

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

## Calibrazione di un simulatore di pioggia per lo studio dei fenomeni di dilavamento atmosferico

Relatore

Prof. Davide POGGI

Co-relatore

Dott. Roberto BOSIO

Candidato

Maria Josefina BADARIOTTI

Ottobre 2022



## Sommario

L'uso della pioggia naturale per le simulazioni in laboratorio costituisce un fattore molto complesso dato che i tempi e le intensità non sono riproducibili in modo affidabile. I simulatori di pioggia sono strumenti di ricerca disegnati per studiare l'acqua in modo di eventi di tempesta. Sono molto utili per l'ottenimento di dati in erosione, infiltrazione, deflusso superficiale e trasporto di sedimenti.

Il problema principale si presenta nella replica delle caratteristiche di un evento specifico di pioggia naturale, per avere risultati rappresentativi è essenziale avere dati di pioggia naturale rappresentativi.

Questo lavoro di tesi ha l'obiettivo di calibrare il simulatore di pioggia presente nel laboratorio di idraulica nel Politecnico di Torino per generare intensità simili a quelle presenti nella città di Torino. Dato che si presenta una variazione nel comportamento del simulatore di fronte all'aumento della temperatura, si procede con l'analisi di questo fenomeno e con la proposta di eventuali soluzioni nel caso sia conveniente. La simulazione ha come scopo quello di studiare l'analisi di abbattimento di particelle dovute alla capacità di trascinamento delle gocce date diverse intensità.

Il simulatore è costituito da un piano di gocciolamento ad aghi posto alla sommità di una torre a *10.70 m* con una superficie di *3.50 m x 4.00 m*. Un serbatoio posto sopra la torre alimenta il sistema di distribuzione e garantisce una prevalenza costante. Si producono intensità di precipitazione comprese tra i *2* e i *100 mm/h* operando con variazioni di carico negli aghi che vanno dai *4* ai *50 cm*.

Tramite una semplice misura volumetrica è stato possibile determinare l'intensità di pioggia corrispondente alla variazione del carico, osservando una analogia con il comportamento teorico, riuscendo anche a coprire intensità che teoricamente non sarebbero state riprodotte. La distribuzione della pioggia della città di Torino è stata ottenuta usando un disdrometro posizionato nel Politecnico. Questi risultati sono stati confrontati con la distribuzione della pioggia generata dal simulatore usando un disdrometro al suo interno.

Il comportamento del simulatore, di fronte ai cambiamenti di temperatura, è stato valutato studiando la variazione delle intensità di un singolo ago in un set up di dimensioni ridotte, riscaldando e raffreddando l'acqua utilizzata nell'esperimentazione.

Usando diversi tipi di aerosol, specificamente, ISO Fine, BioCarb e Fly Ash, si è cercato di studiare l'abbattimento generato dalla simulazione delle precipitazioni. In questo modo sono stati ottenuti alcuni risultati riguardanti i metodi di dispersione, misurati con un impattatore elettrico a bassa pressione (ELPI), e la deposizione a secco.

## Abstract

During experimentation, it is very difficult to use natural rainfall because its timing and intensity are not reproduced reliably. Rainfall simulators are research instruments designed to study water in a similar way to storm events. They are useful for obtaining data on erosion, infiltration, surface runoff and sediment transport.

The main problem it presents in replicating the characteristics of a specific natural storm event, to have representative results it is essential to have a representative natural rainfall. This thesis work, aims to calibrate the rainfall simulator in the laboratory of hydraulics of the Turin Politecnico in order to generate intensities similar to those that occur in Turin. Since there is a variation in the behavior of the simulator increasing temperature, the thesis work proposes a new calibration curve for those increments. The scope of the simulation is to study the abatement of the atmospheric particulate thanks to the processes of wet deposition.

The simulator set-up consists on a drip surface at *10.70 m* with a *3.50 m x 4.00 m* surface. A tank located on the top of it powered the distribution system and guarantee a constant head. The intensities that it can produces are in the range from *2 mm/h* to *100 mm/h*.

The calibration of the simulator was carried on with volumetric methods, these tests allow us to determinate the intensity varying the head. The rainfall distribution of Turin was obtained using a disdrometer located at Politecnico. These results were compared with the rainfall distribution of the simulator using a disdrometer inside it.

The behavior of the simulator in front of the variation of the temperature was valuated studying the variation of the intensity of a single needle in a smaller set up cooling and heating the water used in this experimentation.

Using different types of aerosols, specifically ISO Fine, Pollen, BioCarb and Fly Ash, an attempt was made to study the abatement generated by simulating rainfall drops. In this way, some results regarding the dispersing methods, measures with an electrical low-pressure impactor (ELPI), and dry deposition were obtained.



# Indice

<b>Elenco delle tabelle</b>	IV
<b>Elenco delle figure</b>	V
<b>1 Introduzione</b>	1
1.1 Background . . . . .	1
1.2 Scopo dello studio . . . . .	2
1.3 Domande scientifiche . . . . .	2
1.4 Metodologia . . . . .	3
<b>2 Teoria</b>	5
2.1 Meccanismi di rimozione del particolato dall'atmosfera . . . . .	5
2.2 Deposizione secca . . . . .	7
2.2.1 Velocità di deposizione secca per un gas . . . . .	8
2.2.2 Deposizione secca per il particolato . . . . .	9
2.3 Deposizione umida . . . . .	12
2.3.1 Collection efficiency . . . . .	13
2.3.2 Scavenging coefficient . . . . .	16
2.3.3 Rapporto di dilavamento . . . . .	17
2.3.4 Rapporto di washout . . . . .	17
2.4 Flussi Capillari e Viscosità . . . . .	18
<b>3 Stato dell'Arte</b>	22
3.1 Simulatori di Pioggia . . . . .	22
3.1.1 T. P. Regmi e A. L. Thompson (2000) . . . . .	27
3.1.2 Sima Mohammadi et al. 2022 . . . . .	29
3.2 Collection Efficiency . . . . .	32
3.3 Scavenging Coefficient . . . . .	36
3.3.1 Sensibilità delle parametrizzazioni teoriche di $\Lambda$ di fronte ai diversi parametri imput . . . . .	38

<b>4</b>	<b>Strumentazione</b>	<b>45</b>
4.1	Misure della pioggia . . . . .	45
4.1.1	Disdrometro . . . . .	45
4.1.2	Misure Volumetriche . . . . .	47
4.2	Caratterizzazione degli aerosol . . . . .	48
4.2.1	ELPI . . . . .	48
4.2.2	CPS . . . . .	49
4.2.3	SEM . . . . .	51
4.3	Gli Aerosol . . . . .	53
4.3.1	ISO Fine 12103-1, A2 . . . . .	53
4.3.2	Polline . . . . .	57
4.3.3	Biochar . . . . .	59
4.3.4	Fly Ash . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Set up sperimentale</b>	<b>64</b>
5.1	Rainfall Simulator . . . . .	64
5.2	Test di verifica sensibilità temperatura-portata ago . . . . .	69
5.3	Box preliminare per lo studio della deposizione . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Risultati</b>	<b>75</b>
6.1	Risultati della calibrazione del simulatore . . . . .	75
6.2	Risultati delle prove di gocciolamento . . . . .	79
6.3	Risultati simulazioni degli eventi di pioggia di Torino . . . . .	83
6.4	Risultati delle prove preliminari di deposizione . . . . .	89
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>92</b>
7.1	Sviluppi Futuri . . . . .	93
	<b>Bibliografia</b>	<b>94</b>

# Elenco delle tabelle

4.1	Dati Misurati e Intensità Calcolata dell'Ago [13] . . . . .	54
4.2	Distribuzioni delle dimensioni delle particelle ISO Fine per volume [13]	56
6.1	Dati Misurati e Intensità Calcolata dell'Ago . . . . .	81
6.2	Coefficiente di deposizione asciutta per ogni classe granulometrica .	90

# Elenco delle figure

2.1	Particolato atmosferico [1] . . . . .	6
2.2	Analogia elettrica per la deposizione secca di un gas [2] . . . . .	9
2.3	Velocità di deposizione e di sedimentazione per il particolato [2] . . . . .	10
2.4	Velocità di deposizione del particolato in funzione della granulometria [2] . . . . .	10
2.5	Schema riassuntivo dei principali processi chimico-fisici che si verificano all'interno e al di sotto delle nubi (Seinfeld and Pandis, 1998) . . . . .	13
2.6	Traiettorie delle particelle calcolate con l'estensione Dépée et al. (2019). I pannelli indicano gli effetti del moto browniano (a), impatto inerziale (b), intercettazione (c), diffusioforesi (d), termoforesi e diffusioforesi combinate (e), e termoforesi (f). Le traiettorie rosse determinano una raccolta particella. (d, f). [3] . . . . .	14
2.7	Processi di Scavenging del Black Carbon in-cloud e below-cloud. [4] . . . . .	16
2.8	Sistema di Forze presenti al contatto tra solido, fluido e gas [5] . . . . .	18
2.9	Incurvamento della superficie dato dalla risultante delle forze [5] . . . . .	19
2.10	Fenomeno di Capillarità [5] . . . . .	19
2.11	Tube capillare [5] . . . . .	20
3.1	(a) Vista del simulatore di precipitazioni presso un'università di Valin- cia. (b) Tucson/Università dell'Arizona. (c) Università dell'Arkansas. (d) Università tecnica di Istanbul [6] . . . . .	25
3.2	Rainfall simulator machine in (a) South Korea/ Geologic Institute (patent number: KR101113267B1) and (b) China (patent number: CN204008636U) [6] . . . . .	26
3.3	Schema di progetto del sistema di simulazione delle precipitazioni su scala di laboratorio [7] . . . . .	27
3.4	Rappresentazione grafica dello schema del formatore di gocce tele- scopico [7] . . . . .	28
3.5	Simulatore di pioggia usato per la sperimentazione [8] . . . . .	30
3.6	Lastre zincate con cui è stato costruito il diagramma di erosione [8] . . . . .	31

3.7	Localizzazione delle collection efficiency in letteratura (croci), e delle nuove collection efficiency misurate in BERGAME (cerchi). [9] . . .	33
3.8	Collection Efficiency misurate con la loro dispersione data la dipendenza del diametro di particella. Ogni colore corrisponde a un diametro. [9] . . . . .	34
3.9	Confronto delle efficienze di raccolta misurate per gocce di 2 mm diametro con i vecchi valori della tabella di ricerca DESCAM. Le croci si riferiscono alla misura di Lai et al. (1978). [9] . . . . .	35
3.10	Confronto tra le efficienze della vecchia e della nuova collezione per gocce con un diametro di 2 mm nella tabella di ricerca (stella: dati precedenti, cerchio: nuovi dati). [9] . . . . .	35
3.11	Contributi di vari processi di raccolta per la collection efficiency CE ( $d_p$ , $D_p$ ) in funzione delle dimensione delle particelle di aerosol per una goccia di pioggia con diametro di 1 mm [9] . . . . .	38
3.12	Coefficienti di scavenging determinati con sei diverse parametrizzazioni della collection efficiency in funzione della dimensione delle particelle per intensità di pioggia di 0.1 mm/h (linea tratteggiata) e 10 mm/h (linea continua) [9] . . . . .	39
3.13	Otto diverse distribuzioni dimensionali del numero delle gocce di pioggia per intensità delle precipitazioni di (a) $R = 0.1$ mm/h e (b) $R = 10$ mm/h: MP – Marshall e Palmer (1948); JD – Joss et al. (1968) condizioni di pioviggine; JT – Joss et al. (1968) condizioni temporalesche; ZH – Zhang et al. (2008); DE – de Wolf (2001); W84 – Willis (1984); FL – Feingold e Levin (1986); e CE – Cerro et al. (1997). [9] . . . . .	40
3.14	Coefficienti di scavenging in funzione della dimensione delle particelle derivati da 10 diverse distribuzioni dimensionali del numero di gocce di pioggia per l'intensità delle precipitazioni di (a) $R = 0.1$ mm/h e (b) $R = 10$ mm/h: MP – Marshall e Palmer (1948); JD – Joss et al. (1968) condizioni di pioviggine; JT – Joss et al. (1968) condizioni temporalesche; ZH-Zhang et al. (2008); DE – de Wolf (2001); W84 – Willis (1984); FL – Feingold e Levin (1986); CE – Cerro et al. (1997); AURAMS-Monodisperso – Gong et al. (2006); e LC-Monodisperse - Loosmore e Cederwall (2004). [9] . . . . .	41
3.15	Velocità terminale della goccia di pioggia rispetto al diametro della goccia di pioggia per sette diverse parametrizzazioni e misurazioni da Gunn e Kinzer (1949). [9] . . . . .	42
3.16	Coefficienti di scavenging risolti in funzione della dimensione delle particelle per sette diverse parametrizzazioni della velocità terminale supponendo un'intensità della pioggia di 1.0 mm/h [9] . . . . .	43

4.1	Principio funzionale del Parsivel2 della OTT [10]	46
4.2	Disdrometro utilizzato nel simulatore di pioggia	46
4.3	Vasche per determinare l'intensità distribuite nell'area di interesse del simulatore di pioggia	47
4.4	Principio di funzionamento dell'impattatore [11]	48
4.5	Schema di funzionamento del SEM [12]	52
4.6	Distribuzione dei parametri di forme delle ISO Fine [14]	55
4.7	Immagine ISO Fine utilizzate nelle sperimentazioni realizzate nel SEM	56
4.8	Immagine ISO Fine utilizzate nelle sperimentazioni realizzate nel SEM	57
4.9	Immagine al SEM della mostra di polline [15]	58
4.10	Immagine al microscopio elettronico della mostra di polline utilizzata per l'analisi della deposizione di particolato	58
4.11	Analisi al SEM di particelle di polline di Pinus Massoniana [16]	59
4.12	Analisi al microscopio elettronico di particelle di Biochar del Politecnico di Torino	60
4.13	Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties [17]	61
4.14	Distribuzione granulometrica per le ceneri fly ash [18]	62
4.15	Immagine realizzata al microscopio elettronico del laboratorio del Politecnico di Torino [18]	63
5.1	Sezione del serbatoio di carico del simulatore di pioggia	65
5.2	Aghi del simulatore	66
5.3	Foto del dettaglio degli aghi del simulatore	66
5.4	Schema di funzionamento del simulatore	67
5.5	Foto del simulatore di pioggia nel laboratorio del Politecnico di Torino	68
5.6	Foto del sistema in funzionamento	69
5.7	Setup sperimentale costruito in laboratorio per la valutazione della portata dell'ago	70
5.8	Sistema preliminare per il box di dispersione	71
5.9	Foto del sistema preliminare per il box di dispersione	72
5.10	Sistema completo per la simulazione del fenomeno di deposizione	73
5.11	Foto del sistema costruito per i primi studi	74
6.1	Andamento teorico dell'intensità per ogni collettore in funzione del carico dell'ago, riferito al fondo del serbatoio di carico	75
6.2	Andamento teorico dell'intensità in funzione del carico dell'ago, riferito al fondo serbatoio di carico	76
6.3	Andamento teorico dell'intensità di ogni collettore in funzione del carico dell'ago, riferito al fondo serbatoio e ogni prova realizzata	77

6.4	Curve di calibrazione ogni collettore del simulatore di pioggia in funzione del carico dell'ago, riferito al fondo serbatoio . . . . .	78
6.5	Uniformità della distribuzione per i valori di intensità testati . . . . .	78
6.6	Andamento per le prime prove (giorni invernali) . . . . .	79
6.7	Andamento per le ultime prove (giorni estivi) . . . . .	80
6.8	Andamento dell'intensità del singolo ago per diverse temperature . . . . .	82
6.9	Variazione del comportamento dell'ago e le prove realizzate . . . . .	82
6.10	Variabilità della pendenza della retta che segue l'ago di fronte ai cambiamenti di temperatura . . . . .	83
6.11	Mean probability function per la pioggia di Torino . . . . .	84
6.12	Mean cumulative function per la pioggia di Torino . . . . .	84
6.13	Mean probability function per la pioggia monodispersa generata dal simulatore . . . . .	85
6.14	Mean cumulative function per la pioggia monodispersa generata dal simulatore . . . . .	86
6.15	Mean probability function per la pioggia polidispersa generata dal simulatore . . . . .	86
6.16	Mean cumulative function per la pioggia polidispersa generata dal simulatore . . . . .	87
6.17	Mean probability functions per le diverse intensità . . . . .	88
6.18	Mean cumulative functions per le diverse intensità . . . . .	89
6.19	Deposizione ottenuta sulle 14 classi granulometriche distinte dal ELPI+ mediando 6 prove . . . . .	90



# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Background

L'evoluzione del simulatore di pioggia iniziò alla fine del 1800, quando lo scienziato tedesco Ewald Wollny studiò formalmente l'erosione. All'inizio del 1900, furono progettati strumenti sul campo per catturare il deflusso delle precipitazioni naturali. Negli anni '30, i pionieri degli studi sull'erosione rafforzarono il controllo dei loro esperimenti costruendo i primi simulatori di precipitazioni, con normali lattine o tubi bucati. Questi fori furono sostituiti negli anni '60 con ugelli a cono pieno, accuratamente selezionati per approssimare:

- La dimensione di una goccia d'acqua piovana.
- La velocità di una goccia che colpisce il suolo.
- L'uniformità della distribuzione delle gocce al suolo, per assicurare una simulazione accurata delle precipitazioni.

I simulatori degli anni '60 potevano simulare solo una singola intensità di pioggia. Negli anni '80, l'introduzione delle elettrovalvole ha permesso di modulare il flusso d'acqua, al fine di variare dinamicamente l'intensità della pioggia simulata, proprio come l'intensità della pioggia varia naturalmente durante le tempeste.

Le osservazioni della distribuzione delle dimensioni delle gocce nelle precipitazioni naturali, hanno mostrato che la gamma delle dimensioni delle gocce aumenta con l'aumentare dell'intensità delle precipitazioni. Se si utilizza una rete di ugelli per generare precipitazioni artificiali, un aumento della pressione di esercizio aumenta l'intensità media, ma diminuisce la gamma delle dimensioni delle gocce all'interno dello spruzzo.

Metodi alternativi di simulazione delle precipitazioni, dipendenti dai singoli elementi che formano le gocce (es. aghi ipodermici), sono in grado di produrre solo spruzzi con dimensioni di gocce uniformi.

In questa tesi si è calibrato il simulatore di pioggia del laboratorio di idraulica del Politecnico di Torino in scala reale, in modo da riprodurre fedelmente le precipitazioni naturali in termini di: dimensione delle gocce, distribuzione della precipitazione e intensità.

## 1.2 Scopo dello studio

In letteratura sono presenti pubblicazioni di simulatori con lo scopo di analizzare i diversi comportamenti del suolo date le interazioni con le piogge, analizzando quindi, le erosioni che essi generano. Questo porta a coprire solo la parte di interesse delle caratteristiche delle precipitazioni, senza riprodurre fedelmente il fenomeno completo. I simulatori, perciò, vanno conformati a seconda lo scopo dello studio.

L'obbiettivo principale è stato quello di calibrare il simulatore in modo da rappresentare il più fedelmente possibile le precipitazioni presenti a Torino e studiare il fenomeno di dilavamento dell'atmosfera.

Le dimensioni del set up permettono alla goccia di raggiungere la velocità terminale e arrivare al suolo con i diametri e l'energia che una intensità di quelle caratteristiche genera in natura.

Il sistema è costituito da un piano di gocciolamento ad aghi posto alla sommità di una torre di dimensioni  $3.50\text{ m} \times 4.00\text{ m} \times 10.70\text{ m}$ . Il simulatore produce intensità di precipitazione comprese tra i  $2$  e i  $100\text{ mm/h}$  operando con variazioni di carico negli aghi che vanno dai  $4$  ai  $40\text{ cm}$ .

Data la variazione del comportamento del simulatore con l'incremento della temperatura, si propone anche l'analisi delle diverse intensità generate per valori significativi di cambiamenti di temperatura dell'acqua.

In merito allo studio dei fenomeni di dilavamento atmosferico, in questa tesi si presenta l'analisi in dettaglio di alcune tipologie di aerosol che verranno utilizzate negli esperimenti di abbattimento, nonché dei test preliminari di dry deposition per le polveri ISO Fine Test Dust.

## 1.3 Domande scientifiche

Il simulatore in analisi genera gocce per la simulazione dei processi di pioggia mediante aghi ipodermici; si è cercato di individuare il legame tra i carichi imposti e l'intensità di precipitazione generata. Inoltre, si è cercato di collegare le variazioni di temperatura dell'acqua con il comportamento del simulatore e le variazioni di intensità che esse creavano.

Infine, si è cercato di analizzare il fenomeno di dilavamento atmosferico e cercare l'aerosol che presentasse le caratteristiche adatte per la simulazione del particolato

atmosferico e quelle adatte per l'uso in laboratorio per quanto riguardano i costi e i comportamenti.

## 1.4 Metodologia

Per analizzare fenomeni come le erosioni in diversi tipi di terreni, l'infiltrazione che in essi si generano, il deflusso superficiale dovuto a eventi intensi, il trasporto di sedimenti o la deposizione di inquinanti dispersi in forma di aerosol, il simulatore dev'essere capace di riprodurre fedelmente le precipitazioni reali per trovare risultati attendibili.

I diversi tipi di simulatori esistenti si possono raggruppare in due categorie: ad ago e ad ugello. Il simulatore che si trova nel laboratorio di idraulica del Politecnico corrisponde a un simulatore del tipo ad ago. Questi tipi di simulatori generano una dimensione di goccia che varia con l'intensità come accade naturalmente. Contrariamente, quelli ad ugello lavorando sotto l'azione di carichi elevati, all'aumentare del carico per generare un aumento nell'intensità, generano una riduzione del diametro della goccia, in controtendenza con un evento naturale. Il simulatore di pioggia in studio, quindi, è stato costruito con  $10.7 m$  di elevazione per conferire alla goccia la distanza sufficiente affinché essa raggiunga la velocità terminale.

Questo lavoro di tesi si articola in sei capitoli, il primo capitolo è introduttivo e si forniscono alcuni dati riguardanti il simulatore in generale, lo scopo dello studio, le domande poste e una descrizione della procedura messa in pratica per raggiungere gli obiettivi.

Nel secondo capitolo è stata sviluppata la teoria che governa i fenomeni naturali che condizionano i processi studiati. In particolare, vengono descritti i meccanismi di rimozione del particolato dall'atmosfera, viene descritta la deposizione umida sulla quale si ha un maggior interesse, la *collection efficiency* e la *scavenging efficiency*. In fine è stata descritto il comportamento dei flussi capillari e l'influenza della viscosità. Questo principio è alla base del funzionamento del simulatore e influisce nel comportamento di esso di fronte alle variazioni di temperatura.

Il terzo capitolo tratta lo stato dell'arte relativo agli argomenti di studio di questa tesi. Vengono dunque riassunti i simulatori di pioggia attualmente realizzati e che hanno influenzato le scelte fatte nella realizzazione del simulatore presente in laboratorio. Inoltre, si riportano studi correlati alla *collection efficiency* e allo *scavenging efficiency*.

Si prosegue nel quarto capitolo, con la presentazione della strumentazione utilizzata. Si riporta quindi una descrizione dei principi fisici che governano e permettono il funzionamento di questi dispositivi. Per quanto riguardano le misure della pioggia, si analizzano il disdrometro impiegato e le misure volumetriche realizzate. Per ciò che concerne invece l'abbattimento, si pone attenzione alla

caratterizzazione degli aerosol con l'ELPI, la CPS e il SEM. L'ultima parte è infine dedicata alla descrizione degli aerosol analizzati quali: ISO Fine Test Dust, Polline di conifera, BIO Char e Fly Ash.

Al termine della descrizione teorica, delle sperimentazioni e delle strumentazioni, vengono descritte, nel quinto capitolo, i due setup sperimentali montati al fine di raggiungere gli obiettivi prefissati. Nella prima parte viene descritto il funzionamento del simulatore e nella seconda parte il test di verifica della sensibilità dell'ago, che si trova nel simulatore di fronte alle variazioni di temperatura.

Infine, gli ultimi due capitoli sono dedicati al rapporto dei risultati ed alle conclusioni. I risultati corrispondono a quelli ottenuti per quanto riguardano la calibrazione del sistema completo, quelli ottenuti dall'analisi della variazione di temperatura e quelli che riguardano l'abbattimento degli aerosol. Insieme alle conclusioni vengono riportati suggerimenti per le implementazioni future.

# Capitolo 2

## Teoria

### 2.1 Meccanismi di rimozione del particolato dall'atmosfera

Il particolato atmosferico (in inglese *particulate matter*, PM) è formato da una miscela complessa di particelle solide e liquide di sostanze organiche ed inorganiche sospese in aria. Ad oggi rappresenta il maggior inquinante nelle aree urbane. I componenti del particolato sono: solfati, nitrati, ione di ammonio, cloruro di sodio, particelle carboniose, polvere minerale ed acqua. [1]

Il particolato atmosferico è classificato in funzione del suo diametro aerodinamico, ossia il diametro equivalente di una particella sferica con densità di  $1 \text{ g/cm}^3$  che sotto l'azione della forza di gravità nelle medesime condizioni di temperatura, pressione e umidità relativa, raggiunge la stessa velocità terminale della particella considerata.

In questo modo quando si parla di PM10 si intende l'insieme delle particelle che hanno un diametro aerodinamico inferiore a 10 micrometri. Le particelle ultrafini segnalate come UFP (*ultra fine particulate*) comprendono quelle di diametro aerodinamico inferiore a  $0.1 \mu\text{m}$ .

Ogni anno, diversi miliardi di tonnellate di particolato sono emessi in atmosfera, provenienti principalmente dagli oceani, suoli, conversione da gas a particelle, nubi in evaporazione e dalle attività umane (Jaenicke, 1993). Durante l'ultimo decennio, il ciclo di vita di queste particelle è stato argomento chiave nello studio dell'atmosfera per molte ragioni, primo fra tutti, lo studio del ruolo chiave che svolgono sul clima. Gli aerosol agiscono sulla formazione delle nubi, la loro composizione chimica, la distribuzione dimensionale e concentrazione numerica, influiscono sulla dimensione delle gocce distribuzioni e precipitazioni (Tao et al., 2012). Essi influiscono anche sulla copertura nuvolosa, influenzando il bilancio energetico della Terra (Twomey

et al., 1974). Inoltre, sono stati riferiti di avere un impatto sulla salute umana (Dockery et al., 1992).

In atmosfera si possono distinguere due tipi di particolato, quello primario, che arriva direttamente dalle sorgenti e quello secondario che deriva da reazioni chimiche e fisiche generate tra diversi composti presenti.

Tra le trasformazioni che vanno a conformare queste particelle si trovano:

- La nucleazione, processo di formazione di piccoli aggregati stabili che si producono per l'unione di molecole o ioni, in cui può avvenire una transizione di fase.
- Processi di condensazione e dissoluzione, avviene nel caso in cui una molecola gassosa viene catturata dalla superficie della particella accrescendo il suo volume, quando la superficie della particella è rivestita da una pellicola acquosa e il gas si discioglie in acqua, si parla di dissoluzione, altrimenti, nel caso rimane secca, si parla di condensazione.
- La coagulazione che implica processi di collisione e adesione a causa di moto Browniano, turbolenza, ecc.

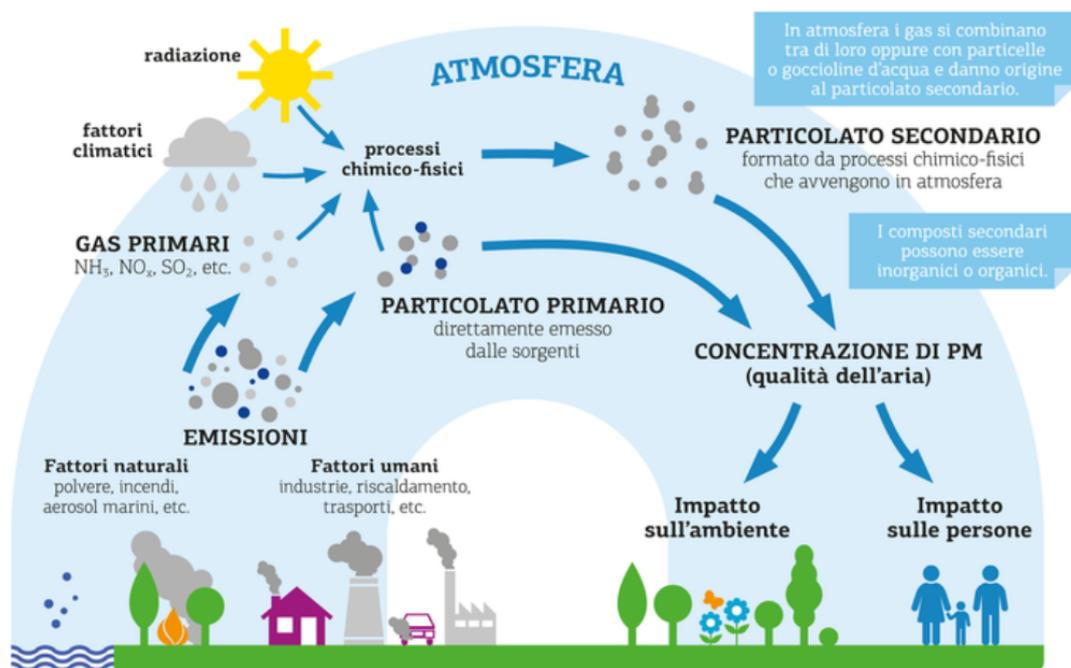


Figura 2.1: Particolato atmosferico [1]

Il particolato presenta un'ampia variazione di particelle, tra le quali, polveri sospese, materiale organico, inorganico, erosione del suolo e manufatti. Inoltre, ci

sono le fonti relative ad attività industriali, processi di combustione ed il traffico autoveicolare, come si può vedere nella Figura 2.1.

Le concentrazioni di particolato nell'atmosfera vengono limitate naturalmente per effetto della gravità, e quindi deposizione secca, oppure per l'azione delle nubi o delle piogge, e quindi deposizione umida.

Oltre agli effetti naturali anche le stesse particelle influenzano le concentrazioni in aria, quelle di diametro notevole precipiteranno piuttosto velocemente mentre quelle più piccole possono rimanere in sospensione molto di più, la loro reciproca attrazione genera la collisione in modo che, raggiungendo dimensioni notevoli, acquistano una velocità di caduta sufficiente a farle depositare.

## 2.2 Deposizione secca

In termini assoluti, il flusso di inquinante al suolo dato dalla deposizione secca non è molto elevato, in contrapposizione a ciò, la sua costante presenza rende questo fenomeno importante per la autodepurazione dell'atmosfera.

Si possono elencare i principali fattori che governano la deposizione secca:

- Il livello di turbolenza posseduto dal PBL (strato limite planetario che risente direttamente dell'influenza della superficie). Se la turbolenza aumenta, aumenta la probabilità di un suo trasferimento al suolo tramite questo meccanismo.
- Le proprietà chimico-fisiche dell'inquinante, in particolare si distinguono gli inquinanti gassosi, dove esiste una rilevanza di solubilità e reattività chimica maggiore che per il particolato solido per cui esiste maggior importanza della densità e la forma.
- La natura della superficie e quindi la differenza di comportamento tra le superficie non reattive, particolarmente quelle lisce e quelle con copertura vegetale più favorevoli per la deposizione.

Le particelle che costituiscono il particolato vengono caratterizzate dal diametro aerodinamico, questo permette di rendere confrontabile due particelle di diametri equivalenti ma con densità diverse.

Si può suddividere il processo di deposizione secca in tre stadi che dipendono dai fattori che governano il fenomeno, dall'alto verso il basso:

- Il primo stadio consiste nel trasporto dell'inquinante a causa della turbolenza atmosferica, avviene nello strato limite planetario ed è chiamato stadio aerodinamico. Completamente indipendente dall'inquinante, dipende solo dalla turbolenza.

- Il secondo stadio consiste, per i gas, nella diffusione molecolare e per il particolato, nei movimenti del tipo Browniano. Avviene entro un sottile strato d'aria chiamato quasi-laminar sublayer.
- Il terzo stadio, che include solo gli inquinanti gassosi, consiste nel trasferimento dell'inquinante al suolo. Dipende quindi dalle caratteristiche dell'inquinante e quelle del suolo.

Per quantificare il processo di deposizione secca si realizza un'analogia elettrica. Il flusso stesso viene equiparato a una corrente elettrica, le concentrazioni in ogni stadio a dei livelli di tensioni, e finalmente le dipendenze tra flusso di inquinante e concentrazione dovuta ad ogni fenomeno presente in ogni stadio, viene equiparato a delle resistenze.

### 2.2.1 Velocità di deposizione secca per un gas

Per descrivere matematicamente il flusso di deposizione di un gas, realizzando l'analogia elettrica il processo di deposizione viene assimilato a tre resistenze collegate in serie.

La prima viene chiamata resistenza aerodinamica  $r_a$  e corrisponde a quella generata dalla dipendenza tra flusso di inquinante e la sua concentrazione dovuta alla turbolenza atmosferica. La seconda viene chiamata resistenza laminare  $r_b$  che rappresenta l'azione della quasi-laminar sublayer e infine la resistenza superficiale  $r_s$  che rappresenta l'interazione con la superficie.

Dalla Figura 2.2,  $C_3$  rappresenta la concentrazione generica ad una quota  $z_R$  a partire dalla surface layer,  $C_2$  la concentrazione tra la quasi-laminar sublayer e la surface layer,  $C_1$  la concentrazione di base e  $C_0$  quella dell'inquinante alla superficie e quindi  $C_0=0$ . Si considera la deposizione secca un fenomeno stazionario e considerando  $F_d$  come il flusso dell'inquinante, abbiamo:

$$|F_d| = \frac{C_3 C_2}{r_a} = \frac{C_2 - C_1}{r_b} = \frac{C_1 - C_0}{r_s} = \frac{C_1}{r_s}$$

Da cui:

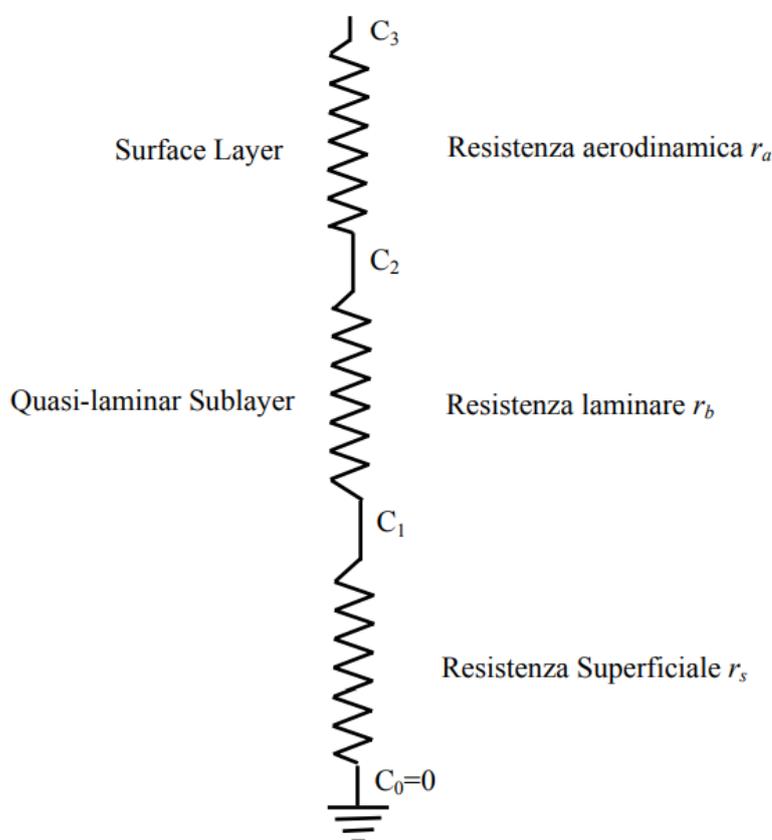
$$C_3 = -(r_a + r_b + r_s) \cdot F_d$$

Il segno negativo rappresenta il flusso rivolto verso il basso, se consideriamo:

$$v_d = (r_a + r_b + r_s)^{-1}$$

Il flusso può essere scritto come:

$$F_d = -v_d \cdot C_3 \quad (g/m^2 s) \quad (2.1)$$



**Figura 2.2:** Analogia elettrica per la deposizione secca di un gas [2]

Dove  $v_d$  avendo dimensioni di velocità in  $(m/s)$  viene denominata velocità di deposizione, mentre  $C_3$  corrisponde alla concentrazione di inquinante misurata ad un'altezza di riferimento in  $g/m^3$ .

Sperimentalmente ci sono tentativi nella determinazione di  $v_d$  per i principali inquinanti, i risultati evidenziano per uno stesso inquinante dei valori che coprono 3 decenni. Questo fenomeno è dovuto alla forte influenza dei fattori biologici e chimici.

### 2.2.2 Deposizione secca per il particolato

La dipendenza della velocità cambia in correlazione con la dimensione del diametro della particella e la sua densità. La differenza con i gas è presente nella quasi laminar sublayer dove si trova una forte influenza dei moti Browniani e tutti gli stadi sono influenzati dalla gravità. Si definisce come  $v_s$  velocità di sedimentazione quel valore assunto dalla particella in assenza di ogni tipo di deposizione e per l'effetto della sola gravità.

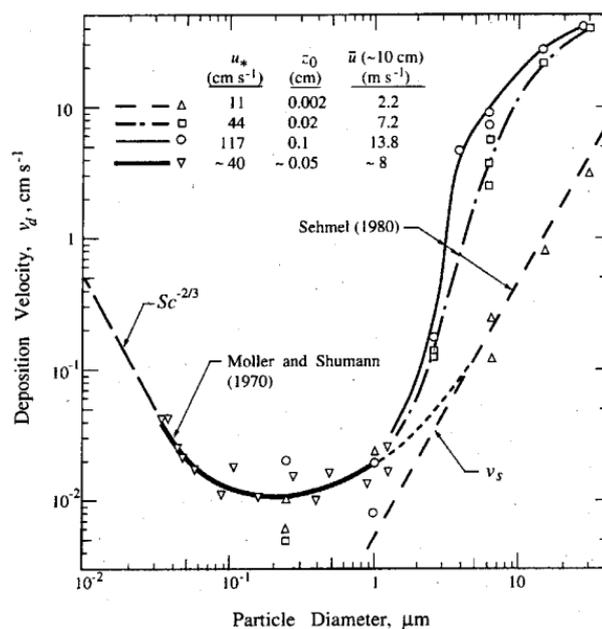


Figura 2.3: Velocità di deposizione e di sedimentazione per il particolato [2]

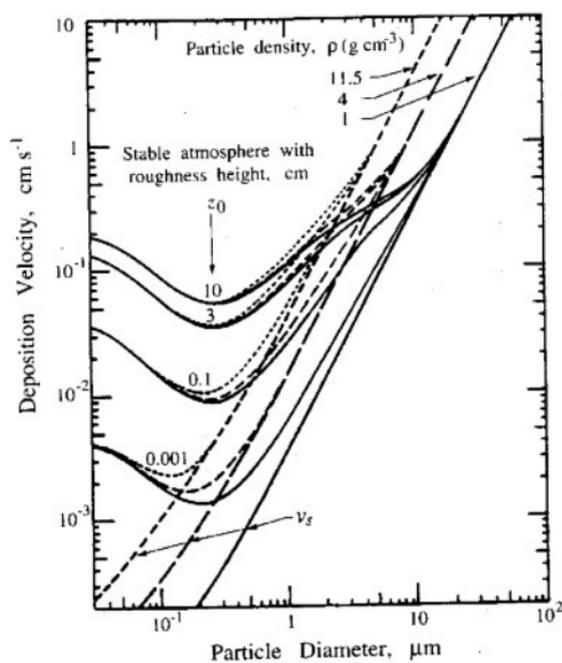


Figura 2.4: Velocità di deposizione del particolato in funzione della granulometria [2]

Da quanto osservato nei dati sperimentali della Figura 2.3 e della Figura 2.4, per quanto riguardano quelle particelle comprese tra  $0.1$  e  $1.0 \mu m$  l'andamento si avvicina a quello di un gas. Queste ultime vengono trasportate entro la quasi laminar sublayer a causa della diffusione Browniana e decresce l'efficienza della diffusione con l'aumentare del diametro della particella. Invece, le particelle di diametro superiore a  $2.0 \mu m$  sono maggiormente influenzate dalla gravità. Le particelle che si trovano nel range tra  $0.05$  e  $2.00 \mu m$  non sono molto soggette a deposizione secca, tendono a essere rimosse principalmente da quella umida. Dai risultati sperimentali si nota che lo stadio legato all'interazione con la superficie terrestre risulta assente.

### Velocità di deposizione secca per il particolato

La velocità di deposizione secca nel caso di particolato deriva anch'essa da una analogia elettrica. In quest'ultima si ipotizza che la particella, una volta raggiunto il contatto con la superficie rimane in quello stato, perciò  $r_s = 0$  e  $C_1 = C_0 = 0$ . Inoltre, la particella presenta una velocità di sedimentazione che agisce in parallelo a  $r_a$  e a  $r_b$ .

Si ha quindi che (Seinfeld e Pandis, 1998, Slinn e Slinn 1980; Pleim e al. 1984):

$$-F_d = \frac{C_3 - C_2}{r_a} + v_s \cdot C_3 = \frac{C_2}{r_b} + v_s \cdot C_2$$

Riscritta come:

$$F_d = -v_d \cdot C_3 \quad (2.2)$$

Dove

$$v_d = (r_a + r_b + r_s)^{-1} + v_s$$

### Velocità di sedimentazione gravitazionale

Per determinare  $v_s$  si parte da un equilibrio di forze entro un fluido in quiete:

$$m_p \cdot \frac{dv_z}{dt} = m_p \cdot g + F_{drag} \quad (2.3)$$

Dove:

$m_p$  : massa delle particelle

$F_{drag}$  : forza viscosa del fluido

Per Seinfeld e Pandis (1998) si ha che:

$$F_{drag} = \frac{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot D_p}{C_c} \cdot v_z$$

Dove:

$\mu$  : viscosità del fluido

$D_p$  : diametro della particella

$C_c$  : fattore dovuto allo scorrimento del fluido sulla superficie esterna della particella

Da questa equazione è possibile ricavare la legge di Stokes valida per particelle di diametro inferiore a  $50 \mu m$ :

$$v_s = \frac{D_p^2 \cdot \rho_p \cdot g \cdot C_c}{18 \cdot \mu} \quad (2.4)$$

### Calcolo della deposizione secca

Esistono diversi modelli che permettono la determinazione quantitativa della velocità di deposizione parametrizzando le diverse resistenze presenti nelle relazioni indicate precedentemente. In generale,  $r_a$  e  $r_b$  sono influenzate dall'azione del vento, dalla copertura vegetale del suolo e dalla stabilità atmosferica e tendenzialmente la loro somma è inversamente proporzionale all'intensità del vento e all'altezza della vegetazione. In condizioni di atmosfera stabile, la deposizione secca è dominata dalla resistenza aerodinamica.

Nonostante la complessità del processo, il fenomeno globalmente viene descritto da una proporzionalità diretta di flusso con concentrazione tramite un coefficiente di proporzionalità  $v_d$  che può essere determinato tenendo conto della natura dell'inquinante, tipo di superficie e livello di turbolenza del PBL.

## 2.3 Deposizione umida

La deposizione umida fa riferimento ai processi di diminuzione della concentrazione del particolato dovuti all'interazione dell'acqua con il particolato stesso.

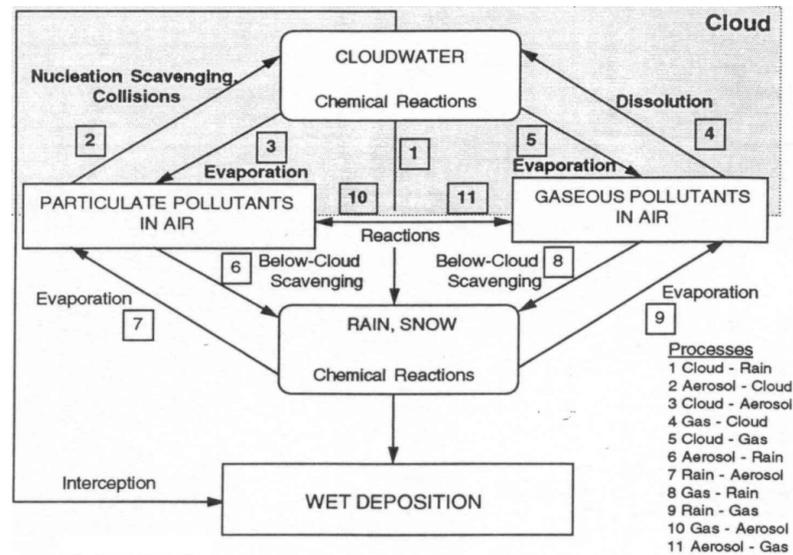
La presenza delle precipitazioni esalta la deposizione, il flusso di inquinante è di circa due ordini di grandezza superiore ed è la causa principale delle piogge acide.

La deposizione umida comprende due fenomeni principali, il *rainout* quindi il dilavamento che avviene all'interno delle nubi e il *washout* che invece rappresenta il dilavamento al di sotto delle nubi.

Questo fenomeno di deposizione si differenzia da quello precedente dato che non deriva dall'interazione suolo-atmosfera ma, ha luogo direttamente nell'atmosfera stessa.

Anche se i fenomeni di *rainout* e *washout* hanno una differenza fisico-chimica notevole, possono essere trattati in maniera simile in termini di modellistica.

Come si può osservare dalla Figura 2.5 il processo di deposizione umida è particolarmente più complesso in comparazione con la deposizione secca, data la



**Figura 2.5:** Schema riassuntivo dei principali processi chimico-fisici che si verificano all'interno e al di sotto delle nubi (Seinfeld and Pandis, 1998)

presenza della fase acquosa e delle trasformazioni fisiche e chimiche che si verificano all'interno e all'esterno delle nubi.

### 2.3.1 Collection efficiency

La deposizione umida, lontani dalla fonte generatrice del particolato, è il principale meccanismo di dilavamento del particolato (Jaenicke, 1993). Flossmann (1998) ha mostrato numericamente che la deposizione umida è principalmente indotta dalle nuvole poiché il 70% della massa del particolato contenuta nelle gocce di pioggia che raggiungono il suolo proviene dalle nuvole.

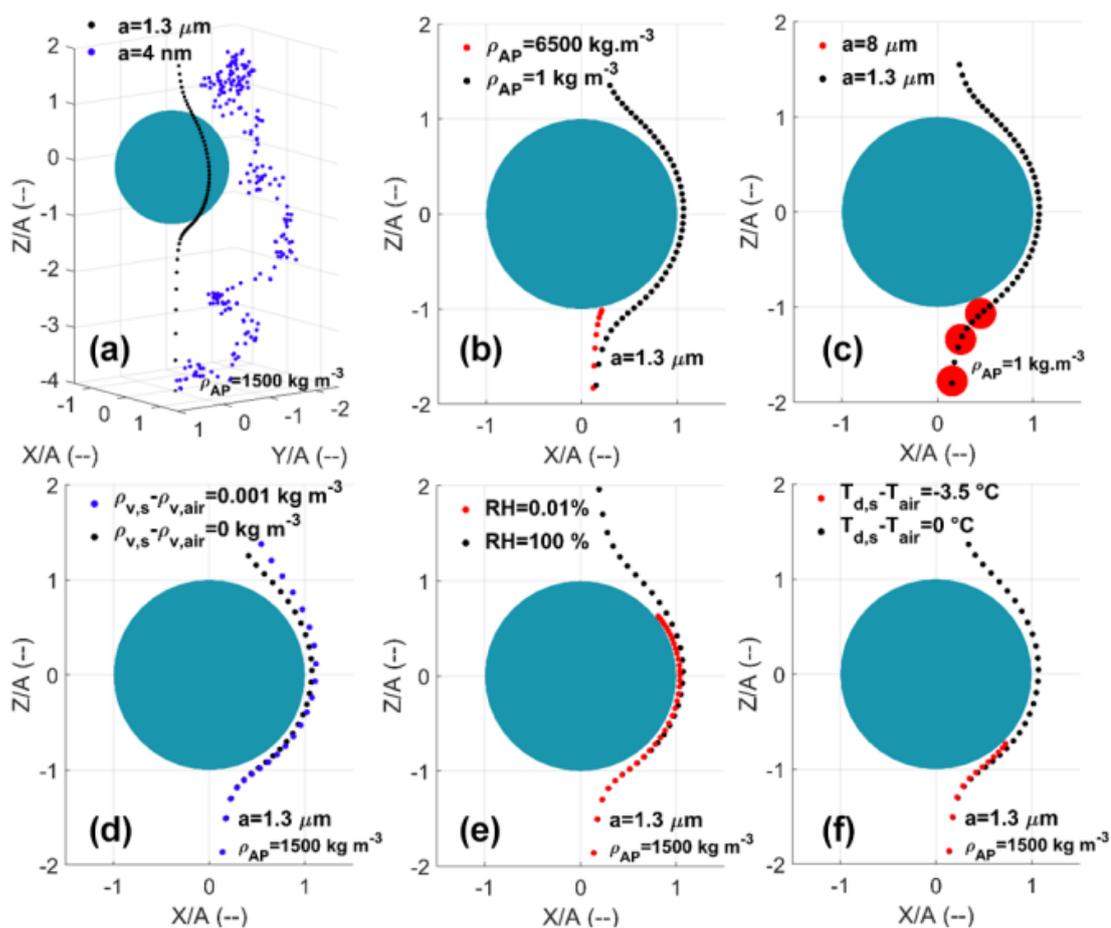
Nella maggior parte degli attuali modelli di deposizione umida come DESCAM (*Detailed Scavenging Model*, Flossmann, 1985) la raccolta del particolato è descritta attraverso un parametro microfisico chiamato *collection efficiency* (CE), che quantifica la capacità di una goccia per catturare il particolato presente nei suoi dintorni durante la sua caduta.

La CE corrisponde al rapporto tra il numero di particelle (o massa) raccolto dalla goccia, e il volume spazzato dalla goccia per un dato raggio di particella. Un'altra definizione equivalente è il rapporto tra l'area della sezione trasversale all'interno della quale le traiettorie delle particelle vengono raccolte dalla goccia e l'area della sezione trasversale della goccia.

Molti effetti microfisici influenzano questa CE, e il loro contributo dipende principalmente dalla dimensione del particolato. Una particella, per essere raccolta,

deve deviare dalla linea aerodinamica intorno alla goccia che cade per entrare in contatto con essa.

La traiettoria delle particelle nanometriche è influenzata dalle collisioni con le molecole d'aria che fanno riferimento alla diffusione browniana. Risulta da casuali schemi di movimento che tendono ad aumentare la CE quando il raggio della particella diminuisce (Figura 2.6a).



**Figura 2.6:** Traiettorie delle particelle calcolate con l'estensione Dépée et al. (2019). I pannelli indicano gli effetti del moto browniano (a), impatto inerziale (b), intercettazione (c), diffusiophoresi (d), termophoresi e diffusiophoresi combinate (e), e termophoresi (f). Le traiettorie rosse determinano una raccolta particella. (d, f). [3]

Per particelle grandi invece, c'è un aumento della CE come risultato di una forte inerzia che devia la particella in modo significativo dalla linea aerodinamica quando curva e la sposta direttamente verso la superficie della goccia, effetto noto come impatto inerziale (vedi Figura 2.6b).

Quando invece si considerano particelle di dimensioni intermedie, la CE passa attraverso un valore minimo chiamato *Greenfield gap* (Greenfield, 1957) dove la diffusione della particella e l'effetto inerziale, sono più deboli. In questa zona, altri effetti microfisici possono essere coinvolti per far incontrare la goccia con la particella, come per esempio l'intercettazione.

L'intercettazione è la raccolta di particelle che seguono una linea di flusso che avvicina la goccia all'interno di una distanza equivalente ai raggi delle particelle  $a$ : vedi Figura 2.6c. Nota che le forze elettrostatiche possono avere un'influenza significativa sulla CE (Tinsley e Zhou, 2015; Dépée et al., 2019).

Ci sono anche effetti termoforetici e diffusioforetici che possono influenzare la CE. Nelle nuvole, si può favorire l'aumento della CE quando si verifica l'evaporazione e può diminuire la CE durante la condensazione (a causa di un equilibrio termico tra la goccia e l'aria).

Si dà luogo alla termoforesi quando prevale un gradiente termico tra l'aria e la goccia. Quando l'umidità relativa (UR) è inferiore al 100%, la temperatura superficiale della goccia in evaporazione ( $T_{d,s}$ ) è più fredda della temperatura dell'aria di massa ( $T_{air}$ ). L'energia cinetica media dell'aria delle molecole sta quindi diminuendo quando si avvicinano alla superficie della goccia. Una particella è quindi attratta da una forza termoforetica vicino alla goccia in evaporazione vedi Figura 2.6f causata dall'asimmetria dell'energia cinetica trasferita durante ogni collisione.

La diffusioforesi si verifica in un ambiente in cui c'è un gradiente di densità di vapore nell'aria così come anche nell'ambiente circostante di una goccia in evaporazione. In questo caso, le molecole d'acqua si diffondono verso l'aria circostante mentre le molecole d'aria si diffondono verso la superficie delle gocce. Nelle nuvole, dato che la massa molare dell'acqua è inferiore alla massa molare dell'aria, c'è un'asimmetria nella quantità di moto trasferita alle particelle vicino alla goccia in evaporazione prodotta dalle collisioni con le molecole dalla fase continua. Questa diffusione tende ad attrarre la particella alla goccia.

Tuttavia, al fine di mantenere una pressione dell'aria costante sulla superficie delle gocce, viene indotto un flusso idrodinamico verso l'aria chiamato *Stefan Flow*. La resistenza idrodinamica indotta dallo Stefan Flow tende a respingere le particelle dalle gocce in evaporazione. La diffusioforesi è la somma della forza di trascinamento prodotta dallo Stefan Flow e la quantità di moto trasferita alle particelle (situati in uno strato limite di diffusione), a causa della dissimmetria molecolare il peso.

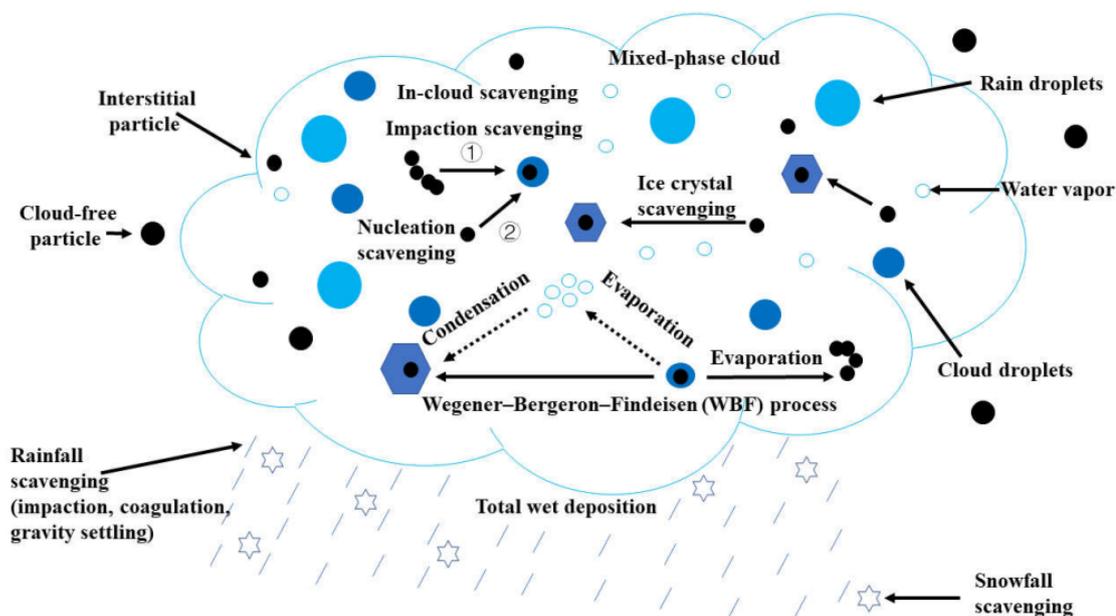
Si noti che lo Stefan Flow (respingente attorno a una gocciolina di nuvola in evaporazione) è in media 5 volte più grande dell'aggiunta ai flussi di diffusione (attraente attorno a una goccia di uvola in evaporazione) come menzionato da Santachiara et al. (2012). Così, la diffusioforesi respinge le particelle dalla gocciolina in evaporazione (vedi Figura 2.6d), che a sua volta diminuisce la CE.

Infine, poiché l'ampiezza della termoforesi è in media il doppio della diffusioforesi (Tinsley et al., 2006), le particelle sono infine attratte verso le gocce nell'aria sub-satura a causa di questi effetti foretici (vedi Figura 2.6e). Pertanto, l'accoppiamento della termoforesi e la diffusioforesi aumentano la CE quando l'umidità relativa diminuisce.

### 2.3.2 Scavenging coefficient

La deposizione umida comprende i processi mediante i quali, in forma acquosa, il particolato atmosferico viene sedimentato sulla superficie terrestre. Questo fenomeno include la rimozione delle particelle atmosferiche quando servono come nuclei per la condensazione dell'acqua atmosferica, per la formazione di una nuvola o una goccia di nebbia. In questo modo sono successivamente incorporati nella goccia. Inoltre include la rimozione delle particelle atmosferiche quando entra in collisione con la goccia all'interno e al di sotto delle nuvole.

Quando succede all'interno delle nuvole, questo processo viene denominato *in-cloud scavenging*, anche noto come *rainout* oppure *nucleation scavenging*. Quando succede al di sotto di esse viene denominato *below-cloud scavenging*, anche noto come *washout* oppure *impaction scavenging*.



**Figura 2.7:** Processi di Scavenging del Black Carbon in-cloud e below-cloud. [4]

La Figura 2.7 illustra i processi di scavenging del black carbon (BC) in-cloud e below-cloud. Il BC, come così anche altri tipi di aerosol, può partecipare alla

formazione della nuvola o della nebbia agendo come nuclei di condensazione o coagulazione/impatto nelle nuvole dando luogo al processo di in-cloud scavenging.

Il tasso di below-cloud scavenging dipende fortemente dall'intensità di pioggia, dalla distribuzione delle dimensioni delle gocce di pioggia e dalla collection efficiency tra la goccia di pioggia e la particella di aerosol.

Un problema consolidato nella modellazione del below-cloud scavenging è riconciliare i tassi di scavenging delle osservazioni in situ con quelli derivati da modelli concettuali ed sperimentali. In particolare, i tassi dei modelli teorici sono di 1-2 ordini di grandezza tassi inferiori a quelli osservati per le particelle di dimensioni di accumulo (diametri di  $0.1 \leq d_p \leq 1 \mu m$ ) (Wang et al., 2010).

### 2.3.3 Rapporto di dilavamento

Il flusso generato dalla deposizione umida  $F_w$  viene definito come il prodotto tra lo *scavenging ratio* (rapporto di dilavamento)  $\Lambda$  per la concentrazione, integrato sulla verticale:

$$F_w(x, y) = \int_0^\infty \Lambda \cdot C(x, y, z) \cdot dz \quad (2.5)$$

Il rapporto di dilavamento  $\Lambda$  utilizzato nei modelli di trasporto di aerosol per descrivere il dilavamento delle particelle al di sotto delle nuvole da parte della pioggia, ha diverse formulazioni empiriche e teoriche con diversi parametri input che lo rendono un coefficiente difficile da determinare.

Per quanto la risoluzione dell'integrale, la concentrazione  $C(x, y, z)$  si considera come una sorgente isolata che emette un pennacchio di fumo rappresentata come un plume tramite un modello gaussiano, in questo modo la deposizione umida può essere modellata con il metodo *source depletion*. Per impiegare questo modello è necessario determinare il rapporto di dilavamento  $\Lambda$ . McMahon e Denison (1979) individuarono una relazione del tipo:

$$\Lambda = \lambda \cdot J_0 \quad (2.6)$$

Dove  $J_0$  è l'intensità delle precipitazioni ( $mm/h$ ) e  $\lambda$  è il coefficiente di scavenging che dipende sia dalle caratteristiche dell'inquinante (solubilità e reattività per i gas e distribuzione granulometrica per le particelle) che dalla natura delle precipitazioni (pioggia, neve, ecc.).

### 2.3.4 Rapporto di washout

Un altro metodo per determinare la deposizione umida sorge dall'equilibrio dell'inquinante tra la fase liquida e la fase gassosa. Questo implica la supposizione dell'esistenza di un *rapporto di washout* determinato come:

$$W_r = \frac{K_0}{C_0} \quad (2.7)$$

Questo rapporto corrisponde alla concentrazione di inquinante in aria  $C_0$  e quella nella pioggia  $K_0$ , in questo modo il flusso di deposizione umida diventa:

$$F_W = -C_0 \cdot W_r \cdot J_0 \quad (2.8)$$

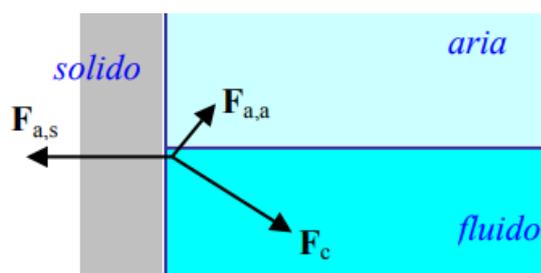
Nuovamente  $J_0$  rappresenta l'intensità di pioggia e il prodotto  $W_0 \cdot J_0$  implica, così come nella deposizione secca, una velocità di deposizione umida  $v_w$ . Questa velocità generalmente, assume valori di due ordini di grandezza superiori a quelli corrispondenti alla deposizione secca.

## 2.4 Flussi Capillari e Viscosità

La capillarità corrisponde a un fenomeno fisico relativo ai liquidi che si manifesta nei tubi capillari, questi ultimi fanno riferimento a tubi in cui la sezione è minore a  $1 \text{ mm}^2$ , dove l'azione delle forze di coesione del liquido e adesione alle pareti del condotto consentono ad esso di risalire o scendere rispetto al livello che raggiungerebbero per azione della sola pressione.

La risultante delle forze che agiscono su molecole identiche viene denominata forza di coesione e tende a mantenere insieme le sostanze, la risultante invece delle forze che agiscono fra molecole diverse, viene chiamata forza di adesione responsabile dell'attrazione tra sostanze diverse.

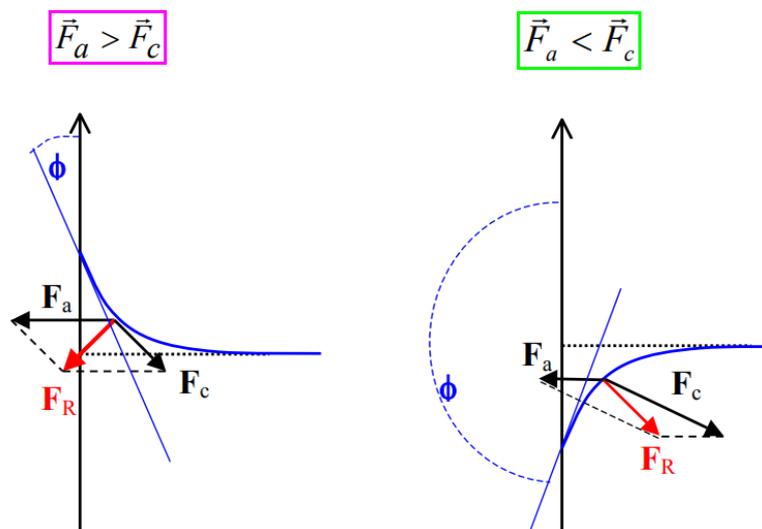
Quando un fluido si trova vicino a parete, risente la forza di coesione diretta verso l'interno del fluido e le forze di adesione, una diretta verso l'interno del gas con cui è in contatto e l'altra verso l'interno del solido come osservabile nella Figura 2.8.



**Figura 2.8:** Sistema di Forze presenti al contatto tra solido, fluido e gas [5]

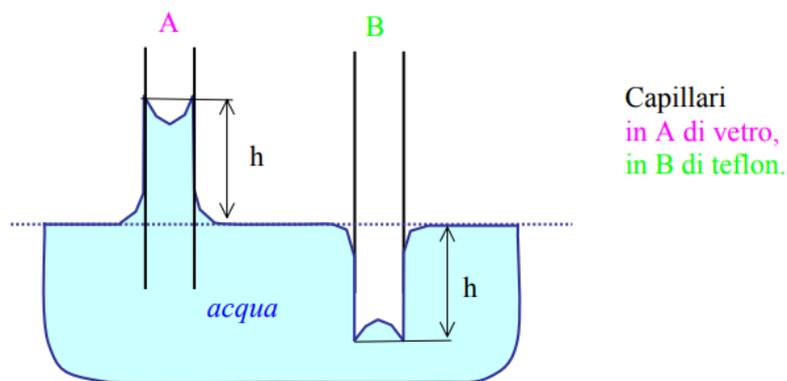
La forza di adesione tra liquido e acqua può essere trascurata perché molto debole, inoltre, le due forze restanti generano una risultante in direzione ortogonale ad esse.

Perciò, a seconda di questa risultante si avrà un innalzamento o allontanamento da parte del liquido rispetto alla parete.



**Figura 2.9:** Incurvamento della superficie dato dalla risultante delle forze [5]

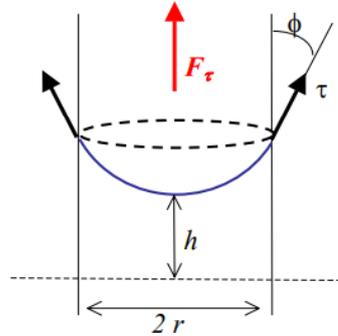
Si osserva un incurvamento della superficie che dà luogo al fenomeno di capillarità, dove  $\phi$  rappresenta l'angolo di raccordo e nel caso sia compreso tra  $0$  e  $\pi/2$  il liquido bagna la parete, mentre nel caso sia compreso tra  $\pi/2$  e  $\pi$  il liquido non bagna la parete.



**Figura 2.10:** Fenomeno di Capillarità [5]

Nella Figura 2.10 si osserva il fenomeno di capillarità dove è possibile calcolare  $h$  la quale rappresenta l'altezza raggiunta del tubo capillare definita tramite la formula di Jurin:

$$h = \frac{2 \cdot \tau \cdot \cos \alpha}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (2.9)$$



**Figura 2.11:** Tubo capillare [5]

Dove:

$h$ : altezza capillare rispetto alla superficie libera

$\tau$ : tensione superficiale

$\alpha$ : angolo di contatto o angolo di bagnabilità delle pareti del tubo

$\rho$ : densità del liquido

$g$ : accelerazione di gravità

$r$ : raggio del tubo capillare

Un fattore importante nell'effetto del tubo capillare corrisponde alla viscosità dell'acqua.

La viscosità corrisponde a una proprietà fisica per la quale le particelle di un fluido incontrano resistenza nello scorrere tra di loro. Questa viscosità viene chiamata viscosità dinamica ed è correlata alla pressione e temperatura alla quale si trova un fluido. In particolare, la viscosità diminuisce all'aumentare della temperatura.

In condizioni standard de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  e pressione di  $1\text{ atm}$  la viscosità dinamica  $\eta$  corrisponde a:

$$\eta = 8.9 \cdot 10^{-4} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (2.10)$$

Oltre la viscosità dinamica, l'acqua è caratterizzata da una viscosità cinematica  $\nu$  la quale esprime la resistenza di un fluido a scorrere sotto l'influenza della forza di gravità, essa viene quantificata come il rapporto tra la viscosità dinamica e la densità del fluido:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2.11)$$

Quindi la formula di Jurin può essere scritta:

$$h = \frac{2 \cdot \tau \cdot \cos \alpha}{\frac{\eta}{v} g \cdot r} \quad (2.12)$$

Si può concludere che l'altezza che viene generata per effetto del tubo capillare cambia secondo la temperatura del fluido. In particolare, se la temperatura aumenta,  $h$  diminuisce.

# Capitolo 3

## Stato dell'Arte

### 3.1 Simulatori di Pioggia

I simulatori di precipitazioni sono stati ampiamente utilizzati come strumenti di ricerca in campo e in laboratorio per la caratterizzazione di studi idrogeomorfologici comprese le caratteristiche di deflusso, infiltrazione ed erosione, nonché studi sul trasporto di sedimenti, nutrienti e inquinanti all'interno dei bacini idrografici. Sono utilizzati anche per misurare gli impatti di rivegetazione, consolidamento e armatura sulle proprietà fisiche e sull'erodibilità del suolo. I simulatori di pioggia possono produrre dati unici che sono vitali per calibrazione e validazione a fini empirici, concettuali o modelli matematici di trasporto di precipitazioni-deflusso-sedimenti basati sui processi (Aksoy e Kavvas, 2005).

L'erosione del cantiere e la conseguente sedimentazione costituisce una delle maggiori minacce di inquinamento da fonte non puntuale ai corsi d'acqua. Testare l'erosione e le pratiche di controllo, in condizioni di pioggia simulata rappresentative delle condizioni sperimentate sulla costruzione in situ, è importante per comprendere meglio le loro capacità di riduzione dell'erosione (Matthew D. Ricks et al., 2019).

La necessità di simulatori di pioggia è emersa quando i ricercatori hanno stabilito che la pioggia simulata forniva controllo più uniforme sugli esperimenti rispetto alle precipitazioni naturali. La pioggia simulata consente dati raccolti velocemente e test riproducibili.

Gli eventi meteorici molto intensi si verificano con una bassa frequenza e sono quelli che contribuiscono maggiormente alle variazioni geomorfologiche. L'imprevedibilità, la rarità e la casualità delle precipitazioni naturali rendono difficile studiarne gli effetti mentre si verificano e richiede molti anni di misurazioni affinché queste siano significative (Keesstra et al. 2014, Cerdà et al. 2017, Rodrigo-Comino et al. 2018).

L'obiettivo più importante della costruzione del simulatore di precipitazioni serve

a replicare il processo delle precipitazioni naturali che è un fenomeno notevolmente complesso e non ha mai potuto essere replicato accuratamente (Aksoy et al., 2012; Bryan, 1981). Negli ultimi decenni, tali simulatori di pioggia sono diventati uno strumento significativo per analizzare l'erosibilità del suolo al variare dell'intensità delle precipitazioni tipi di suolo e diverse condizioni di pendio (Grismer, 2012; Wang et al., 2010).

I simulatori di pioggia costituiscono uno strumento molto importante dato che permettono l'acquisizione di dati in maniera efficiente, controllata e adatta a ogni esigenza in quanto sono in grado di generare una specifica precipitazione.

La corretta simulazione delle precipitazioni ne richiede diversi criteri:

1. Distribuzione delle dimensioni delle gocce vicino a precipitazioni naturali (Bubenzer, 1979a).
2. Velocità d'impatto vicino alla velocità terminale delle precipitazioni naturali (Leggi, 1941) (Gunn e Kinzer, 1949).
3. Intensità piovosa uniforme e distribuzione casuale delle dimensioni delle gocce (Leggi e Parsons, 1943).
4. Pioggia uniforme applicata sull'intero diagramma di prova.
5. Angolo di impatto verticale.
6. Modelli temporaleschi di durata e intensità significativa riproducibili (Moore e al., 1983) (Meyer e Armon, 1979).

I piccoli simulatori di pioggia portatili sono strumenti efficienti per la misurazione del deflusso e dell'erosione del suolo grazie al basso consumo di acqua, alle misurazioni accurate e alla loro gestione semplice ed economica (Ries et al. 2013, Vaezi et al. 2017). Idealmente, questi dovrebbero essere facilmente gestibili da un numero ridotto di personale.

Da una parte, i simulatori a piccola scala potrebbero essere svantaggiosi a causa del fatto che di solito sono simulatori economici, semplici e piccoli su cui si preferisce un diagramma di prova di piccole aree. Un simulatore portatile può essere utile in questo senso, grazie alla sua semplicità e rapidità di montaggio e trasporto da un appezzamento all'altro. Dall'altra parte, i grandi simulatori, che sono poco pratici, non portatili e difficili da utilizzare nelle ricerche sul campo in aree remote, comportano la capacità di riprodurre le caratteristiche delle precipitazioni naturali e i vincoli tecnici (Koca e Aksoy, 2010).

In generale, i simulatori di pioggia si possono classificare come, quelli ad ago e quelli pressurizzati ad ugello. Per quanto riguarda il primo, la forza trainante delle gocce corrisponde alla gravità, per quanto riguarda il secondo l'altezza del

dispositivo è il fattore cruciale affinché la velocità di caduta raggiunga il limite di velocità, condizionando così anche quella del dispositivo.

La valutazione accurata e misurazione dell'intensità della pioggia in relazione alla dimensione dell'ugello e alla pressione idraulica applicati all'ugello sono necessari per ottenere una massima somiglianza con le gocce naturali di pioggia (Vaezi et al., 2018). Dato che le caratteristiche dei simulatori differiscono a seconda del clima studiato e dagli obiettivi delle ricerche, è necessaria la calibrazione del sistema.

L'erosione del suolo è uno dei problemi più significativi del degrado del suolo, corrisponde ad una separazione e un movimento di particelle di suolo. Il deflusso superficiale prodotto da forti piogge porta alla formazione di sedimenti ed è stata influenzata dalla precedente formazione di acque sotterranee o bacini idrografici e dalla pressione idrica del suolo.

Molti ricercatori hanno progettato e fabbricato simulatori con il canale di erosione per trovare l'effetto delle precipitazioni sull'erosione del suolo, infiltrazione del suolo, deflusso superficiale e derivazione di sedimenti dovuti alla rimozione di strati di superficie del suolo.

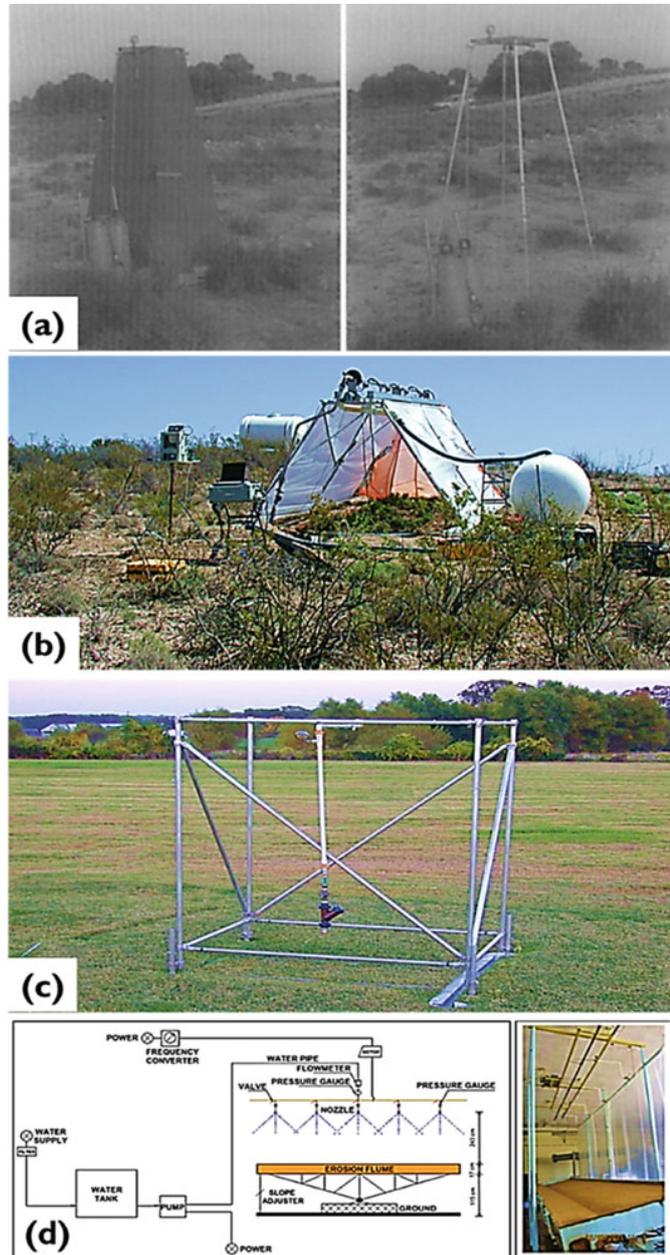
Nell'Università di Valencia viene utilizzato un simulatore di pioggia per eseguire test sperimentali in aree remote e accidentate. Questo simulatore di pioggia consente di eseguire esperimenti su un pendio ripido a causa della sua portabilità. Il simulatore di pioggia può applicare  $0.24 m^2$  di pioggia sull'area tracciata; l'intensità della pioggia è di  $55 mm/h$ , vedi Figura 3.1a.

A Tucson nell'University of Arizona, è stato progettato e prodotto un simulatore rimovibile controllato tramite computer, chiamato *Walnut Gulch Rainfall Simulator* (WGRS). L'intensità delle precipitazioni è stata variabile e utilizzata per la ricerca del deflusso delle erosioni per precipitazioni. Questo simulatore di pioggia ha un unico braccio oscillante focale e fornisce acqua al di sopra di un'area del tracciato di  $2 m \times 6.1 m$  e il simulatore di precipitazioni applica tassi di pioggia variati da  $13$  a  $178 mm/h$ , con un incremento di  $13 mm/h$ , Figura 3.1b.

Un semplice simulatore di precipitazioni è stato progettato nell'Università dell'Arkansas e questo strumento è stato relativamente utile per il trasporto da e verso il campo con conservazione in condizioni di intensità critiche, caratteristiche dell'energia e distribuzione delle precipitazioni naturali. La cornice di questo simulatore di pioggia è realizzata con tubi in alluminio leggero con un unico ugello a getto pieno (HH50W5Q) del sistema di spruzzatura. Questo ugello è centrato nella parte superiore lato del telaio del simulatore di precipitazioni alto  $3 m$ . La pressione di esercizio è di  $28 kPa$  e l'ugello fornisce un'intensità di  $70 mm/h$  con un'area di  $1.5 m \times 2 m$ . Il simulatore può essere facilmente montato o smontato in circa  $10 min$  Figura 3.1c.

All'Università tecnica di Istanbul, è stato sviluppato un simulatore di pioggia per esperimenti di laboratorio e prodotto per simulare le condizioni di pioggia naturale con ragionevole accuratezza. Raggiunge intensità di precipitazioni da  $45$  a  $105$

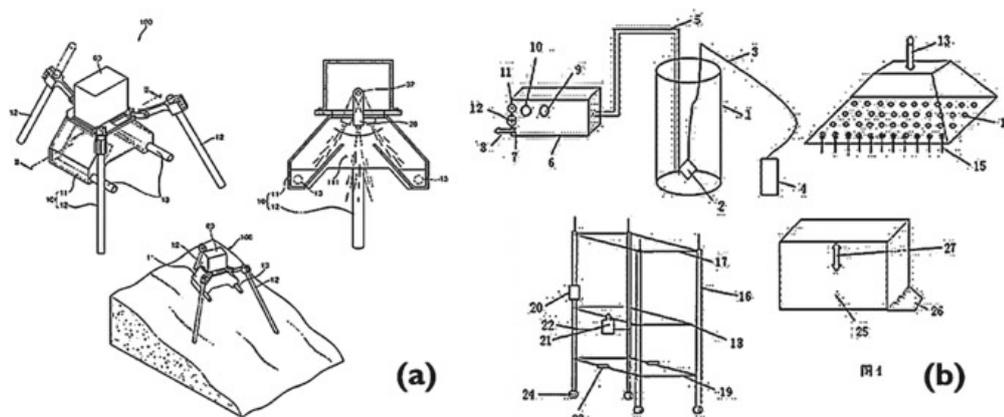
$mm/h$ , con un coefficiente di uniformità compreso tra 82% e 89% e la pendenza di erosione del canale che accompagna questo simulatore di pioggia arriva fino al 20% in senso longitudinale e direzione laterale (Figura 3.1d).



**Figura 3.1:** (a) Vista del simulatore di precipitazioni presso un'università di Valincia. (b) Tucson/Università dell'Arizona. (c) Università dell'Arkansas. (d) Università tecnica di Istanbul [6]

In Corea del Sud (Kikam Institute for Geosciences) 2013 è stato inventato un dispositivo per simulare la pioggia (numero di brevetto: KR101113267B1) basato sul principio di vibrazione di una piattaforma che ne contiene più ugelli le gocce scendono automaticamente a causa della vibrazione della piattaforma. Il problema di questa invenzione è l'intensità delle gocce che cadono, che dipende anche dalla velocità di partenza la quale non è stata presa in considerazione. Non è disponibile il controllo idraulico della densità delle gocce di pioggia e l'intensità della pioggia non può essere modificata; (Figura 3.2a).

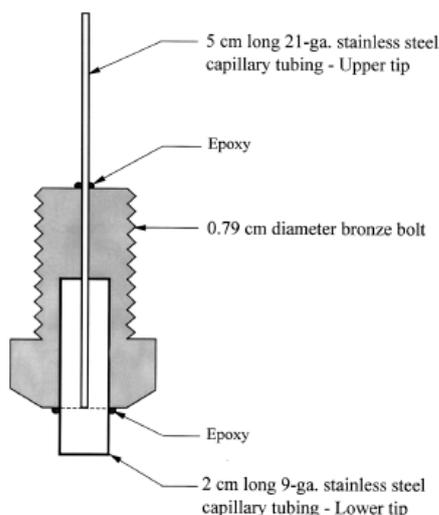
In Cina, Sichuan University, si trova un simulatore di pioggia con brevetto numerato (CN204008636U), inventato nel 2014 per studiare l'effetto delle precipitazioni sui terreni coltivati. Il simulatore di pioggia era molto semplice, ma c'era un problema nel movimento della piattaforma forata a diversa altezza per la caduta libera delle gocce di pioggia in aggiunta alla stessa dimensione dei fori della piattaforma di caduta delle gocce di pioggia, che fanno il cambiamento dell'intensità della pioggia difficile da controllare da parte della pompa. Questo è del tutto inverso al simulatore, in cui è possibile controllare l'apertura degli ugelli e la portata controllata dalla pompa attraverso il tubo posteriore come mostrato in (Figura 3.2b).



**Figura 3.2:** Rainfall simulator machine in (a) South Korea/ Geologic Institute (patent number: KR101113267B1) and (b) China (patent number: CN204008636U) [6]

Successivamente vengono riportati in dettaglio esempi di alcuni recenti simulatori di pioggia. In particolare, quello riferito di T. P. Regmi e A. L. Thompson (2000) preso in considerazione per la costruzione del simulatore in esame in questa tesi, per la sua calibrazione.





**Figura 3.4:** Rappresentazione grafica dello schema del formatore di gocce telescopico [7]

principio afferma semplicemente che  $\Delta V_a = \Delta V_f$  a pressione costante, dove  $\Delta V_a =$  variazione del volume d'aria in ingresso sistema e  $\Delta V_f =$  variazione del volume del liquido in uscita dal sistema.

Il serbatoio è dotato di un tubo d'ingresso dell'aria graduato, di diametro interno  $20\text{ mm}$  e spessore  $2\text{ mm}$ , in materiale poliuretano trasparente, per il controllo del carico. La prevalenza nel serbatoio è misurata dalla parte inferiore del tubo di ingresso dell'aria alla punta inferiore del formatore della goccia. Il serbatoio funziona come una bottiglia di Mariotte, perciò al suo interno, nella parte inferiore del tubo di ingresso dell'aria, si registra la pressione atmosferica. La tavola d'acqua sopra i formatori di gocce viene manipolata alzando e/o abbassando il tubo di ingresso dell'aria mediante un motore passo-passo, questo sistema consente di variare il carico con una precisione di  $0.9\text{ mm}$ . Quando il tubo è sollevato, la distanza dalla punta esterna del formatore di gocce, sul fondo del tubo, aumenta, aumentando la prevalenza al di sopra della caduta, e viceversa. Perché la portata varia proporzionalmente alla prevalenza, questo fornisce un controllo preciso dei tassi di applicazione.

I formatori a goccia con tubo calibro  $22$  hanno mostrato variazioni minime nella portata rispetto al carico. Per tubi capillari calibro  $21$  e più grandi, la resistenza al flusso era considerevolmente inferiore fornendo maggiore flessibilità nell'applicare un'ampia gamma di intensità per un piccolo cambiamento di carico. È stato selezionato il tubo calibro  $9$  perché ha prodotto una goccia massima diametro di  $5\text{ mm}$  simile a Mutchler e Moldenhaur (1963).

Il sistema di gocciolamento consiste, come osservabile nella Figura 3.3, in un

serbatoio di  $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.6\text{ m}$  chiuso inferiormente da un piano di gocciolamento di  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ . Un totale di 216 gocciolatori sono stati avvitati nei fori prefilettati del modulo letto in configurazione geometrica di triangoli equilateri,  $7.7\text{ cm}$  per ridurre al minimo il numero di gocciolatori e allo stesso tempo mantenere un'adeguata gamma di tassi di intensità, copertura della goccia di pioggia e uniformità di applicazione.

Il serbatoio di gocciolamento, data la sua dimensione, garantisce un carico di  $0.65\text{ m}$ , perciò per le prove di carico maggiore, l'acqua viene fornita da un serbatoio ausiliario da  $1.89\text{ m}^3$ , collegato al serbatoio di gocciolamento.

Il sistema è stato installato in una torre ad un'altezza di  $14\text{ m}$  ritenuta adeguata a garantire il 95% di velocità terminale per gocce di  $4.3\text{ mm}$  di diametro e più piccola. Risultati ottenuti durante la simulazione del flusso hanno indicato che l'uniformità del flusso areale migliora con tassi di intensità crescenti. Ad un tasso di intensità basso come  $1.25\text{ cm/h}$ , l'uniformità del flusso areale aveva uno standard deviation del 15%; mentre è migliorato al 7.5% a  $8.5\text{ cm/h}$ . La non linearità dell'andamento del flusso dei formatori di gocce possono essere associati al superamento delle forze di attrito interne e tensione superficiale capillare. Il sistema è in grado di controllare la prevalenza statica sul letto gocciolatore con incrementi di  $0.9\text{ mm}$ , con tassi di intensità risultanti che vanno da  $0.025$  a  $16\text{ cm/h}$  con incrementi di  $0.025\text{ cm/h}$ , adeguati a entrambi studi di trasferimento chimico ed erosione.

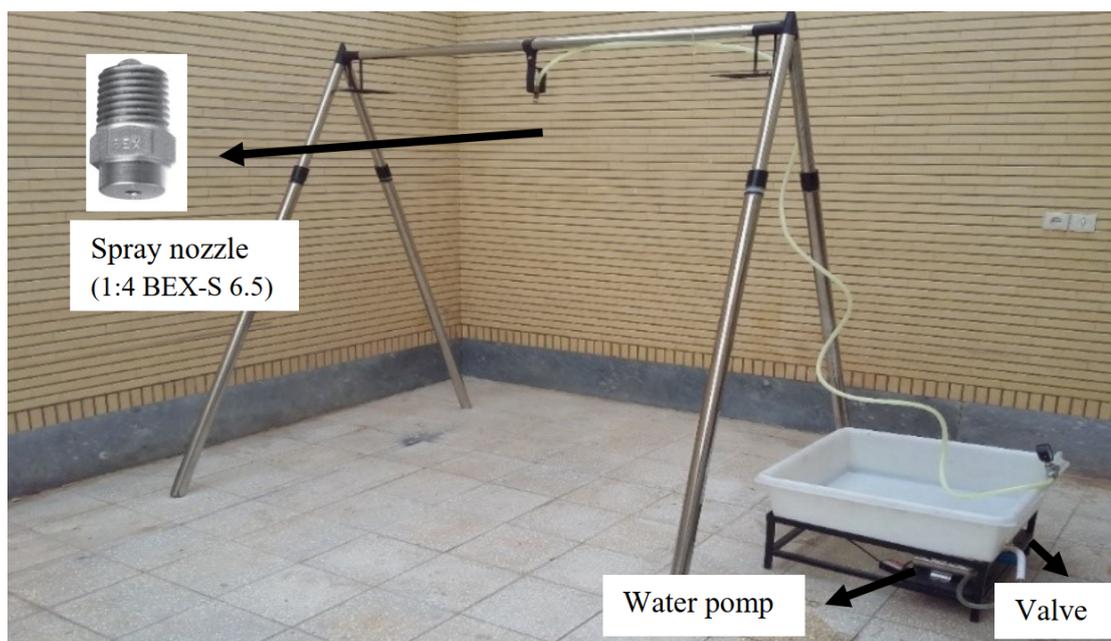
Al di sotto del serbatoio di gocciolamento è stato posizionato uno schermo di redistribuzione, questo permette la modifica dei diametri delle gocce, producendo una distribuzione più simile a quella delle piogge naturali nel range di intensità compreso tra  $12.7$  e  $152.4\text{ mm/h}$ .

### 3.1.2 Sima Mohammadi et al. 2022

Il simulatore di pioggia costruito corrisponde a un sistema pressurizzato, ciò indica che la pioggia viene prodotta a diverse velocità a seconda della pressione applicata, con il principale vantaggio di una distribuzione uniforme. L'obiettivo a raggiungere con questo tipo di simulatore includeva un accurato controllo dell'intensità, una somiglianza con le precipitazioni naturali in termini di energia cinetica e un'uniformità spaziale delle precipitazioni sull'intero diagramma di prova. Un altro fattore importante include la migliore affidabilità meccanica per un facile trasporto all'interno delle aree di ricerca (Salem e Meselhy, 2020).

Il simulatore è stato conformato per essere trasportato in situ e produrre una intensità di pioggia relativamente elevata. La struttura del simulatore è presente nella Figura 3.5

Gli elementi principali del simulatore sono: la struttura, gli ugelli spruzzatori, il sistema di alimentazione dell'acqua e un manometro, come può osservarsi nella Figura 3.5.



**Figura 3.5:** Simulatore di pioggia usato per la sperimentazione [8]

Questo simulatore è stato progettato per essere utilizzato su un'area sperimentale di precipitazione di  $1 \text{ m}^2$ . Tutto il sistema è relativamente leggero e portatile, le gambe telescopiche possono inoltre, aumentare o diminuire l'altezza dell'apparecchio per regolare la stabilità sul terreno. L'ugello raggiunge un'altezza massima di  $2.3 \text{ m}$ , consentendo eseguire esperimenti su pendii in salita a  $30^\circ$ .

La configurazione del sistema di alimentazione comprende un serbatoio in polietilene di  $60 \text{ l}$ , una e una pompa con un consumo di  $90 \text{ W}$  e prevalenza di  $10 \text{ m}$ . La pompa aziona l'acqua attraverso il sistema di alimentazione verso l'ugello. A sua volta è presente una valvola di controllo che permette la regolazione della portata e la pressione. Il manometro che si trova all'uscita della pompa permette la lettura della pressione del flusso. L'ugello di spruzzatura singolo si trova centrale sulla sommità della struttura.

L'ugello è del tipo conico 1:4 BEX-S 6.5 per irrigazione a barra Figura 3.5. Questo ugello fornisce diverse intensità di pioggia tra  $35$  e  $75 \text{ mm/h}$  a pressione tra  $0.05$  e  $0.1 \text{ MPa}$ . Come mostrato nella Figura 3.6, il grafico dell'erosione è costituito da piastre zincate  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  attaccate alla cerniera e una piastra trapezoidale per guidare il deflusso e il sedimentazione della trama (Kinnell, 2016). Per prevenire l'acqua pulita di ugello dalla miscelazione con il deflusso del terreno sotto il campione è installata una piastra nella trama trapezoidale come scudo che aumenta la precisione del test. L'uscita della trama di deflusso è pallinata per migliorare il tasso di miscela di acqua e suolo e incrementare ulteriormente la

precisione.

Il vento può influire negativamente sulla quantità e distribuzione delle precipitazioni perciò l'attrezzatura è ricoperta di plastica durante le sperimentazioni in modo da ridurre l'effetto del vento tramite la dispersione delle gocce, favorendo così l'accuratezza del test per quanto riguarda le precipitazioni sul suolo.



**Figura 3.6:** Lastre zincate con cui è stato costruito il diagramma di erosione [8]

Questo simulatore di precipitazioni portatile progettato, prodotto, costruito e calibrato per la ricerca di laboratorio e sul campo, è facile da trasportare e utilizzare luoghi remoti. Il simulatore, tuttavia, richiede la calibrazione in base alle proprietà delle precipitazioni regionali. Riesce a creare un'intensità di pioggia che varia da  $35$  a  $75$   $mm/h$  su un appezzamento di  $1$   $m^2$ .

Il sistema di pressione dell'acqua è stato ridotto il più possibile per raggiungere la massima dimensione della goccia. Questo aumenta l'eterogeneità della distribuzione attraverso la trama con intensità di precipitazioni basse. Al contrario, l'eterogeneità diminuisce con l'aumentare dell'intensità di precipitazione. Questa scoperta lo dimostra il coefficiente di uniformità che corrisponde alla sensibilità influenzata dall'intensità delle precipitazioni. Avendo un valore di coefficiente di uniformità di Christiansen tra  $77\%$  e  $87\%$ , si indica comunque un'elevata uniformità.

I diametri che vengono creati con questi tipi di simulatori variano da  $0.6$  a  $3.8$   $mm$ , comunque, contrariamente a quello che succede in natura aumentando l'intensità delle precipitazioni, il diametro delle gocce di pioggia simulate diminuiscono. I risultati mostrano anche che la velocità di caduta delle gocce di pioggia varia tra  $3.5$  a  $5.7$   $mm/s$ . Il disegno attuale permette flessibilità in entrambi i diametri delle gocce e intensità delle precipitazioni.

## 3.2 Collection Efficiency

Per quanto riguardano i valori che può assumere la collection efficiency, viene presentato uno studio numerico per valutare il possibile impatto delle particelle di aerosol da parte delle gocce di pioggia sul calcolo della deposizione umida di inquinamento di pennacchi.

Questo studio realizzato nel 2013 copre i valori di collection efficiency tra  $0.3 \mu m$  e  $3.5 \mu m$  di diametro per le particelle di aerosol e da  $2 \mu m$  a  $2.6 mm$  di diametro per le gocce.

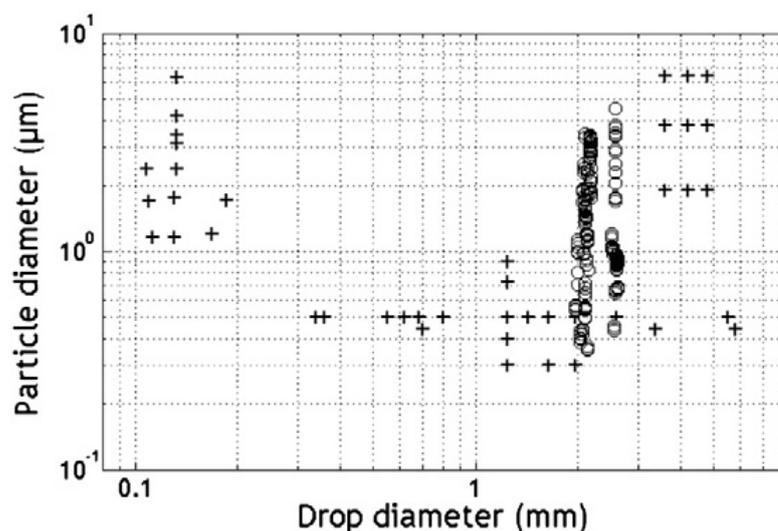
La concentrazione del particolato varia tra alcune centinaia di particelle per centimetro cubo negli oceani e diverse decine di mille particelle per centimetro cubo vicino ai centri di inquinamento. A seconda delle dimensioni queste particelle di aerosol possono permanere in sospensione per diversi minuti fino a per, addirittura, diversi mesi.

In particolare, le particelle con diametri tra  $0.1$  e  $1 \mu m$  che formano il cosiddetto *accumulation mode* (Whitby, 1978), hanno una durata relativamente più lunga in atmosfera, poiché sono solo debolmente influenzati dalla rimozione per diffusione termica o decantazione gravitazionale. Queste particelle vengono principalmente rimosse dalle nuvole precipitanti, sono efficienti nuclei di condensazione delle nubi. Sotto la nuvola, possono anche essere depositati a causa di un assorbimento nelle gocce di pioggia che cadono.

È stato studiato il processo di scavenging sotto le nuvole sperimentalmente e teoricamente, ad es. di Barba (1974), Grover et al. (1977), Wang e Pruppacher (1977), Lai et al. (1978), Wang et al. (1978), Radke et al. (1980), Carstens e Martin (1982), Leong et al. (1982), Barlow e Latham (1983), Pranesha e Kamra (1996, 1997a, b) e Vohl et al. (2001) che hanno quantificato le collection efficiency per determinate combinazioni di dimensione delle particelle e delle gocce. La Figura 3.7 riassume con croci i risultati raggiunti comparabili con i cerchi che corrispondono ai risultati ottenuti da Quérel (2012), interessato nel presente studio.

Al fine di valutare l'effetto di below-cloud scavenging, sono stati introdotti dei modelli. Questi modelli sono trattati come modelli di trasporto con parametrizzazioni teoriche o adattamenti dei dati sperimentali disponibili. Esistono anche dei modelli risolti con bin come nel caso di DESCAM (DEtailed SCavenging Model). Questo modello tratta le idrometeore e le particelle di aerosol in modo dimensionale, nel modello è stata incorporata una tabella di collection efficiency la quale, considera tutta l'informazione disponibile prima del 1986, coprendo il range di dimensioni non studiati prima, con delle estrapolazioni in modo da riempire l'intera matrice. Di conseguenza, i valori per gocce maggiori a  $500 \mu m$  e per particelle di aerosol più grandi di  $1 \mu m$  erano estrapolati da pochissimi punti dati e presentano grandi incertezze.

Recentemente è disponibile un set di nuovi dati per le collection efficiency di particelle tra  $0.3$  e  $3.5 \mu\text{m}$  di diametro e gocce da  $2$  a  $2.6 \text{ mm}$  (Quérel, 2012) (cerchi fig). Nell'articolo di [9] si propone lo studio dell'impatto di questi nuovi valori sulla quantità di deposizione umida calcolata da DESCAM.

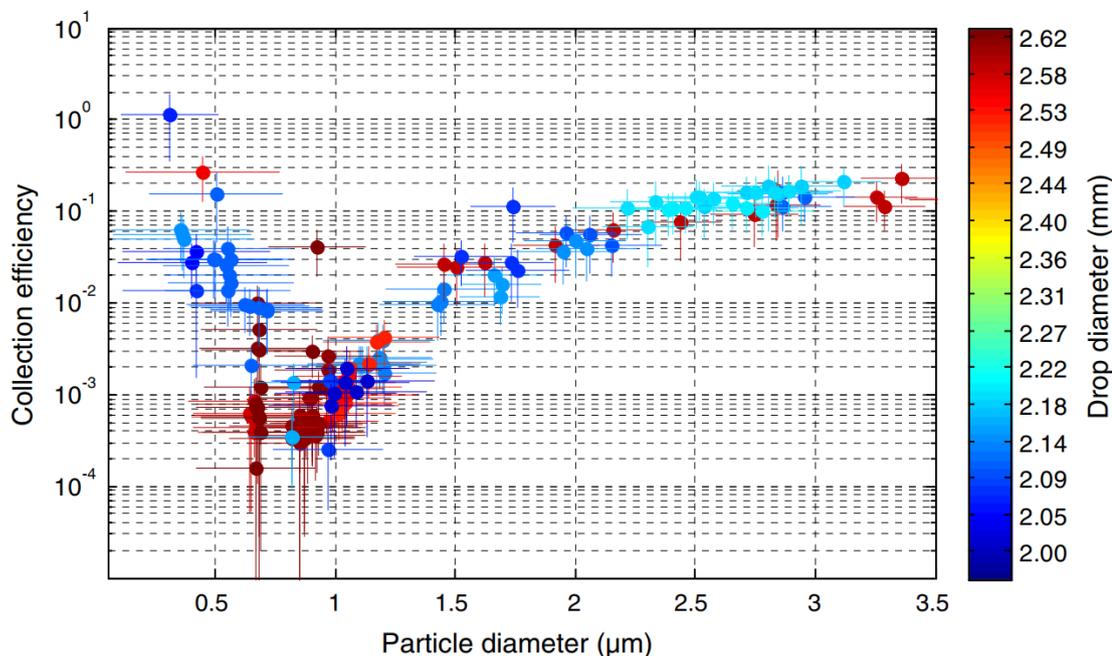


**Figura 3.7:** Localizzazione delle collection efficiency in letteratura (croci), e delle nuove collection efficiency misurate in BERGAME (cerchi). [9]

Per misurare la collection efficiency è stata realizzata una struttura sperimentale denominata BERGAME (acronimo francese di *Strumentazione per lo studio dello scavenging degli aerosol e la misura della collection efficiency*). Questo sistema consiste in un condotto verticale di  $10 \text{ m}$  attraverso il quale, le gocce d'acqua riescono a raggiungere la loro velocità terminale, con una camera aerosol di  $0.64 \text{ m}^3$  nella parte inferiore. Un attento protocollo permette di monitorare temperatura, umidità, dimensione delle gocce, forma delle gocce, aerosol e contaminazione delle gocce (vedi Quérel, 2012, per particolari).

Prima di ogni esperimento, sono state catturate gocce d'acqua pura per verificare il livello di contaminazione del banco. Successivamente la camera di aerosol è stata riempita con particelle di aerosol di fluoresceina. Monitorati continuamente mediante spettrometro (ELPI, APS) mentre la densità di massa è stata controllata da campioni filtrati. Una volta che le gocce cadenti hanno attraversato l'aerosol che riempiva la camera, queste sono state raccolte. La densità di massa della fluoresceina nell'acqua accumulata è stata misurata e successivamente sono state determinate le collection efficiency. Un'attenta analisi ha prodotto che l'errore principale deriva dal polidispersione delle particelle di aerosol, in particolare nel caso di concentrazioni molto basse.

La Figura 3.8 mostra i 162 valori di collection efficiency con le corrispondenti barre di errore. Le dimensioni delle gocce variano tra 2 e 2.6 mm e le particelle di aerosol hanno dimensioni comprese tra 0.3 e 3.5  $\mu\text{m}$ .

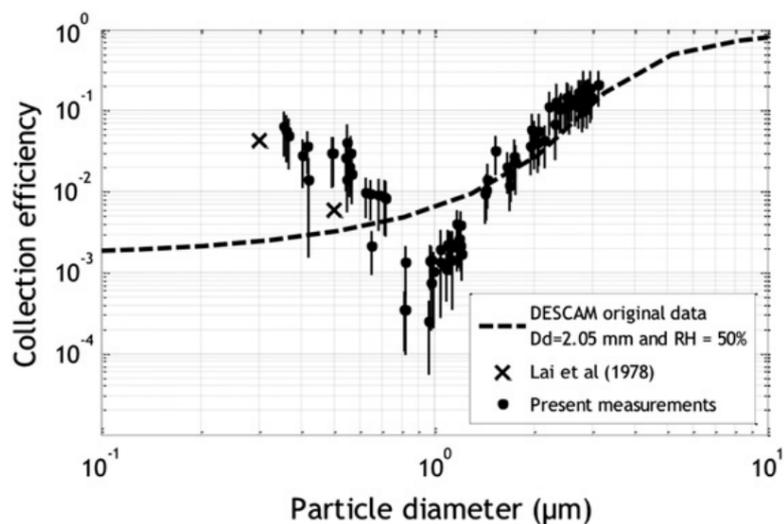


**Figura 3.8:** Collection Efficiency misurate con la loro dispersione data la dipendenza del diametro di particella. Ogni colore corrisponde a un diametro. [9]

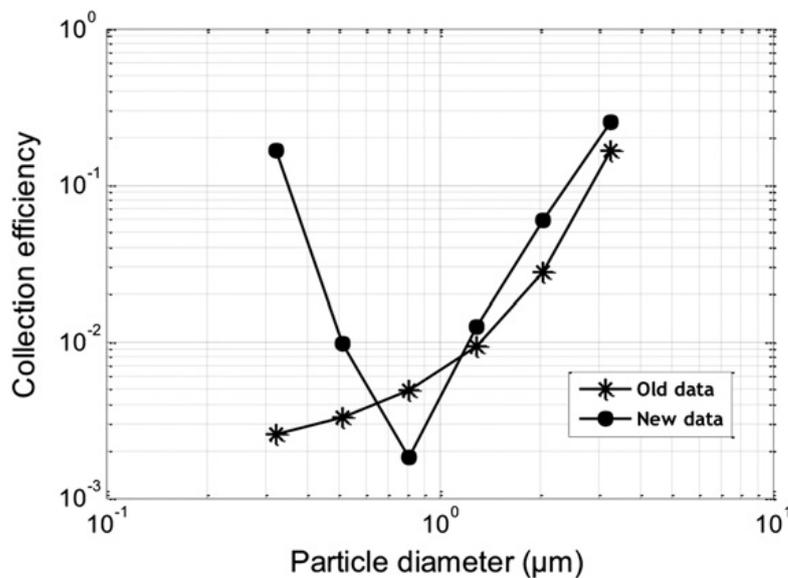
La Figura 3.9 confronta le efficienze misurate per gocce di 2 mm diametro con i vecchi valori nella tabella di ricerca DESCAM. Per particelle grandi i valori precedenti erano leggermente inferiori ai nuovi. La differenza principale, però, sta nell'aumento della collection efficiency verso le piccole particelle, risultato riscontrato anche da Lai et al. (1978). Per spiegare questo effetto Quérel (2012) propose la visualizzazione per mezzo di velocimetria dell'immagine (PIV) della particella di acqua. In particolare, ha riscontrato un'influenza della cattura delle particelle di aerosol presumibilmente data dallo sviluppo del vortice posteriore dietro la goccia di dimensioni millimetriche che non era stato misurato prima.

La Figura 3.10 mostra i nuovi valori di 2 mm che hanno sostituito i vecchi interpolati nella ricerca DESCAM. Tuttavia, oltre alle collection efficiency misurate, queste, sono state estrapolate alle particelle comprese tra 0.05  $\mu\text{m}$  e 0.3  $\mu\text{m}$  e tra 3.5  $\mu\text{m}$  e 13  $\mu\text{m}$  per consentire una transizione graduale.

Lo studio presentato evidenzia l'importanza di un'accurata conoscenza della collection efficiency dello scavenging di particelle di aerosol e gocce per il calcolo della rimozione a umido dei pennacchi di inquinamento da pioggia. Fino ad ora,



**Figura 3.9:** Confronto delle efficienze di raccolta misurate per gocce di 2 mm diametro con i vecchi valori della tabella di ricerca DESCAM. Le croci si riferiscono alla misura di Lai et al. (1978). [9]



**Figura 3.10:** Confronto tra le efficienze della vecchia e della nuova collezione per gocce con un diametro di 2 mm nella tabella di ricerca (stella: dati precedenti, cerchio: nuovi dati). [9]

persistono ancora importanti lacune, in particolare nel settore di gocce di pioggia millimetriche e particelle di aerosol di dimensioni micrometriche. L'ipotesi dello

sviluppo di vortici posteriori dietro una goccia di dimensioni millimetriche derivata da PIV misurazioni fatta da Qu erel (2012) si traduce in un aumento della collection efficiency per particelle di dimensioni inferiori a  $0.7 \mu\text{m}$ .

Questo effetto ha contribuito per il 30% all'aumento totale della massa depositata con le nuove collection efficiencies durante un evento di pioggia. Questo percentuale potrebbe aumentare, se il pennacchio   composto da pi  particelle di dimensioni inferiori al micrometro. Il restante 70% dell'aumento totale sulla massa depositata con le nuove collection efficiencies pu  essere attribuito all'aumento di un fattore due delle particelle di dimensioni micrometriche. I valori precedentemente utilizzati erano interpolazioni in quanto non lo erano le misurazioni in questo intervallo di dimensioni a disposizione.

Nel complesso, la massa inquinante depositata dalla pioggia   aumentata fino al 17% rispetto ai vecchi valori di efficienza per i casi convettivi studiati. Lo studio qui riferito ha confermato che il calcolo di un coefficiente di scavenging a partire dall'osservazione di concentrazioni di inquinamento che diminuisce nell'aria da sola non sar  corretta per quantificare la quantit  di deposizione umida, in particolare non per precipitazione convettiva. Un coefficiente di scavenging calcolato in questo modo sar  purtroppo quasi completamente dominato da effetti dinamici.

Vista l'importante influenza della collezione efficiency sullo scavenging e le grandi lacune che ancora persistono, si suggerisce fortemente di pi  studi di laboratorio in pi  gamme di dimensioni, per confermare l'esistenza di una cattura posteriore per particelle di dimensioni sub-micrometriche e gocce di dimensioni millimetriche, ma considerando anche effetti foretici ed elettrici.

Invece di collegare il coefficiente di scavenging a la diminuzione dello spettro delle particelle nell'aria, un approccio significativo potrebbe essere sviluppato collegando anche all'intensit  della pioggia come altri parametri, ad esempio, meteorologici, dimensione delle nuvole e caratteristiche del pennacchio. Queste parametrizzazioni dovrebbero essere sviluppate in stretta interazione con modelli dettagliati come DESCAM.

### 3.3 Scavenging Coefficient

Lo scavenging delle precipitazioni delle particelle di aerosol atmosferici   un importante processo di rimozione che dovrebbe essere incluso nei modelli di trasporto chimico atmosferico (CTM *Clinical Trial Management System*) che simulano numero di particelle di aerosol e/o concentrazioni di massa.

Un parametro noto come coefficiente di scavenging  $\Lambda$    stato utilizzato nell'equazione di continuit  della massa dell'aerosol per rappresentare lo scavenging delle particelle sotto la nuvola (Seinfeld e Pandis, 2006). I precedenti CTMs sviluppati si occupavano solo della massa apparente di aerosol senza la complessit  del numero

di massa e delle concentrazioni di massa (Baklanov, 1999; Rasch et al., 2000; e Jacobson, 2003, e riferimenti ivi contenuti).

In questi modelli per massa apparente,  $\Lambda$  è stato comunemente parametrizzato in funzione dell'intensità della pioggia (es.  $\Lambda = A \cdot R^B$ , dove  $R$  è l'intensità di pioggia mentre  $A$  e  $B$  sono costanti empiriche) (Balkanski et al., 1993; Mircea et al., 2000; Baklanov e Sorensen, 2001; Andronache, 2003).

Dall'altra parte, i recenti CTMs sviluppati per aerosol considerano esplicitamente il numero di particelle e le concentrazioni di massa, dove  $\Lambda$  è espresso in funzione della dimensione delle particelle (es. Gong et al., 2003; Loosmore e Cederwall, 2004; Henning et al., 2006; Tost et al., 2006; Croft et al., 2009).

I confronti tra i modelli hanno dimostrato che sia la massa apparente che le dimensioni delle particelle per la parametrizzazione dello scavenging hanno grandi incertezze (Rasch et al., 2000; Textor et al., 2006).

In letteratura esistono parametrizzazioni di  $\Lambda$  risolte sia teoricamente sia empiricamente. Nelle parametrizzazioni teoriche di  $\Lambda$  sono necessarie le parametrizzazioni di altri tre componenti, la collection efficiency delle gocce di pioggia, la distribuzione dimensionale del numero di gocce di pioggia e la velocità di caduta terminale della goccia di pioggia. Negli ultimi decenni, un numero significativo di studi teorici e sperimentali è stato condotto per indagare  $\Lambda$  e questi componenti correlati che la definiscono (recensioni in Zhang e Vet, 2006; Sportisse, 2007). Sono state sviluppate anche diverse formule analitiche, empiriche o semi empiriche per descrivere queste componenti di scavenging.

Tuttavia, a causa della naturale variabilità delle gocce di pioggia e la complessità dei processi di raccolta microfisici tra particelle e gocce di pioggia, non c'è stato alcun accordo o consenso comunitario su quale formula debba essere utilizzata per i componenti summenzionati necessari per il calcolo di  $\Lambda$ .

Per esempio, la collection efficiency delle gocce di pioggia, può essere ottenuta risolvendo l'equazione di Navier-Stokes per il flusso d'aria attorno a una goccia d'acqua. Tuttavia, è difficile ottenere una soluzione teorica dell'equazione di Navier-Stokes per la collection efficiency a causa del complesso campo di flusso attorno alle particelle in caduta (es. Pruppacher e Klett, 1997). Esistono anche varie forme di funzioni di distribuzione della dimensione del numero di gocce di pioggia (ad es. distribuzioni esponenziale, gamma e lognormale) e formulazioni per la velocità terminale a goccia. Diverse scelte sono state fatte da diversi gruppi di modellizzazione ma non è stata effettuata alcuna valutazione sistematica dell'incertezza sulla sensibilità di  $\Lambda$  alla scelta di questi parametri di input. Per quanto riguardano le formule derivate empiricamente (ad esempio, Laakso et al., 2003), mentre queste formule si adattano bene al set di dati da cui sono stati derivati, potrebbero non adattarsi così bene ad altri set di dati.

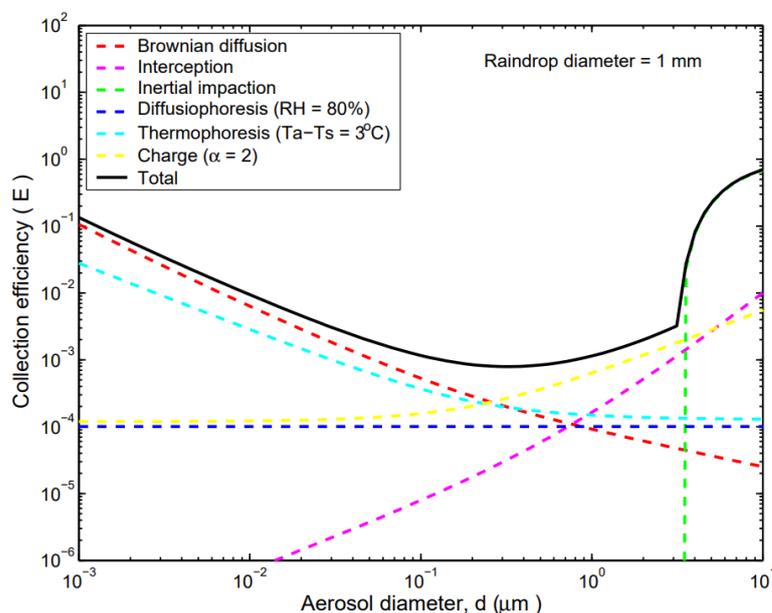
Si presenta lo studio di X. Wang, L. Zhang, and M. D. Moran, realizzato nel 2010, nel quale sono state confrontate parametrizzazioni teoriche ed empiriche con

l'obiettivo di migliorare i modelli CMT dell'aerosol atmosferico.

### 3.3.1 Sensibilità delle parametrizzazioni teoriche di $\Lambda$ di fronte ai diversi parametri input

Esistono diverse formule per la collection efficiency a partire dalle gocce di pioggia, distribuzione dimensionale del numero di gocce di pioggia e velocità terminale della goccia di pioggia, i quali sono i tre parametri di input necessari per calcolare  $\Lambda$ .

#### Collection efficiency



**Figura 3.11:** Contributi di vari processi di raccolta per la collection efficiency CE ( $d_p$ ,  $D_p$ ) in funzione delle dimensioni delle particelle di aerosol per una goccia di pioggia con diametro di  $1\text{ mm}$  [9]

La Figura 3.11 mostra che il contributo dell'impatto inziale domina la collection efficiency per particelle maggiori a  $3.5\ \mu\text{m}$ . Aumenta il contributo di intercettazione con l'aumento della dimensione delle particelle e inizia a essere importante per particelle con diametro compreso tra  $1$  e  $3.5\ \mu\text{m}$ .

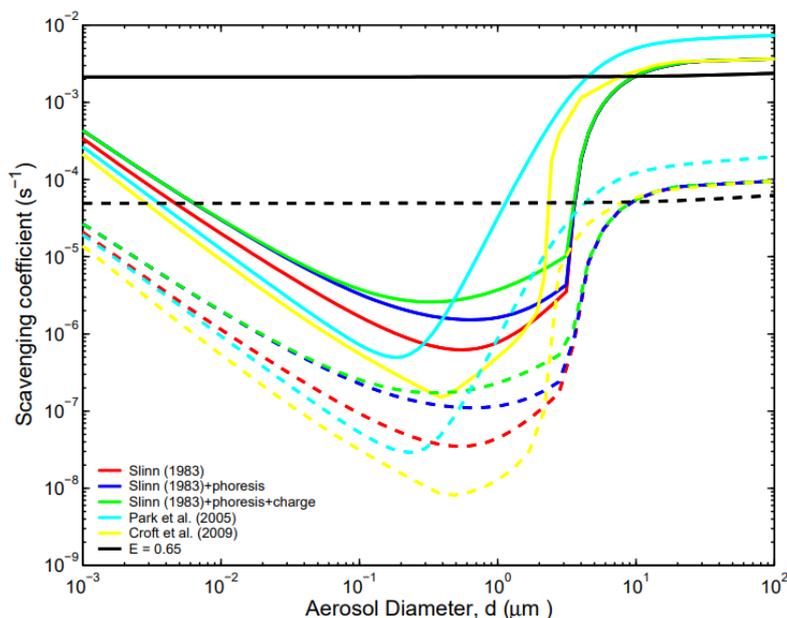
La termoforesi fornisce un contributo comparabile alla diffusione browniana per particelle con  $d_p$  tra  $0.1$  e  $1\ \mu\text{m}$ . Mentre il contributo della diffusiophoresi è più piccola di quella della termoforesi per tutte le dimensioni delle particelle. Infine, il contributo delle spese elettriche aumenta con la dimensione delle particelle ed è

dominante per le particelle con diametro tra  $0.3$  e  $3.5 \mu\text{m}$ . A causa dell'azione combinata dei processi microfisici, la collection efficiency delle particelle di pioggia varia in modo significativo per le diverse dimensioni delle particelle.

La Figura 3.11 indica che la collection efficiency è massima per particelle ultrafina ( $d_p < 0.1 \mu\text{m}$ ) dovute alla diffusione browniana e per particelle di grandi dimensioni ( $d_p > 0.1 \mu\text{m}$ ) dovute all'impatto inerziale. Tuttavia, per particelle con diametro compreso tra  $0.01$  e  $3.00 \mu\text{m}$ , sebbene più di questi meccanismi, ovvero la diffusione browniana, l'intercettazione, la diffusioforesi, la termoforesi e le cariche elettriche, svolgano un ruolo nel processo di raccolta, la grandezza di CE ( $d_p, D_p$ ) è molto bassa ( $< 10^{-2}$ ).

Tuttavia, il paper esposto in questa sezione corrisponde al 2010, l'informazione utilizzata per lo studio di questi fenomeni è precedente a quelli esposti nella sezione che riguarda la collection efficiency di Qu  rel et al. i quali corrispondono al 2014.

Si trovano perci , alcune incongruenze tra quello riportato in questa sezione sulla collection efficiency e quello esposto precedentemente. L'aumento della collection efficiency per particelle di dimensioni inferiori a  $0.7 \mu\text{m}$  modifica quindi il valore del coefficiente di scavenging. Possiamo quindi ritenere validi i risultati osservabili sulla destra della Figura 3.11. Comunque le informazioni sulle particelle molto piccole sono ancora da approfondire.

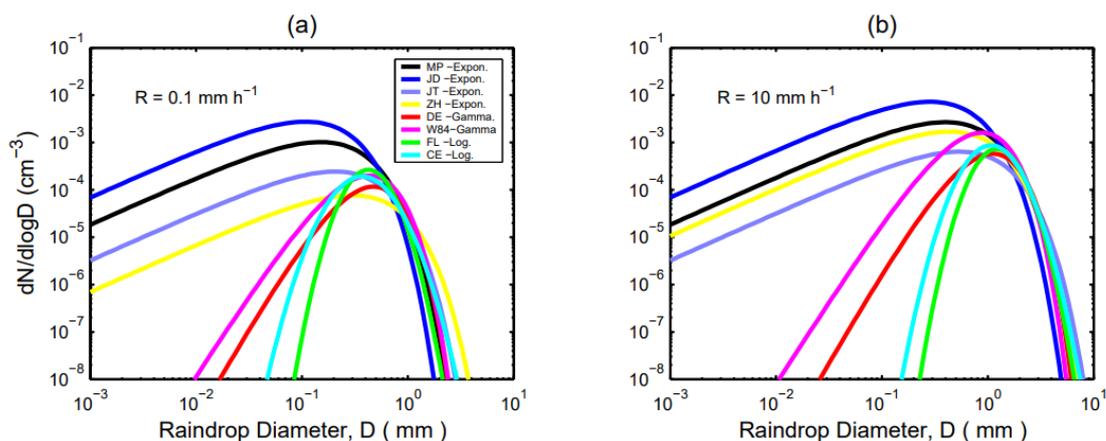


**Figura 3.12:** Coefficienti di scavenging determinati con sei diverse parametrizzazioni della collection efficiency in funzione della dimensione delle particelle per intensità di pioggia di  $0.1 \text{ mm/h}$  (linea tratteggiata) e  $10 \text{ mm/h}$  (linea continua) [9]

Per particelle più grandi, questi processi hanno un effetto molto minore poiché l'impatto inerziale prevale sugli altri meccanismi Figura 3.12.

### Distribuzione del numero di gocce di pioggia

Per indagare la sensibilità di  $\Lambda$  secondo la parametrizzazione del numero di gocce di pioggia, sono state selezionate otto formula empiriche, le quali includono quattro distribuzioni esponenziali, due distribuzioni gamma e due distribuzioni lognormali.



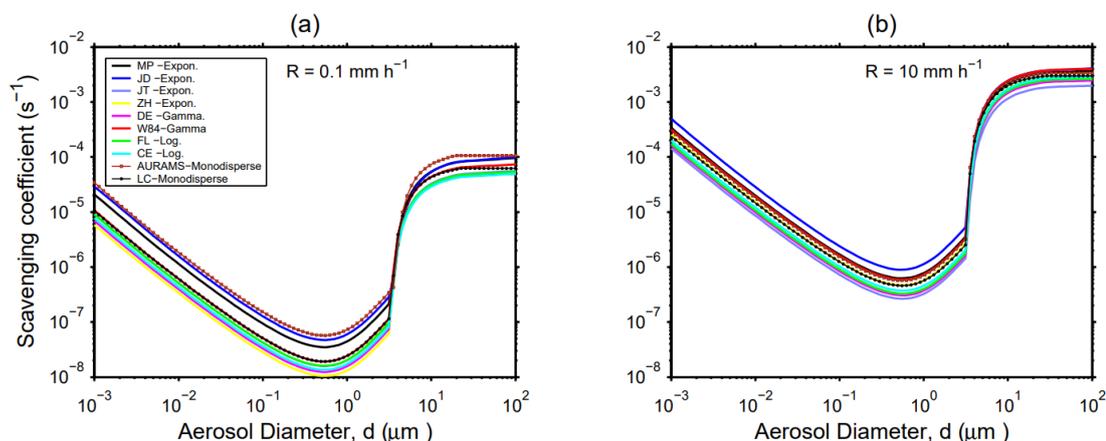
**Figura 3.13:** Otto diverse distribuzioni dimensionali del numero delle gocce di pioggia per intensità delle precipitazioni di (a)  $R = 0.1 \text{ mm/h}$  e (b)  $R = 10 \text{ mm/h}$ : MP – Marshall e Palmer (1948); JD – Joss et al. (1968) condizioni di piovigginie; JT – Joss et al. (1968) condizioni temporalesche; ZH – Zhang et al. (2008); DE – de Wolf (2001); W84 – Willis (1984); FL – Feingold e Levin (1986); e CE – Cerro et al. (1997). [9]

Un'osservazione immediata dalla Figura 3.13 è che le quattro distribuzioni esponenziali producono un numero maggiore di piccole gocce rispetto alle altre distribuzioni.

All'aumentare dell'intensità delle precipitazioni, le modalità di tutte le distribuzioni si spostano su gocce più grandi. Anche la concentrazione numerica aumenta all'aumentare dell'intensità.

La Figura 3.14 mostra un confronto di  $\Lambda$  di fronte alle curve derivate dagli otto diversi spettri di dimensioni di gocce di pioggia considerati nella Figura 3.13 per due diverse intensità di pioggia ( $0.1$  e  $10 \text{ mm/h}$ ). Si osserva una debole influenza di  $\Lambda$  alla distribuzione del numero di gocce.

Chiaramente  $\Lambda$  dipende fortemente dalla distribuzione del numero di gocce. Il valore di  $\Lambda$  calcolato utilizzando diversi spettri di dimensioni di gocce può differire



**Figura 3.14:** Coefficienti di scavenging in funzione della dimensione delle particelle derivati da 10 diverse distribuzioni dimensionali del numero di gocce di pioggia per l'intensità delle precipitazioni di (a)  $R = 0.1 \text{ mm/h}$  e (b)  $R = 10 \text{ mm/h}$ : MP – Marshall e Palmer (1948); JD – Joss et al. (1968) condizioni di piovigginie; JT – Joss et al. (1968) condizioni temporalesche; ZH-Zhang et al. (2008); DE – de Wolf (2001); W84 – Willis (1984); FL – Feingold e Levin (1986); CE – Cerro et al. (1997); AURAMS-Monodisperse – Gong et al. (2006); e LC-Monodisperse – Loosmore e Cederwall (2004). [9]

di un fattore che va da 3 a 5, a seconda della dimensione della particella e l'intensità della precipitazione.

Le distribuzioni delle dimensioni di goccia di MP e JD danno valori di  $\Lambda$  più alti rispetto ad altre distribuzioni per due motivi:

1. Le loro concentrazioni sono più elevate del numero totale di gocce.
2. La loro maggiore frazione di piccole gocce, hanno una maggiore collection efficiency.

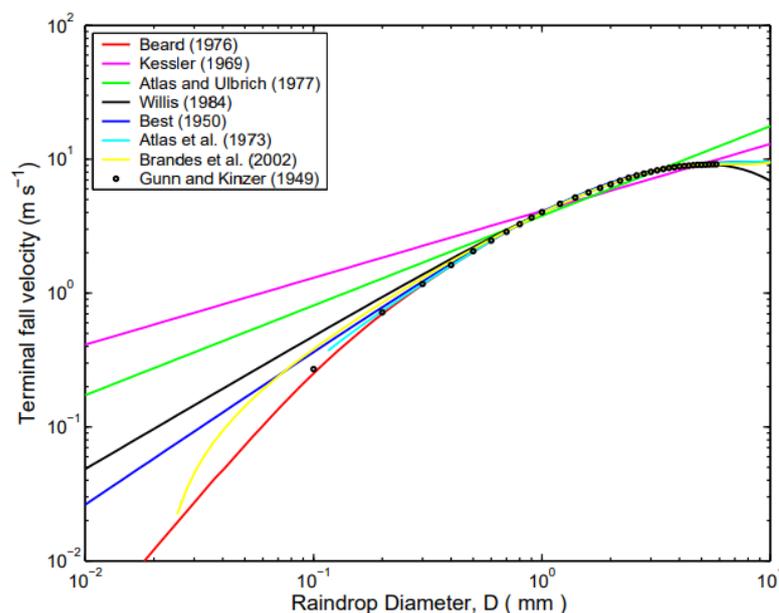
All'aumentare dell'intensità delle precipitazioni, tuttavia, le differenze nella concentrazione del numero totale delle gocce e la frazione di piccole gocce tra i diversi spettri di dimensioni di gocce di pioggia, diminuisce. Questo perché le modalità di tutte le distribuzioni passano a dimensioni di gocce più grandi. Così, le differenze in  $\Lambda$  rispetto all'utilizzo di diversi spettri di dimensioni di gocce di pioggia diminuiscono con l'aumentare dell'intensità delle precipitazioni.

Molti modelli di trasporto di aerosol su larga scala utilizzano una distribuzione monodispersa introducendo un diametro rappresentativo  $D_p$  per sostituire la distribuzione della goccia di pioggia nei calcoli di  $\Lambda$ , con una funzione di legge di potenza dell'intensità delle precipitazioni comunemente usata per parametrizzare  $D_p$ .

In Figura 3.14 sono mostrati due profili  $\Lambda$  generate sulla base di diverse formulazioni di  $D_p$ . In AURAMS viene usata una distribuzione monodispersa e un'altra in NARAC/LLNL.

Si può notare che i  $\Lambda$  generati da questi due approcci semplificati sono simili a quelli ottenuti da una piena integrazione su uno spettro di dimensioni di gocce polidisperse.

### Velocità terminale delle gocce



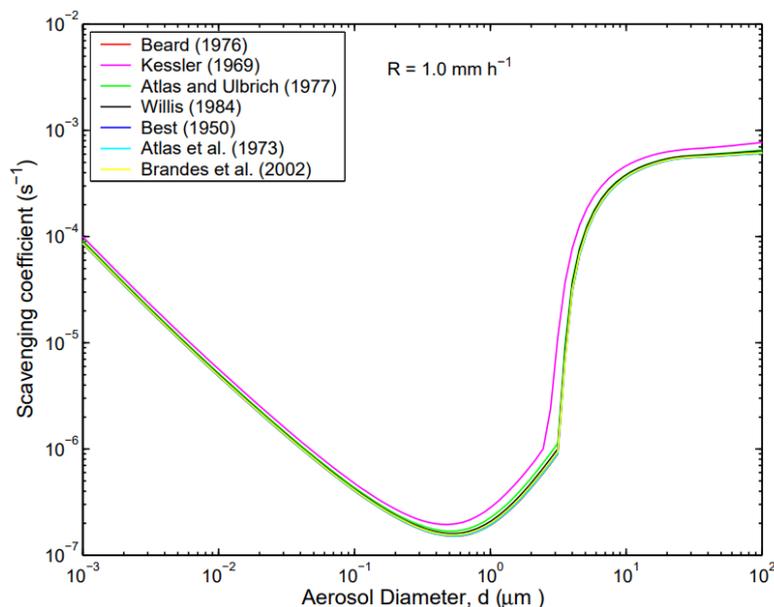
**Figura 3.15:** Velocità terminale della goccia di pioggia rispetto al diametro della goccia di pioggia per sette diverse parametrizzazioni e misurazioni da Gunn e Kinzer (1949). [9]

La Figura 3.15 mostra le velocità di caduta terminale delle gocce di pioggia derivato dalle sei formule empiriche e lo schema teorico di Beard e le misurazioni riportato da Gunn e Kinzer (1949). Si noti che le formule di Atlas et al. (1973) e Brandes et al. (2002) danno valori negativi quando una goccia ha un diametro inferiore a  $0.10 \text{ mm}$  e  $0.02 \text{ mm}$ , rispettivamente.

Si può vedere che la maggior parte formule, eccetto la formula della legge di potenza di Kessler (1969), concordano bene con i dati sperimentali per le gocce nell'intervallo di dimensioni da  $0.5 \text{ mm}$  a  $5 \text{ mm}$ .

Per gocce di dimensioni superiori a  $5 \text{ mm}$ , tuttavia, formule diverse producono velocità terminali abbastanza diversi

Per gocce più piccole di  $0.5 \text{ mm}$  (vale a dire, negli Stokes e nei regimi transitori inferiori), la maggior parte delle formule sovrastima la velocità di caduta. Si nota che la formula teorica di Beard (1976) concorda meglio con i dati sperimentali.



**Figura 3.16:** Coefficienti di scavenging risolti in funzione della dimensione delle particelle per sette diverse parametrizzazioni della velocità terminale supponendo un'intensità della pioggia di  $1.0 \text{ mm/h}$  [9]

Anche le formule che danno valori di velocità più alti tendono a dare valori più alti di  $\Lambda$ . Inoltre, per diverse intensità di pioggia, i test di sensibilità hanno mostrato la differenza in valori di  $\Lambda$  dall'utilizzo di diverse formule di velocità, questo diminuisce all'aumentare dell'intensità delle precipitazioni. L'incertezza maggiore si verifica per condizioni di pioggia molto deboli (cioè pioggerella) dovute alle alte concentrazioni di piccole gocce.

Si può notare che l'incertezza in  $\Lambda$  dall'uso di diverse formule della velocità terminale è generalmente all'interno di un fattore 2 per qualsiasi dimensione delle particelle, molto più piccolo delle incertezze causate dalla scelta di diverse collection efficiency delle gocce e di diversi spettri delle dimensioni delle goccioline.

I coefficienti di scavenging dalla maggior parte delle misurazioni sul campo per trarre le conclusioni precedenti sono stati ottenuti ad altezze prossime alla superficie dove la turbolenza e la diffusione verticale erano più forti. Questi processi fisici potrebbero avere notevolmente migliorato la rimozione delle particelle sia aumentando la collection efficiency, sia tramite il trasporto di alcune particelle verso l'alto dove potrebbero poi essere spazzate via da processi microfisici all'interno di

nubi basse. È probabile che questi processi aggiuntivi siano la causa principale della grande discrepanza tra i valori teorici e quelli derivati dal campo.

Di conseguenza, dovrebbero essere utilizzate le formule empiriche per  $\Lambda$  con grande cautela nei modelli di trasporto aerosol poiché molti ulteriori processi che contribuiscono direttamente o indirettamente alla rimozione delle particelle sono già stati considerati separatamente.

Le attuali formule teoriche possono produrre valori di  $\Lambda$  comparabili a quelli derivati da esperimenti controllati (dove processi aggiuntivi che contribuiscono alla rimozione delle particelle sono stati limitati) e sembrano essere una scelta ragionevole per l'uso nei modelli di trasporto di aerosol.

# Capitolo 4

## Strumentazione

Per fare le analisi proposte sono state utilizzate diverse strumentazioni. Per la calibrazione del simulatore è stata necessaria la misura dell'intensità di pioggia, quindi, sono state effettuate due tipi di misurazioni: una mediante un disdrometro e l'altra in maniera volumetrica. Inoltre, per le analisi che riguardano l'abbattimento dry dell'aerosol è stato utilizzato un impattatore elettrico a bassa pressione ELPI (*electrical low pressure impactor*). La definizione delle curve granulometriche delle polveri testate è stata condotta impiegando un analizzatore di particelle CPS *Disc Centrifuges*. Un'analisi qualitativa degli aerosol e delle loro caratteristiche granulometriche è stata condotta con l'ausilio di un microscopio ottico e un microscopio elettronico SEM.

### 4.1 Misure della pioggia

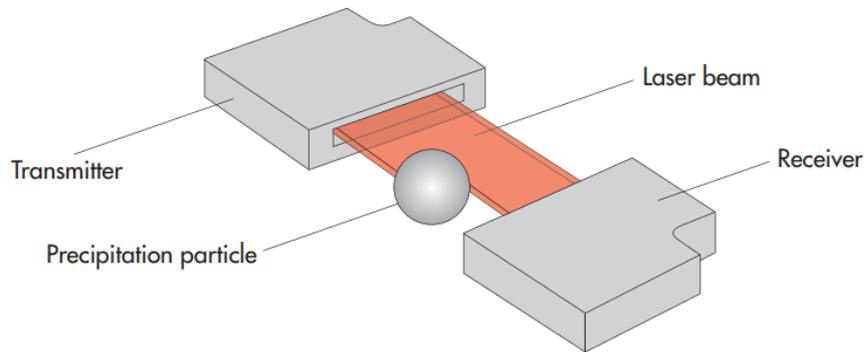
#### 4.1.1 Disdrometro

Il disdrometro impiegato per le misurazioni corrisponde a un disdrometro PDO (Parsivel Della OTT). Il disdrometro funziona con un sensore laser che produce una striscia di luce. L'emittore e il recettore sono integrati in una custodia protettiva come si può vedere nella Figura 4.1

Il sistema misura ogni tipo di precipitazione, il suo intervallo va da  $0.2$  a  $8.0$   $mm$  per particelle liquide e da  $0.2$  a  $25.0$   $mm$  per particelle solide.

Il sensore utilizzato rileva la precipitazione in maniera ottica e l'informazione viene processata e salvata in un processore di segnale digitale. Esso emette un telegramma di dati ogni  $60$  s.

Per cogliere l'informazione delle precipitazioni, se non ci sono particelle che attraversano il laser, il recettore riceve il voltaggio massimo emesso dall'emittore. Nel momento che una particella attraversa il raggio laser, blocca la porzione di



**Figura 4.1:** Principio funzionale del Parsivel2 della OTT [10]

raggio corrispondente al suo diametro, il quale riduce il voltaggio ricevuto dal recettore e questo effetto permette di determinare la dimensione della particella.



**Figura 4.2:** Disdrometro utilizzato nel simulatore di pioggia

Per quanto riguarda la velocità della particella, viene misurata la durata del segnale. Appena una particella di precipitazione entra nella striscia luminosa, si

accende un segnale che termina quando la particella ha completamente lasciato la striscia.

Dalla dimensione della particella e la sua velocità si possono determinare: le dimensioni dello spettro, il tipo di precipitazione, l'energia cinematica, l'intensità della precipitazione, la riflettività del radar e la visibilità.

Nella Figura 4.2 si osserva una protezione contro gli schizzi delle particelle sulla parte superiore del sensore che impedisce alle particelle di deviare, entrare nel raggio del laser e falsare le misure.

Durante l'esperimento, il disdrometro ha permesso di classificare, attraverso le dimensioni delle gocce, il tipo di distribuzione generata dal simulatore di pioggia. In questo modo, è stato possibile realizzare la curva della pioggia monodispersa. Inoltre, sempre attraverso il disdrometro, sono state ottenute le misure per fare la simulazione di piogge polidisperse il più simile possibile a quelle reali.

#### 4.1.2 Misure Volumetriche

Per quanto riguarda le misure realizzate in maniera volumetrica, l'obiettivo è stato quello di determinare l'intensità di pioggia generata dal simulatore per diversi carichi; in questo modo è stato possibile realizzare la curva di calibrazione del sistema.



**Figura 4.3:** Vasche per determinare l'intensità distribuite nell'area di interesse del simulatore di pioggia

Come si osserva nella Figura 4.3, per determinare l'intensità sono state utilizzate nove vasche di  $0.24 \text{ m}^2$  distribuiti all'interno dell'area di interesse del simulatore.

Ognuna di esse è stata collocata in un tempo noto e, poi, tolta dopo un  $\Delta t$ , determinato secondo il carico imposto nel simulatore di pioggia. Più alto era il carico, minore era l'intervallo di raccolta di acqua, dato che si cercava di ottenere per ogni prova la stessa quantità volumetrica.

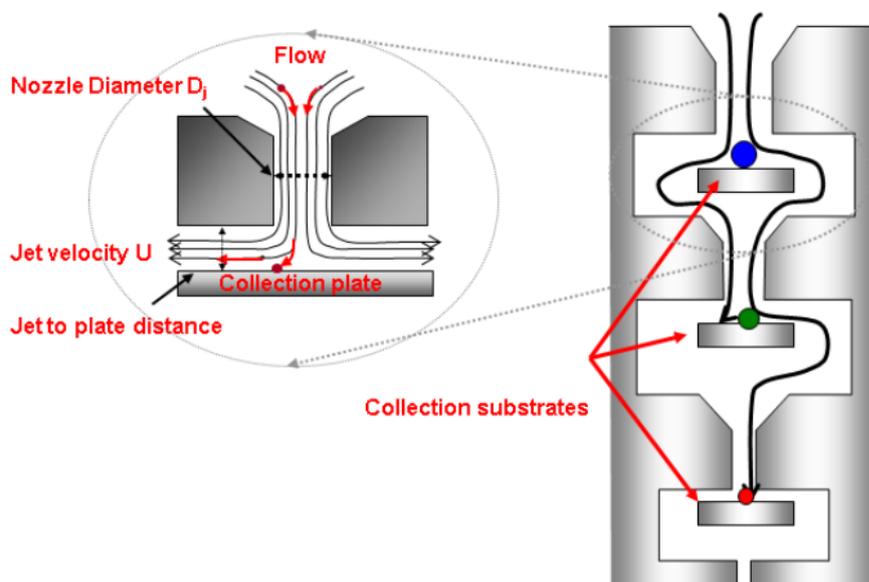
Utilizzando una caraffa graduata è stato determinato il volume di acqua raccolto e, conoscendo l'intervallo nel quale quest'acqua era stata rilasciata dal simulatore e l'area nella quale era stata raccolta, si è calcolata l'intensità generata:

$$\text{intensità} = \frac{\text{Volume}}{\text{Area}} \cdot \text{tempo} \quad (4.1)$$

## 4.2 Caratterizzazione degli aerosol

### 4.2.1 ELPI

Nell'ELPI viene utilizzato un impattore a cascata per raccogliere selettivamente le dimensioni delle particelle.



**Figura 4.4:** Principio di funzionamento dell'impattore [11]

Un impattore è un semplice dispositivo avente due piastre collineari di cui una ha a piccolo ugello al suo interno. La piastra con gli ugelli è chiamata piastra a getto mentre l'altra, piatto di raccolta. Come osservabile nella Figura 4.4 l'aerosol passa attraverso gli ugelli della piastra del getto con alta velocità e fa una brusca

virata per fluire tra le piastre. Le particelle con che sono maggiori a una certa dimensione caratteristica per le dimensioni dell'impattatore, non possono fare la brusca virata e impattano sul secondo piatto. Gli impattori a cascata sono costituiti da diversi stadi con diminuzione nel diametro di taglio.

Lo stadio più alto (stadio 15) nell'impattatore Dekati ha un diametro di taglio di circa  $15 \mu m$  e lo stadio più basso (stadio 2) di circa  $17 nm$ .

Il diametro di taglio per un impattore è definito come la dimensione delle particelle raccolte con un 50% di efficienza. Idealmente, la collection efficiency corrisponde a una funzione di passaggio, in modo che le particelle più grandi di un certo valore siano raccolte sullo stadio dell'impattore, mentre tutte le particelle più piccole di una certa dimensione continuano con il flusso. Tuttavia, a causa del rimbalzo e del soffiaggio, alcune delle particelle più grandi vanno a stadi inferiori rispetto a quelli che dovrebbero e, a causa della diffusione, alcune delle più piccole rimangono sugli stadi superiori. Così la vera collection efficiency di uno stadio d'urto è una funzione a forma di  $S$ .

## 4.2.2 CPS

Il CPS è un analizzatore di granulometria per la misurazione di particelle in un intervallo da  $0.01 \mu m$  a  $40.00 \mu m$ . Il sistema è più efficace con particelle comprese tra  $0.02 \mu m$  e  $30.00 \mu m$ . L'analizzatore misura le distribuzioni delle dimensioni delle particelle utilizzando la sedimentazione centrifuga all'interno di un disco rotante otticamente trasparente riempito di fluido. La sedimentazione è stabilizzata da un gradiente di densità all'interno del fluido e l'accuratezza delle dimensioni misurate è assicurata mediante l'uso di uno standard di calibrazione delle dimensioni noto prima di ogni test.

La concentrazione di particelle ad ogni dimensione è determinata misurando continuamente la torbidità del fluido in prossimità del bordo esterno del disco rotante. Le misurazioni della torbidità vengono convertite in una distribuzione di peso utilizzando i calcoli di diffusione della luce di Mie Theory. La distribuzione del peso viene convertita in un'area superficiale o in una distribuzione numerica, se necessario.

Il software *Disc Centrifuge Control System* (DCCS), che funziona su un computer, gestisce tutta la raccolta dei dati e l'analisi, e imposta anche la velocità di rotazione del disco in base al tipo di materiale analizzato e alla gamma di dimensioni misurata. Tutte le distribuzioni vengono registrate su un disco rigido nel computer per un successivo recupero. Il formato di presentazione per le distribuzioni stampate ha un'ampia gamma di opzioni.

La velocità di sedimentazione all'interno del disco rotante è controllata da quattro fattori: la dimensione delle particelle, la differenza di densità tra le particelle e

il fluido attraverso il quale passano, la viscosità del fluido e la forza del campo centrifugo (rotazionale velocità).

Stokes ha mostrato che quando le particelle si depositano in un campo gravitazionale in un determinato insieme di condizioni, le forze che agiscono sulla particella sono in perfetto equilibrio e la particella si muove a una velocità costante (che può essere prevista) dopo un breve periodo di accelerazione iniziale.

Le condizioni sono:

1. La particella deve essere liscia, sferica, e abbastanza rigida da non deformarsi a causa delle forze che agiscono su di essa.
2. La particella deve essere piccola rispetto al contenitore del fluido: l'albero del fluido deve avere dimensioni essenzialmente infinite rispetto alla dimensione della particella.
3. La particella che compone il fluido può essere molto più piccola della particella di sedimentazione, in modo che il fluido sia essenzialmente omogeneo.
4. La velocità di decantazione dev'essere sufficientemente lenta in modo che tutte le forze viscosive provengano da un flusso regolare (non turbolento).

Queste condizioni sono normalmente soddisfatte per la maggior parte dei campioni eseguiti sul CPS Disc Centrifuge utilizzando i normali parametri operativi. Ci sono, però, due situazioni abbastanza comuni in cui queste condizioni non sono completamente soddisfatte.

### **Particelle non sferiche**

Le particelle non sferiche si depositano sempre a una velocità inferiore rispetto a quella della sfera dello stesso peso, quindi, le particelle non sferiche sono riportate come più piccole della loro dimensione corretta.

Tutte le particelle non sferiche possono essere misurate per determinare la distribuzione del *diametro sferico equivalente*. Sebbene questa distribuzione non sia corretta in senso assoluto, consente confronti accurati delle dimensioni per campioni simili.

Finché la forma delle particelle non cambia in modo significativo da un campione all'altro, la misurazione del diametro sferico equivalente sarà una buona rappresentazione della dimensione relativa delle particelle e consentirà un confronto accurato dei diversi campioni.

Se si cerca una distribuzione del peso ragionevolmente accurata per le particelle non sferiche, ci sono due passaggi che si possono effettuare per produrre distribuzioni molto vicine a quella corretta:

1. Immettere il fattore "non-sfericità" appropriato nella definizione della procedura.
2. Ridurre la densità delle particelle nella definizione della procedura per compensare una sedimentazione più lenta del previsto.

### Fluido omogeneo

Il requisito per un fluido che appaia completamente "omogeneo" rispetto alle dimensioni della particella non è completamente soddisfatto quando la particella è sufficientemente piccola da mostrare moto browniano.

Il moto browniano è un movimento casuale e irregolare di particelle molto piccole sospese in un liquido. È causato da irregolarità momentanee negli impatti delle molecole di fluido sulle superfici della particella. L'irregolarità è dovuta alla natura del tutto casuale degli impatti. Quando le particelle sono molto piccole, c'è una probabilità finita che, durante un brevissimo periodo di tempo, la forza netta esercitata sulla particella dagli impatti molecolari su una metà della superficie sia maggiore che sulla metà opposta della superficie. Ciò fa sì che la particella si muova brevemente nella direzione della forza netta. Un movimento browniano significativo si verifica solo per particelle di diametro inferiore a circa  $1-2 \mu m$ .

Il moto browniano è un processo di diffusione. Le singole particelle si diffondono nel tempo a seconda della loro dimensione: le particelle grandi diffondono pochissimo, le particelle piccole si diffondono di più. All'interno della centrifuga a disco, una stretta banda di particelle si allarga durante la sedimentazione a una velocità che dipende dalla dimensione delle particelle.

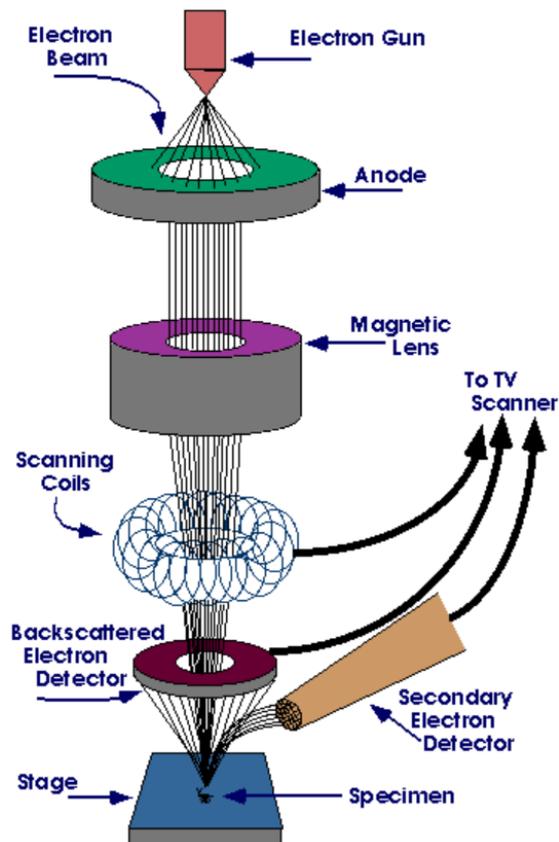
Normalmente, la velocità di diffusione è proporzionale alla radice quadrata inversa del diametro della particella. Poiché il moto browniano è completamente casuale, la maggior parte del movimento della particella si annulla nel tempo. La posizione più probabile per una particella dopo un lungo tempo di diffusione è la sua posizione originale.

Nella centrifuga a disco, una banda molto stretta di particelle si allarga gradualmente a causa della diffusione; nel frattempo le particelle sedimentano e la banda assume una forma gaussiana, ma il centro della banda arriva sempre al raggio del rivelatore esattamente nello stesso momento in cui sembrerebbe non ci sia stato alcun moto browniano. L'effetto netto del moto browniano è la perdita di risoluzione, non un errore nella dimensione del picco riportata.

### 4.2.3 SEM

Il SEM corrisponde a un microscopio elettronico a scansione, che utilizza gli elettroni al posto della luce per formare un'immagine. Presenta molti vantaggi rispetto ai microscopi tradizionali, consente di mettere a fuoco più campioni simultaneamente,

la risoluzione permette di ingrandire i campioni a livelli molto elevati con un controllo sul grado di ingrandimento maggiore. Questi vantaggi e altri, come le effettive immagini molto nitide, fanno di questo microscopio uno strumento molto utile.



**Figura 4.5:** Schema di funzionamento del SEM [12]

Il SEM è uno strumento che produce un'immagine ampiamente ingrandita utilizzando elettroni invece della luce per formare un'immagine. Un fascio di elettroni viene prodotto nella parte superiore del microscopio da un cannone elettronico come si può osservare nella Figura 4.5. Il fascio di elettroni segue un percorso verticale attraverso il microscopio, che è tenuto nel vuoto. Il raggio viaggia attraverso campi elettromagnetici e lenti, che focalizzano il raggio verso il campione. Una volta che il raggio colpisce il campione, gli elettroni e i raggi X vengono espulsi dal campione.

I rivelatori raccolgono questi raggi X, elettroni retrodiffusi ed elettroni secondari e li convertono in un segnale che viene inviato a uno schermo simile a uno schermo televisivo che produce l'immagine finale.

Poiché il SEM utilizza condizioni di vuoto e utilizza elettroni per formare un'immagine, è necessario eseguire preparazioni speciali sul campione. Tutta l'acqua deve essere rimossa dai campioni, perché vaporizzerebbe nel vuoto. Tutti i metalli sono conduttivi e non richiedono preparazione prima di essere utilizzati. Tutti i non metalli devono essere resi conduttivi coprendo il campione con un sottile strato di materiale conduttivo. Questo viene fatto utilizzando un dispositivo chiamato *sputter coater*.

Lo sputter coater utilizza un campo elettrico e gas argon. Il campione viene posto in una piccola camera sottovuoto. Il gas argon e un campo elettrico provocano la rimozione di un elettrone dall'argon, caricando positivamente gli atomi. Gli ioni argon vengono quindi attratti da una lamina d'oro carica negativamente. Gli ioni argon fanno cadere gli atomi d'oro dalla superficie della lamina d'oro nel momento che cadono, si depositano sulla superficie del campione producendo un sottile rivestimento d'oro.

## 4.3 Gli Aerosol

### 4.3.1 ISO Fine 12103-1, A2

#### Identificatore del prodotto

Queste polveri vengono anche indicati come: Arizona sand including Arizona Test Dust, Arizona Road Dust, Arizona Silica, AC Fine and AC Coarse Test Dusts, SAE Fine and Coarse Test Dusts, J726 Test Dusts, ISO 12103-1, A1 Ultrafine Test Dust, ISO 12103-1, A2 Fine Test Dust, ISO 12103-1, A3 Medium Test Dust and ISO 12103-1, A4 Coarse Test Dust, MIL STD 810F Blowing Dust, MIL STD 810G Blowing Dust.

#### Storia

Questo tipo di polveri viene particolarmente utilizzato nella valutazione dei filtri. L'uso dell'Arizona sand come contaminante de prova risale a prima del 1940. Il Codice *Air Cleaner Test Code*, *SAE Journal* propone e fornisce un esame precoce della forma delle particelle, dimensioni e metodi di analisi accettati a quell'epoca. Nel *Air Cleaner Test Code-Preparation of Air Cleaner Test Dust*, *SAE Handbook*, 1943 si sottolinea che a causa dell'assenza di informazioni certe e mancanza quasi unanime di accordo da parte degli interessati, che non è stato possibile impostare una polvere di prova standard anche se probabilmente non esiste un singolo elemento che influenzi in misura così grande l'efficienza di un filtro dell'aria come la finezza della polvere utilizzata per la prova. Comunque sono stati riscontrati risultati soddisfacenti nello sviluppo di depuratori d'aria con un alto grado di efficienza sul campo.

## Composizione chimica

CAS No	Componenti	Quantità
14808-60-7	Silice (polvere fine)	69-77%
1344-28-1	Ossido di Alluminio	8-14%
1305-78-8	Ossido di Calcio (minerale)	2.5-5.5%
12136-45-7	Ossido di Potassio (minerale)	2-5%
1313-59-3	Ossido di Sodio (minerale)	1-4%
1309-37-1	Ossido di Ferro III (ematite)	4-7%
1309-48-4	Ossido di Magnesio	1-2%
13463-67-7	Biossido di Titanio	0-1%

**Tabella 4.1:** Dati Misurati e Intensità Calcolata dell'Ago [13]

### Misure di sicurezza

Riguardo a questi tipi di polveri non devono essere inalate, non devono essere utilizzate mentre si mangia o beve, bisogna lavare spesso mani e viso per proteggere la pelle dato che possono essere irritabili. Quindi, bisogna utilizzare dispositivi con ventilazione per evitare la distribuzione di essi nell'ambiente lavorativo.

### Caratteristiche tipiche delle particelle ISO Fine

#### *Irregolarità*

Le particelle ISO fine tendono ad essere regolari, hanno un valore di media e mediana di  $0.2$ , questo vuol dire che l' $80\%$  delle volte le particelle si sovrappongono ad una elisse.

#### *Proporzioni*

Il valore tipico di proporzionalità in questo tipo di particelle si trova attorno ai  $1.4$ . Considerando che le sfere hanno un valore di proporzionalità di  $1$ , queste particelle non sono proprio oblunghe.

#### *Rettangolarità*

La rettangolarità corrisponde a una misura dell'irregolarità, i valori attorno ad uno indicano un'alta regolarità e una miglior adattabilità ad essere descritte da un rettangolo. Per le ISO Fine questo valore si trova sui  $0.65$ .

#### *Compattezza*

Se la compattezza assume un valore di uno indica una particella circolare mentre sono associati valori più alti quando le strutture sono più articolate. Le ISO Fine tendono ad avere una compattezza di  $1.69$ .

#### *Solidità/Convessità*

Queste sono misure della convessità del profilo delle particelle (in contrapposizione alla concavità). I valori più vicini a uno indicano una particella principalmente convessa. Per quanto riguardano le ISO Fine sono in gran parte convessa con valori tra 0.93 e 0.84.

*Rotondità*

Per le ISO Fine gli angoli sono moderatamente rotondi (ne perfettamente rotondi ne affilati). Le sfere hanno una rotondità di 1, mentre le ISO Fine si trovano attorno ai 0.58.

Si può quindi dire che le ISO Fine sono delle particelle cristalline, compatte, regolari, convesse e non facilmente descrivibili geometricamente. Nella Figura 4.6 si osserva la distribuzione di questi parametri.

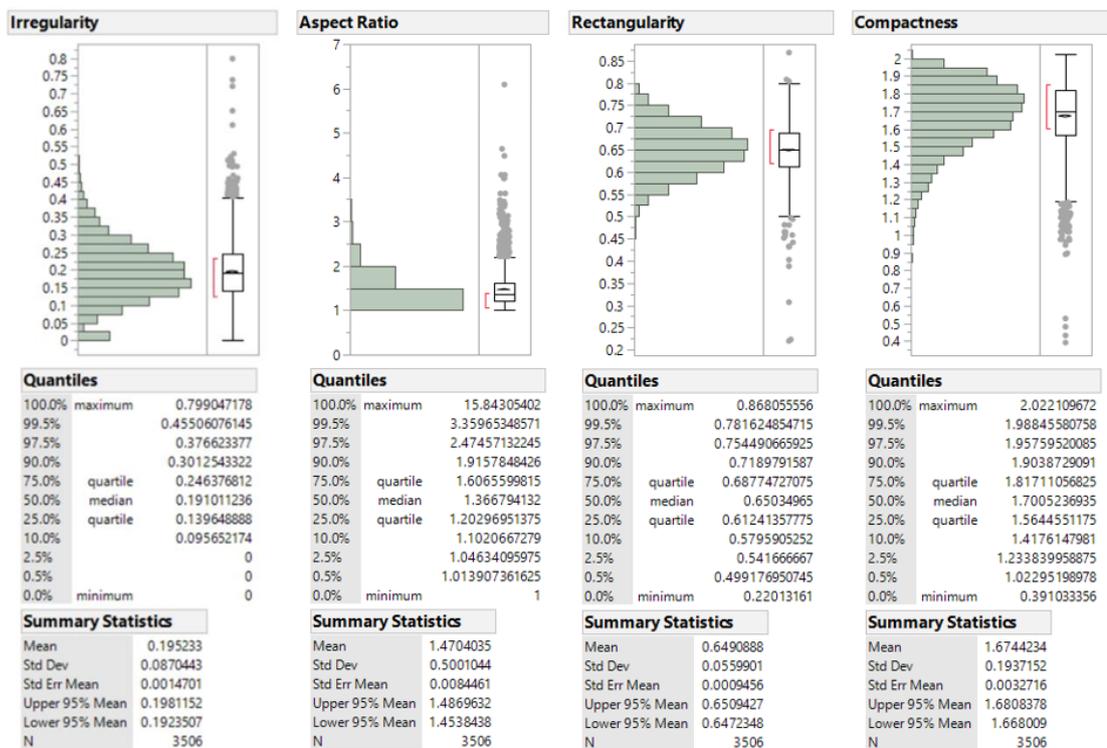


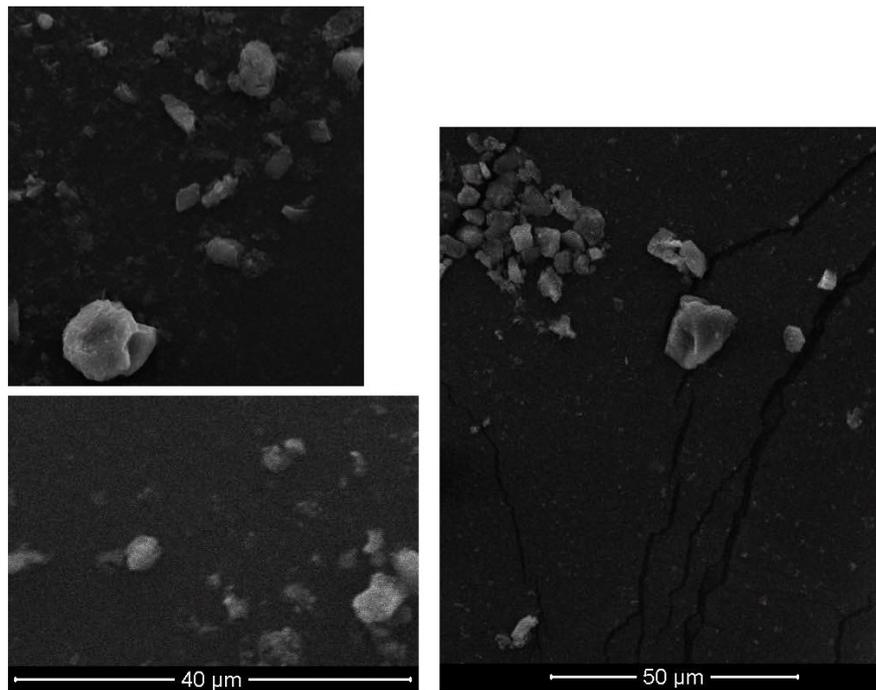
Figura 4.6: Distribuzione dei parametri di forme delle ISO Fine [14]

Nella tabella successiva vengono raccolte le dimensioni delle particelle date dal fornitore per volume.

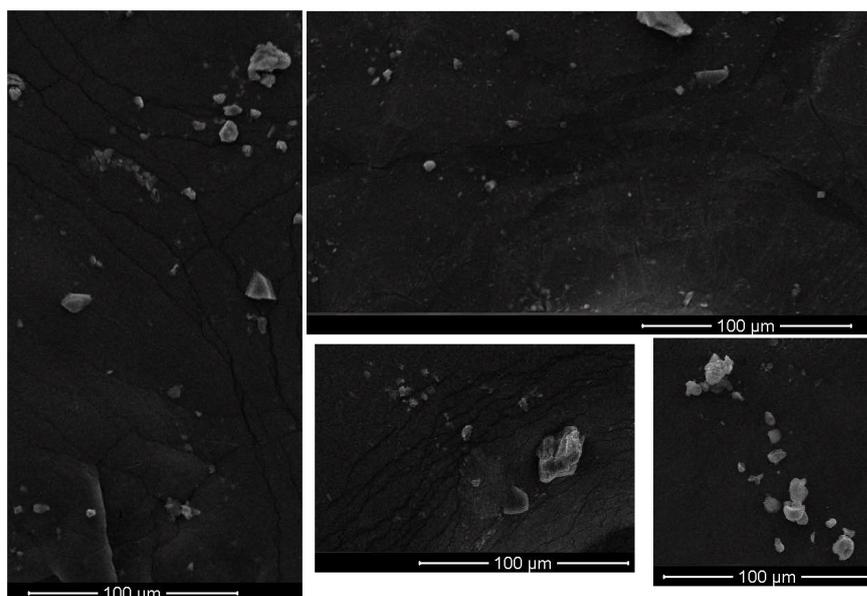
Nelle Figura 4.7 e Figura 4.7 possiamo osservare le caratteristiche descritte in precedenza e la elevata presenza di particelle fini che permette una simulazione approssimativa del particolato atmosferico, a partire dalle immagini realizzate in laboratorio tramite SEM.

Size ( $\mu\text{m}$ )	ISO 12103-1, A2 Fine Test Dust % Less Than
0.97	4.5 - 5.5
1.38	8.0 - 9.5
2.75	21.3 - 23.3
5.50	39.5 - 42.5
11.00	57.0 - 59.5
22.00	73.5 - 76.0
44.00	89.5 - 91.5
88.00	97.9 - 98.9
124.50	99.0 - 100.0
176.00	100.0

**Tabella 4.2:** Distribuzioni delle dimensioni delle particelle ISO Fine per volume [13]



**Figura 4.7:** Immagine ISO Fine utilizzate nelle sperimentazioni realizzate nel SEM



**Figura 4.8:** Immagine ISO Fine utilizzate nelle sperimentazioni realizzate nel SEM

### 4.3.2 Polline

Il pino è una conifera sempreverde membro della famiglia delle Pinaceae originaria dell'emisfero settentrionale, suo polline viene prodotto dall'albero ogni primavera fino all'inizio dell'estate.

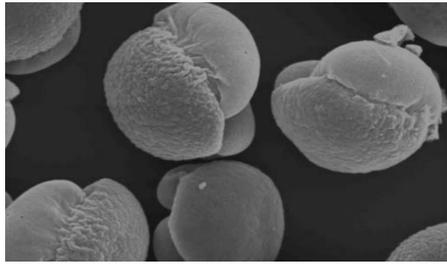
Il polline di pino è stato utilizzato nella medicina tradizionale cinese da oltre 2000 anni come tonico per tutto il corpo e come alimento tonico Jing. È particolarmente ricco di sostanze nutritive tra cui le vitamine B1, B2, B6, E, C, D2, D3, A, nicotinamide, acido folico, b-carotina, potassio, sodio, calcio, magnesio, fosforo, ferro, manganese, rame, zinco e selenio.

Il polline di pino Masson contiene circa 29% di lignina, 14% di cellulose, 13% micellulose e solo il 15% di carboidrati solubili.

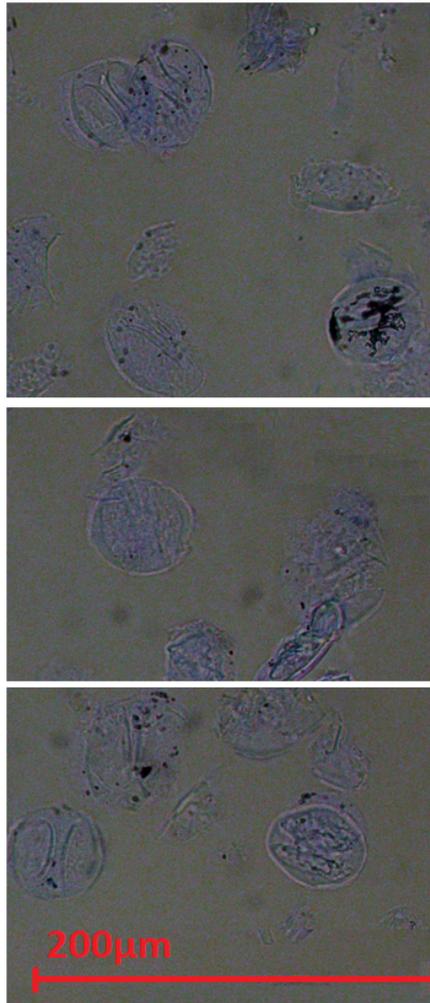
Nella Figura 4.9 è possibile osservare la forma di questo aerosol, ha un diametro attorno ai  $40\ \mu\text{m}$  e sono costituiti da una parte principale che ne copre due sacchi, che fungono da *airbag* per i pini anemogamici.

Nella Figura 4.10 vengono riportate le immagini prese nel (microscopio del laboratorio) con le mostre di polline utilizzate per la prova.

Inoltre, vengono anche riportate le immagini al SEM dello studio realizzato da Wang Ya-min, et al nel 2005 dove possiamo distinguere le particelle di polline. Nello studio è stata analizzata la differenza nella morfologia tra quello sano e quello spezzato.

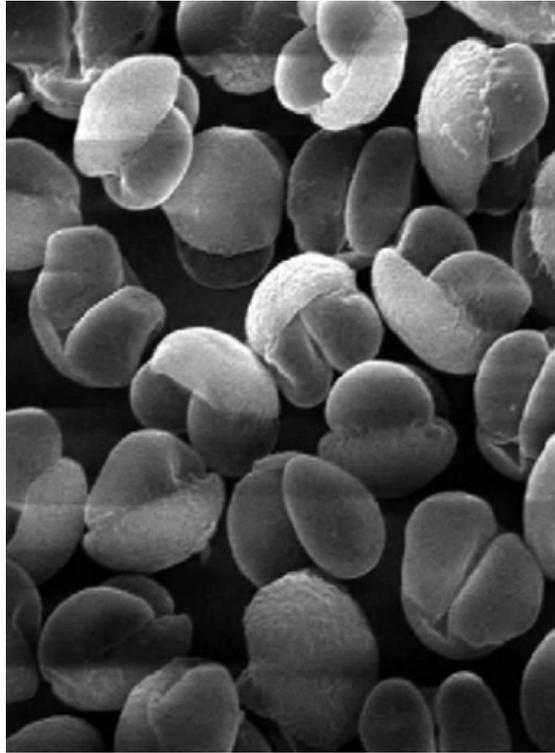


**Figura 4.9:** Immagine al SEM della mostra di polline [15]



**Figura 4.10:** Immagine al microscopio elettronico della mostra di polline utilizzata per l'analisi della deposizione di particolato

Come si osserva nelle immagini scattate in laboratorio, non tutte le particelle mantengono la loro forma. Il campione generato in laboratorio è stato miscelato con olio per ottenere una visuale migliore della particella. Nella preparazione del campione alcune particelle si sono spezzate, rappresentando comunque le particelle che vengono spruzzate in aria durante la prova.



**Figura 4.11:** Analisi al SEM di particelle di polline di *Pinus Massoniana* [16]

Come risultato del SEM si conclude che i granuli pollinici sono oblungi o sub-sferoidali nella faccia distale e prossimale. La scultura in esina è granulare, esiste anche una differenza tra i grani pollinici e quei granuli spezzati. Il principale cambiamento morfologico del polline rotto sono gli airbag separati dalle particelle di polline, e una parte del corpo principale di particelle di polline rotta.

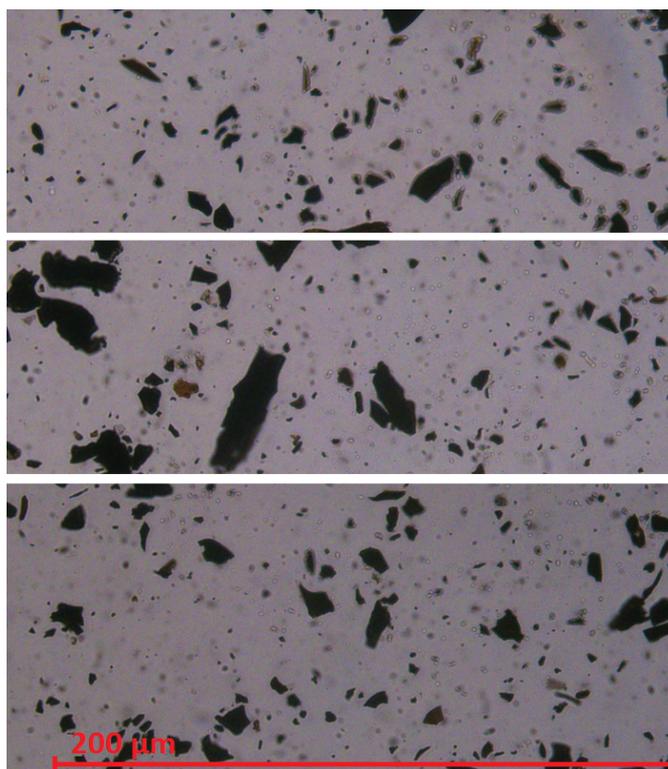
Il contenuto degli oligoelementi è diverso nei diversi tipi di polline. L'intensità dell'elemento nel polline di pino massone spezzato è nettamente superiore a quella del polline naturale di pino massone.

### 4.3.3 Biochar

Il Biochar corrisponde a un prodotto ricco di carbonio che viene generato dalla pirolisi della biomassa sotto condizioni di ossigeno limitato. Generalmente l'aggiunta

di questo aerosol ai terreni carenti di nutrienti e/o inclini alla siccità migliora il sequestro del carbonio nel suolo, migliorando anche la capacità di stoccaggio dell'acqua.

Le particelle di biochar hanno una forma allungata, questo è osservabile nella Figura 4.12 realizzata nel microscopio, coprendo dimensioni minori rispetto alle particelle di polline. Questi risultati implicano che i biochar data l'elevata intraporsità e le forme irregolari, aumentano in modo più efficace lo stoccaggio dell'acqua nei terreni grossolani.



**Figura 4.12:** Analisi al microscopio elettronico di particelle di Biochar del Politecnico di Torino

Nella Figura 4.13 vengono raccolte alcune caratteristiche morfologiche di questo tipo di aerosol.

#### 4.3.4 Fly Ash

Le caratteristiche riportate di questi materiali sono state ricavate dallo studio su *Morphology and chemical composition of mineral matter present in fly ashes of bituminous coal and lignite* realizzato nel 2020 da E. Strzałkowska

<i>Biochar</i>	
Feedstock	Mesquite
Heating rate (°C/min)	5
Heating duration (hours)	4
Pyrolysis temperature (°C)	400
Feedstock particle size before pyrolysis (mm)	2.00–2.30
Biochar sieved particle size used in experiment (mm)	<0.251, 0.251–0.853, 0.853–2.00
Biochar rate (wt%)	2
Ash Content (wt%)	4.26
pH	7.41
Electric Conductivity (µS/cm)	110
C %	73.0 ± 0.4
H %	3.2 ± 0.1
N %	0.74 ± 0.01

**Figura 4.13:** Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties [17]

Utilizzando tecniche di ricerca innovative, tra le altre: SEM con EDS rivelatore e analisi dell'immagine si è dimostrato che le fly ash sono un materiale eterogeneo composto da particelle che si presentano in tre forme morfologiche di base: sferica, irregolare e fine-detritica.

Un'alta percentuale di particelle sferiche è stata trovata nelle ceneri di carbone bituminose (ricche di SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), che conferisce loro un'elevata attività pozzolanica.

Il componente principale delle particelle irregolari che si trovano nelle ceneri è carbone incombusto e, in misura minore, una sostanza minerale.

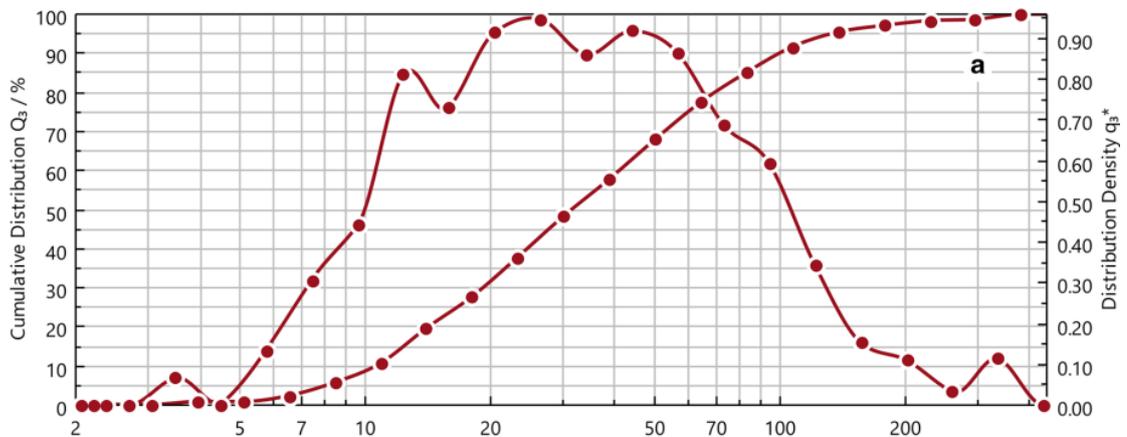
Queste ceneri, a seguito della combustione del carbone, hanno alcune proprietà specifiche che consentono vari usi. Uno dei più significativi fini dei fly ash corrisponde all'uso come additivi minerali nella produzione di cemento o leganti multicomponenti.

La distribuzione granulometrica delle ceneri testate è stata ottenuta utilizzando un sensore QICPIC/R, il cui sistema ottico consente l'analisi di immagini che cambiano dinamicamente. I segnali hanno permesso il calcolo della distribuzione granulometrica per determinare la frequenza di comparsa di classi di grani selezionate.

È stato sperimentalmente trovato che la cenere di carbone di lignite è caratterizzata da una granulometria piccola, il contenuto di grani inferiori a 45 µm è del 63.65%.

La forma delle curve granulometriche per la cenere di carbone di lignite indica una distribuzione unimodale della granulometria con un massimo ampio rientrante

nell'intervallo  $12-65 \mu m$ , come osservabili nella Figura 4.14.



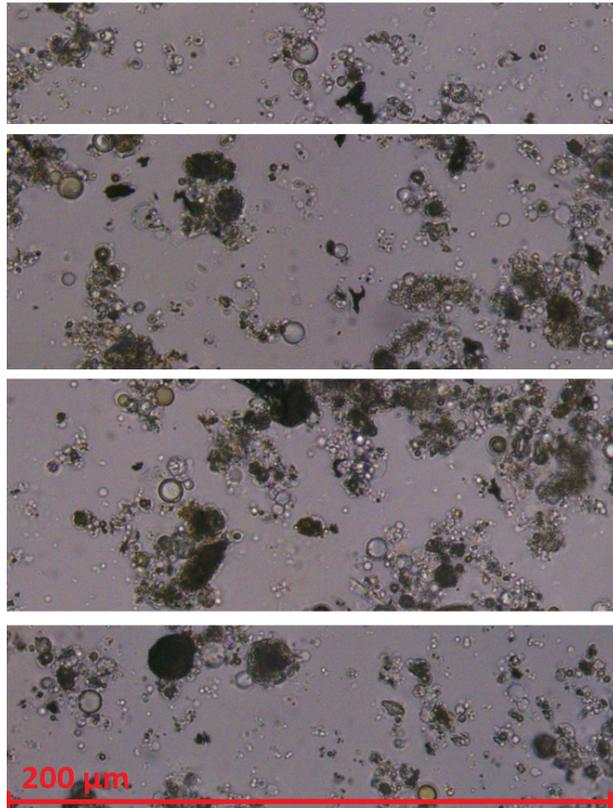
**Figura 4.14:** Distribuzione granulometrica per le ceneri fly ash [18]

Le particelle di fly ash prodotte dal carbone di lignite sono più sferiche con un valore di proporzionalità attorno a  $0.9$ , questa caratteristica è facilmente osservabile nella Figura 4.15. Quando il rapporto di proporzionalità è uguale a uno, indica la massima simmetria, come nel caso di una sfera.

Nelle ceneri di carbon fossile, la materia inorganica trasformata è presente principalmente sotto forma di particelle sferiche. Le particelle vengono create come risultato della combustione del minerale, materia dal carbone, la sua fusione e quindi, la solidificazione. L'elevata tensione superficiale porta alla creazione di una perfetta sfericità le forme.

La fase vetrosa sferica del carbone di lignite ha una composizione chimica alluminio-silicio-calcio, che è ciò che ne determina le proprietà pozzolaniche e idrauliche di queste ceneri. La presenza di ioni calcio nel vetro alluminio silicato influenzerà sicuramente la sua stabilità.

Queste particelle sono caratterizzate da una bassa densità, forma sferica e carattere vetroso. Le microsfele presenti nella cenere qualificano questa materia prima per molte applicazioni, ad esempio come materiale reologico migliorativo di proprietà o nella produzione di calcestruzzo leggero.



**Figura 4.15:** Immagine realizzata al microscopio elettronico del laboratorio del Politecnico di Torino [18]

# Capitolo 5

## Set up sperimentale

### 5.1 Rainfall Simulator

Il simulatore di precipitazione presente nel laboratorio corrisponde a un simulatore del tipo ad ago, questi simulatori devono essere sufficientemente alti dato che non riescono ad impartire una velocità iniziale alla goccia. Considerando che uno degli obiettivi di questo simulatore corrisponde a quello di simulare l'effetto della deposizione umida del particolato atmosferico, è necessario che la goccia raggiunga la velocità terminale o almeno il 95% di essa.

Il set-up è composto da un box con una base di  $3.4\text{ m} \times 4.0\text{ m}$  e una altezza di  $10.40\text{ m}$  creato con sistema TRUSS con quattro colonne a traliccio, quattro travi a traliccio e quattro nodi di collegamento.

Per descrivere il simulatore di pioggia che si trova in laboratorio e facilitare la comprensione del sistema, si segue il circuito idraulico iniziando dall'acquedotto dove viene presa l'acqua che alimenta il sistema continuando con il suo rilascio in forma di pioggia dal piano gocciolante di aghi e finendo con lo scarico nei canali di ricircolo del laboratorio.

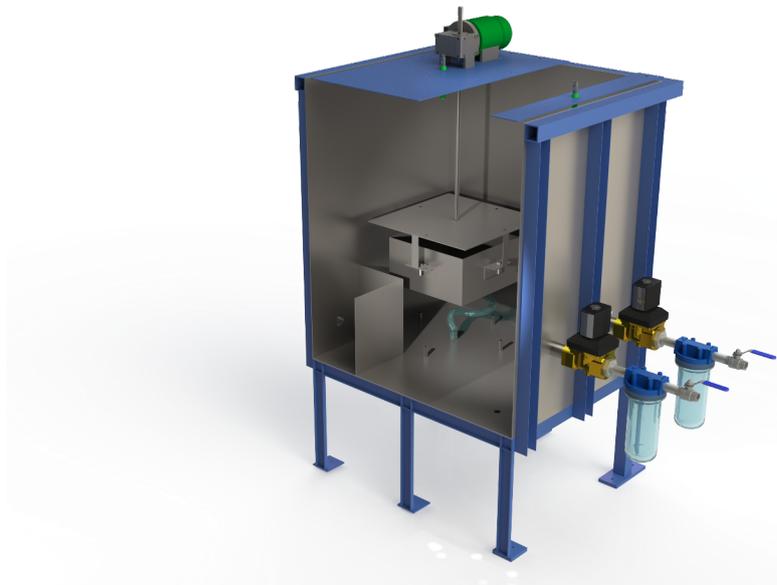
I principali componenti del sistema sono la Mili-Q, il serbatoio ausiliare, il serbatoio di carico e il sistema di gocciolamento.

Inizialmente, l'acqua viene presa dall'acquedotto e purificata dalla Mili-Q, questa strumentazione permette la depurazione dell'acqua, è essenziale per evitare l'intasamento del sistema gocciolante a causa del calcare ed eventuali impurità. La Milli-Q è composta da un pre-filtro ai carboni che riduce la presenza di gas disciolti e residui grossolani presenti, con una produzione oraria di  $10\text{ l}$ .

L'acqua ultrafiltrata viene successivamente stoccata, il sistema di stoccaggio è composto da due serbatoi di plastica del volume di  $1000\text{ l}$  ciascuno. Questi serbatoi sono connessi tra di loro in modo da avere un comportamento unico.

Il sistema di stoccaggio alimenta il serbatoio di carico con capienza di  $800\text{ l}$  tramite un circuito di adduzione PEAD di  $40\text{ mm}$  di diametro, mediante una pompa multistadio. Il serbatoio di carico permette di regolare l'intensità della pioggia generata del sistema. Quest'ultimo è in materiale acciaio inox AISI304 con dimensioni di  $0.8\text{ m} \times 0.9\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ .

All'interno del serbatoio di carico si trova uno sfioratore a parete sottile mobile montato su un supporto metallico mosso da un sistema di sollevamento a vite controllato da un motore passo-passo. Nella Figura 5.1 è possibile osservare la sezione. Il carico del sistema viene impostato dal movimento dello sfioro. Per mantenere il carico costante, il serbatoio viene alimentato dalla pompa, la quale fornisce una portata maggiore alla massima richiesta dal simulatore in modo da mantenere in equilibrio la portata in ingresso, quella sfiorata e quella in uscita necessaria per la simulazione. La portata sfiorata in eccesso scarica ai serbatoi di stoccaggio tramite un tubo spiralato di  $25\text{ mm}$  che si trovano alla base della torre.

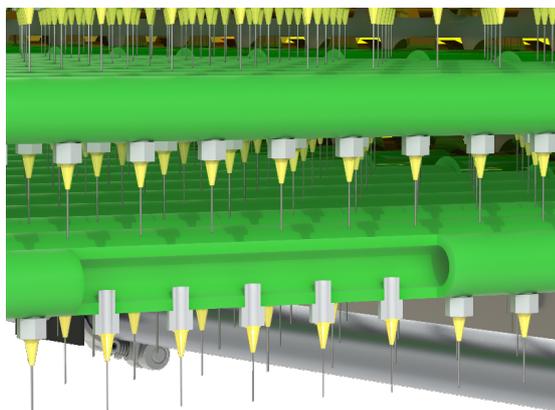


**Figura 5.1:** Sezione del serbatoio di carico del simulatore di pioggia

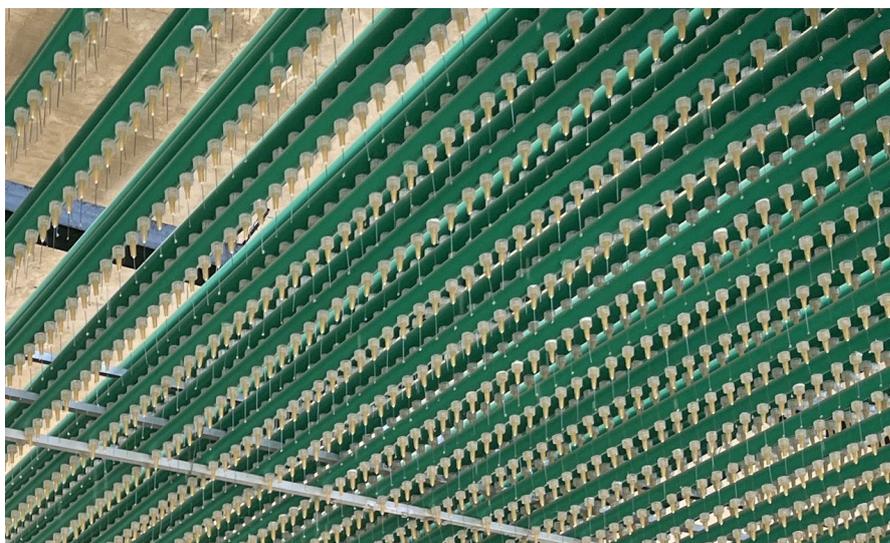
Dal serbatoio di carico, l'acqua viene raccolta da un collettore principale costituito da uno scatolare in acciaio inox a sezione rettangolare  $10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  e lunghezza di  $3.9\text{ m}$ . Quest'ultimo è forato lungo tutta la sezione per il collegamento con i collettori secondari che attraversano la torre trasversalmente. Per ogni collettore sono presenti tre misuratori di pressione in modo da monitorare il carico imposto dal serbatoio quindi rilevare le perdite di pressione.

Le tubazioni in PP-R che conformano i collettori secondari sono in totale  $141$  e si trovano disposti su tre livelli, ciascuno a  $7.5\text{ cm}$  dal precedente. Gli

aghi si dispongono a una distanza quadrata di  $2.5\text{ cm}$  per  $2.5\text{ cm}$  e permettono successivamente la formazione delle gocce, con un totale di  $17061$  aghi. In questo modo è possibile raggiungere un ampio intervallo di intensità. Sulla Figura 5.2 possiamo vedere gli aghi in dettaglio e successivamente nella Figura 5.3 una foto di quelli presenti in laboratorio.

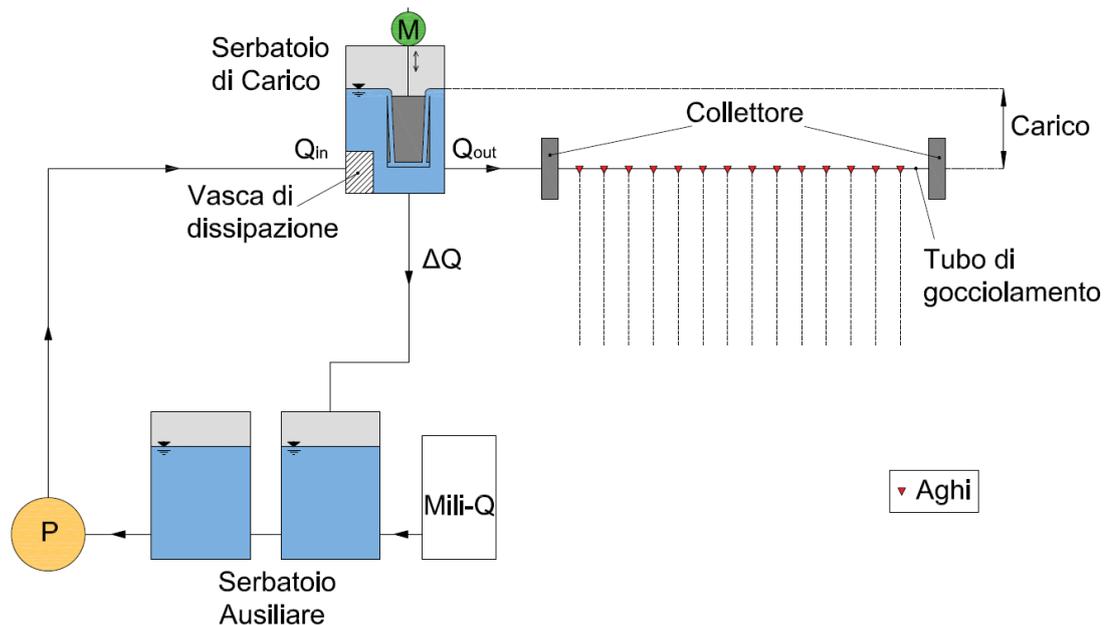


**Figura 5.2:** Aghi del simulatore



**Figura 5.3:** Foto del dettaglio degli aghi del simulatore

Il funzionamento completo del sistema è rappresentato sulla Figura 5.4 dove si segue il percorso dell'acqua dalla depurazione del sistema con la mili-Q fino alla creazione delle gocce che simulano la pioggia.



**Figura 5.4:** Schema di funzionamento del simulatore

Il simulatore contiene un sistema di nove vasche a terra per lo scarico dell'acqua precipitata, ciascuna delle vasche possiede un collegamento con un tubo flessibile il quale permette la deposizione dell'acqua nei canali di ricircolo del laboratorio. Nella Figura 5.5 si ha la foto del sistema completo costruito e nella Figura 5.6 una foto del sistema in funzionamento.

Sull'altezza del piano del laboratorio si trova un quadro di controllo che determina il funzionamento della pompa che alimenta il serbatoio di carico e un interruttore che controlla il motore di movimento dello sfioratore che imposta il carico, permettendo così la salita e discesa dello sfioratore manualmente. Dal quadro di controllo è possibile chiudere e aprire lo sfiato presente nel collettore principale per il rilascio dell'aria nel momento di ingresso dell'acqua e la chiusura nel caso del funzionamento in pressione.

Nel quadro di controllo è presente una scheda di acquisizione che permette il controllo del simulatore via LabView.

Sul LabView è possibile osservare i risultati dei diversi sensori disposti sul box. Si trova la quota dello sfioratore presa da un misuratore di livello ad ultrasuoni così come anche il livello di acqua all'interno del serbatoio. Inoltre, graficamente vengono riportati i dati dei sei sensori di pressione.

Con l'obbiettivo di riuscire a simulare la distribuzione della pioggia reale che precipita nella città di Torino, si è deciso di posizionare una rete all'interno del box sotto il sistema gocciolante con lo scopo di generare una rottura delle gocce

precipitate in modo di far corrispondere la dimensione della goccia con l'intensità della pioggia simulata.



**Figura 5.5:** Foto del simulatore di pioggia nel laboratorio del Politecnico di Torino



**Figura 5.6:** Foto del sistema in funzionamento

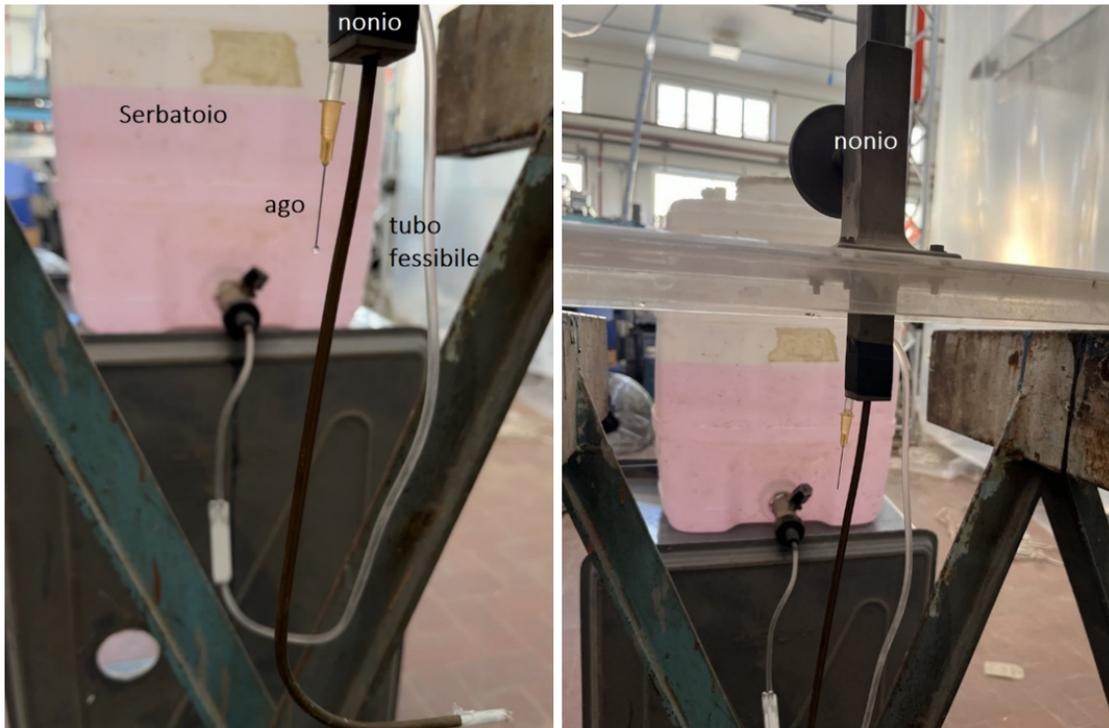
## **5.2 Test di verifica sensibilità temperatura-portata ago**

Con l'obbiettivo di verificare la variazione della portata dell'ago di fronte alle variazioni di temperatura, è stato riprodotto il setup sperimentale della tesi di Laurea Magistrale di Elisabetta Corte [19]. In quest'ultima l'obbiettivo era quello

di determinare l'equazione che legava il carico con la portata dell'ago e le dimensioni della goccia.

Il setup segue un metodo volumetrico, per determinati periodi di tempo si misura il peso dell'acqua rilasciato dall'ago del simulatore.

Per valutare l'intensità di fronte alle variazioni di temperatura si utilizza un serbatoio la cui superficie corrisponde a  $350\text{ cm}^2$  dal fondo del quale è collegato un tubo flessibile, con un ago inserito sull'estremità e collegato ad un nonio, come si osserva nella Figura 5.7.



**Figura 5.7:** Setup sperimentale costruito in laboratorio per la valutazione della portata dell'ago

Il nonio permette di alzare ed abbassare l'ago, variando in questo modo il suo carico, nella scala graduata presente è possibile l'impostazione di diversi valori di carico a seconda delle proprie considerazioni.

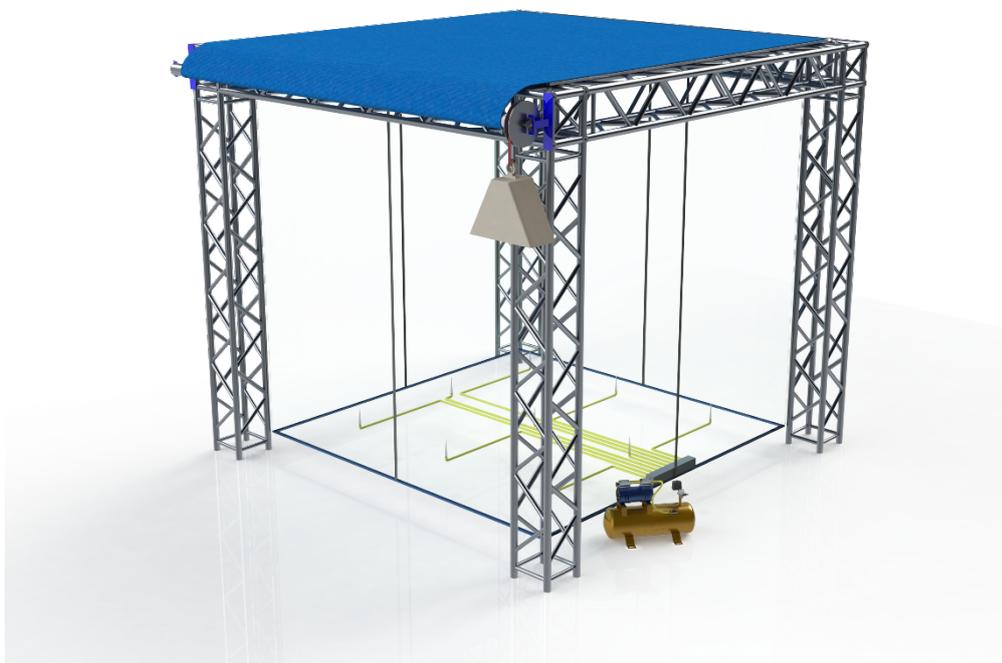
Sono state realizzate diverse prove valutando diverse temperature dell'acqua sugli stessi carichi. Per ogni prova si misura la temperatura dell'acqua e si determina il valore di carico zero. Successivamente si impostano valori di carichi e per ogni carico si misura la quantità di acqua rilasciata dall'ago durante un determinato periodo di tempo.

Si pesa l'apposito contenitore che raccoglie le gocce rilasciate dall'ago, prima e dopo ciascuna prova mediante l'uso di una bilancia digitale con una precisione del decimo di grammo. La differenza tra il peso successivo e quello antecedente alla prova, rappresenta il peso del volume d'acqua raccolto nella singola prova.

Conoscendo l'area di influenza dell'ago è possibile valutare l'intensità associata a quella temperatura e a quel carico. In questo modo si ottiene l'andamento dell'intensità per i diversi valori di carico a una temperatura data.

### 5.3 Box preliminare per lo studio della deposizione

Per quanto riguarda l'analisi di deposizione, è stato costruito una box preliminare. Nella Figura 5.8 viene rappresentato il box pensato per la dispersione delle polveri. Il box è composto da un sistema TRUSS con quattro colonne a tralicci, simile a quello del simulatore ma ovviamente più piccolo dato che deve essere collocato al suo interno.



**Figura 5.8:** Sistema preliminare per il box di dispersione

L'idea originale come si vede nella Figura 5.8 corrispondeva a un sistema a tetto scorrevole, il funzionamento avrebbe permesso la sua apertura immediata per far passare le gocce di pioggia, una volta che le polveri si erano disperse. Come si vede nella Figura 5.9 la foto del sistema costruito.



**Figura 5.9:** Foto del sistema preliminare per il box di dispersione

La simulazione per lo studio del fenomeno di deposizione si basava nell'immissione tramite aria compressa di  $1\text{ g}$  di particolato con una previa accensione di ventola in modo da agitare l'ambiente. In seguito, dopo l'immissione, si lasciava la ventola accesa  $1\text{ min}$  per distribuire le polveri nella box. Finalmente, si lasciava calmare l'aria con la successiva apertura del tetto per lasciare entrare la pioggia.

Nella Figura 5.10 si può vedere il sistema completo con la box di deposizione preliminare al suo interno, mentre nella Figura 5.11 una foto del sistema costruito per le prime analisi di deposizione.



**Figura 5.10:** Sistema completo per la simulazione del fenomeno di deposizione



**Figura 5.11:** Foto del sistema costruito per i primi studi

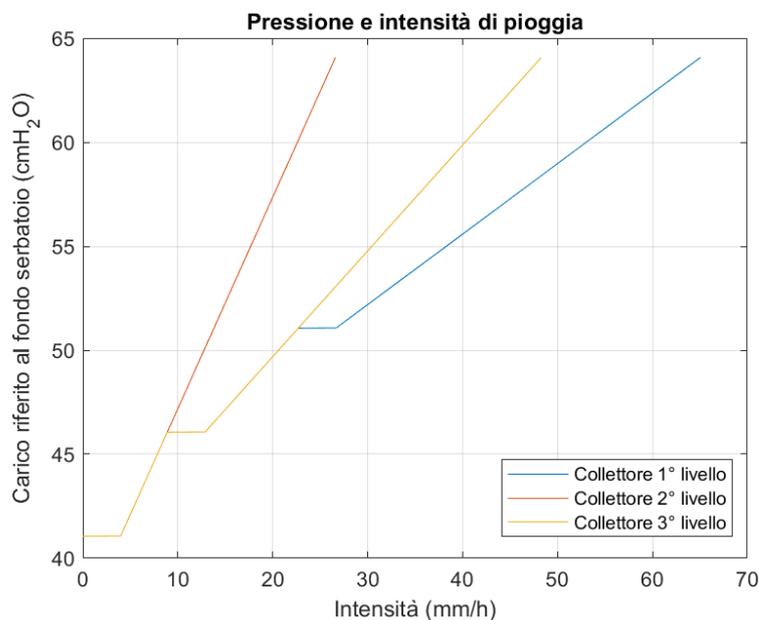
# Capitolo 6

## Risultati

### 6.1 Risultati della calibrazione del simulatore

Per quanto riguarda la calibrazione del sistema, si è fatto uso dell'andamento teorico che corrisponde alla formula che lega il carico con l'intensità. La formula, deriva dallo studio seguito nella tesi di Laurea Magistrale di Elisabetta Corte [19]:

$$i(\text{mm/h}) = 2.9497 \cdot h - 4.2786 \quad (6.1)$$



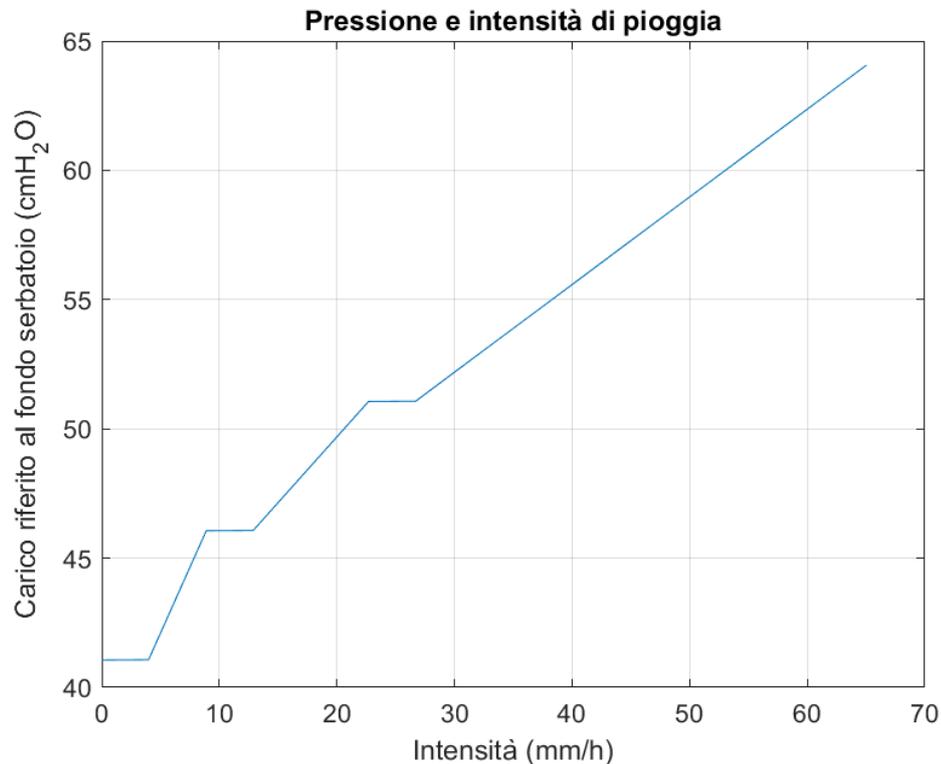
**Figura 6.1:** Andamento teorico dell'intensità per ogni collettore in funzione del carico dell'ago, riferito al fondo del serbatoio di carico

Dove:

$h$  corrisponde al carico rispetto alla punta dell'ago espresso in  $cm$

Considerando che il simulatore possiede tre collettori a diversi livelli, per ognuno di loro corrisponde un terzo dell'intensità teorica data dalla formula. Il carico minimo affinché un ago inizi a gocciolare è pari a  $5.5\text{ cm}$  e riferendo il carico al fondo del serbatoio, l'andamento dell'intensità di pioggia corrisponde a quella rappresentata nel grafico della Figura 6.1.

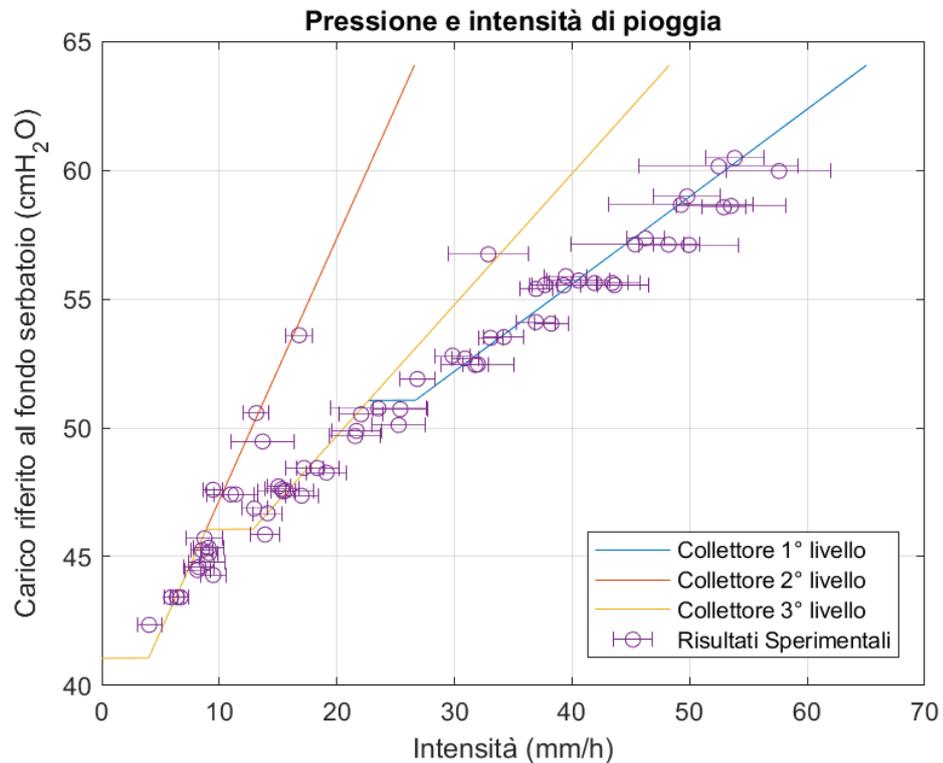
Nel grafico si vede il contributo di ogni collettore, mentre la curva che teoricamente rappresenta l'intensità totale generata dal simulatore, corrisponde a quella nella Figura 6.2.



**Figura 6.2:** Andamento teorico dell'intensità in funzione del carico dell'ago, riferito al fondo serbatoio di carico

In questa, si osserva un cambiamento netto ogniqualvolta il carico è sufficientemente elevato da generare intensità di pioggia nel collettore che si trova a un'altezza superiore.

In questo modo, per ogni simulazione di carico, con delle misure volumetriche (descritte nel Capitolo 5) viene calcolata e rappresentata l'intensità generata e la sua deviazione standard, ottenendo come risultato la Figura 6.3.



**Figura 6.3:** Andamento teorico dell'intensità di ogni collettore in funzione del carico dell'ago, riferito al fondo serbatoio e ogni prova realizzata

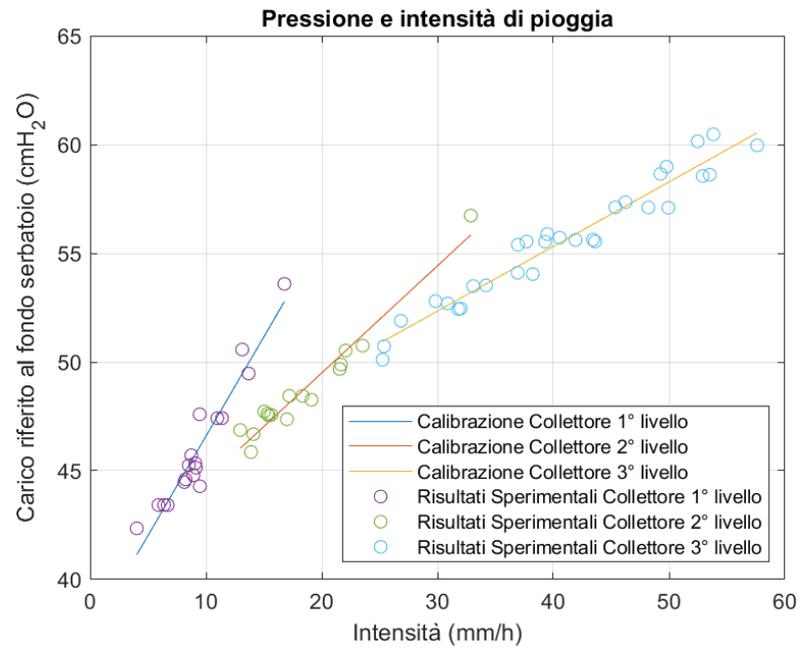
I cambiamenti netti di intensità osservabili nella Figura 6.2 nella realtà del funzionamento del simulatore si verificano in modo più smussato dato che comunque dell'aria rimane intrappolata e non tutti gli aghi iniziano a funzionare nello stesso istante temporale. Inoltre, la geometria del sistema potrebbe essere sfavorevole, una leggera inclinazione del piano di gocciolamento genererebbe in una zona del simulatore un carico maggiore piuttosto che in un'altra.

Interpolando i dati sperimentali, la curva di calibrazione reale di comportamento del sistema corrisponde a tre spezzate rappresentate nella Figura 6.4.

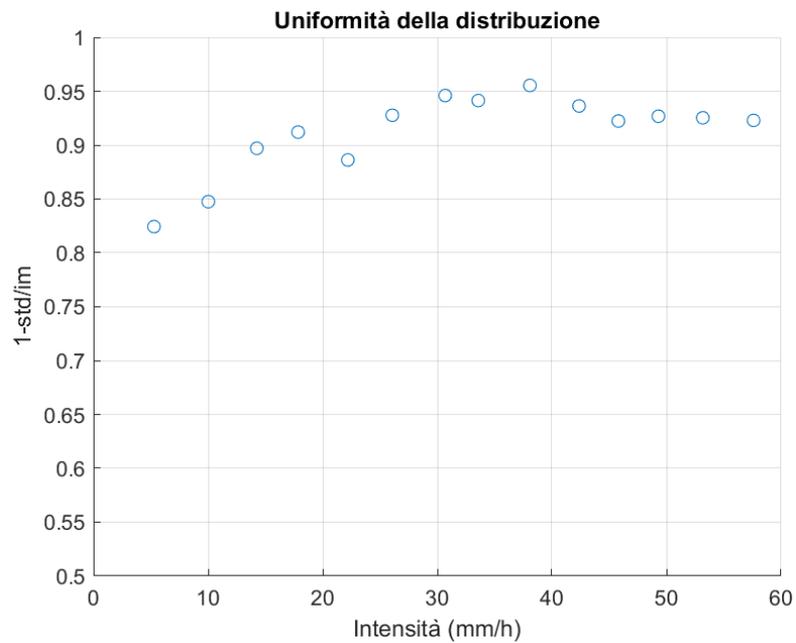
Da evidenziare il fatto che non ci sarà una correlazione di un terzo per ogni collettore, giustificato dagli errori che presenta il sistema dovuti alla geometria e alla sensibilità di funzionamento degli aghi che fa sì che il tutto non risponda in modo ideale.

Per valutare l'uniformità della distribuzione è stato graficato il complemento del rapporto della deviazione standard con l'intensità media rispetto appunto all'intensità media, osservabile nella Figura 6.5.

I valori prossimi a 1 indicano una minor variabilità rispetto alla media di intensità generata dal simulatore. Questo potrebbe indicare una probabilità maggiore che



**Figura 6.4:** Curve di calibrazione ogni collettore del simulatore di pioggia in funzione del carico dell'ago, riferito al fondo serbatoio



**Figura 6.5:** Uniformità della distribuzione per i valori di intensità testati

l'intensità, per il carico imposto, corrisponda più precisamente al valor desiderato.

Nel caso del simulatore di pioggia si vede quindi dalla Figura 6.5 una maggior probabilità di ottenere l'intensità desiderata per i valori più alti, con una maggior sensibilità e influenza degli errori geometrici, per valori di intensità più bassi.

## 6.2 Risultati delle prove di gocciolamento

Osservando il posizionamento delle prove lungo la curva teorica è possibile distinguere due andamenti diversi. Infatti, sono presenti dei punti che tendono a seguire un'altra curva. Dato che gli aghi funzionano a capillarità, e considerando che le prove sono state svolte da marzo a giugno, c'è stato un cambiamento nella temperatura del Laboratorio che influì nel comportamento degli aghi.

Avendo aumentato la temperatura durante le ultime prove, a ugual carico l'aumento di temperatura genera un aumento di intensità.

In effetti, nella Figura 6.6 e Figura 6.7 sono state separate le prove in due gruppi, quelle che vanno da marzo a aprile, preso come riferimento degli ultimi giorni freddi, e quelle che vanno da aprile a giugno, dove la temperatura del laboratorio era aumentata notevolmente.

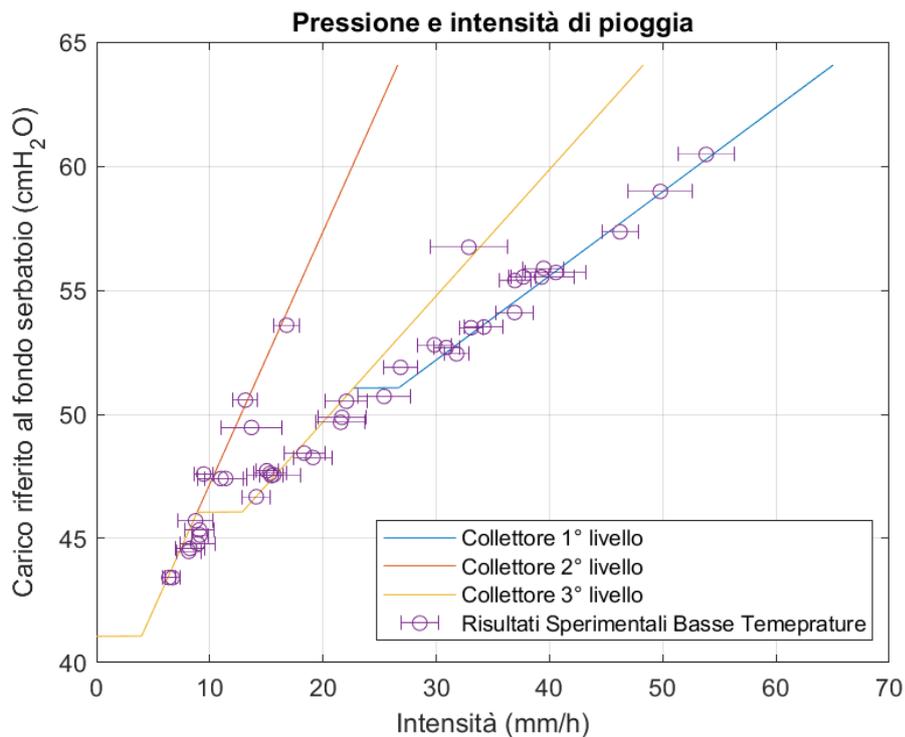
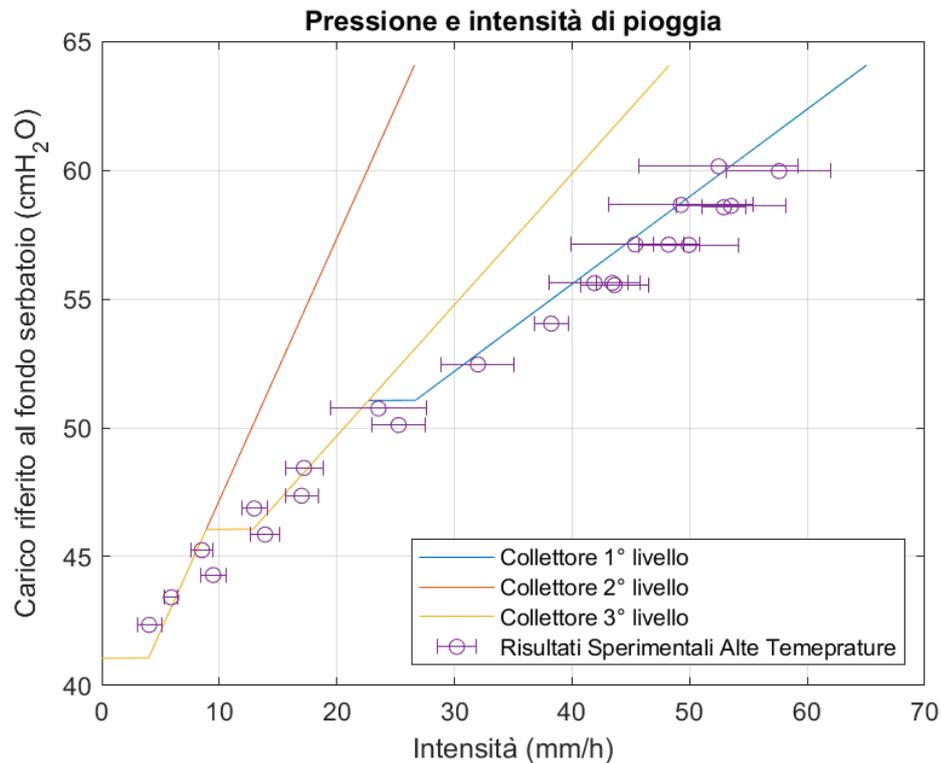


Figura 6.6: Andamento per le prime prove (giorni invernali)



**Figura 6.7:** Andamento per le ultime prove (giorni estivi)

La variazione del comportamento per gli esperimenti condotti in periodi relativamente caldi era prevedibile, ma una grandezza così elevata ha portato una valutazione del comportamento dell'ago di fronte alla variazione di temperatura.

Per definire il comportamento del singolo ago sono state svolte le prove descritte nel Capitolo 5, ottenendo la Tabella 1.1. In questo modo, vengono raccolte le intensità generate dall'ago del simulatore per temperature dell'acqua misurate.

L'intensità generata viene calcolata come il rapporto tra il volume totale rilasciato dall'ago e, il prodotto tra area di pertinenza dell'ago e il tempo.

Rappresentando l'andamento dell'intensità con la variazione del carico per ogni temperatura nella Figura 6.8, possiamo osservare che all'aumentare della temperatura, per lo stesso carico, l'intensità è maggiore.

La variazione dell'intensità è significativa per valori di carichi elevati. Si può osservare che tra temperature estreme il comportamento è decisamente diverso, trattandosi di casi con temperature di quasi  $50^{\circ}\text{C}$  e  $13^{\circ}\text{C}$ . Per i casi più comuni la variazione non è molto significativa.

Nella Figura 6.9 possiamo anche vedere l'andamento dell'intensità con la quale è stato calibrato il simulatore, perciò valori di temperatura sotto i  $24^{\circ}\text{C}$ .

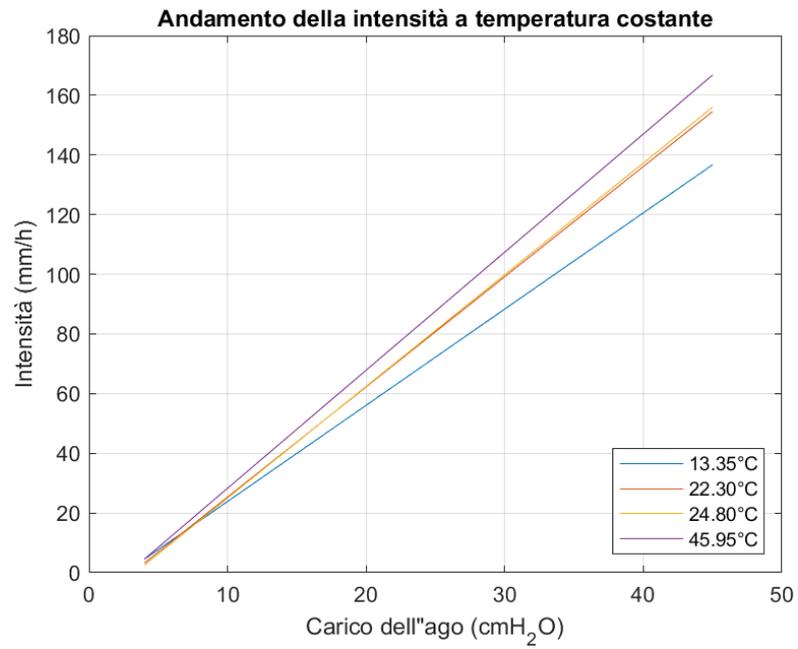
Se considerassimo prolungare le rette per valori di carico zero avremmo valori

Temperatura (°C)	Carico (cm)	Peso Bicchiere Vuoto (g)	Peso Bicchiere Pieno (g)	Peso Aqua (g)	i (mm/h)
24.80	5.00	13.55	14.15	0.60	1.93
	11.30	14.14	23.13	8.99	28.89
	16.00	17.14	34.05	16.91	54.35
	25.00	17.90	35.33	17.43	84.03
	35.00	16.22	39.90	23.68	114.16
	45.00	17.26	41.62	24.36	156.59
22.30	5.30	13.55	14.15	0.60	1.93
	10.30	14.14	23.13	8.99	28.89
	16.30	17.14	34.05	16.91	54.35
	25.30	17.90	35.33	17.43	84.03
	35.30	16.22	39.90	23.68	114.16
	45.30	17.26	41.62	24.36	156.59
45.95	4.00	15.22	15.37	0.15	0.48
	10.00	15.15	24.66	9.51	30.56
	16.00	16.25	32.57	16.32	52.45
	25.00	17.67	36.76	19.09	92.03
	35.00	16.44	41.81	25.37	122.31
	45.00	16.05	41.85	25.80	165.84
13.35	4.00	13.58	14.84	1.26	4.05
	10.00	14.71	22.03	7.32	23.53
	16.00	15.69	29.38	13.69	44.00
	25.00	15.91	30.84	14.93	71.98
	35.00	16.86	39.08	22.22	107.12
	45.00	16.69	37.78	21.09	135.57

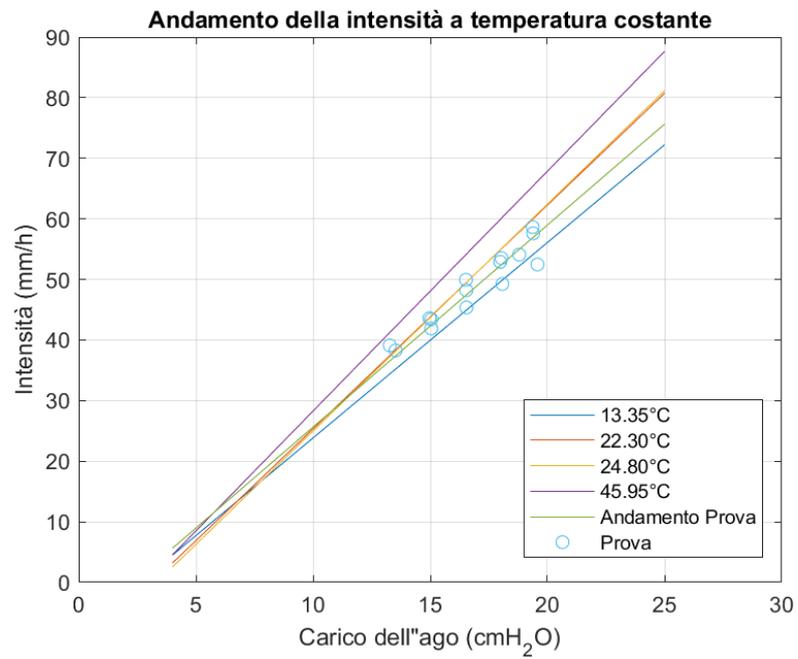
**Tabella 6.1:** Dati Misurati e Intensità Calcolata dell'Ago

teorici di intensità negativi, questo non corrisponde alla realtà dato che per valori di carico zero l'intensità chiaramente è zero. I fenomeni di attriti, quelli geometrici e di perdite di carico portano ad avere un valore di intercetta negativo.

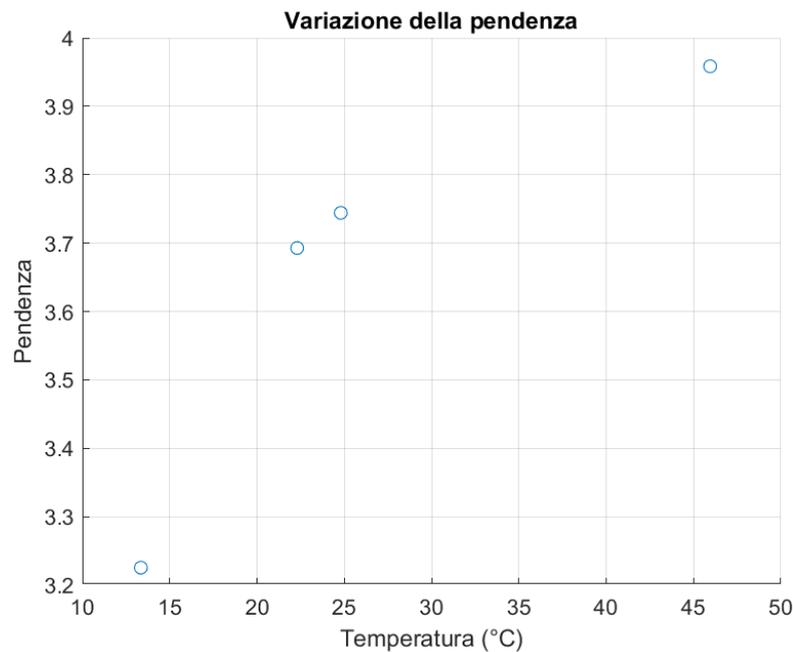
Nella Figura 6.10 si osserva la variazione dei valori dalla pendenza per le diverse temperature testate, man mano che la temperatura aumenta, aumenta anche il valore di questo coefficiente dato che il calore comporta un aumento della viscosità e perciò allo stesso carico corrisponde una intensità maggiore.



**Figura 6.8:** Andamento dell'intensità del singolo ago per diverse temperature



**Figura 6.9:** Variazione del comportamento dell'ago e le prove realizzate



**Figura 6.10:** Variabilità della pendenza della retta che segue l'ago di fronte ai cambiamenti di temperatura

### 6.3 Risultati simulazioni degli eventi di pioggia di Torino

Uno degli obiettivi del simulatore di pioggia è quello di riuscire a rappresentare gli eventi di pioggia che hanno luogo nella città di Torino. Sono stati quindi, analizzati i dati raccolti dal disdrometro del laboratorio, per ottenere gli andamenti di pioggia della città, e quelli all'interno del simulatore, per ottenere gli andamenti di pioggia del simulatore.

I risultati ottenuti dal disdrometro sono stati manipolati in modo da con l'obiettivo di rappresentare la *mean probability function*, che indica la probabilità di una variabile di assumere un determinato valore e la *mean cumulative function* che invece rappresenta la probabilità della variabile di assumere un valore determinato.

Per il caso della città di Torino, la funzione di probabilità possiede l'andamento della Figura 6.11. In quest'ultima è osservabile, come più comunemente succede, che nei casi di intensità minori, la presenza di gocce molto piccole, mentre man mano che l'intensità aumenta, aumenta la probabilità di presenza di gocce maggiori diminuendo quella per le gocce maggiori.

Nella Figura 6.12 invece viene rappresentata la cumulata di questa funzione di probabilità della città di Torino.

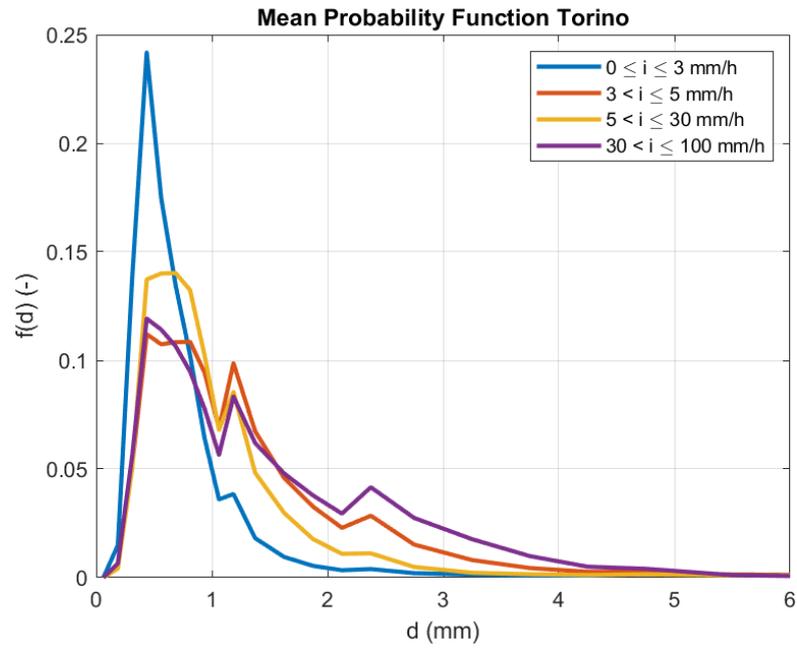


Figura 6.11: Mean probability function per la pioggia di Torino

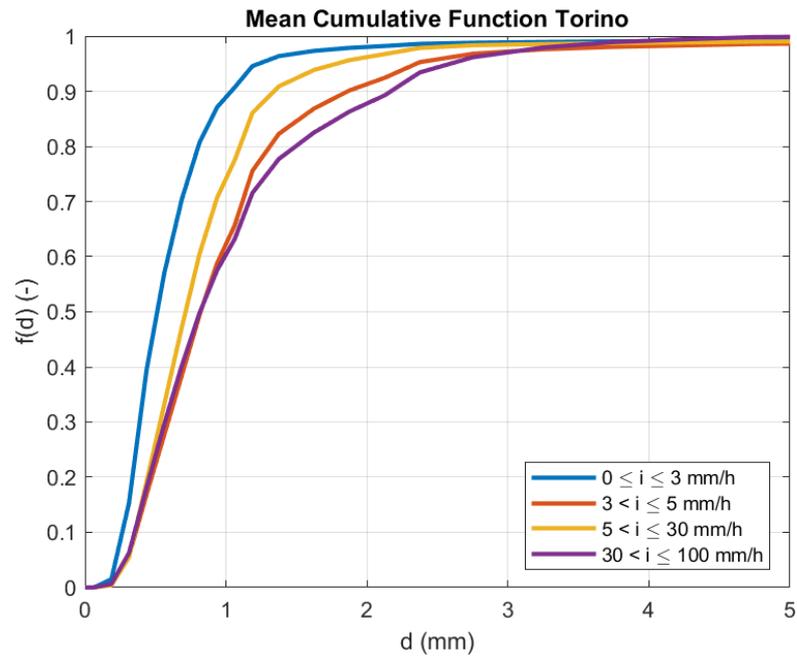
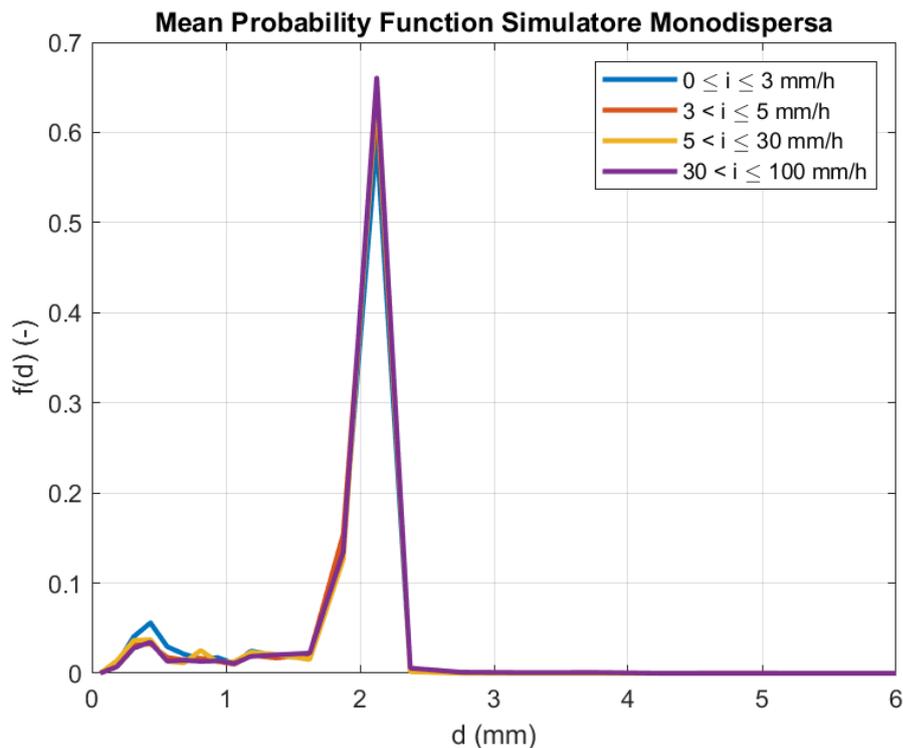


Figura 6.12: Mean cumulative function per la pioggia di Torino

Dalla Figura 6.12 si può concludere che, dato che per valori di intensità maggiori abbiamo una pendenza minore, abbiamo più probabilità di distribuzioni di gocce maggiori. Nel caso delle intensità più basse, la curva è più ripida dato che abbiamo probabilità di valori compresi in un range di diametri più piccoli.

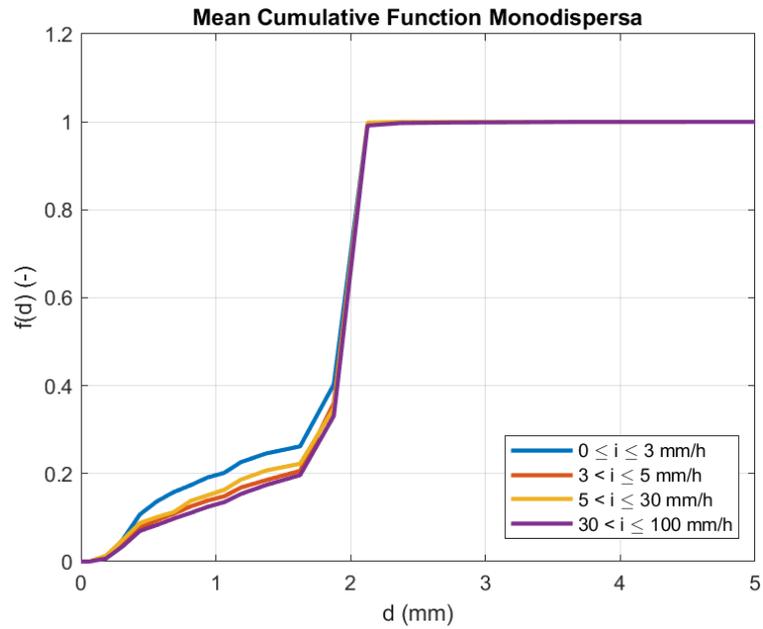
Nelle Figura 6.13 e Figura 6.14 vengono rappresentate le due funzioni appena descritte per la pioggia generata dal simulatore. Quest'ultimo genera una pioggia monodispersa dato che le dimensioni di goccia che genera stanno attorno ad un unico valore. Contrariamente a quello che succede nella realtà, tutte le intensità si aggirano attorno allo stesso diametro.



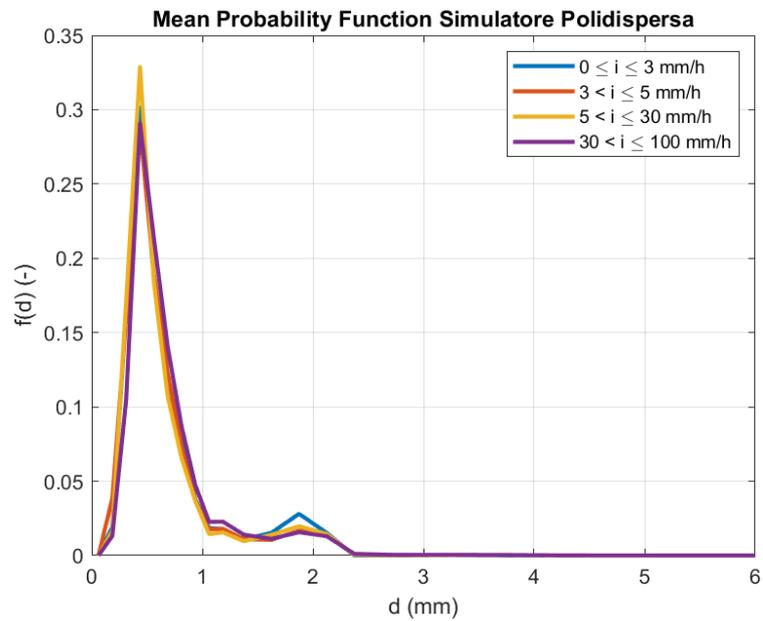
**Figura 6.13:** Mean probability function per la pioggia monodispersa generata dal simulatore

Nella Figura 6.13 è chiaramente visibile che per ogni tipo di intensità abbiamo una maggior probabilità di assumere un valore di diametro della goccia attorno ai 2 mm. Questo valore di diametro non varia per ogni intensità dato che l'angolo che genera la goccia simulata non cambia.

Nella Figura 6.14 invece viene rappresentata la funzione cumulata dove, si osserva che per tutte le intensità, la probabilità che il diametro della goccia sia molto minore a 2mm è bassissima, mentre nel range di 2mm si trovano la maggior parte delle gocce prodotte.



**Figura 6.14:** Mean cumulative function per la pioggia monodispersa generata dal simulatore



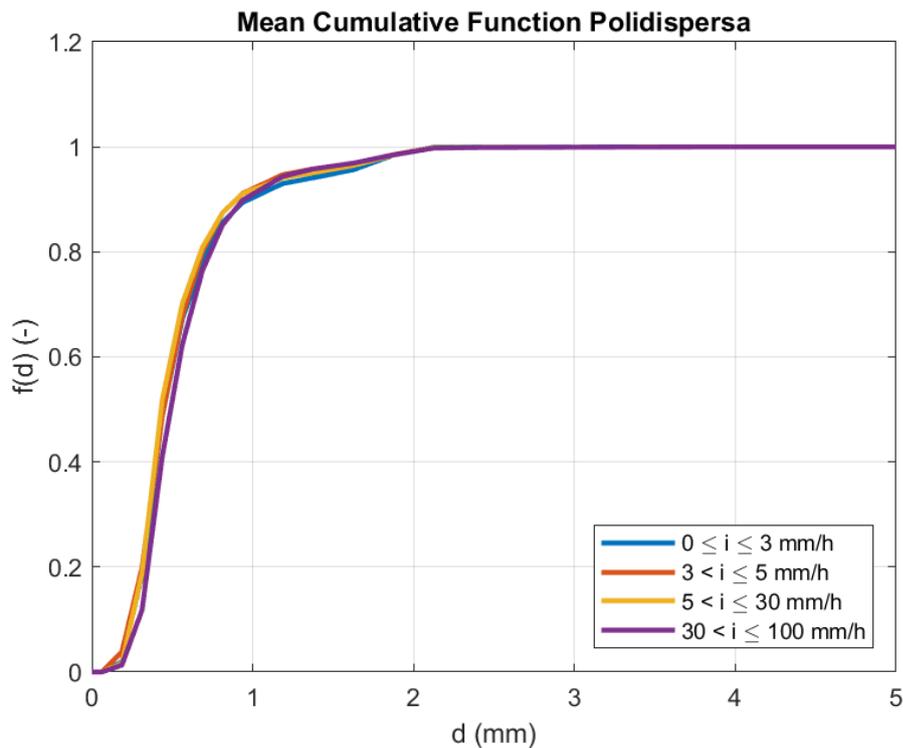
**Figura 6.15:** Mean probability function per la pioggia polidispersa generata dal simulatore

Per simulare una pioggia con diametri più reali è stata collocata una rete a  $1.10\text{ m}$  dal fondo del collettore per rompere le gocce generando la funzione di probabilità rappresentata nella Figura 6.15.

Dalla Figura 6.15 contrariamente a prima, data la presenza della rete, il simulatore ha maggior probabilità di generare dimensioni di gocce attorno ai  $0.5\text{ mm}$ . Sono comunque sempre uguali per le diverse intensità.

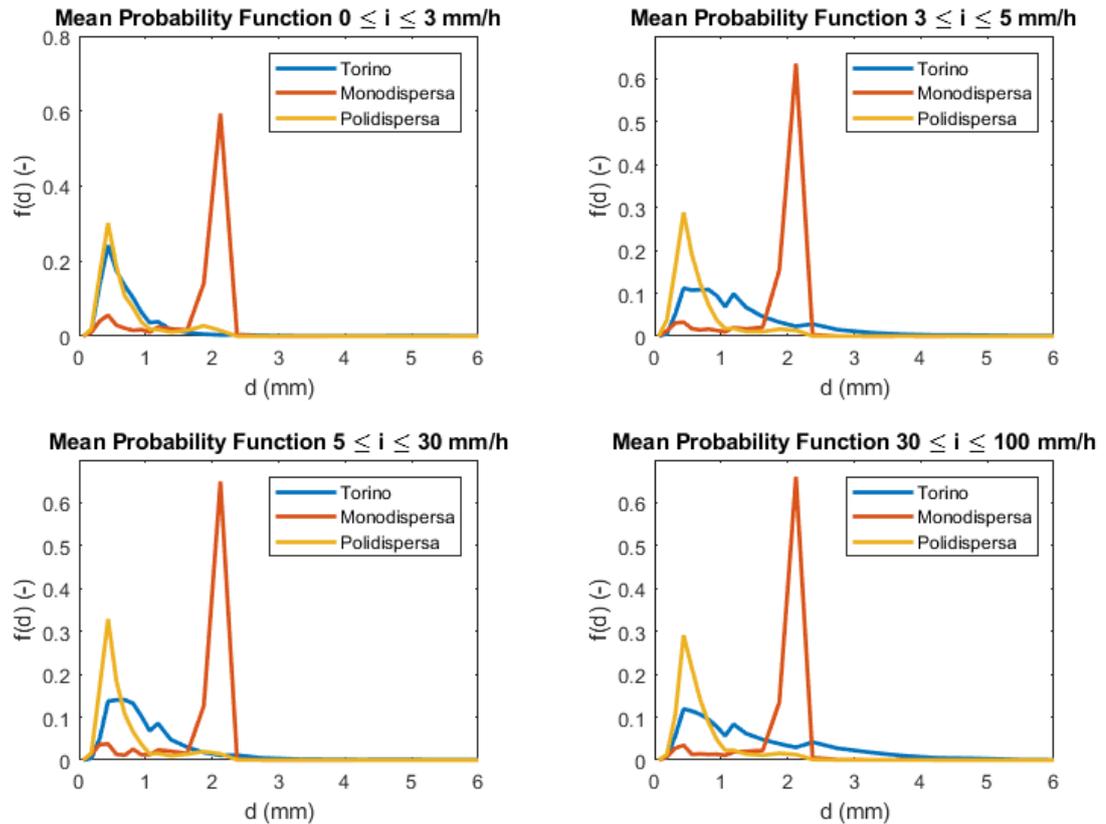
Si potrebbe pensare a cambiare la posizione della rete in modo da produrre, per ogni intensità, le dimensioni di gocce reali che si creano.

Nella Figura 6.16 dove invece viene presentata la cumulata, si osserva un comportamento con un cambiamento meno rigido a quello della monodispersa, sempre uguale per tutte le intensità testate però comunque, con probabilità maggiori per diametri minori.



**Figura 6.16:** Mean cumulative function per la pioggia polidispersa generata dal simulatore

Per avere una miglior comprensione degli eventi simulati sono state rappresentate, per ogni range di intensità, le tre dispersioni di pioggia, sia nel caso della mean probability function nella Figura 6.17 che in quello della mean cumulative function nella Figura 6.18.



**Figura 6.17:** Mean probability functions per le diverse intensità

Com'è osservabile nella Figura 6.17 con la disposizione della rete a  $1.10$  m dal fondo del collettore, la pioggia poldispersa generata dal simulatore è molto simile a quella reale di Torino, mentre la monodispersa ovviamente resta distante dal comportamento reale.

Come riportato prima, sarà necessario uno spostamento della rete per una miglior simulazione per le intensità più intense.

Le funzioni cumulate, per quanto riguarda l'intensità compresa tra  $0$  e  $3$  mm/h, rappresenta una probabilità sufficientemente approssimata a quella di Torino. Quindi non solo viene rappresentato il diametro reale associato a quella intensità, ma anche il range del diametro, diversamente agli altri casi di intensità dove per la pioggia di Torino si ha uno spostamento verso i diametri più grandi.

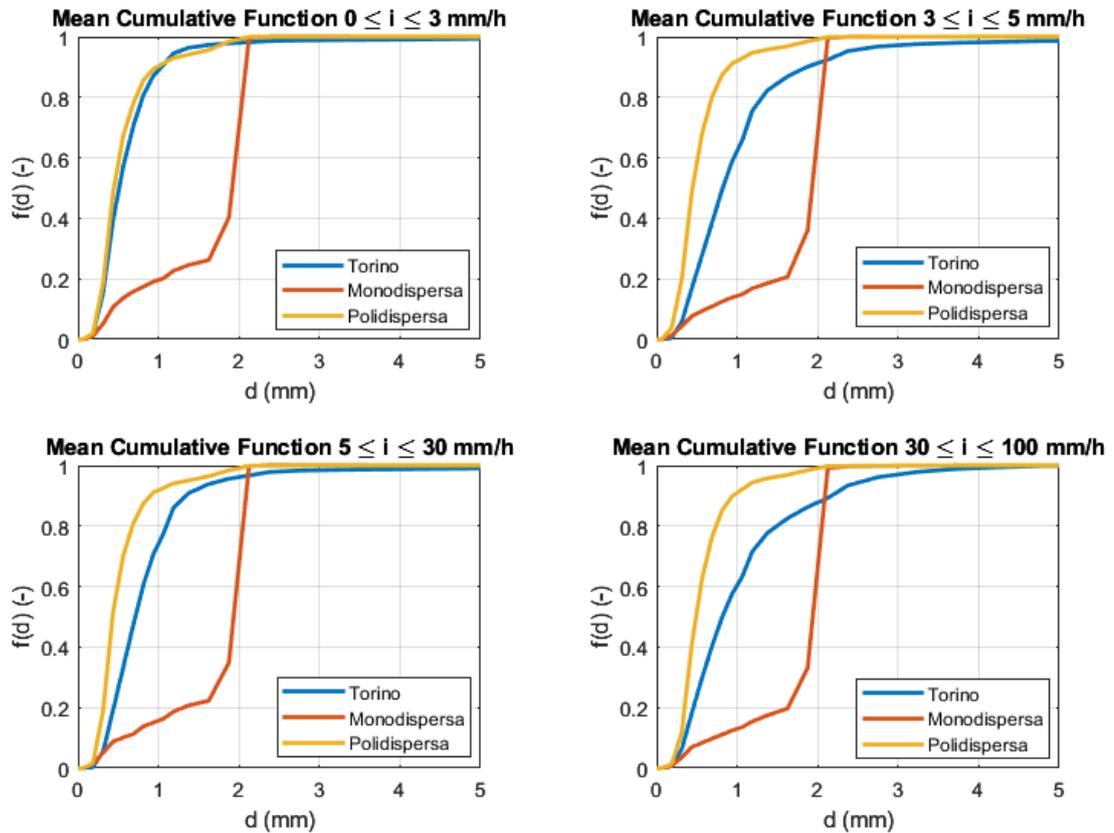


Figura 6.18: Mean cumulative functions per le diverse intensità

## 6.4 Risultati delle prove preliminari di deposizione

Sono state eseguite sei prove con le ISO Fine per valutare la deposizione, i risultati evidenziano una deposizione del particolato completamente asciutta.

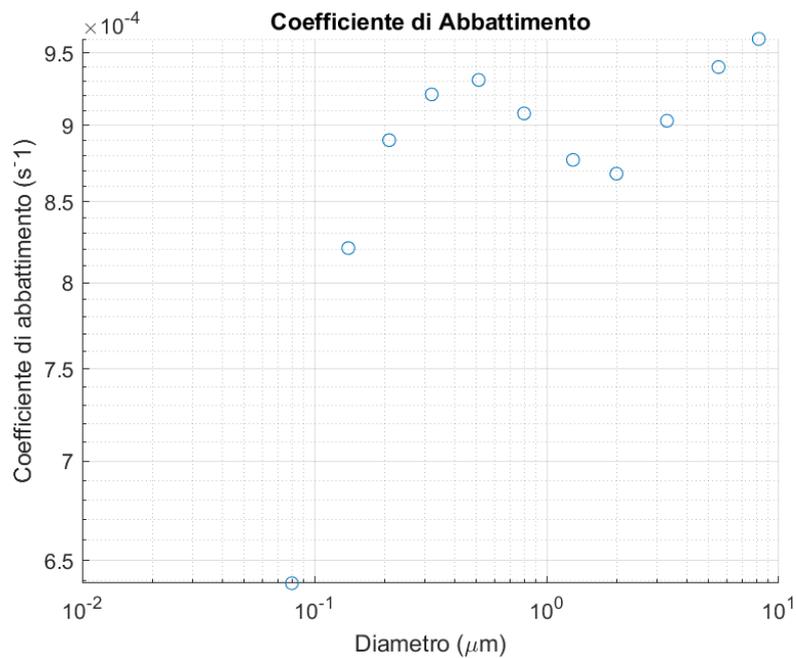
Per analizzare i risultati è stato calcolato un coefficiente di abbattimento dato dalla variazione della concentrazione, normalizzata con la concentrazione iniziale, il tutto diviso il tempo di prova, ottenendo i risultati nella Tabella 1.2.

Graficando i risultati si ottiene l'andamento riportato nella Figura 6.19.

Le prime classi vanno subito a zero e questo è dovuto al fatto che le elevate concentrazioni, specialmente con immissione di aria compressa, allontana queste classi dal punto di misura. Nel momento che si depositano e arrivano al punto di lettura dell'ELPI+ trascorre molto tempo. Inoltre, la mancanza di dati di queste dimensioni è anche dovuta al fatto dell'effetto di nascondimento che si può generare per effetto delle particelle più grandi che vanno ad agglomerarsi con quelle più

Diametro della particella ( $\mu\text{m}$ )	Coefficiente di deposizione ( $\text{s}^{-1}$ )
0.01	-4.42E-03
0.022	-1.62E-03
0.042	-6.19E-01
0.08	6.39E-04
0.14	8.21E-04
0.21	8.90E-04
0.32	89.21E-04
0.51	9.31E-04
0.8	9.08E-04
1.3	8.77E-04
2	8.68E-04
3.3	9.03E-04
5.5	9.40E-04
8.2	9.60E-04

**Tabella 6.2:** Coefficiente di deposizione asciutta per ogni classe granulometrica



**Figura 6.19:** Deposizione ottenuta sulle 14 classi granulometriche distinte dal ELPI+ mediando 6 prove

piccole.

Possiamo concludere dai risultati ottenuti che il fenomeno di risulta di un ordine di grandezza superiore all'abbattimento umido. Perciò nel momento che inizia a piovere, il fenomeno è mascherato dalla deposizione asciutta.

La motivazione di tutto ciò può essere associata con la geometria del box creato per il set up, può essere anche dovuto al tipo di aerosol utilizzato, il metodo di immissione delle polveri, e altro.

Le prove di abbattimento sono state realizzate con le ISO Fine dato che rappresentano meglio il particolato atmosferico dovuto al fatto che presentano diametri di dimensioni molto più piccole degli altri aerosol. L'abbattimento simulato con le altre polveri studiate nei capitoli precedenti genererebbe un abbattimento dry maggiore dovuto appunto al fatto della presenza di particelle di dimensioni maggiori.

# Capitolo 7

## Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro di tesi era la calibrazione del simulatore di pioggia presente nel Laboratorio di Idraulica del Politecnico di Torino, per riuscire a simulare le precipitazioni che si generano nella città e realizzare un'analisi preliminare del fenomeno di deposizione.

Si riportano diverse proposte di simulatori e studi riferiti ai fenomeni di deposizioni trovati in letteratura.

Il simulatore studiato è ispirato a quello proposto da T. P. Regmi e A. L. Thompson (2000). Ha un'altezza di  $10.70\text{ m}$  e un piano di gocciolamento che si trova a una distanza di  $10.40\text{ m}$ . Questa altezza permette alle gocce di raggiungere una velocità prossima a quella terminale per le gocce aventi diametro equivalente minore o uguale a  $3.9\text{ mm}$ .

Per l'analisi del tipo di pioggia simulata si è fatto uso del disdrometro e delle valutazioni volumetriche. Con l'obiettivo di studiare gli aerosol per rappresentare il particolato atmosferico e simulare il fenomeno di deposizione, sono state utilizzate diverse strumentazioni che hanno permesso di caratterizzarli, in particolare il SEM, la CPS e l'ELPI.

Al fine dello scopo della tesi, è stato realizzato un set up che permettesse di valutare il fenomeno di abbattimento. La calibrazione del sistema è stata valutata utilizzando il simulatore e, l'abbattimento, mediante l'introduzione di un box apposito per la dispersione delle polveri che permettesse, senza successo, l'analisi del fenomeno di dilavamento.

La calibrazione del sistema ha permesso di convalidare il comportamento del simulatore che segue in maniera sufficientemente accettabile l'andamento teorico aspettato, descritto per gli aghi studiati precedentemente, con una leggera variazione dovuta ai cambiamenti di temperatura.

Il sistema, inoltre, è stato analizzato con un ampio range di valori di temperatura in modo da osservare l'andamento delle intensità di pioggia e evidenziarne eventuali soluzioni.

Per quanto riguarda la simulazione della pioggia della città di Torino, i risultati hanno permesso di dimostrare una affidabile rappresentazione della pioggia reale nelle intensità minori a  $3 \text{ mm/h}$  per la presenza di una rete che permette una riduzione del diametro delle gocce, avvicinandosi notevolmente a diametri reali creati da quelle intensità.

Finalmente, la valutazione della deposizione ha permesso di evidenziare alcuni errori del set up generato per le analisi di dilavamento atmosferico, avendo osservato valori di abbattimento *dry* più elevati di quelli *wet*.

## 7.1 Sviluppi Futuri

La presente tesi è centrata sulla calibrazione del simulatore di pioggia, l'andamento riporta una elevata uniformità delle intensità generate approssimandosi notevolmente all'andamento teorico descritto per il comportamento degli aghi scelti, con una variazione più smussata laddove il carico permette l'attivazione di un ulteriore fila di gocciolatori.

Una soluzione alla variazione del comportamento di fronte ai cambiamenti di temperatura potrebbe essere l'installazione di un *chiller* dentro il serbatoio che riuscisse a mantenere la temperatura del sistema sempre costante.

Il diametro delle gocce generate dal simulatore non corrispondono alle intensità che esso è in grado di riprodurre dato che l'ago crea una dimensione sempre uniforme. La presenza di una rete permette la generazione di dimensioni variate, sarebbe necessario testare diverse reti a diverse quote del simulatore in modo da creare intensità di piogge con gocce aventi diametri rappresentativi di quelle reali. Non solo testare diverse altezze ma anche diverse tipologie di reti.

Per quanto riguardano i fenomeni di abbattimento, si potrebbe pensare ad un ulteriore tipo di aerosol, più leggero, in modo da non comportare un abbattimento *dry* così elevato, con un comportamento minore di aggregazione. Un'altra soluzione corrisponde all'installazione di un motore termico per produrre polveri simili al particolato della città, oppure all'uso di dispersori di polveri con una immissione continua di aerosol, in modo da creare un sistema che stabilisca una situazione stazionaria.

# Bibliografia

- [1] *Il particolato atmosferico*. ARPA: Agenzia Regionale Protezione Ambiente. URL: <https://www.arpa.vda.it/it/aria/1-inquinamento-atmosferico/2536-il-particolato-atmosferico> (cit. alle pp. 5, 6).
- [2] R. Sozzi. *La Micrometeorologia e la Dispersione degli Inquinanti in Aria*. Via Vitaliano Brancati, 48, 00144 Roma: APAT: Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003 (cit. alle pp. 9, 10).
- [3] A. Dépée, P. Lemaitre, M. Monier T. Gelain e A. Flossmann. «Laboratory study of the collection efficiency of submicron aerosol particles by cloud droplets – Part I: Influence of relative humidity». In: *Atmos. Chem. Phys.* 21 (mag. 2021), pp. 6945–6962 (cit. a p. 14).
- [4] Y. Yang et al. «Recent Advances in Quantifying Wet Scavenging Efficiency of Black Carbon Aerosol». In: *Atmosphere* 10 (apr. 2019), p. 175 (cit. a p. 16).
- [5] *Fenomeni di superficie: Capillarità*. INFN: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. URL: <http://web2.ba.infn.it/~depalma/lezioni/capillarita.pdf> (cit. alle pp. 18–20).
- [6] S. A. Alzamly, A. H. Aldefae, W. H. Humaish, E. K. Sinichenko e S. L. Zubaidi. *Geotechnical Engineering and Sustainable Construction: Design and Manufacturing of Rainfall Simulator Machine for the Soil Erosion Investigation*. Singapore: Springer Singapore, 2022 (cit. alle pp. 25, 26).
- [7] T. P. Regmi e A. L. Thompson. «Rainfall simulator for laboratory studies». In: *Applied Engineering in Agriculture* 16(6) (gen. 2000), pp. 641–47 (cit. alle pp. 27, 28).
- [8] S. Mohammadi, A. Amini, A. Salesi, M. Ahmadi e M. Jalali M. Badiee. «Designing and manufacturing a portable rainfall simulator». In: *Environmental Resources Research* 10(1) (feb. 2022), pp. 93–104 (cit. alle pp. 30, 31).
- [9] A. Quérel, M. Monier, A. I. Flossmann, P. Lemaitre e E. Porcheron. «The importance of new collection efficiency values including the effect of rear capture for the below-cloud scavenging of aerosol particles». In: *Atmospheric Research* 142 (giu. 2014), pp. 57–66 (cit. alle pp. 33–35, 38–43).

- 
- [10] *Operating instructions Present Weather Sensor OTT Parsivel 2*. OTT HydroMet. URL: <https://www.ott.com/download/operating-instructions-present-weather-sensor-ott-parsivel2-without-screen-heating-1/> (cit. a p. 46).
- [11] *ELPI+™ USER MANUAL Ver. 1.12*. Dekati Ltd. URL: <https://www.ecotech.com/wp-content/uploads/2015/03/ELPIPlusUserManual1.12.pdf> (cit. a p. 48).
- [12] *Scanning Electron Microscope*. Purdue University Radiological e Environmental Management. URL: [https://www.purdue.edu/ehps/rem/laboratory/equipment%5C%\\$20safety/Research%5C%\\$20Equipment/sem.html](https://www.purdue.edu/ehps/rem/laboratory/equipment%5C%$20safety/Research%5C%$20Equipment/sem.html) (cit. a p. 52).
- [13] *Safety Data Sheet Arizona Test Dust (ATD)*. Powder Technology inc. URL: <https://www.powdertechnologyinc.com/wp-content/uploads/2012/08/SDS.01.Arizona-Test-Dust.4-Feb-2016.pdf> (cit. alle pp. 54, 56).
- [14] J. R. Moody, J. Hogan Jr. e J. Ellison. «Structure from Motion for the Creation of Realistic 3D Models of ISO Fine Test Dust». Tesi di laurea mag. University of Minnesota, 2021 (cit. a p. 55).
- [15] L. Zhao, W. Windisch, F. X. Roth, K. Eder e T. Ettle. «Nutritive value of Masson Pine pollen (*Pinus massoniana*) in comparison to wheat bran and effects on stool characteristics in a pig model». In: *Die Bodenkultur* 58 (dic. 2007), pp. 1–4 (cit. a p. 58).
- [16] Y. Wang, H. Wang e Z. Zhang. «Analysis of Pine Pollen by Using FTIR, SEM and Energy-Dispersive X-Ray Anlaysia». In: *Spectroscopy and Spectral Analysis* 25 (nov. 2005), pp. 1797–1800 (cit. a p. 59).
- [17] Z. Liu, B. Dugan, C. A. Masiello e H. M. Gonnermann. «Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties». In: *PLoS ONE* 12 (giu. 2017), pp. 1–19 (cit. a p. 61).
- [18] E. Strzałkowska. «Morphology and chemical composition of mineral matter present in fly ashes of bituminous coal and lignite». In: *International Journal of Environmental Science and Technology* 18 (nov. 2021), pp. 2533–2544 (cit. alle pp. 62, 63).
- [19] E. Corte, D. Poggi e R. Bosio. «Realizzazione di un simulatore di pioggia di laboratorio in scala reale». Tesi di laurea mag. Politecnico di Torino, 2020 (cit. alle pp. 69, 75).