

Docenti e studenti a confronto su:

**LO STUDIO DELL' ARIA  
E DEI FENOMENI ATMOSFERICI**  
**Osservare e sperimentare nella scienza.**

Firenze, 19-20 aprile 2023

**PRIMO CLASSIFICATO**

SEZIONE TESINE TRIENNIO

**NON IMPORTA QUELLO CHE STAI GUARDANDO MA QUELLO CHE VEDI**

*Studenti*

Cirillo Miranda - Dabravalskyte Morta - D'Amico Raniero - Verrocchio Roberta

Classe 5C

*Istituto di Istruzione Superiore*  
Liceo Scientifico Galileo Galilei  
Pescara

*Docente Coordinatore*

Chella Federico

Il gruppo ha progettato, realizzato e accuratamente calibrato un dispositivo di misura per verificare la legge di Lambert-Beer-Bourger. Sono state realizzate misure di trasmissione di luce laser da parte di soluzioni acquose con diverse concentrazioni di soluto, nero di china. La preparazione dell'apparato ha comportato una fase di lavoro abbastanza complessa, con esito finale positivo; le misure sono state sistematiche e accurate. Dopo la verifica della legge sono state discusse, con esempi quantitativi, le sue applicazioni a misure di trasparenza atmosferica.

## Relazione del docente

Il gruppo di lavoro è costituito da quattro studenti e studentesse che frequentano la classe quinta di un Liceo Scientifico.

L'idea progettuale è nata dopo la partecipazione degli studenti ad un seminario tenuto a scuola, nel quale sono stati trattati diversi argomenti attinenti alla meteorologia, fra cui la formazione e composizione di aerosol atmosferico. Prendendo spunto da questo argomento e incuriositi dai processi atmosferici indotti dalla presenza di aerosol, gli studenti hanno scelto di approfondire un aspetto particolare: l'effetto della riduzione della visibilità in aria, misurata in termini di portata ottica meteorologica, con particolare riferimento alle leggi fisiche che ne permettono l'indagine. Il mio intervento nella scelta dell'argomento è stato marginale, partecipando alle loro discussioni ma lasciando piena autonomia.

La maggior parte del lavoro è stata condotta in piena autonomia da parte degli studenti, partendo dallo studio della letteratura esistente sull'argomento, passando per la realizzazione dell'apparato sperimentale, fino all'esecuzione delle misure. Il mio contributo si è concentrato principalmente sulla definizione dell'idea progettuale e sulla generale supervisione del lavoro svolto. La tesina è stata redatta dagli studenti in piena autonomia.

Il gruppo è soddisfatto del lavoro eseguito, così come chi scrive. Pertanto, sottopongo la tesina alla valutazione da parte della commissione del convegno.

ScienzAfirenze

# «NON IMPORTA QUELLO CHE STAI GUARDANDO MA QUELLO CHE RIESCI A VEDERE»

*Henry David Thoreau*

---



---

## INDICE :

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Introduzione.....</i>                     | <i>3</i>  |
| <i>Cenni storici.....</i>                    | <i>3</i>  |
| <i>Parte teorica:</i>                        |           |
| <i>La legge di Lambert-Beer-Bouguer.....</i> | <i>4</i>  |
| <i>Parte pratica:</i>                        |           |
| <i>Materiali necessari.....</i>              | <i>6</i>  |
| <i>Preparazione.....</i>                     | <i>6</i>  |
| <i>Descrizione esperimento.....</i>          | <i>7</i>  |
| <i>Analisi e discussione dei dati.....</i>   | <i>10</i> |
| <i>Distanza ottica metereologica.....</i>    | <i>14</i> |
| <i>Conclusione.....</i>                      | <i>15</i> |
| <i>Ringraziamenti .....</i>                  | <i>15</i> |
| <i>Bibliografia.....</i>                     | <i>16</i> |

---

---

## INTRODUZIONE:

L'aria una miscela di sostanze aeriformi, essenziale per la vita per cui la salvaguardia è fondamentale per qualsiasi organismo biologico. La sua stessa qualità e salubrità è determinata dalla densità che, ad eccezione di fenomeni atmosferici quali nebbia, è influenzata dalla presenza di "aerosol atmosferico", uno degli inquinanti più frequenti nelle aree urbane, una composizione di sostanze solide o liquide sospese nell'ambiente. A tutti noi almeno una volta è capitato, in condizioni di poca visibilità su strada, di dover rallentare onde evitare pericoli. Per la XX edizione del concorso ScienzaFirenze, abbiamo messo in relazione che lega la visibilità in aria con la presenza di particolato atmosferico, attraverso lo studio e l'analisi della legge di Lambert-Beer-Bouguer che descrive l'assorbimento di un raggio elettromagnetico (tipicamente si tratta di luce visibile proveniente dal sole) che si propaga attraverso un mezzo opaco come l'aria. Pertanto, sapendo che la tutela del clima e dell'ambiente, regolata da apposite norme legislative [1], è un tema molto influente al giorno d'oggi, recepire e comprendere questo aspetto è importante e fondamentale per la difesa del nostro pianeta, minacciato assiduamente da emissioni di  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}$ .

## CENNI STORICI

La legge porta i nomi di tre fisici diversi poiché, secondo l'opera originale di Mach [2], le prime applicazioni della legge apparvero separatamente nel 1760 sia nel "Traité d'optique" [3] di Bouguer che nella "Photometria" [4] di Lambert. Il primo, durante una vacanza in Alentejo, in Portogallo, osservando il vino rosso definì la quantità di luce perduta passando attraverso un determinato intervallo dell'atmosfera terrestre. Le scoperte di Bouguer furono riprese successivamente da Lambert che elaborò una legge per cui l'assorbanza è direttamente proporzionale allo spessore del mezzo

---

---

attraversato. I due sono riconosciuti come i fondatori della "fotometria", mentre il contributo di Beer risale alla fine del 1852 [5] quando aggiunse alla legge di Lambert il

rapporto di proporzionalità tra l'assorbanza e le concentrazioni dei costituenti fisico-chimici responsabili dell'attenuazione, dandogli la forma in cui è più spesso utilizzata.

La forma moderna [6] della legge di Lambert-Beer combina questi due enunciati correlando l'assorbanza sia alla concentrazione della specie assorbente che alla lunghezza del cammino ottico nel materiale.

## LEGGE DI LAMBERT-BEER-BOUGUER

La legge di Lambert-Beer, o legge di Lambert-Beer-Bouguer è una legge che afferma che l'attenuazione dell'intensità della luce è proporzionale allo spessore del materiale, all'intensità iniziale e alla concentrazione di soluzione in cui passa il fascio luminoso. Ciò a livello macroscopico si mostra come un abbassamento dell'intensità luminosa che nel SI viene misurata in Candela ( $cd$ ) [seppur il nostro strumento misura l'Intensità luminosa tramite il Lux ( $lx = \frac{cd \cdot sr}{m^2}$ , dove  $sr$  sta per il Steradiano, l'unità di misura degli angoli solidi)].

Quindi da tale legge possiamo affermare che in un tratto  $dx$  l'intensità si abbassa di un valore  $dI$  in relazione alla legge sopra citata; per cui:

$$dI = -kI dx$$

Dove  $k$  è la costante di assorbimento del materiale, che dipende dalla concentrazione molare della soluzione.

Per trovare la formula generale, e quindi la nostra costante, basta semplicemente integrare l'intensità e la distanza:

$$\frac{dI}{I} = -k dx \rightarrow \int \frac{dI}{I} = -k \int dx$$

---

---

da cui risulta che

$$\ln(I) = -kx + c \Rightarrow I(x) = ce^{-kx}$$

Da questa primitiva possiamo quindi trovare l'equazione dell'Intensità della luce a partire dalle condizioni a contorno:

$$\begin{cases} I(x) = ce^{-kx} \\ I(x_0) = I_0 \end{cases} \Rightarrow I(x) = I_0 e^{-kx}$$

Nel nostro esperimento, la distanza è rimasta pressoché invariata per motivi strutturali e di tempo, seppur siamo riusciti a variare la concentrazione del nostro composto.

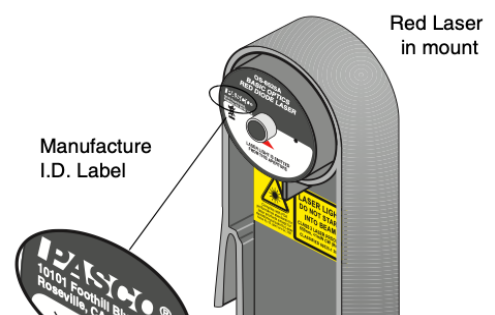
Per capire come varia questa costante e quindi comprenderne il coefficiente di assorbimento, abbiamo trovato che per l'OMM (Organizzazione Meteorologica Mondiale) la visibilità è "la distanza percorsa nell'atmosfera per ridurre il flusso di un raggio collimato proveniente da una lampada incandescente a 2700 °K al 5% del suo valore originale" [7].

Per tanto, per la OMM, la cecità, è pari ad un'intensità pari o inferiore al 5% del suo valore originale

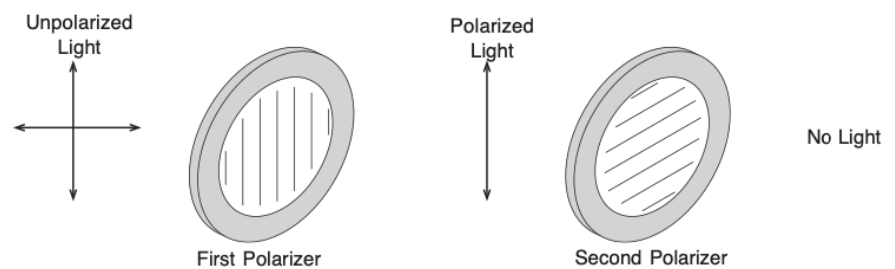
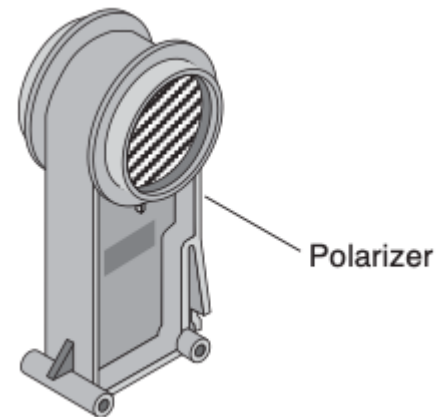
Da ciò, possiamo dedurre che la formula da noi precedentemente ottenuta, assuma un aspetto del tipo:  $\frac{I(x)}{I} = 5\% \wedge \frac{I(x)}{I} = e^{-kx} \rightarrow 5\% = e^{-kx}$  e quindi otterremo che  $kx = -\ln(0.05)$ , da cui ricaviamo che  $k = -\frac{\ln(0.05)}{x}$ , ma  $\ln(0.05) \sim -3$  e quindi otterremo che  $k \sim \frac{3}{x}$

La costante  $k$ , però, è un valore che dipende dalla concentrazione molare della sostanza presa in atto, poiché la legge può essere espressa in termini di un valore detto assorbanza ( $A = \epsilon M l$  dove  $\epsilon$  è il coefficiente di assorbimento molare,  $M$  è la concentrazione, e  $l$  è il cammino geometrico) nella relazione  $I(x) = I_0 e^{-A}$ .

## MATERIALI UTILIZZATI



- lastre metalliche per allineamento
- stativi/aste di appoggio fissate
- acqua distillata
- inchiostro nero di china  
(soluzione di MIT e CMIT)
- beckers
- pipette
- contagocce
- sensore ricevitore laser
- Pasco Basic Optics Diode Laser (650 nm) OS-8525A (red),  
raggio monocromatico di 3 mm
- polarizzatore Pasco
- cuvette di vetro (4,2cm x 8,2 cm)
- tessuto per pulire cuvette
- computer per  
elaborazione dati  
collegato via USB al  
ricevitore



## PREPARAZIONE ESPERIMENTO

Prima di iniziare l'esperimento abbiamo effettuato i dovuti accertamenti riguardo l'intensità del laser e la taratura della soluzione acquosa con nero di china e ci siamo accertati di pulire con cura le cuvette maneggiandole solo dai bordi superiori e controllando la presenza di eventuali bolle d'aria. Abbiamo quindi misurato l'intensità emessa con il laser a diverse distanze dal ricevitore, senza le cuvette di plexiglas, per

---

confermare che l'influenza della perdita di intensità con la distanza (effetto Keplero) era trascurabile.



Nel nostro progetto sperimentale, questo era vero entro gli errori sperimentali delle misure.

Per quanto riguarda la taratura della soluzione, abbiamo utilizzato un becker con sensibilità 0,1 ml e lo abbiamo riempito fino a 5 ml servendoci di un contagocce e annotando il numero di gocce necessarie. Per avere il numero di gocce necessarie per riempire 1ml abbiamo diviso per 5 e ottenuto 1 ml = 16 gocce di inchiostro di china. Per evitare eventuali errori di misurazione del contagocce abbiamo ripetuto il procedimento per tre volte, sempre mantenendo una bassa concentrazione di soluto per una buona visibilità del laser durante l'esperimento.

## DESCRIZIONE ESPERIMENTO

Per iniziare abbiamo reperito i materiali per eseguire l'esperimento, come mostrato dalla figura abbiamo composto la struttura di base ponendo ad un'estremità l'emettitore laser e dall'altra il ricevitore, impilando quattro aste di appoggio fissate

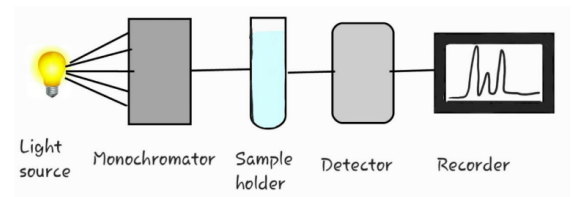


con gli opportuni chiodi per

far sì che emettitore e

ricevitore fossero alla stessa altezza. Di seguito abbiamo

fissato il ricevitore con del nastro adesivo in modo che il laser emesso entrasse perfettamente nell'ingresso del sensore e collegato quest'ultimo ad un computer per registrare i dati e convertire il segnale ottico in segnale elettrico digitale.



---

Per accertarci che il ricevitore e l'emettitore avessero la stessa sensibilità abbiamo acceso il laser e rilevato sul computer il valore che il raggio trasmesso registrava senza ostacoli presenti sul percorso ottico, in seguito ponendo un mezzo poco opaco fra il

raggio incidente e lo strumento ci saremmo aspettati un effettivo abbassamento dell'intensità, ma ciò non è accaduto. Stabilito che il raggio incidente era troppo intenso per il ricevitore, abbiamo utilizzato una lente polarizzata graduabile al fine di diminuire l'intensità del laser monocromatico rosso e dopo diversi tentativi abbiamo stabilito che l'angolo di polarizzazione migliore per permettere allo strumento di poter registrare l'intensità del nostro fascio monocromatico era di circa 20 gradi. In questo modo abbiamo attenuato il raggio incidente portandolo ad una sensibilità adatta al compimento dell'esperimento.

La legge di Beer-Lambert afferma che l'assorbanza di una soluzione è direttamente proporzionale alla concentrazione delle specie assorbenti nella soluzione e nel percorso lunghezza. Perciò abbiamo realizzato la variazione di percorso utilizzando la lunghezza delle cuvette poste in parallelo rispetto al laser:

- 1 cuvetta= 8,2 cm
- 2 cuvette= 16,4 cm
- 3 cuvette= 24,6 cm
- 4 cuvette= 32,8 cm

In questo modo abbiamo ottenuto una variazione della lunghezza percorsa dal laser.

Per quanto riguarda le specie assorbenti abbiamo registrato il percorso ottico attraverso aria, acqua e soluzione acquosa con nero di china in diverse concentrazioni.

---

Posizionando il laser in modo che attraversasse le cuvette di vetro, le prime misure sono state effettuate ponendo le quattro cuvette, una alla volta, sulle aste d'appoggio, tra il ricevitore e l'emettitore. Abbiamo confermato la legge di Beer-Lambert registrando sul PC un effettivo abbassamento d'intensità all'aumentare del percorso ottico, ossia dell'aggiunta delle cuvette. Abbiamo ripetuto tre volte le misurazioni per accertarci di ottenere risultati simili.

Conseguendo le misurazioni per la seconda specie assorbente, versando dell'acqua distillata all'interno delle cuvette, una alla volta, abbiamo notato dai dati rilevati che la legge di Lambert-Beer non risulta verificata poiché il livello d'intensità non diminuiva linearmente all'aumentare del percorso a causa dell'errato posizionamento delle vaschette che non risultavano perfettamente perpendicolari al raggio trasmesso. Una delle maggiori difficoltà nell'esecuzione della misura è consistita nel posizionamento corretto, infatti per risolvere il problema abbiamo fissato sulle aste d'appoggio delle lastrine metalliche su cui riporre le cuvette. Abbiamo ripetuto le misurazioni dell'aria e dell'acqua verificando la legge. Infine per determinare la concentrazione dell'assorbitore in una soluzione abbiamo utilizzato una soluzione acquosa con inchiostro nero di china a basse concentrazioni, diluito in acqua con mostrato in tabella.

|  |              |         |         |        |        |        |        |        |
|--|--------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| gocce<br>soluzione<br>primaria<br>0,1%             | 2            | 4       | 8       | 16     | 32     | 48     | 64     | 96     |
| soluto (ml)  | 0,125        | 0,25    | 0,5     | 1      | 2      | 3      | 4      | 6      |
| nero di china<br>nella<br>soluzione<br>finale (ml) | 0,00012<br>5 | 0,00025 | 0,0005  | 0,001  | 0,002  | 0,003  | 0,004  | 0,006  |
| solvente (ml)                                      | 110          | 110     | 110     | 110    | 110    | 110    | 110    | 110    |
| % soluzione<br>finale                              | 0,00012<br>5 | 0,00023 | 0,00045 | 0,0009 | 0,0018 | 0,0027 | 0,0035 | 0,0052 |

---



---

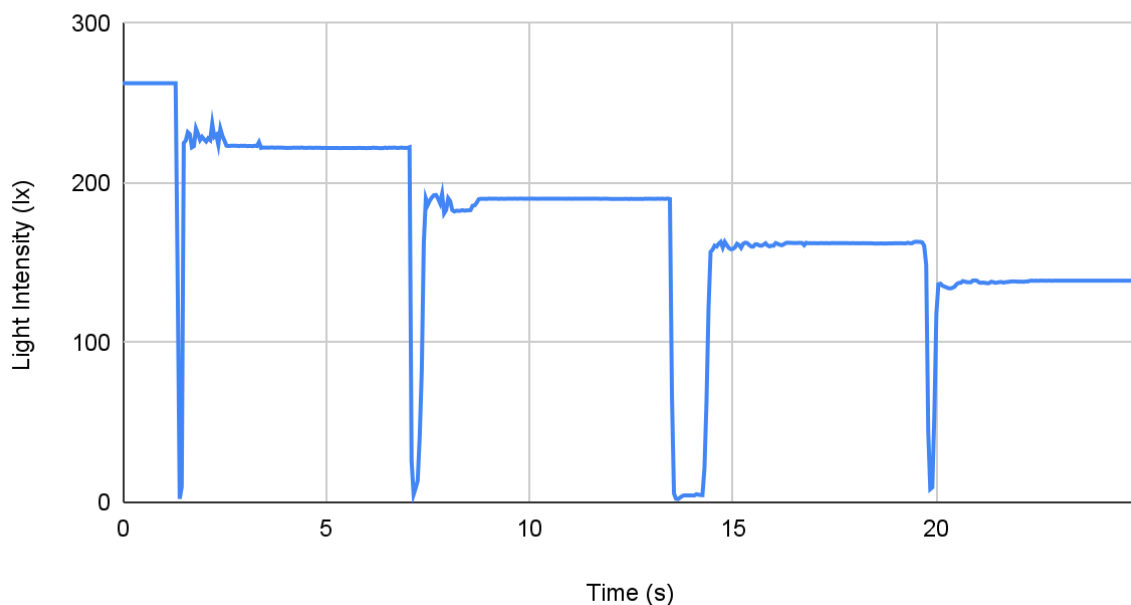
Quindi abbiamo effettuato la misurazione ponendo come specie assorbente iniziale le 4 cuvette riempite d'acqua, assicurandoci che il laser attraversasse quest'ultima e in seguito secondo i dati ricavati in tabella riempiendo le cuvette attraverso un

contagocce, una dopo l'altra, con inchiostro diluito. Abbiamo notato che l'assorbanza cambia in base alla concentrazione: una maggiore concentrazione della soluzione opaca assorbe più luce e trasmette meno di una soluzione con minore concentrazione.

## RACCOLTA E DISCUSSIONE DATI

Dai dati sperimentali, abbiamo osservato che non è solamente la concentrazione e la distanza sorgente-ricevitore l'elemento che altera l'intensità luminosa, ma un ruolo importante lo gioca anche la geometria del problema. Infatti nei nostri problemi abbiamo misurato le variazioni date dall'uso di una o più vaschette (in questo caso da 1 a 4) che vengono mostrate dalla caduta a picco dell'Intensità.

### Vasche vuote parallele



---

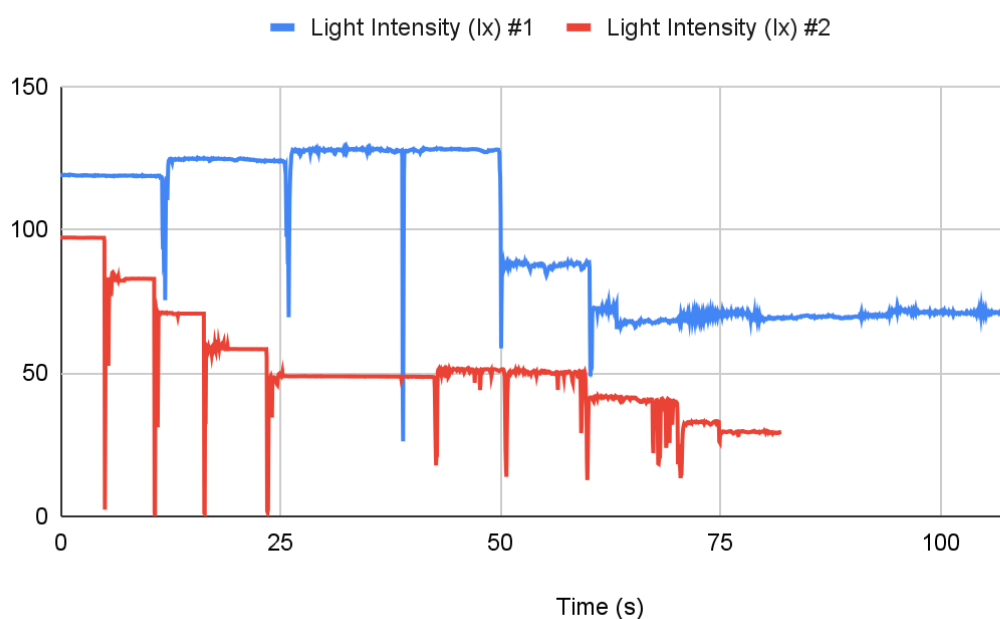
In questo grafico la superficie maggiore è stata messa parallelamente al raggio e, rispetto al grafico precedente, le intensità della luce hanno un andamento molto simile, seppur, facendo una media con un errore di circa 0.02, l'intensità delle vaschette perpendicolari è minore di quella delle vaschette parallele

$$Vaschette \perp \sim 137.33 \pm 0.02 < Vaschette // \sim 138.39 \pm 0.02$$

Data la bassa differenza, abbiamo trascurato tale effetto, portandoci ad escludere gli effetti di rifrazione, riflessione e dispersione della luce.

Dati tali evenienze, abbiamo poi scelto per comodità le vaschette parallele e messo l'acqua, cosa che tramite lo scattering, la rifrazione, la diffrazione e in parte dall'assorbimento, l'intensità della nostra luce monocromatica rossa è diminuita

### Vaschette parallele con l'aggiunta di Acqua (H<sub>2</sub>O)



ulteriormente, decidendo poi di designare come  $I_0$  l'intensità finale mostrata nel nostro grafico.

Per vari errori, dovuti alla posizione e alla forma delle vaschette, abbiamo notato spesso innalzamenti dell'intensità, cosa che teoricamente non potrebbe accadere.

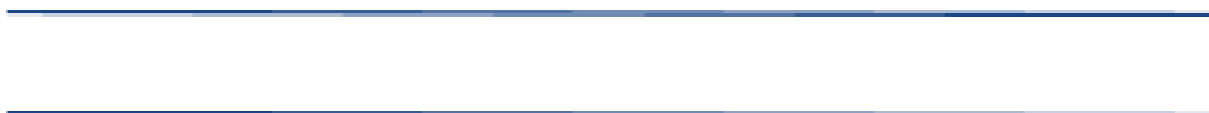
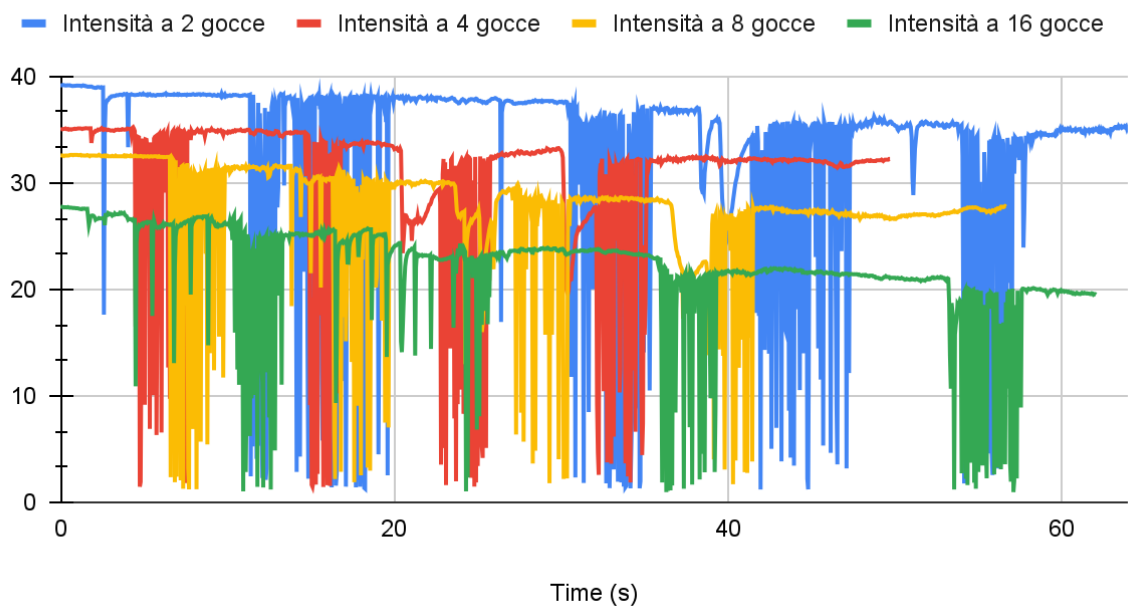
Gli innalzamenti registrati sono dati dalla sensibilità del sensore, al posizionamento errato delle vaschette e dalla luce rifratta che ne aumenta l'intensità

Data le misure, abbiamo stimato che la nostra  $I_0$  si aggiri intorno ai 40 lx [precisamente ( $39.07 \pm 0.02$ ) lx]

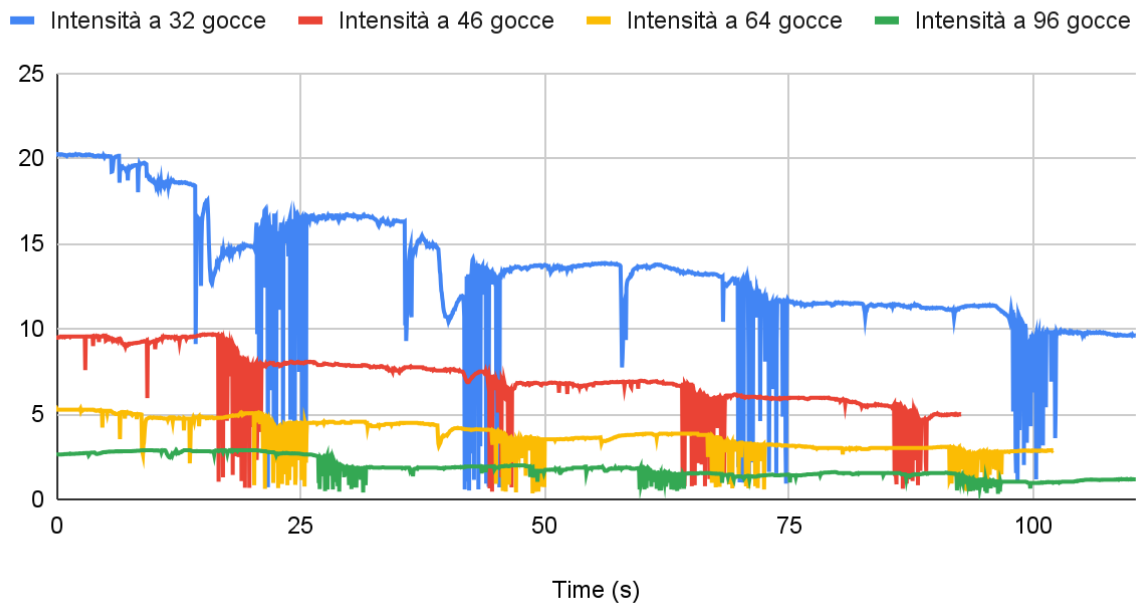
(nel grafico sopra le intensità vanno da circa 70 lx ai 20 lx, trovandoci a dover scartare come validi i dati sopracitati)

Dopo la stime dell'Intensità iniziale, abbiamo aggiunto un soluzione di MIT e CMIT (il nostro inchiostro di china), stimando le differenze dell'intensità a gocce.

### Intensità della luce a 2 gocce, 4 gocce, 8 gocce e 16 gocce



## Intensità della luce a 32 gocce, 46 gocce, 64 gocce e 96 gocce



Dai grafici qui sopra, abbiamo quindi stimato la tabella sottostante:

|             | 2 gocce | 4 gocce | 8 gocce | 16 gocce | 32 gocce | 48 gocce | 64 gocce | 96 gocce |
|-------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Vaschetta 1 | 37.84   | 34.477  | 31.38   | 25.21    | 16.48    | 7.80     | 4.46     | 1.87     |
| Vaschetta 2 | 36.83   | 33.57   | 29.95   | 23.50    | 13.66    | 6.81     | 3.70     | 1.53     |
| Vaschetta 3 | 35.50   | 32.81   | 28.44   | 21.40    | 11.35    | 5.85     | 3.04     | 1.18     |
| Vaschetta 4 | 34.84   | 32.08   | 27.20   | 19.78    | 9.73     | 4.97     | 2.84     | 0.79     |

Dalle osservazioni empiriche, abbiamo notato che la luce a 64 gocce era ancora visibile ai nostri occhi opacizzando la sorgente, mentre a 96 gocce la luce monocromatica non era più visibile ai nostri occhi.

Data l'equazione di LBB, l'intensità stimata per cui la nostra visibilità precipiti è circa di

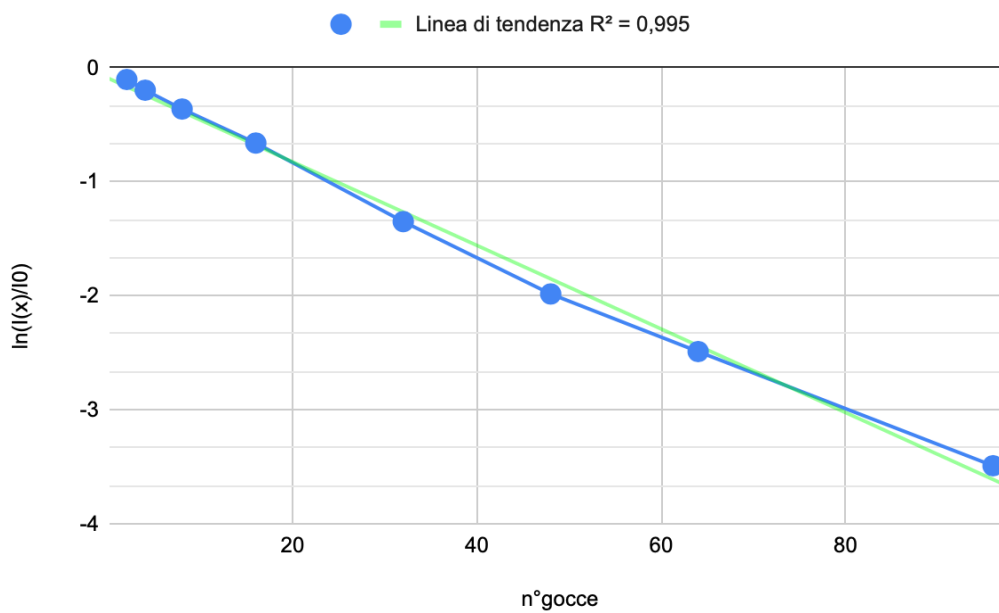
$$I_{min} = 5\% di I_0 \sim 1.953 \pm 0.001$$

Avendo ottenuto dai dati sperimentali un valore  $I < I_{min}$  abbiamo quindi confermato la legge.

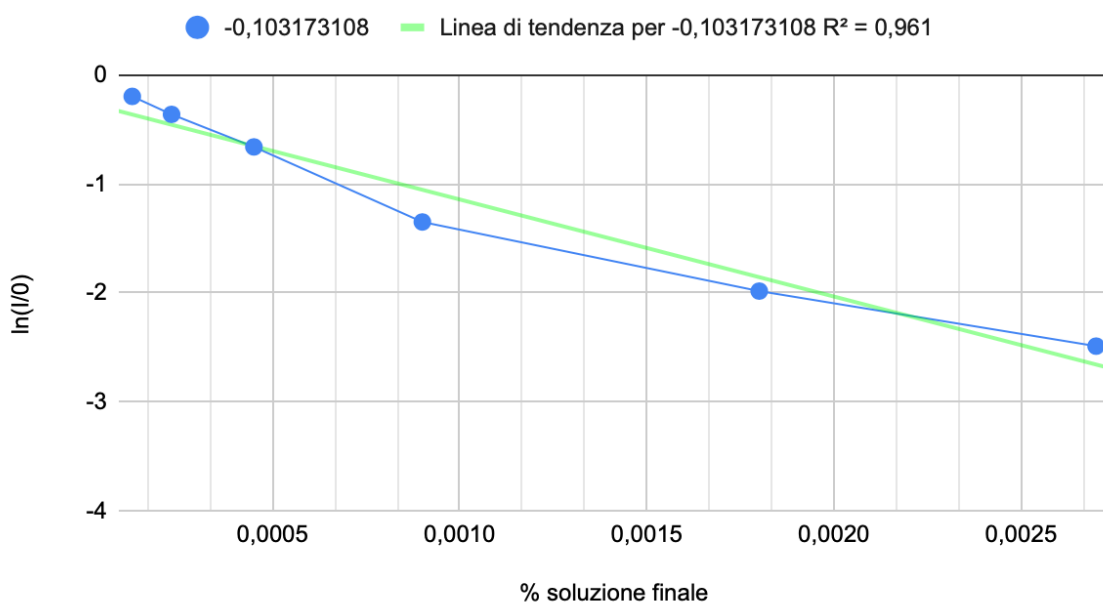
Da tali dati e dalla concentrazione, possiamo quindi stimare la costante di assorbimento ipotizzando una concentrazione costante:

$$I_{min} = I_0 e^{-kx} \Rightarrow \frac{I_{min}}{I_0} = e^{-kx} \Rightarrow -\ln(20) = kx \rightarrow 3 \sim kx \rightarrow k \sim \frac{3}{x} \text{ da ci\o{}}\text{}$$

$$k \sim (365.853659 \pm 0.000004) m^{-1}$$

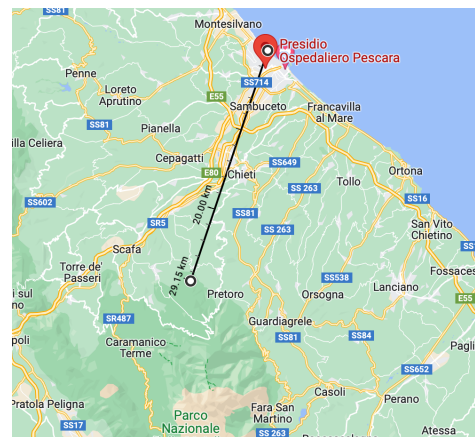
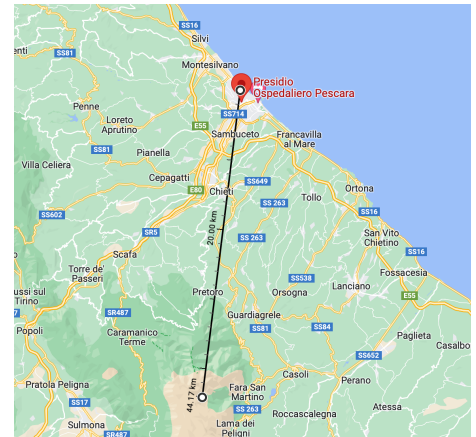


### % soluzione finale





## DISTANZA OTTICA METEOROLOGICA



Una volta dimostrata la legge di Lambert-Beer-Bourger è opportuno e funzionale applicarla alla realtà. Solitamente è utilizzata nel settore meteorologico.

La visibilità meteorologica, infatti, è stata inizialmente definita come una quantità che deve essere stimata da un osservatore umano. Essendo, influenzata da molti fattori soggettivi e fisici, la grandezza meteorologica essenziale, che è la trasparenza dell'atmosfera, è oggettivamente misurabile ed è rappresentata dal range ottico meteorologico (MOR).

---

L'intervallo ottico meteorologico è la lunghezza del percorso nell'atmosfera necessario per ridurre il flusso luminoso, in un raggio collimato da una lampada a incandescenza, a una temperatura di colore di 2 700 K, al 5% del suo valore originale [7]. La formula del MOR è espressa dalla formole:

$F = F_0 e^{-av}$  dove  $F_0$  rappresenta il flusso luminoso iniziale ed  $F$  quello finale;  $v$  è la distanza in km (MOR) ed  $a$  che è data dalla somma della costante dell'aria ( $0,012 \text{ Km}^{-1}$ ) e la costante dell'aerosol virabile e che dipende dalla dimensione delle particelle e dalla loro composizione chimica. Essendo il MOR facilmente calcolabile utilizzando Google maps, la costante  $a$  è data da:

$$F/F_0 = e^{-av} = 5\% \quad \ln(e^{-av}) = \ln(0,05) \quad -av \approx -3 \quad a \approx 3/v$$

Pertanto nel nostro caso:

$$a = 3/44 \text{ km} = 0,68$$

$$a = 3/29 \text{ km} = 0,1$$

## CONCLUSIONE

La fisica nel corso dei secoli ha sempre fornito notevoli contributi al progresso dell'essere umano e in questo caso ha dimostrato come dalla visibilità ambientale sia possibile rendersi conto anche dell'inquinamento atmosferico che stiamo producendo nel corso degli anni attraverso la legge di Lambert-Beer- Bourger.

Dimostrando la dipendenza della visibilità ambientale dalla presenza di particolato presente nell'aria, fonte primaria di inquinamento.

## RINGRAZIAMENTI

Al termine di questa esperienza volevamo ringraziare chi ci ha permesso di realizzare e portare a termine il progetto: il nostro docente di matematica e fisica il quale dopo averci proposto la partecipazione al progetto, ci ha seguiti e si è reso disponibile per qualsiasi chiarimento e il dirigente scolastico di questo istituto, che ha permesso l'adesione all'iniziativa e per aver messo a disposizione i laboratori nelle ore pomeridiane.

---

---

## BIBLIOGRAFIA

[1] [DECRETO LEGISLATIVO 13 agosto 2010, n. 155](#)

[2] Mach E 1926 The Principles of Physical Optics: An Historical and Philosophical Treatment (New York: Dutton)

[3] Bouguer P 1760 Traité D'optique Sur La Gradation De La Lumière (Paris: Guerin and Delatour)

[4] Lambert J H 1760 Photometria, Sive De Mensura Et Gradibus Luminis, Colorum Et Umbrae (Leipzig: Engelmann)

[5] Beer A 1852 Bestimmung der absorption des rothen lichts in farbigen flüssigkeiten Ann. Phys. [162 78-88](#)

[6] Mach E 2006 The Principles of Physical Optics: An Historical and Philosophical Treatment (Dover: Dover Publications)

[7] [OMM: CHAPTER9: MEASUREMENT OF VISIBILITY](#)

R Di Capua et al 2014 Eur. J. Phys. 35 045025