

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Fisica

# Impiego di sensori ottici di riflettanza per la diagnosi dello stato fisiologico delle colture agricole

Relatore:  
Prof. Giorgio Prosdocimi Gianquinto

Presentata da:  
Fabio Chessa

Correlatore:  
Dott. Vito Aurelio Cerasola

Anno Accademico 2021/2022

<b>Abstract</b> .....	3
<b>Introduzione</b> .....	4
<b>1 Agricoltura di precisione e diagnostica ottica in agricoltura</b> .....	6
1.1 Agricoltura di precisione .....	6
1.2 Gestione dinamica delle fertilizzazioni tramite la diagnostica ottica .....	7
<b>2 Proprietà e leggi della luce</b> .....	9
2.1 Natura della radiazione .....	9
2.2 Spettro elettromagnetico.....	11
2.3 Corpo nero .....	12
2.4 Radiometria .....	14
2.5 Legge del coseno .....	18
2.6 Riflessione .....	19
2.7 Radianza e Irradianza .....	21
2.8 Proprietà fisiche della radiazione solare .....	22
2.9 Luce polarizzata.....	24
<b>3 Interazione luce-pianta</b> .....	27
3.1 Riflettanza, trasmittanza e assorbanza delle foglie.....	28
3.2 Riflessione della luce da parte delle foglie.....	31
3.3 Riflessione dalla superficie delle foglie.....	31
3.4 Riflessione dalla struttura interna della foglie.....	32
3.5 Proprietà superficiali e interne della foglia a confronto .....	34
3.6 Riflettanza e contenuto di azoto .....	35
3.7 Indici vegetazionali .....	37
<b>4 Rilevamento della luce da parte dei sensori ottici</b> .....	40
4.1 Imaging spettrale .....	40
4.2 Imaging iperspettrale .....	41
4.3 Sensori attivi e sensori passivi.....	42
4.4 Struttura generica di uno spettrometro .....	43

4.5 Parametri di un sensore .....	44
4.6 Sensori .....	47
4.7 Confronto tra i sensori CMOS e CCD.....	51
<b>5 Spettroscopia di campo .....</b>	<b>54</b>
5.1 Geometria della spettroscopia di campo.....	54
5.2 Fattori che influenzano le misure .....	57
<b>Conclusioni.....</b>	<b>61</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>62</b>

# Abstract

Questa tesi ha lo scopo di analizzare i principali fenomeni fisici legati all'interazione tra radiazione elettromagnetica e piante per la diagnostica ottica in agricoltura. L'uso efficiente dei fertilizzanti è un obiettivo importante per la ricerca agricola per migliorare le prestazioni delle colture, la qualità ambientale e la sostenibilità delle produzioni. La gestione dinamica delle fertilizzazioni permette di somministrare i nutrienti, come l'azoto (N), quando sono cruciali per lo sviluppo della pianta, evitando mancanze o eccessi. Questo è possibile mediante tecniche di spettrometria che permettono di valutare lo stato di N nelle colture tramite misure di riflettanza spettrale delle foglie. La riflettanza di una copertura vegetale è legata al suo contenuto di clorofilla che è a sua volta correlato alla concentrazione di azoto. Partendo dalle basi fisiche della radiazione elettromagnetica, si analizzano le principali grandezze radiometriche e ci si concentra in particolare sulla natura della riflessione, speculare e diffusa, per meglio comprendere la riflettanza di una chioma. Si esaminano il principio di funzionamento di un generico spettrometro e i parametri più importanti attorno a una misura spettrale. Viene data una panoramica dei principali sensori attualmente più diffusi. Infine, si effettuerà un'attenta valutazione sulla geometria della spettroscopia di campo e i principali fattori che influenzano le misure di riflettanza.

# Introduzione

Lo stress nelle piante è causato da diversi fattori biotici o abiotici che influenzano negativamente la crescita delle piante e nel complesso riducono significativamente la resa (Katsoulas et al., 2016). Lo stress nelle colture si manifesta nelle foglie in molti tipi di sintomi. Lo stress nutritivo, causato ad esempio da una bassa disponibilità di azoto (N) porta alla degradazione dei pigmenti vegetali, che si manifesta con un ingiallimento ed una senescenza precoce a partire dalle foglie basali più vecchie. Misure distruttive dello stato dell'azoto delle colture sono ancora troppo costose e lunghe per giustificare il loro uso (Gianquinto et al., 2011), e l'implementazione di tecniche basate su strumenti non distruttivi come i radiometri spettrali sono un'opportunità che ha suscitato molto interesse negli anni, dal momento che rapidi monitoraggi della riflettanza fogliare permettono il calcolo di indici (definiti vegetazionali) che possono correlarsi ai diversi aspetti dello stato fitosanitario della pianta (come stress nutrizionali, stress idrici ed attacchi da parte di patogeni). La concentrazione di N nella foglia è strettamente correlata alla concentrazione di clorofilla, la quale è capace di influenzare la riflettanza di una copertura vegetale nelle lunghezze d'onda del verde (560 nm) e del vicino infrarosso (800-810 nm). Di conseguenza, il monitoraggio di queste lunghezze d'onda permette di valutare lo stato di N delle colture (Gianquinto et al., 2011). Queste tecniche di monitoraggio della riflettanza, adottate prevalentemente nell'ambito dell'agricoltura di precisione, possono essere condotte mediante l'uso di camere multispettrali o iperspettrali, spesso connesse a dei droni. In questo elaborato parleremo di quali sono gli obiettivi dell'agricoltura di precisione e di come gestire le fertilizzazioni mediante strumenti di diagnostica che misurano le proprietà spettrali delle chiome. Per fare ciò sarà necessario partire dalla natura fisica della radiazione elettromagnetica. Approfondiremo le principali proprietà e leggi della luce, in particolare il fenomeno della riflessione, questa può essere divisa in riflessione speculare e riflessione diffusa, ciascuna delle quali porta con sé

determinate informazioni dell'oggetto illuminato. Da argomenti puramente fisici passeremo all'interazione tra luce e pianta, analizzando in che modo la superficie e la struttura interna della foglia interagiscono con la radiazione incidente e di come tramite delle analisi di riflettanza si possono avere informazioni sul contenuto di azoto di una pianta. Analizzeremo la struttura di un generico spettrometro e quali sono i principali metodi di presa dati per l'acquisizione di cubi iperspettrali contenenti tutti i dati spaziali e spettrali raccolti. Verranno elencate le principali caratteristiche che caratterizzano un sensore e si darà una panoramica dei principali sensori attualmente più diffusi e li metteremo a confronto mostrando i pro e i contro di ciascuno. Infine, ci si occuperà dello studio delle relazioni tra le informazioni spettrali e il particolare ambiente di campo in cui si effettuano le misure. Questo è importante perché le misure di riflettanza devono essere accompagnate dalle particolari condizioni ambientali in cui si è effettuata la presa dati. Ciò è fondamentale per poter interpretare i valori misurati e per garantire misure accurate e rappresentative dello stato sanitario della coltura.

## Capitolo 1

# Agricoltura di precisione e diagnostica ottica in agricoltura

### 1.1 Agricoltura di precisione

L'agricoltura di precisione consiste nell'applicazione di tecnologie e principi per gestire la variabilità spaziale e temporale associata a tutti gli aspetti della produzione agricola allo scopo di migliorare le prestazioni delle colture, la qualità ambientale (Pierce & Nowak, 1999) e migliorare la sostenibilità della produzione alimentare (Gebbers & Adamchuk, 2010). Le caratteristiche importanti dell'ambiente di produzione delle colture, come l'acqua e la fornitura di nutrienti, spesso variano notevolmente nello spazio e nel tempo all'interno di un singolo campo agricolo. La variazione spaziale nelle prestazioni delle colture può essere causata dal suolo così come da malattie, infestanti, parassiti e dalla precedente gestione del terreno, mentre la variabilità nel tempo deriva dalla gestione degli anni precedenti delle colture, così come dalle mutevoli condizioni ambientali dell'anno produttivo (Gebbers & Adamchuk, 2010). Nell'agricoltura di precisione è importante studiare e sviluppare dei metodi per applicare un determinato trattamento nel posto giusto al momento giusto (Gianquinto et al., 2011). Secondo Pierce & Nowak (1999) gli obiettivi dell'agricoltura di precisione sono fondamentalmente tre:

- (1) Ottimizzare l'uso delle risorse disponibili per aumentare la redditività e la sostenibilità delle operazioni agricole;
- (2) Ridurre l'impatto ambientale negativo;

- (3) Migliorare la qualità dell'ambiente di lavoro e gli aspetti sociali dell'agricoltura, dell'allevamento e delle relative professioni.

## 1.2 Gestione dinamica delle fertilizzazioni tramite la diagnostica ottica

La gestione dinamica della fertilizzazione è un modo efficiente per somministrare i nutrienti alla pianta quando sono cruciali per il suo sviluppo (Gianquinto et al. (2011). Infatti, piccoli cambiamenti nella disponibilità di N intorno al punto ottimale di N richiesto dalle colture risultano in riduzioni di resa (Gianquinto et al., 2010). Il rilevamento precoce dello stress delle piante è molto critico soprattutto nei sistemi di produzione intensiva, al fine di minimizzare la perdita di produttività sia acuta che cronica. Esperimenti condotti sul mais (*Zea mays*) in Quebec hanno evidenziato che la quantità di azoto ottimale non varia solo tra le stagioni, in base alla regione, ai suoli e alla gestione delle colture ma anche tra i campi diversi e persino all'interno di uno stesso campo (Tremblay et al., 2008). L'interazione della luce con i materiali biologici, come le foglie, è un fenomeno complicato. Quando una foglia è esposta a una sorgente di radiazione una piccola quantità di luce incidente viene riflessa dalla superficie esterna, causando la *riflettanza speculare*; la restante energia incidente entra nel campione, e i fotoni subiscono molteplici riflessioni e rifrazioni prima di essere assorbiti o riflessi per riemergere dalla superficie del campione, generando la *riflettanza diffusa* (Qin et al., 2013). Quindi la misura di riflettanza generalmente coinvolge entrambi i segnali di riflettanza speculare e diffusa. Come vedremo in seguito è la riflettanza diffusa che fornisce informazioni provenienti dai tessuti fogliari e da cui possiamo ricavare informazioni sullo stato di N delle colture. La concentrazione di N nella vegetazione verde e il contenuto di clorofilla sono strettamente correlati in quanto l'azoto è un



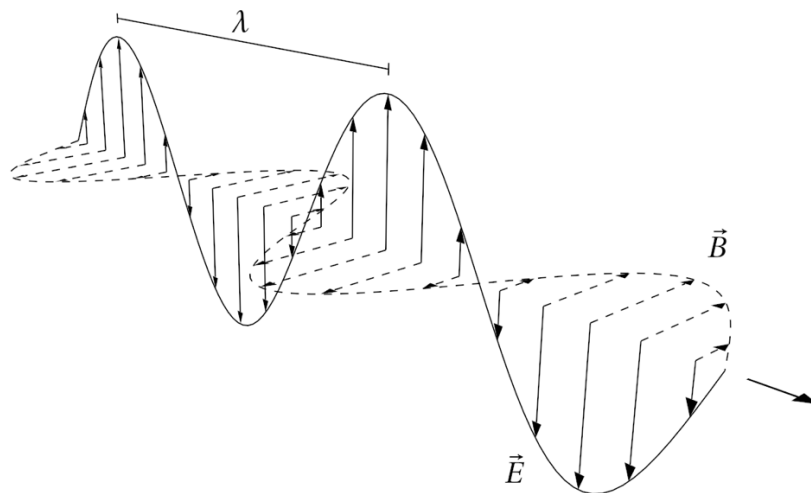
elemento che è parte della struttura della clorofilla. La riflettanza della chioma nelle bande del verde è legata al contenuto di clorofilla delle foglie, e può essere usata per valutare lo stato di N delle colture (Gianquinto et al., 2011). Comprendere la natura della radiazione e il modo in cui interagisce con le foglie è quindi fondamentale per poter raccogliere numerose informazioni sullo stato delle piante.

## Capitolo 2

# Proprietà e leggi della luce

### 2.1 Natura della radiazione

L'energia elettromagnetica è una forma di energia trasportata dai fotoni, quanti di energia della radiazione elettromagnetica, che viaggiano alla velocità della luce ( $c=3\cdot 10^8$  m/s nel vuoto) e con la peculiarità di comportarsi sia come onda che particella. Un'onda elettromagnetica, secondo l'elettrodinamica classica, è costituita da un campo elettrico  $\vec{E}$  e un campo magnetico  $\vec{B}$  che oscillano in maniera sincronizzata. I due campi sono perpendicolari tra loro e simultaneamente perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda stessa, come mostrato in **Fig.1**. La frequenza di oscillazione  $\nu$  è legata alla lunghezza d'onda  $\lambda$  dall'equazione  $c = \nu\lambda$ .



*Fig. 1: Rappresentazione di un'onda elettromagnetica. Il campo elettrico e il campo magnetico oscillano in direzione perpendicolare tra loro e alla direzione di propagazione (Lennart Kudling)*

La capacità di emettere e assorbire radiazione è una proprietà intrinseca della materia solida, liquida e gassosa ed è la conseguenza di salti quantici nei livelli elettronici degli atomi o cambiamenti di energia vibrazionale e rotazionale negli orbitali molecolari. Le variazioni dello stato energetico di un elettrone si possono osservare in seguito all'interazione di un atomo con un fotone, e si manifestano in linee spettrali di emissione e di assorbimento confinate in una particolare frequenza, o insieme di frequenze, dello spettro elettromagnetico. Un fotone viene assorbito solo se ha la giusta energia per permettere un cambio nello stato energetico dell'atomo o della molecola. Nel caso di un atomo solitamente si tratta di un salto orbitale di un elettrone. Il fotone verrà spontaneamente ri-emesso, o nella stessa frequenza del fotone originale o in cascata tramite più fotoni la cui energia totale sarà pari a quella del fotone assorbito. Vale inoltre il principio di conservazione dell'energia per cui la quantità di energia radiante emessa da un atomo o una molecola è uguale al decremento di energia potenziale dei suoi costituenti (Monteith e Unsworth, 1990). La lunghezza d'onda della radiazione è unicamente determinata dall'energia del fotone secondo l'equazione di Planck:

$$e = \frac{hc}{\lambda}$$

dove  $h$  è la costante di Planck ( $6.63 \cdot 10^{-34}$  J s) e  $\lambda$  è la lunghezza d'onda del fotone. Da un punto di vista pratico l'energia di un singolo fotone non è di particolare interesse, ma generalmente si vuole conoscere l'energia di una mole di fotoni. Questo si ottiene semplicemente moltiplicando l'energia del fotone per il numero di Avogadro ( $N_A = 6.023 \cdot 10^{23}$ ). Inoltre, dalla relazione  $c = v\lambda$  si può esprimere l'energia del fotone in funzione della sua frequenza  $v$  e avremo  $e = hv$  (Campbell et al., 2000).

## 2.2 Spettro elettromagnetico

I fotoni hanno una vasta gamma di lunghezze d'onda e di conseguenza energie. L'insieme di tutte le possibili frequenze della radiazione elettromagnetica è chiamata spettro elettromagnetico. Viene spesso diviso arbitrariamente in bande a seconda della fonte dei fotoni o della loro interazione con gli esseri viventi come viene mostrato in **Fig. 2**. Una parte dello spettro elettromagnetico è mostrata in **Fig. 3**. La parte in alto della barra superiore mostra le due importanti fonti di radiazione (solare e termica) e la parte inferiore nomina tre importanti bande (ultravioletto, visibile e vicino infrarosso). I fotoni con lunghezze d'onda più corte dell'estremità ultravioletta dello spettro sono chiamati raggi X e raggi gamma. I fotoni con lunghezze d'onda più lunghe sono chiamati microonde e onde radio. La seconda barra in **Fig. 3** mostra due delle tre bande in cui viene divisa la radiazione ultravioletta (UVA e UVB) e le bande d'onda dei colori visibili. La barra finale mostra alcune delle risposte biologiche alle diverse parti dello spettro elettromagnetico. Nel nostro studio sarà di fondamentale importanza la radiazione fotosinteticamente attiva (PAR), che è la radiazione compresa tra 400 e 700 nm (Campbell et al., 2000). Ma anche nel vicino infrarosso (NIR) si possono eseguire importanti osservazioni, in quanto è spesso coinvolto nel calcolo di indici vegetazionali utili a valutare lo stato fisiologico delle piante (Katsoulas et al., 2016). La radiazione fotosinteticamente attiva è una misura della radiazione disponibile per la fotosintesi ma non deve essere trattata come una misura universale della radiazione disponibile per la crescita delle piante. Purtroppo, non esiste una tale misura. La radiazione influisce su molti processi di crescita diversi, ognuno dei quali dovrebbe essere trattato in modo indipendente (McCree, 1981).

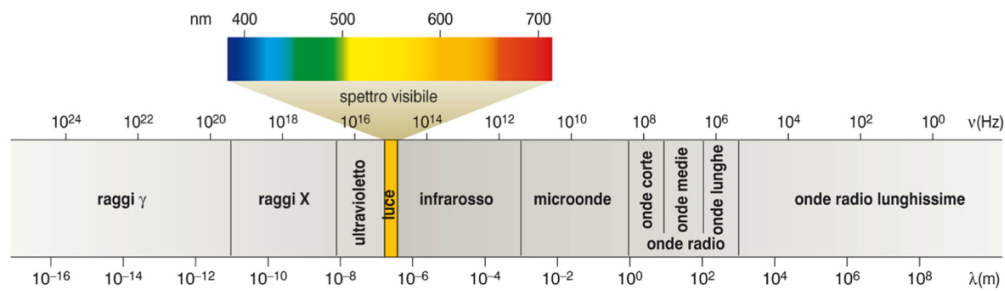


Fig. 2: Spettro elettromagnetico in cui viene evidenziata la banda della radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) (Zanichelli, 2013)

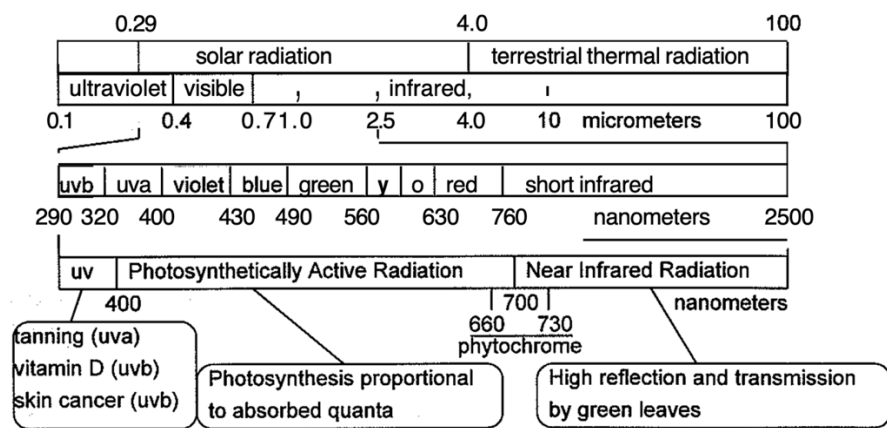


Fig. 3: Parte dello spettro elettromagnetico suddiviso in alcune bande e con alcune interazioni biologiche con piante e animali, (Campbell et al., 2000)

### 2.3 Corpo nero

Kirchhoff si dedicò allo studio della relazione tra energia assorbita ed emessa dalla materia. Definì l'assorbanza di una superficie  $\alpha(\lambda)$  come la frazione di radiazione incidente che viene assorbita ad una specifica lunghezza d'onda  $\lambda$ . L'emissività  $\epsilon(\lambda)$  invece come il rapporto della radiazione emessa a lunghezza d'onda  $\lambda$  e un ipotetico flusso radiante  $\mathbf{B}(\lambda)$ . Considerando un oggetto in equilibrio termico all'interno di una cavità a temperatura costante, egli mostrò che  $\alpha(\lambda)$  è sempre uguale a  $\epsilon(\lambda)$ . Per un oggetto completamente assorbente alla lunghezza d'onda  $\lambda$  si

avrà che  $\alpha(\lambda) = 1$ ,  $\varepsilon(\lambda) = 1$  e la radiazione emessa è  $\mathbf{B}(\lambda)$ . Nel caso particolare  $\varepsilon=1$  ad ogni lunghezza d'onda, lo spettro di emissione è noto come *spettro di corpo nero* (Monteith e Unsworth, 1990). Il corpo nero è un oggetto ideale capace di assorbire tutta la radiazione elettromagnetica incidente senza rifletterla, viene chiamato “nero” secondo l'interpretazione classica dei colori visibili dall'essere umano. In natura non esiste nessun materiale del genere, un corpo nero perfetto è un oggetto ideale ma alcuni materiali si avvicinano a questo comportamento su parti dello spettro elettromagnetico. Si può parlare di corpo nero a lunghezze d'onda visibili o di corpo nero a lunghezze d'onda termiche, ma non ci aspetteremmo necessariamente che lo stesso materiale sia un corpo nero in entrambe le bande elettromagnetiche (Campbell et al., 2000). Ad esempio, la neve fresca è un assorbitore molto povero di radiazione visibile, infatti è una delle superfici più bianche presenti in natura, ma emette radiazione quasi come un perfetto corpo nero nel lontano infrarosso, tra 3 e 100  $\mu\text{m}$ . Perciò nel dire “la neve fresca si comporta come un corpo nero” ci si riferisce alla radiazione *emessa* dalla superficie della neve e non alla luce solare *riflessa* dalla neve (Monteith e Unsworth, 1990). La differenza tra lo spettro di emissione di un oggetto reale e quello di un corpo nero ideale permette di individuare la composizione chimica di tale oggetto (Campbell et al., 2000). La **Fig. 4** mostra alcune curve tipiche che rappresentano lo spettro a diverse temperature  $T$  del corpo nero. Ogni curva fornisce  $u=u(\lambda)$ , l'energia per unità di volume (densità di energia), a diverse lunghezze d'onda. È importante notare che ogni curva ha un picco ad una particolare lunghezza d'onda e che l'altezza del picco aumenta e si sposta verso lunghezze d'onda più corte all'aumentare della temperatura del corpo nero (Ranganath, 2008).

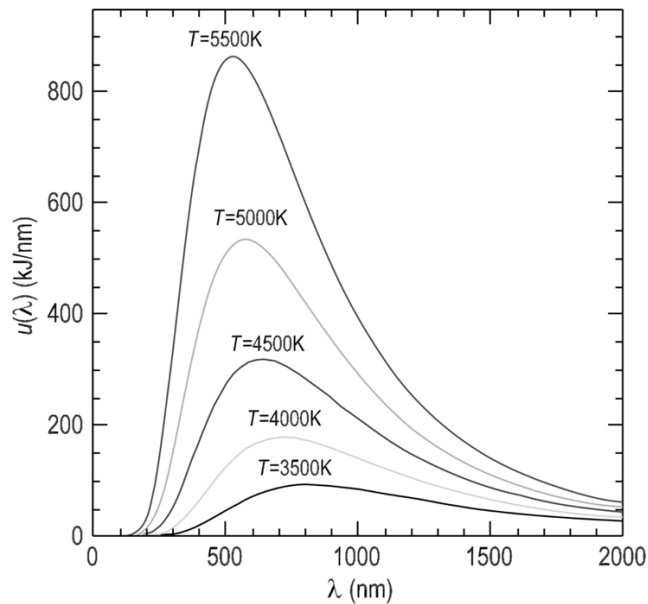


Fig. 4: Spettro di corpo nero a differenti temperature (Ranganath, 2008)

## 2.4 Radiometria

La radiometria (CIE 1970) è lo studio della misura delle proprietà dell'*energia radiante* (unità SI: joule, J), che è una delle molte forme intercambiabili di energia. L'energia radiante emessa, riflessa, trasmessa o assorbita, da una sorgente o da una superficie per unità di tempo è nota come *flusso radiante* o *potenza radiante* (unità SI: watt, W;  $1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1}$ ). Il flusso radiante può essere misurato mentre fluisce da una sorgente attraverso un mezzo a un ricevitore. La sorgente è generalmente il sole o delle grow lights, il mezzo potrebbe essere l'atmosfera o una copertura vegetale, mentre il ricevitore potrebbe essere una foglia capace di fare fotosintesi (McCree, 1981). Questo trasporto di energia dipende da molte variabili come la direzione del raggio tra la sorgente e il ricevitore, la lunghezza d'onda della radiazione, le coordinate del punto di interesse e l'area della regione in esame. Dalla definizione di flusso radiante possiamo ricavare altre grandezze frequentemente utilizzate, che

possono essere divise in *grandezze emisferiche* e *grandezze direzionali*. Le grandezze emisferiche sono ampiamente usate per considerare i bilanci dei flussi di energia su superfici come tettoie, foglie e laghi, e sono:

*Densità di flusso radiante,  $E$  ( $\text{W m}^{-2}$ ):* Flusso radiante per unità di superficie, che può essere emesso (*Emittanza radiante*) o incidente (*Irradianza*);

*Densità di flusso radiante spettrale  $E_\lambda$  ( $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ):* Densità di flusso radiante per unità di intervallo di lunghezza d'onda.

Analizziamo ora le grandezze direzionali. Per un fascio di radiazione parallela, la densità di flusso radiante è definita in relazione ad un piano ad angolo retto rispetto al fascio, ma sono necessari diversi termini aggiuntivi per descrivere le relazioni spaziali della radiazione che si disperde in tutte le direzioni da una sorgente puntiforme o da una superficie radiante. La **Fig. 5** rappresenta il flusso  $dF$  emesso da una sorgente puntiforme all'interno di un angolo solido  $d\omega$  dove  $dF$  e  $d\omega$  sono entrambe quantità molto piccole. Possiamo definire una grandezza direzionale, analoga alla densità di flusso radiante, che chiameremo *intensità radiante* e la indicheremo con  $I$  che è definita come il flusso radiante per unità di angolo solido o  $I = dF/d\omega$ . Questa quantità può essere espressa in watt su steradiano.

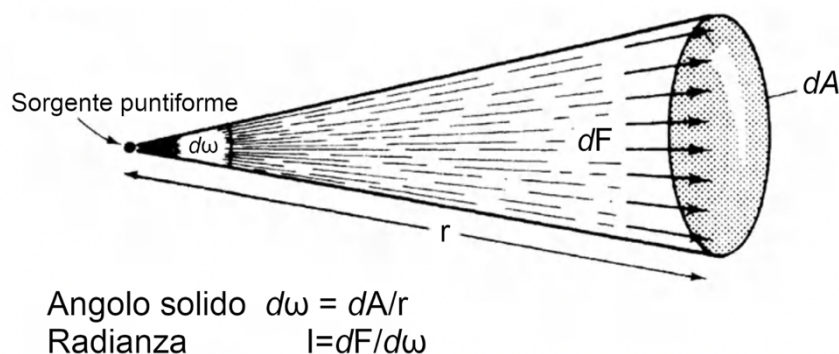


Fig. 5: Geometria della radiazione emessa da una sorgente puntiforme, (Monteith e Unsworth, 1990) riadattata



La Fig. 6 illustra la definizione di una quantità strettamente correlata: la *radianza*. Un elemento di superficie con un'area  $dS$  emette un flusso  $dF$  in una direzione specificata da un angolo  $\psi$  rispetto alla normale. Quando l'elemento è proiettato ad angolo retto rispetto alla direzione del flusso, la sua area proiettata è  $dS \cos\psi$ , che è l'area apparente della superficie vista da un angolo  $\psi$ . La radianza dell'elemento in questa direzione è il flusso emesso nella direzione per unità di angolo solido, o  $dF/\omega$ , diviso per l'area proiettata  $dS \cos\psi$ . In altre parole, la radianza è equivalente all'intensità radiante osservata in una particolare direzione e divisa per l'area apparente della sorgente nella stessa direzione e questa quantità può essere espressa in  $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$  (Monteith e Unsworth, 1990).

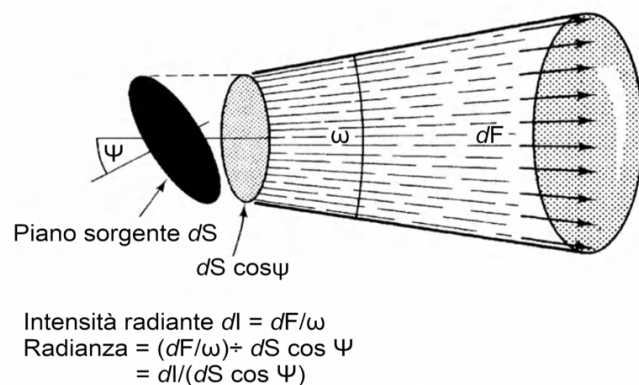


Fig. 6: Geometria della radiazione emessa da un elemento di superficie, (Monteith e Unsworth, 1990) riadattata

Volendo invece considerare la radianza per unità di lunghezza d'onda possiamo definire la *radianza spettrale* le cui unità sono  $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ . Riassumendo, le grandezze direzionali sono:

*Intensità radiante, I* ( $\text{W sr}^{-1}$ ): Flusso emesso da una superficie per unità di angolo solido;

*Radianza, L* ( $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ): Densità di flusso radiante emesso da una superficie per unità di angolo solido;

*Radianza spettrale* ( $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ): Radianza per unità di intervallo di lunghezza d'onda;

Queste grandezze sono ampiamente usate nel telerilevamento, dove i radiometri (che possono essere portatili, montati su droni, aerei o su satelliti) tipicamente vedono da una particolare direzione e rilevano entro un piccolo angolo solido attorno a quella direzione. Questo piccolo angolo solido è tipicamente indicato come il *campo visivo istantaneo* (IFOV, dall'inglese *Istantaneous Field of View*). Talvolta queste grandezze fisiche vengono pesate con la curva di risposta spettrale dell'occhio umano e vengono chiamate *grandezze fotometriche*. Il termine fotometrico corrispondente al flusso radiante ( $\text{W}$ ) è il *flusso luminoso* la cui unità di misura è il lumen ( $\text{lm}$ ),  $1 \text{ watt} = 683 \text{ lumen}$ , mentre il corrispettivo fotometrico della densità di flusso radiante ( $\text{W m}^{-2}$ ) è l'*illuminamento* che si misura in lux ( $\text{lx} = \text{lm m}^{-2}$ ). Se queste grandezze sono pesate secondo la risposta fotosintetica vengono indicate come *unità di flusso fotonico fotosintetico*. Il termine fotosintetico per il flusso radiante ( $\text{W}$ ) è il *flusso fotonico fotosintetico* (PPF) con unità  $\mu\text{mol s}^{-1}$ , mentre il corrispettivo della densità di flusso radiante ( $\text{W m}^{-2}$ ) è la *densità di flusso fotonico fotosintetico* (PPFD) e ha unità  $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$  (Campbell et al., 2000). Riassumendo, le grandezze radiometriche pesate secondo la risposta fotosintetica sono:

*Flusso fotonico fotosintetico* (PPF,  $\mu\text{mol s}^{-1}$ )

*Densità di flusso fotonico fotosintetico* (PPFD,  $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ )

L'energia radiante interagisce con la materia tramite riflessione, trasmissione e assorbimento. L'interazione può dipendere dalla direzione della radiazione incidente, dalla direzione da cui la superficie è vista, dalla lunghezza d'onda della radiazione e dalla natura del materiale su cui la luce incide (Campbell et al., 2000). Risulta perciò utile definire le seguenti grandezze:

*Riflettanza*: è il rapporto tra flusso radiante riflesso da un mezzo e flusso radiante incidente;

*Assorbanza*: è il rapporto tra flusso radiante assorbito da un mezzo e flusso radiante incidente;

*Trasmittanza*: è il rapporto tra flusso radiante trasmesso da un mezzo e flusso radiante incidente

## 2.5 Legge del coseno

Analizziamo ora la dipendenza dall'angolo zenitale della densità di flusso radiante. Consideriamo un fascio parallelo di radiazione incidente su una superficie e chiamiamo  $\theta$  l'angolo zenitale contenuto tra la normale alla superficie e la direzione del fascio. Se l'angolo  $\theta$  è nullo, ovvero il fascio è perpendicolare alla superficie, allora la densità di flusso radiante è massima e corrisponde a quella presente in una qualunque sezione perpendicolare del fascio. Ma all'aumentare di  $\theta$ , mantenendo costante l'area perpendicolare al flusso, il fascio inciderà su un'area sempre più grande e la densità di flusso sulla superficie diminuirà (**Fig. 7**). Da semplici considerazioni geometriche se chiamiamo  $A_p$  l'area coperta dal fascio in incidenza normale e l'area all'angolo  $\theta$  è  $A$  allora

$$A_p/A = \cos\theta$$

che porta direttamente alla *legge del coseno di Lambert*:

$$\phi = \phi_0 \cos \theta$$

Dove  $\phi_0$  è la densità di flusso normale al fascio,  $\phi$  è la densità di flusso incidente sulla superficie, e  $\theta$  è l'angolo tra il fascio radiante e la normale alla superficie, noto come angolo zenitale. L'unica fonte comune di luce parallela negli ambienti naturali è il sole, e la legge di Lambert è usata per calcolare l'irraggiamento solare diretto in superfici inclinate come ad esempio le foglie. Per fare il calcolo è necessario conoscere  $\phi_0$  e l'angolo  $\theta$  che il sole fa con la normale alla superficie d'interesse (Campbell et al., 2000).

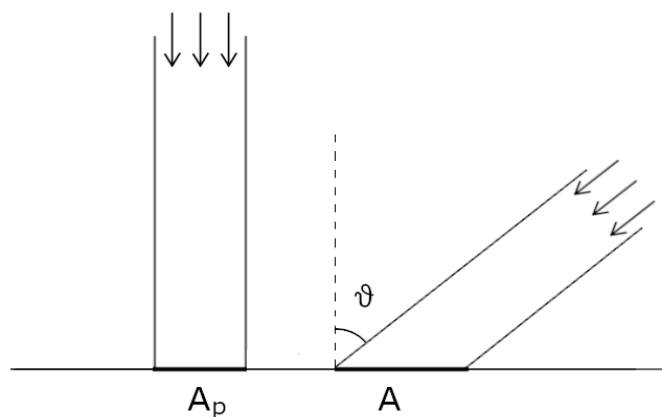


Fig. 7: L'area investita dal fascio aumenta all'aumentare dell'angolo tra la normale e la direzione del fascio

## 2.6 Riflessione

La riflettanza di una superficie  $\rho(\lambda)$  è definita come il rapporto tra il flusso incidente e il flusso riflesso alla stessa lunghezza d'onda. In **Fig. 8** si mostrano tre casi di riflessione, due casi estremi sono la riflessione perfettamente speculare e quella perfettamente diffusa ma generalmente le superfici presentano un comportamento misto di questi casi (**Fig. 8 c**). Per le superfici che esibiscono una riflessione speculare o a specchio, un fascio di radiazione incidente con un angolo  $\psi$  rispetto alla normale viene riflesso all'angolo complementare ( $-\psi$ ). D'altra parte, la

radiazione diffusa da una superficie perfettamente diffondente, nota anche come *superficie lambertiana*, è distribuita in tutte le direzioni secondo la legge del coseno, cioè l'intensità della radiazione diffusa è indipendente dall'angolo di riflessione, ma il flusso diffuso da una zona specifica è proporzionale a  $\cos\psi$ .

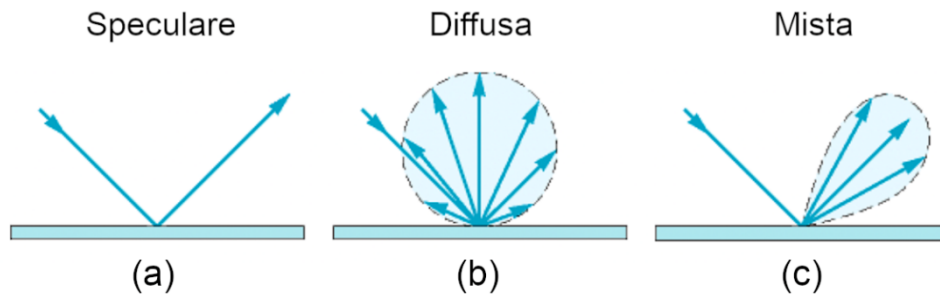


Fig. 8: Luce riflessa specularmente (a), diffusamente (b) e in maniera mista (c) (Ryer, A)

La natura della riflessione dalla superficie di un oggetto dipende in modo complesso dalle sue proprietà elettriche e dalla struttura della superficie. In generale, la riflessione speculare assume un'importanza crescente all'aumentare dell'angolo di incidenza. Gran parte delle superfici naturali agiscono come superfici diffondenti quando l'angolo di incidenza  $\psi$  è inferiore a  $60^\circ$  o  $70^\circ$ , ma quando  $\psi$  si avvicina a  $90^\circ$ , condizione nota come *incidenza radente*, la riflessione diventa prevalentemente speculare e vi è un corrispondente aumento della riflettanza. Questa condizione si verifica su specchi d'acqua, foglie cerose e altre superfici lisce. L'effetto è spesso visibile all'alba e al tramonto su una superficie d'acqua estesa, o un prato, o un campo di spighe di orzo. Quando le superfici vengono osservate con tecniche di telerilevamento è importante conoscere la direzione della radiazione ricevuta dal radiometro e sono necessarie diverse definizioni aggiuntive: La *riflettanza bidirezionale* ( $\text{sr}^{-1}$ ) è il rapporto tra la radiazione *riflessa* in una specifica direzione di vista e la radiazione *incidente* in quella direzione.

Il *fattore di riflettanza bidirezionale* di una superficie (BRF) è il rapporto tra la radianza riflessa da una specifica direzione di vista e la radianza che si osserverebbe da una superficie perfettamente diffondente nella stessa posizione. La frazione di

radiazione incidente riflessa da una tale superficie è talvolta indicata come riflettanza bi-emisferica o semplicemente come coefficiente di riflessione. Il coefficiente di riflessione per la radiazione solare è comunemente noto come *albedo* (Monteith e Unsworth, 1990).

## 2.7 Radianza e Irradianza

Quando una superficie piana è circondata da una sorgente uniforme di energia radiante, esiste una semplice relazione tra l'irradianza della superficie (il flusso incidente per unità di superficie) e la radianza della sorgente. La **Fig. 9** mostra una superficie di area unitaria circondata da un guscio emisferico radiante così grande che la superficie può essere trattata come un punto al centro dell'emisfero. L'area ombreggiata  $dS$  è un piccolo elemento della superficie radiante e la radiazione che raggiunge il centro dell'emisfero da  $dS$  forma un angolo  $\beta$  con la normale al piano. Poiché la proiezione di un'area unitaria nella direzione della radiazione è  $1 \times \cos\beta$ , l'angolo solido che l'area sottende a  $dS$  è  $\omega = \cos\beta/r^2$ . Se l'elemento  $dS$  ha una radianza  $N$ , il flusso emesso da  $dS$  nella direzione del piano deve essere  $N dS \omega = NdS \cos\beta/r^2$ .

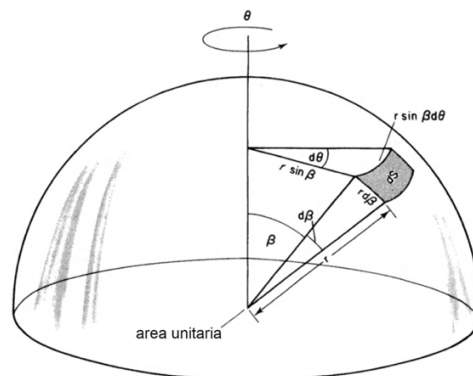


Fig. 9: Metodo per calcolare l'irradianza al centro di un piano equatoriale da un elemento di superficie  $dS$  a un angolo  $\beta$  dall'asse verticale

Per trovare l'irradianza totale del piano, questa quantità deve essere integrata su tutto l'emisfero, ma se la radianza è uniforme, il calcolo convenzionale può essere evitato notando che  $dS \cos\beta$  è l'area  $dS$  proiettata sul piano equatoriale. Ne segue che  $dS \cos\beta$  è l'area di tutto il piano o  $\pi r^2$ , in modo che l'irradianza totale al centro del piano diventa

$$(N/r^2) \int \cos\beta dS = \pi N$$

L'irradianza espressa in  $W m^{-2}$  si trova quindi moltiplicando la radianza in  $W m^{-2} sr^{-1}$  per l'angolo solido  $\pi$ . Un trattamento più rigoroso è necessario se la radianza dipende dalla posizione di  $dS$  rispetto alla superficie che riceve la radiazione. È necessario trattare  $dS$  come un rettangolo i cui lati sono  $r d\beta$  e  $r \sin\beta d\theta$  dove  $\theta$  è un angolo azimutale rispetto all'asse dell'emisfero di raggio  $r$  (Monteith e Unsworth, 1990). Dato che  $dS = r^2 \sin\beta d\beta d\theta$ , l'integrale diventa

$$\begin{aligned} & \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{\beta=0}^{\beta=\pi/2} N(\beta, \theta) \left( \frac{\cos\beta}{r^2} \right) \sin\beta d\beta d\theta \\ &= 2\pi \int_{\beta=0}^{\beta=\pi/2} N \sin\beta \cos\beta d\beta \\ &= 2\pi \int_{\beta=0}^{\beta=\pi/2} N \sin 2\beta d\beta \end{aligned}$$

## 2.8 Proprietà fisiche della radiazione solare

La maggior parte della radiazione emessa dal sole si trova nell'intervallo da 200 a 2500 nm (**Fig. 10**), con un picco a circa 500 nm e una distribuzione approssimabile allo spettro di emissione di un corpo nero a 5800 K, come descritto dalla legge di

Planck (Ollinger, 2011). Nell'atmosfera, la luce è diffusa dalle polveri, molecole atmosferiche e aerosol ed è assorbita a varie lunghezze d'onda da diversi di gas. Gran parte della radiazione ultravioletta è assorbita da  $O_2$  e  $O_3$ , mentre ci sono pochi assorbitori nella parte visibile dello spettro (400-700 nm) il che rende l'atmosfera trasparente in questa regione. L' $H_2O$  è l'assorbitore dominante nella regione NIR, e ha forti caratteristiche di assorbimento centrate a 1450, 1950 e 2500 nm e caratteristiche più deboli a 980 e 1150 nm. Circa la metà dell'energia nella radiazione incidente che raggiunge la superficie terrestre è nelle lunghezze d'onda visibili, mentre la restante metà è nel vicino e medio infrarosso. Questo ha un effetto importante sulle interazioni tra la luce solare e le piante ed è il motivo per cui, per esempio, l'evoluzione ha selezionato i pigmenti che assorbono lunghezze d'onda minori e più energetiche per guidare le reazioni fotochimiche della fotosintesi (Ollinger, 2011).

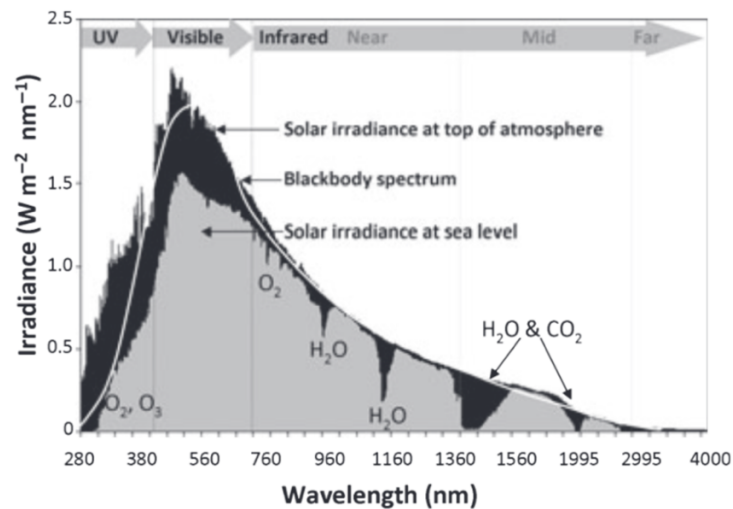


Fig. 10: Spettro della radiazione solare sopra e sotto l'atmosfera (Ollinger, 2021)



## 2.9 Luce polarizzata

In un'onda elettromagnetica il vettore campo elettrico  $\mathbf{E}$  oscilla in un piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda stessa. Come visto in **Fig. 1** la radiazione solare è costituita da onde elettromagnetiche i cui campi elettrici e magnetici sono perpendicolari tra loro e alla direzione di propagazione. Consideriamo un fascio di radiazione monocromatica, questo sarà formato da numerose onde elettromagnetiche aventi la stessa frequenza costante e i cui campi elettrici saranno disposti generalmente in direzioni casuali tra loro.<sup>1</sup> Di solito non è importante conoscere la particolare direzione del campo elettrico nello spazio. Ma analizziamo ora il fenomeno della *polarizzazione* della luce, in cui la caratteristica centrale è proprio la particolare direzione in cui il campo elettrico oscilla. Consideriamo un piano  $xy$  perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. Qui alcune onde avranno il campo elettrico che oscilla solo lungo  $x$ , altre solo lungo  $y$  e altre ancora in tutte le possibili direzioni intermedie agli assi. Ciascun campo elettrico può considerarsi come generato da una combinazione lineare di un campo elettrico lungo  $x$  e un campo elettrico lungo  $y$  (**Fig. 11**). Non dimentichiamoci che il campo elettrico in un'onda elettromagnetica non è un vettore costante ma oscilla nel tempo e nello spazio. Se le oscillazioni del campo elettrico lungo  $x$  e lungo  $y$  hanno la stessa frequenza, allora la loro combinazione darà luogo a una nuova oscillazione nel piano  $xy$  (Feynman, 1965). Se le oscillazioni lungo  $x$  e lungo  $y$  sono *in fase* la luce viene detta *polarizzata linearmente* e il campo elettrico dell'onda oscillerà lungo una retta contenuta nel piano  $xy$ . In **Fig. 11** vengono mostrate alcune possibili sovrapposizioni di diverse ampiezze per l'oscillazione lungo  $x$  e quella lungo  $y$ .

---

<sup>1</sup> Stiamo considerando solo il campo elettrico per agevolare la lettura ma lo stesso discorso vale per il campo magnetico. Poiché il campo magnetico è sempre perpendicolare al campo elettrico per questo tipo di trattazione possiamo considerare uno solo dei campi che costituiscono l'onda elettromagnetica ovvero il campo elettrico.

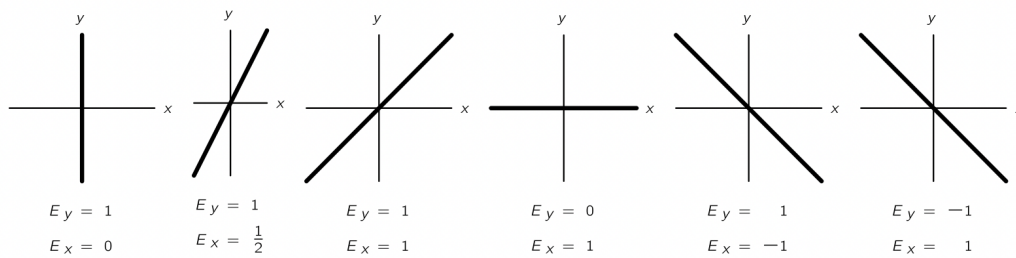


Fig. 11: Sovrapposizione delle oscillazioni in fase del campo elettrico lungo  $x$  e lungo  $y$  (Feynman, 1965)

Se invece è presente una differenza di fase<sup>2</sup> tra le oscillazioni lungo  $x$  e quelle lungo  $y$  avremo che il vettore campo elettrico risultante ruoterà attorno alla direzione di propagazione descrivendo o un cerchio o un'ellisse e parleremo rispettivamente di *polarizzazione circolare* o *polarizzazione ellittica*. La polarizzazione a cui faremo riferimento d'ora in avanti sarà sempre la polarizzazione lineare, questo perché è un tipo di polarizzazione che si ottiene proprio con la riflessione della luce da una superficie. Quando la luce viene riflessa da una superficie riflettente può essere polarizzata, e la spiegazione fisica di questo è molto semplice. Fu scoperto empiricamente da Brewster che la luce riflessa da una superficie è completamente polarizzata se il raggio riflesso e il raggio rifratto nel materiale formano un angolo retto, e in tale caso l'angolo d'incidenza è chiamato *angolo di Brewster* (noto anche come *angolo di polarizzazione*) e viene solitamente indicato con  $\theta_B$  come mostrato in **Fig. 12**. Quando la luce non polarizzata incide a questo angolo, la luce riflessa dalla superficie è perfettamente polarizzata linearmente. La ragione è molto facile da capire se si considera in che modo la luce viene riflessa da una superficie. La nostra attuale comprensione del fenomeno della riflessione è che il fascio incidente porta a un'oscillazione delle cariche nel materiale, che a sua volta genera il fascio riflesso (Feynman, 1965). Perciò è il movimento delle cariche nel materiale che

<sup>2</sup> Due onde elettromagnetiche della stessa frequenza sono dette "in fase" quando sono perfettamente allineate, cioè se raggiungono il loro picco massimo e minimo allo stesso tempo e in questo caso la differenza di fase è 0. Mentre sono dette "fuori fase" quando hanno una differenza di fase, ossia quando le onde sono disallineate e raggiungono il loro valore zero a istanti diversi.

genera il raggio emergente che noi chiamiamo raggio riflesso. Un altro effetto è che il raggio rifratto risulterà parzialmente polarizzato.

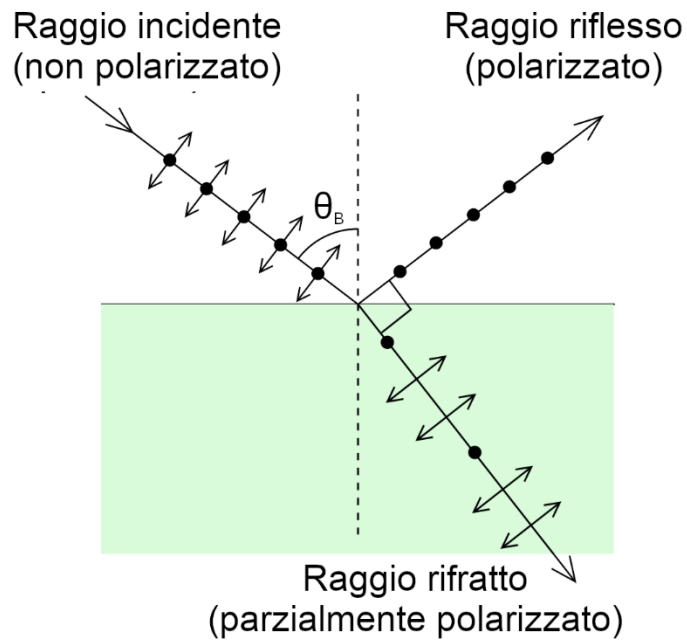
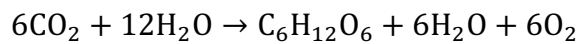


Fig. 12: Riflessione della luce polarizzata linearmente all'angolo di Brewster. La direzione di polarizzazione è indicata da frecce più piccole; i punti tondi indicano la polarizzazione normale al foglio.

## Capitolo 3

# Interazione luce-pianta

Per crescere, le piante hanno bisogno di anidride carbonica, acqua ed energia luminosa. Il processo chimico attraverso il quale le piante utilizzano queste risorse per produrre glucosio, elemento costitutivo delle piante, si chiama fotosintesi ed è descritta dalla seguente reazione chimica



L'energia della fotosintesi ha origine nelle reazioni nucleari del Sole e arriva sulla Terra come luce solare. Le piante utilizzano solo una piccola porzione dello spettro elettromagnetico, la cosiddetta PAR, indicativamente dai 390 nm ai 700 nm, che corrisponde a ciò che è noto come spettro visibile. Le piante contengono clorofilla a e clorofilla b che assorbono questa radiazione e il loro colore dipende dalla lunghezza d'onda della luce riflessa. Le piante appaiono verdi perché riflettono principalmente lunghezze d'onda attorno al verde mentre si hanno dei picchi di assorbimento attorno alle lunghezze d'onda rossa e blu (**Fig. 13**).

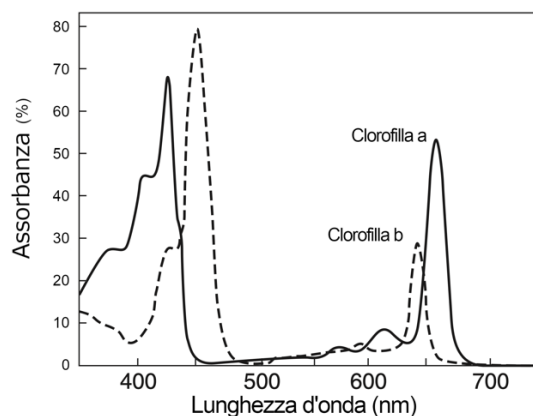


Fig. 13: Spettri di assorbimento della clorofilla a e b (Lichtenthale & Hartmut 2001, riadattata)

### 3.1 Riflettanza, trasmittanza e assorbanza delle foglie

Un tipico spettro di riflettanza di una foglia è mostrato in **Fig. 14 a**. La curva mostra la riflettanza di una foglia di tabacco in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente nell'intervallo spettrale da 400 a 2800 nm. Possiamo notare che nel visibile, da 400 a 700 nm, la riflettanza della foglia è piuttosto bassa, circa il 10%, con un picco a circa 550 nm nella regione verde. Questo picco rappresenta il colore verde delle piante percepito dall'occhio umano. La riflettanza aumenta fino a un massimo di circa il 50% nell'infrarosso nell'intervallo da 700 a 1300 nm. La bassa riflettanza nell'infrarosso oltre i 1300 nm è dovuta al forte assorbimento di una foglia da parte dell'acqua (Allen e Richardson, 1968). La riflettanza continua a diminuire gradualmente fino a un valore basso a circa 2700 nm. Non è di particolare interesse indagare oltre gli estremi dell'intervallo mostrato in **Fig. 14 a**, cioè a lunghezze d'onda più corte, nell'ultravioletto o a lunghezze d'onda maggiori, nel lontano infrarosso, questo perché in queste zone la riflettanza fogliare è a un livello basso e relativamente uniforme, generalmente inferiore al 5% (Knipling, 1970).

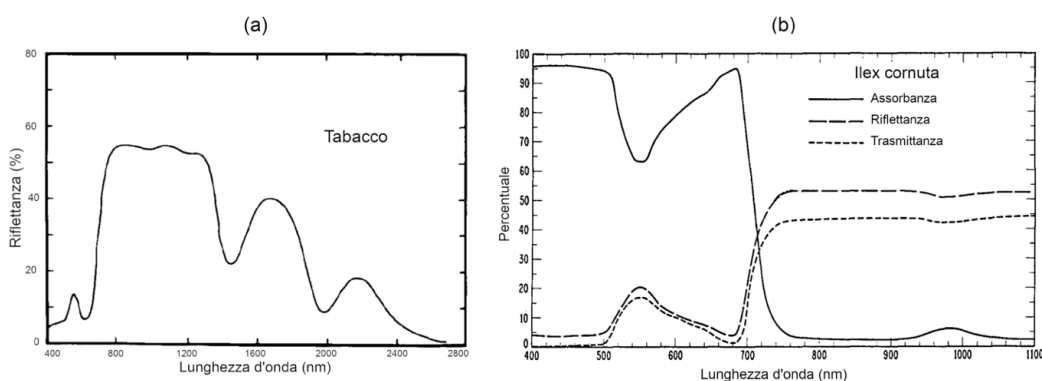


Fig. 14: (a) Spettro della riflettanza di una foglia di tabacco. Riadattata da Knipling, 1970. (b) Spettro della riflettanza, trasmittanza e assorbanza di una foglia di *Ilex cornuta*. Riadattata da Gates et al. (1965)

Solo una parte della radiazione incidente è riflessa dalla foglia, il resto viene assorbito o trasmesso e tutte queste grandezze, strettamente correlate, sono utili

nella valutazione dello stato fisiologico della foglia e della pianta in generale. Ad esempio, lo stato idrico e quello nutrizionale sono capaci di influenzare le proprietà ottiche delle piante, come mostrato dalla letteratura (Gianquinto et al., 2011). In **Fig. 14 b** possiamo osservare gli spettri di riflettanza, assorbanza e trasmittanza nell'intervallo di lunghezze d'onda da 400 a 1100 nm per una foglia di *Ilex cornuta* (Agrifoglio cornuto) misurati da Gates et al. (1965). Possiamo notare come lo spettro di trasmittanza abbia la stessa forma dello spettro di riflettanza, il motivo sarà più chiaro a breve. Lo spettro di assorbanza, tuttavia, è opposto agli altri due. Ovviamente la somma di questi spettri deve dare la radiazione incidente totale. L'assorbimento è alto nel visibile e nell'infrarosso oltre 1300 nm, ma è quasi nullo nell'infrarosso da 700 a 1300 nm. Nella regione spettrale visibile l'alto assorbimento dell'energia di radiazione è dovuto ai pigmenti delle foglie, principalmente le clorofille (clorofilla a e clorofilla b), ma anche carotenoidi, xantofille e antocianine (Allen e Richardson, 1968). Una prova molto evidente di ciò è data dagli spettri di riflessione della foglia di un geranio variegato, avente alcune porzioni di tessuto verde e altre bianche, assenti di clorofilla (**Fig. 15 a**). In questo caso le porzioni prive dei soliti pigmenti riflettono maggiormente nel visibile rispetto alle porzioni verdi che assorbono parte della radiazione incidente. Inoltre, le porzioni bianche riflettono gran parte della luce visibile in maniera analoga a come riflettono il NIR. La riflettanza nell'infrarosso è stata talvolta erroneamente attribuita alle clorofille, in realtà, gli spettri di assorbimento delle clorofille isolate (a e b) indicano che i pigmenti sono completamente trasparenti alla radiazione infrarossa (Knipling, 1970). La **Fig. 15 b** mostra un grafico analogo ma per una specie di *Philodendron* variegato. Anche in questo caso la riflettanza nel visibile delle porzioni bianche è maggiore di quella delle porzioni verdi e la riflettanza delle parti variegate ha circa lo stesso valore della riflettanza nel vicino infrarosso. Ma a differenza del grafico del geranio notiamo che la riflettanza nel NIR della parte albina è minore rispetto alla riflettanza del NIR delle porzioni verdi. Woolley (1971) attribuisce questi valori al fatto che le porzioni variegate sono più sottili delle parti verdi e quindi riflettevano meno infrarosso dalla struttura interna. Ciò è in accordo con quanto

osservato da Knipling (1970) che ritiene che l'alta riflettanza delle foglie nel NIR sia causata dalla loro struttura cellulare interna.

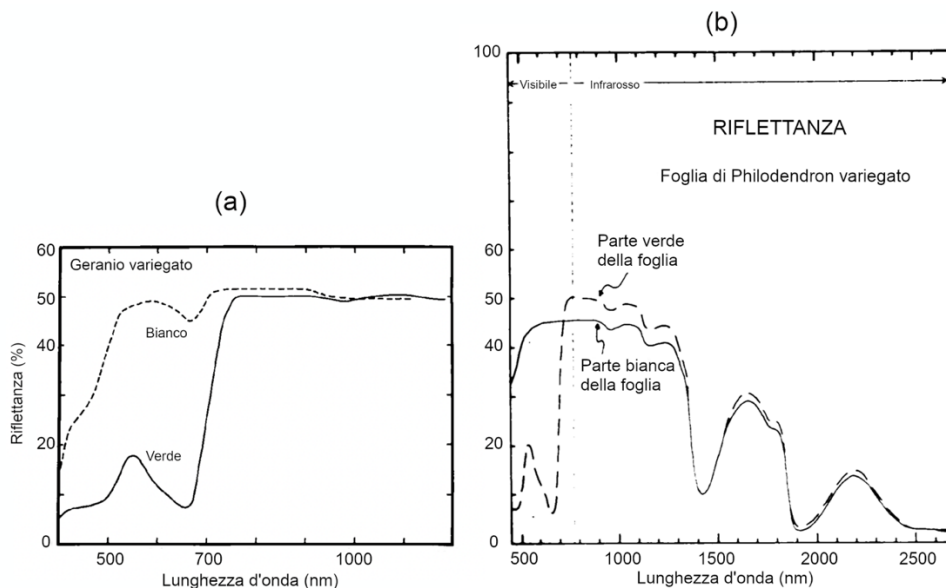


Fig. 15: (a) Spettro della riflettanza delle porzioni bianca e verde della foglia variegata di un geranio. Riadattata da Knipling, 1970. (b) Spettro della riflettanza delle porzioni bianca e verde della foglia variegata di una specie di Philodendron. Riadattata da Woolley, 1971.

Le cere della cuticola di una foglia sono quasi trasparenti alla radiazione visibile e infrarossa, e poca dell'energia solare incidente su una foglia viene riflessa direttamente dalla sua superficie esterna (Knipling, 1970). La radiazione è diffusa e dispersa attraverso la cuticola e l'epidermide fino alle cellule del mesofillo e alle cavità d'aria all'interno della foglia. Poco o niente della radiazione infrarossa nell'intervallo di lunghezza d'onda da 700 a 1300 nm viene assorbita internamente, ma circa il 40-60% di essa viene diffusa verso l'alto attraverso la superficie di incidenza ed è misurata come radiazione riflessa, mentre il resto viene diffuso verso il basso ed è misurata come radiazione trasmessa (Knipling, 1970). Questo meccanismo di dispersione interna spiega la somiglianza nella forma degli spettri di riflettanza e trasmittanza in Fig. 14 b.

## 3.2 Riflessione della luce da parte delle foglie

Analizziamo ora in dettaglio in che modo avviene la riflessione della luce su una foglia. Abbiamo visto due differenti tipi di riflessione: quella speculare e quella diffusa. La foglia non è né una superficie puramente speculare né esclusivamente diffusante. Secondo Grant L. (1987) la radiazione incidente su una foglia può essere trasmessa nella foglia o riflessa. La riflessione sulla superficie fogliare è tendenzialmente speculare e polarizzata, soprattutto ad angoli di incidenza lontani dalla normale alla superficie della foglia. Ma la superficie presenta anche una componente di riflettanza diffusa originata dalla presenza di microscopici elementi anatomici che ne rivestono la superficie, come ad esempio i tricomi (Grant, 1987). La radiazione che non viene immediatamente riflessa dalla superficie penetra all'interno dei tessuti fogliari, dove viene riflessa e rifratta numerose volte e fuoriesce in molteplici direzioni casuali come radiazione diffusa. Se questa radiazione emerge dalla superficie rivolta verso la sorgente luminosa la chiameremo radiazione riflessa (diffusamente) mentre la radiazione che penetra, attraversa la foglia e fuoriesce dalla superficie opposta è detta trasmessa e sono entrambe non polarizzate (Woolley, 1971). Il tipo di riflessione e l'estensione del suo effetto dipendono dall'angolo di incidenza e dalla natura degli elementi superficiali.

## 3.3 Riflessione dalla superficie delle foglie

Dagli studi di Grant L. (1987) la riflessione superficiale tende ad essere parzialmente polarizzata. Secondo Rondeaux (1991) la misura di radiazione polarizzata permette di avere informazioni sulla superficie delle foglie, che sono indipendenti dalla radiazione che viene diffusa dalla struttura interna della foglia



(Grant, 1987; Grant et al., 1987). Ciò permette di valutare separatamente la radiazione riflessa specularmente dalla superficie e la riflettanza diffusa dai tessuti interni. Secondo Grant L. (1987) l'intensità della riflettanza speculare aumenta con l'aumentare dell'angolo di incidenza. Ad angoli di incidenza maggiori di  $45^\circ$ , la luce riflessa consisteva principalmente in radiazione polarizzata dalla superficie della foglia. Perciò a grandi angoli di incidenza la riflettanza speculare può considerarsi il meccanismo dominante della riflettanza. Mentre ad angoli di incidenza quasi normali, come con il sole vicino allo zenith, la riflettanza speculare dalla superficie della foglia si può considerare scarsa e talvolta trascurabile (Knipling, 1970). Vanderbilt et al. (1985) hanno misurato il grado di polarizzazione nella riflettanza delle foglie di mais, soia e sorgo con un goniometro dotato di un filtro polarizzatore. Per tutte e tre le specie, il grado di polarizzazione era minimo ad angoli di incidenza e di vista quasi normali e massimo ad un angolo di incidenza di  $60^\circ$ . L'aumento del grado di polarizzazione da  $0^\circ$  a  $60^\circ$  ha suggerito che il meccanismo primario responsabile della risposta polarizzata è la riflessione speculare dalla prima superficie della foglia. Inoltre, la riflettanza speculare dipende dalle strutture morfologiche sulla superficie della foglia, che ne determinano la rugosità superficiale. Infatti, la riflettanza speculare di una foglia glabra è sensibilmente maggiore rispetto a quella di una foglia pubescente. E queste strutture anatomiche della superficie possono contribuire a disperdere la luce in direzioni casuali. Perciò la superficie della foglia riflette la luce in maniera principalmente speculare ma una piccola parte di luce è riflessa in diffusamente.

### 3.4 Riflessione dalla struttura interna della foglie

La radiazione che non viene riflessa sulla superficie entrerà nella foglia e sarà dispersa in numerosi cammini ottici; infatti, ogni raggio del fascio passerà

attraverso diverse configurazioni geometriche e viene disperso tramite rifrazione ad ogni discontinuità incontrata nel suo particolare percorso attraverso la struttura interna della foglia. Parte di questa radiazione avrà un cammino tale da venire nuovamente ri-emessa indietro. Questa radiazione attraversa la superficie superiore della foglia, non è polarizzata, viene misurata come riflettanza ed è considerata diffusa (lambertiana). Come detto in precedenza ci può essere un piccolo contributo di diffusione dovuto alla presenza di piccoli elementi anatomici sulla superficie della foglia. È importante puntualizzare che la riflettanza diffusa non polarizzata dalla superficie della foglia è indistinguibile dalla riflettanza diffusa dalla struttura interna (Grant L., 1987). La riflettanza non polarizzata dalla struttura interna può considerarsi in pratica completamente diffusa, in quanto viene riflessa in tutte le direzioni. La riflettanza delle foglie è relativamente bassa nella porzione visibile dello spettro (400-700 nm), dove si ha molto assorbimento della luce da parte dei pigmenti fogliari (Grant L., 1987). Nelle regioni del vicino e medio infrarosso (700-3000 nm) questi pigmenti sono trasparenti e la riflettanza dipende dalla struttura interna della foglia. La riflettanza nel vicino infrarosso (700-1300 nm) è caratterizzata da valori relativamente alti di riflettanza. Mentre nel medio infrarosso (1300-3000 nm) la riflettanza è attenuata dal contenuto di acqua della foglia (Grant L., 1987). Kumar e Silva (1973) usarono la tecnica del ray tracing per studiare la riflettanza nel vicino infrarosso usando una sezione trasversale di una foglia di soia. Il valore calcolato di riflettanza in uno dei modelli proposti da Kumar e Silva (1973) era del 46%, in buon accordo con il valore misurato del 47% della riflettanza della foglia di soia nella regione 700-1300 nm da Woolley (1971). Sinclair et al. (1973) ipotizzarono che gran parte della riflettanza sia dovuta alla diffusione interna delle pareti cellulari. Ma l'esperimento di Woolley (1971) smentisce ciò. Woolley filtrò la foglia sottovuoto con un olio di indice di rifrazione pari a 1.48, prossimo al valore di 1.47 che è l'indice di rifrazione della parete cellulare idratata. L'infiltrazione della foglia con quest'olio ha praticamente eliminato le interfacce parete cellulare-aria e aria-parete cellulare e la riflettanza della foglia è diminuita del 15%. Ciò mostra come la presenza di due mezzi con indici di rifrazione differenti (aria e parete

cellulare) e le numerose rifrazioni subite dalla radiazione siano un meccanismo che contribuisce fortemente alla riflettanza misurata. Se la riflettanza derivasse dalla dispersione diffusa dalla parete cellulare, come ipotizzato da Sinclair et al. (1973), ci sarebbe poca riduzione della riflettanza della foglia con l'infiltrazione dell'olio. Ne segue che le riflessioni e rifrazioni nelle interfacce parete cellulare-aria sono i fattori più importanti che determinano la riflettanza da parte dei tessuti interni della foglia. Secondo Kumar e Silva (1973) ogni raggio del fascio prende un percorso unico attraverso il tessuto in quanto incontra diverse conformazioni geometriche delle superfici interne e viene disperso ad ogni discontinuità di rifrazione. La radiazione, che alla fine è diretta indietro attraverso la superficie della foglia e viene misurata come riflettanza, è diretta in modo casuale, è considerata diffusa e non è polarizzata. Quindi l'interazione della radiazione con il tessuto fogliare può essere considerata un sistema ottico (Kumar e Silva, 1973). Il numero abbastanza grande di superfici rifrangenti all'interno della foglia ha l'effetto di massimizzare l'assorbimento della radiazione nel PAR da parte dei pigmenti fogliari e di migliorare i tassi complessivi di fissazione della CO<sub>2</sub> (Evans, 1999; Gutschick, 1999).

### 3.5 Proprietà superficiali e interne della foglia a confronto

Dagli studi di Grant L. (1987) la riflettanza totale della superficie fogliare aumenta all'aumentare dell'angolo di incidenza e dal punto di osservazione e monitoraggio, ad esempio, con un radiometro. La riflettanza diffusa (originata principalmente dai tessuti interni del mesofillo fogliare) variava poco al variare dell'angolo di incidenza. In sintesi, una foglia è una superficie non lambertiana. Il carattere non lambertiano della riflettanza della foglia deriva dalla riflessione sulla superficie della foglia stessa. Questo effetto è tanto più importante quanto più è grande

l'angolo di incidenza. Gran parte della riflettanza dalla superficie è polarizzata e, per questo motivo, la riflettanza superficiale dovrebbe essere separabile dalla riflettanza diffusa dalla struttura interna mediante misurazioni della riflettanza polarizzata. La superficie contribuisce in piccola parte alla riflettanza diffusa per la presenza di microstrutture anatomiche che rivestono la foglia. La radiazione che non viene riflessa dalla superficie penetra all'interno della foglia, subisce numerose riflessioni e rifrazioni fuoriuscendo in numerose direzioni. Se la radiazione esce dalla superficie rivolta verso la sorgente sarà considerata riflettanza, altrimenti se esce dalla superficie opposta verrà misurata come trasmittanza, e questo spiega la somiglianza degli spettri di riflettanza e trasmittanza della **Fig. 14 b**. La struttura fisica e chimica della foglia, la geometria della struttura interna e della superficie della foglia sono i fattori principali che influenzano le differenze di riflettanza tra foglie di piante diverse. Ma è fondamentale sottolineare che anche lo stato fisiologico della pianta è capace di determinare alterazioni nella riflettanza fogliare (Gianquinto et al., 2011). Infatti, la quantità di radiazione assorbita o riflessa da una pianta è legata al contenuto d'acqua e al colore delle sue foglie, quindi al loro contenuto di clorofilla che dipende dal contenuto di azoto. È pertanto possibile diagnosticare lo stato fisiologico delle piante, come stress idrici o nutrizionali, sulla base delle misure di riflettanza a specifiche lunghezze d'onda (Gianquinto et al., 2011; Katsoulas et al., 2016).

### 3.6 Riflettanza e contenuto di azoto

L'azoto è un nutriente importante, che influenza direttamente il comportamento delle piante. L'azoto viene prelevato dalle radici e immagazzinato nelle cellule del mesofillo delle foglie per sintetizzare proteine ed enzimi (Vigneau et al., 2011). La scarsa disponibilità di N porta a una crescita e a una resa ridotte e a una senescenza

precoce delle foglie. D'altra parte, l'eccesso di N può aumentare il vigore della pianta ed estendere il ciclo della pianta causando un raccolto ritardato, l'accumulo di nitrati nei tessuti della pianta e la contaminazione dell'ambiente attraverso l'inquinamento delle falde acquifere (Gianquinto et al., 2011). Xue et al. (2004) hanno condotto studi sugli spettri di riflettanza delle foglie di riso a vari tassi di fertilizzazione di N. Aumentando la somministrazione di N la riflettanza è diminuita nelle regioni di lunghezza d'onda visibile mentre è aumentata nelle regioni di lunghezza d'onda NIR (**Fig. 16**). La regione 560 nm è fortemente riflessa dalla clorofilla nella vegetazione verde, ed essendo che essa è strettamente associata alla concentrazione di N nei tessuti fogliari (Xue et al., 2004) tale lunghezza d'onda può essere impiegata per monitorare lo stato di azoto della pianta (Gianquinto et al. 2011).

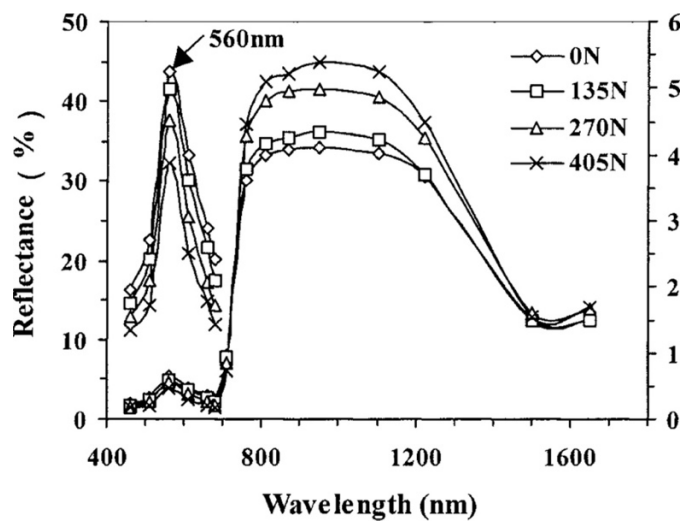


Fig. 16: Riflettanza delle foglie di riso a diversi livelli di N (0, 135, 270 e 405 kg ha<sup>-1</sup> di N)(Xue et al., 2004).

In passato tutto l'azoto necessario alla pianta veniva applicato prima della semina o al momento della semina, ma negli ultimi anni molti coltivatori applicano una parte dell'azoto necessario alle piante durante la crescita della coltura, distribuito lateralmente o sulla pianta o tramite fertirrigazione. In alternativa, l'azoto può essere applicato per via fogliare. Tuttavia, al fine di minimizzare il costo delle

fertilizzazioni e le perdite di N, occorrerebbe fornire azoto quando la sua presenza è cruciale per la crescita della pianta e la resa, facendo corrispondere la fornitura di N al bisogno della coltura in ogni fase di crescita (Gianquinto et al., 2011). L'ottimizzazione dinamica della fornitura di N si ottiene attraverso la sua applicazione a tasso variabile (VRA). L'ottimizzazione dinamica della fertilizzazione richiede una valutazione corretta dello stato di N del suolo o della coltura. Prima della semina si effettuano analisi del suolo per determinare l'azoto già disponibile per le colture e si effettua una stima provvisoria della quantità supplementare di azoto da applicare. Tuttavia, le misurazioni di riflettanza delle piante sono più adatte per monitorare il fabbisogno di N delle colture durante la stagione di crescita e possono essere utilizzate per valutare se la fornitura iniziale era sufficiente, indicando così se e quando la coltura ha bisogno di ulteriore azoto. In caso di bassa disponibilità di N si verifica la degradazione dei pigmenti vegetali e le differenze osservate nella riflettanza spettrale delle colture (Daughtry et al., 2000) possono essere utilizzate per guidare la gestione dell'azoto nelle colture. Blackmer e Schepers (1994) hanno verificato che piante di mais carenti di N riflettono più luce nell'intero spettro visibile rispetto a quelle azoto-sufficienti mentre McMurtrey et al. (1994) hanno osservato che riflettono meno il NIR rispetto alle piante in salute. Inoltre, le differenze nei valori di riflettanza erano più importanti per le lunghezze d'onda 550-600 nm (Blackmer & Schepers, 1994; McMurtrey et al., 1994).

### 3.7 Indici vegetazionali

L'utilizzo di indici vegetazionali spettrali (VI) è ciò che permette di comprendere appieno i valori di riflettanza delle colture che vengono misurati. I VI si basano sulla bassa riflettanza nella banda visibile e l'alta riflettanza nella banda del vicino

infrarosso. I VI sono espressi generalmente come rapporti di somme e differenze di misure di riflettanza a diverse lunghezze d'onda. Negli indici vegetazionali si indica con NIR (o  $R_{810}$ ) la radiazione riflessa a 810 nm contenuta nella banda del NIR (Near Infrared). In maniera analoga si indicherà la riflettanza  $R$  alla lunghezza d'onda  $\lambda$  come  $R_\lambda$ , ad esempio  $R_{560}$  indica la riflettanza della radiazione avente lunghezza d'onda pari a 560 nm (regione verde). Tra i VI, due famiglie principali possono essere considerate:

- (i) il rapporto semplice e gli indici normalizzati;
- (ii) gli indici combinati.

Il rapporto semplice e gli indici normalizzati possono essere legati al rapporto di riflettanza di diverse lunghezze d'onda (Gianquinto et al., 2006), dove le radiazioni visibili riflesse a  $R_{460}$ ,  $R_{510}$ ,  $R_{560}$ ,  $R_{610}$ ,  $R_{660}$ ,  $R_{710}$  o  $R_{760}$  sono usate come denominatori nel rapporto con il NIR, ad esempio, per la generica lunghezza d'onda  $\lambda$  si ha  $IVI = NIR/R_\lambda$ . Ma esistono VI più complessi come, ad esempio, il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). È uno dei VI più comunemente adottati, con una gamma estremamente ampia di applicazioni e precisione nella determinazione dello stato di N delle piante (Vouillot et al., 1998):

$$NDVI = \frac{NIR - R_{660}}{NIR + R_{660}}$$

Oppure il *Normalized Difference Vegetation Index* sul verde (NDVI-G):

$$NDVI = \frac{NIR - R_{560}}{NIR + R_{560}}$$

e questi sono solo due dei numerosi VI che vengono utilizzati. Gianquinto et al. (2011) hanno dimostrato che gli indici vegetazionali  $NIR/R_{560}$  e NDVI-G sono in

grado di rilevare anche piccole variazioni nell'apporto di N nel pomodoro. Ottime prestazioni sono state registrate anche per gli indici NIR/R<sub>510</sub>, NIR/R<sub>610</sub> e NIR/R<sub>710</sub>. Tra tutti i risultati sperimentali dello studio di Gianquinto et al. (2011) emerge che NIR/R<sub>560</sub> è il miglior indicatore dello stato nutrizionale delle piante e ha dimostrato di prevedere in maniera affidabile la resa delle colture. Inoltre, questo indice è stato in grado di rilevare la necessità di un apporto supplementare di N, poiché ha anche presentato correlazioni significative con entrambe le concentrazioni di clorofilla e N nelle foglie. Infine, essendo basato su un rapporto semplice, può essere facilmente adottato dagli operatori agricoli, valutando le letture fornite dallo strumento.



## Capitolo 4

# Rilevamento della luce da parte dei sensori ottici

### 4.1 Imaging spettrale

Le immagini spettrali sono oggetti tridimensionali (3D), con due dimensioni spaziali e una dimensione spettrale. La tecnica dell'imaging spettrale può essere divisa in due categorie distinte: *imaging multispettrale* e *imaging iperspettrale*. L'imaging multispettrale acquisisce immagini con poche (generalmente meno di 10) bande d'onda discrete e solitamente non contigue, mentre l'imaging iperspettrale acquisisce immagini con numerose (decine o centinaia) bande d'onda contigue, più o meno strette. Le immagini multispettrali producono un insieme di punti di dati isolati per ogni pixel a causa delle bande d'onda separate, mentre da ogni pixel di immagini iperspettrali si può ricavare uno spettro quasi continuo (Qin et al., 2013). In **Fig. 17** viene mostrata la differenza tra queste due tecniche.

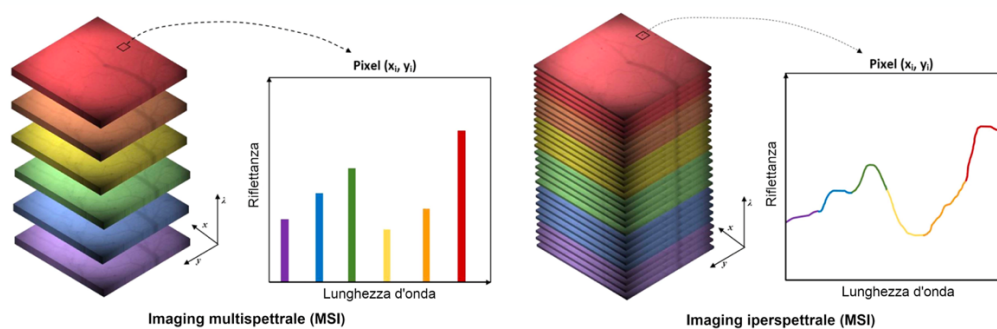


Fig. 17: Differenza tra *imaging multispettrale* (a sinistra) e *imaging iperspettrale* (a destra). L'*imaging multispettrale* considera solo porzioni discrete e discontinue dello spettro elettromagnetico mentre quello *iperspettrale* fornisce uno spettro completo per ogni pixel  $(x_i, y_i)$ . Riadattata da Giannoni et al. (2018)

## 4.2 Imaging iperspettrale

Poniamo la nostra attenzione sull'imaging iperspettrale, che è la tecnica maggiormente utilizzata se si vogliono raccogliere dati con alte risoluzioni spaziali e spettrali. La presa dati di solito richiede una gran quantità di tempo per l'acquisizione delle immagini in condizioni di laboratorio o campo e occorrono procedure relativamente complicate per l'analisi delle immagini offline. In generale, ci sono tre metodi per l'acquisizione di cubi iperspettrali 3D o ipercubi  $(x, y, \lambda)$  contenenti tutti i dati spaziali e spettrali (Qin et al., 2013). Questi sono i metodi *point-scan*, *line-scan* e *area-scan* (**Fig. 18**).

Metodo *point-scan* (o metodo *whiskbroom*): un singolo punto viene scansionato lungo due direzioni spaziali ( $x$  e  $y$ ) spostando il campione o il rivelatore. Uno spettrofotometro dotato di un rivelatore di punti viene utilizzato per acquisire un singolo spettro per ogni pixel della scena. I dati dell'immagine iperspettrale sono accumulati pixel per pixel. Solitamente si utilizzano delle tavole di posizionamento motorizzate a due assi in modo da spostare il campione o il rivelatore per finire la scansione di una scena completa (Qin et al., 2013). È un approccio spettroscopico di base, che utilizza una sorgente luminosa che non può coprire una vasta area della superficie del campione, come un laser puntiforme. Tendenzialmente non è un metodo praticabile per l'acquisizione rapida di immagini, poiché la scansione di molti punti di un'area richiede molto tempo;

Metodo *line-scan* (o metodo *pushbroom*): è un'estensione del metodo *point-scan*. Invece di scansionare un punto ogni volta, questo metodo acquisisce i dati lungo un segmento. Ogni misura è un'immagine 2D  $(y, \lambda)$ , con una dimensione spaziale ( $y$ ) e una dimensione spettrale ( $\lambda$ ). Un ipercubo completo si ottiene man mano che il sensore scansiona lungo  $x$  (Qin et al., 2013). Questa tecnica permette di acquisire dati su campioni o sensori in movimento e trova molte applicazioni in agricoltura

dove droni o aerei dotati di sensore si muovono lungo una direzione scansionando un raccolto;

Metodo *area-scan* (o metodo *band sequential*): questa tecnica acquisisce una immagine 2D in scala di grigi a banda singola  $(x, y)$  con tutte le informazioni spaziali in una sola volta. Un ipercubo contenente una pila di immagini a banda singola viene costruito man mano che la scansione viene eseguita nel dominio spettrale (Qin et al., 2013). Nessun movimento relativo tra il campione e il rivelatore è richiesto per questo metodo.

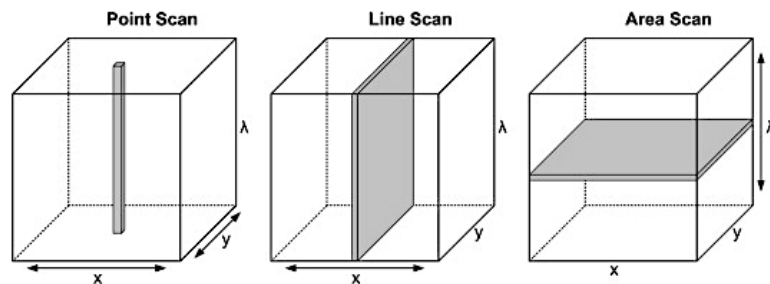


Fig. 18: Rappresentazione dei metodi per acquisire cubi iperspettrali tridimensionali con informazioni spaziali  $(x$  e  $y)$  e spettrali  $(\lambda)$ . Le frecce rappresentano le direzioni in cui avviene la scansione, le aree grigie rappresentano i dati acquisiti al momento di una singola scansione (Qin et al., 2013)

### 4.3 Sensori attivi e sensori passivi

I sensori di riflettanza sono classificati come *attivi* o *passivi* a seconda che abbiano rispettivamente una propria fonte di luce o no. I sensori passivi hanno solitamente due fotorivelatori, uno misura la radiazione incidente sopra la chioma della coltura, e l'altro misura la radiazione riflessa dalla copertura vegetale, la misura della radiazione incidente permette al sensore di considerare le diverse condizioni di luce ambientale durante il funzionamento (Padilla et al., 2018). Invece, i sensori attivi

emettono un segnale luminoso verso il bersaglio di interesse e ne misurano la radiazione riflessa. I sensori attivi più recenti hanno una sorgente che emette sia radiazione visibile che NIR (Padilla et al., 2018). Modulando l'intensità della sorgente luminosa a una determinata frequenza i sensori attivi possono distinguere la radiazione riflessa dalla propria sorgente di luce da quella riflessa dalla radiazione ambientale (Solari et al., 2008) e quindi i sensori attivi possono essere utilizzati in qualsiasi condizione di luce (Fitzgerald G. J., 2010).

#### 4.4 Struttura generica di uno spettrometro

Il principio di funzionamento di uno spettrometro è relativamente semplice. La luce entra dalla *fenditura*, che costituisce l'apertura dello spettrometro. La radiazione attraverserà un *collimatore*, un componente costituito da un sistema di lenti che rende parallelo il fascio proveniente dalla fenditura (Qin et al., 2013). Il fascio collimato raggiunge l'*elemento disperdente* (formato da prismi o *reticoli di trasmissione*<sup>3</sup>) che separa il fascio nelle sue lunghezze d'onda. Una tipologia di elemento disperdente è il *PGP* (*prism-grating-prism*) formato da un reticolo di trasmissione in mezzo a due prismi (**Fig. 19**). La lunghezza d'onda centrale passa simmetricamente attraverso il PGP, mentre le lunghezze d'onda più corte e più lunghe sono disperse in alto e in basso rispetto all'asse centrale. Di conseguenza, la radiazione in ingresso viene scomposta nelle sue lunghezze d'onda. La luce dispersa viene poi proiettata su un rivelatore d'area attraverso la lente posteriore, creando una speciale immagine 2D in cui una dimensione rappresenta lo spazio e l'altra lo spettro (Qin et al., 2013). La **Fig. 19** mostra il diagramma di uno

---

<sup>3</sup> Un reticolo di trasmissione è un particolare tipo di *reticolo di diffrazione*. In generale un reticolo di diffrazione è un componente ottico con una struttura periodica che diffrange la luce in diversi fasci che viaggiano in direzioni diverse. Nel reticolo a trasmissione le strutture sono delle fenditure che lasciano passare la luce diffratta.

spettrometro basato su reticoli di trasmissione, in particolare, è costruito utilizzando un componente PGP.

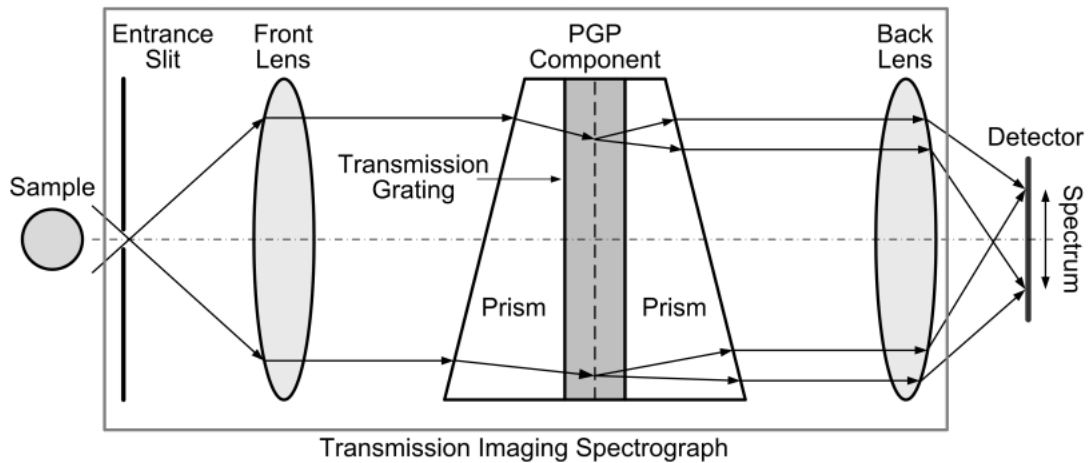


Fig. 19: Spettrometro basato su reticoli di trasmissione, in particolare, è costruito utilizzando un componente prisma-griglia-prisma (Qin et al., 2013).

#### 4.5 Parametri di un sensore

Il sensore che raccoglie informazioni spettrali sugli oggetti da analizzare è un elemento critico nelle misure, conoscere il procedimento con cui un'immagine viene creata è importante per ottenere risultati migliori. Prima di analizzare i principali sensori utilizzati analizziamo le caratteristiche più importanti che caratterizzano un sensore:

*risoluzione spettrale*: indica il numero e la larghezza delle bande in cui il sensore raccoglie le informazioni di radiazione (Campari et al., 2015). Un'alta risoluzione spettrale è caratterizzata da un numero elevato di bande di larghezza stretta. La risoluzione spettrale è ciò che differenzia il telerilevamento multispettrale da quello

iperspettrale. I sensori multispettrali acquisiscono dati in un numero limitato di bande, ampie e tendenzialmente non contigue. Mentre i sensori iperspettrali rilevano numerose bande spettrali, strette e solitamente contigue in modo da avere informazioni spettrali molto dettagliate dell'oggetto osservato;

*risposta spettrale* (talvolta espressa come *efficienza quantica*<sup>4</sup>): identifica la probabilità di ottenere una reazione quantica, come la cattura di un fotone, in funzione della lunghezza d'onda o può anche essere espressa come il numero di elettroni generati per fotone di una data frequenza (Hain et al., 2007);

*sensibilità*: è la minima quantità di luce che si può rilevare e dipende principalmente dal rumore di fondo del sensore;

*range dinamico* che il sensore è in grado di raggiungere: cioè il rapporto tra il massimo e il minimo valore che possono essere registrati nella stessa scansione. Al limite superiore, i pixel appaiono bianchi per ogni valore più alto di intensità (saturazione), mentre i pixel appaiono neri al limite inferiore e sotto. Il range dinamico dipende dal numero di bit del convertitore utilizzato;

*saturazione* del sensore: è un fenomeno che si verifica quando un singolo pixel non è più in grado di immagazzinare altra carica, ciò limita la possibilità di osservare segnali intensi. Quando il sensore si satura si perde linearità e si può verificare il fenomeno del *blooming*, in cui la carica in eccesso in un pixel invade quelli adiacenti;

*rapporto segnale-rumore* (S/N): talvolta indicato con SNR (dall'inglese: *Signal to Noise Ratio*) è una misura che quantifica la bontà di una misura, confrontando il

---

<sup>4</sup> L'efficienza quantica nel caso dei sensori ottici può essere definita come il rapporto tra il numero di cariche prodotte dai fotoni incidenti e il numero di fotoni che colpiscono la superficie stessa.

livello di un segnale desiderato con il livello del rumore di fondo. Il rapporto segnale-rumore è definito come il rapporto tra la potenza del segnale e la potenza del rumore, spesso espresso in decibel;

*rumore*: è dovuto a fattori geometrici, fisici ed elettronici e possono manifestarsi casualmente o in maniera costante. Alcuni sono:

- (i) *Corrente oscura*: deriva dall'energia termica all'interno dei reticoli del semiconduttore che costituisce il sensore. L'agitazione termica libera elettroni dagli atomi indipendentemente dalla luce incidente. Questi elettroni vengono comunque rilevati e contati come segnale. Il numero di elettroni termici, così come il relativo rumore di corrente oscura, aumenta con la temperatura e il tempo di esposizione.
- (ii) *Shot noise*: è un rumore che si presenta come una granulosità diffusa nelle immagini ed è dovuto alla natura corpuscolare della luce. Se l'intensità della radiazione incidente è bassa, cioè se il fascio contiene un basso numero di fotoni o se impatta nella piccola superficie di un pixel avremo che le fluttuazioni sul numero di fotoni incidenti saranno importanti. Ad ogni istante l'intensità è diversa perché diverso è il numero di fotoni che impattano sulla superficie. Se il numero di fotoni è elevato questo effetto è trascurabile. Mentre se il numero di fotoni è basso si osservano oscillazioni di intensità che non dipendono da un'effettiva oscillazione di intensità della radiazione emessa dall'oggetto. Per comprenderlo meglio consideriamo un laser. I fotoni vengono emessi dal laser in momenti casuali, ma i molti miliardi di fotoni necessari per creare uno spot sono così tanti che l'intensità luminosa varia infinitesimamente con il tempo. Tuttavia, se l'intensità del laser viene ridotta fino a che solo una manciata di fotoni colpisce la parete ad ogni istante, le fluttuazioni relative nel numero di fotoni saranno importanti e verranno osservate oscillazioni di intensità. Questo

rumore viene spesso paragonato a come la probabilità di testa o croce è significativamente lontana dal 50% se la moneta viene lanciata poche volte;

- (iii) *Gain noise*: è causato dalla differenza di comportamento dei diversi pixel in termini di sensibilità e di *guadagno*<sup>5</sup>. Questo è un esempio di rumore costante che può essere misurato ed eliminato;
- (iv) *Rumore di quantizzazione*: è dovuto alla conversione analogico-digitale del valore continuo della differenza di potenziale (valore analogico) nel valore discreto della tensione elaborata (valore digitale).

## 4.6 Sensori

Possiamo inizialmente dividere i sensori in due categorie:

- (i) **CCD**: *Dispositivo ad accoppiamento di carica* (dall'inglese *Charge-Coupled Device*) che a sua volta si suddivide in: *Full Frame*, *Frame Transfert* e *Interline*;
- (ii) **CMOS**: (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) o *Active Pixel Sensor* (APS)

I sensori CCD sono dispositivi guidati dalla corrente elettrica. I fotoni che impattano sul sensore generano delle cariche elettriche che vengono dirette in un angolo della matrice del sensore (Herres, 2019). Si genera una differenza di potenziale dell'ordine dei microvolt che esce dal sensore sotto forma di

---

<sup>5</sup> In elettronica, il guadagno è una misura della capacità di un circuito a due porte (come un amplificatore) di aumentare l'ampiezza di un segnale (come corrente o tensione) dall'ingresso alla porta di uscita. Viene definito come il rapporto medio tra l'ampiezza del segnale alla porta di uscita e quella di ingresso.



segnale analogico, in cui la carica è proporzionale all'intensità luminosa. Un convertitore analogico-digitale trasforma il valore di ogni pixel in un valore digitale misurando la quantità di carica in ogni punto della foto e convertendo questa misura in forma binaria.

I sensori CMOS sono dispositivi guidati dalla tensione. Ogni singolo fotodiodo è affiancato ad un convertitore; perciò, l'energia dei fotoni viene subito trasformata in differenza di potenziale senza generazione di corrente elettrica. Il segnale in uscita è digitale. La luce che colpisce il pixel crea una differenza di potenziale proporzionale all'intensità luminosa. La tensione viene campionata sul pixel, digitalizzata sul riproduttore di immagini e cancellata per il fotogramma successivo.

Analizziamo ora le caratteristiche dei sensori più utilizzati: CCD, EMCCD, ICCD e CMOS. La tipologia di sensore più diffusa è il *Dispositivo ad accoppiamento di carica* o CCD (dall'inglese *Charge-Coupled Device*) che a sua volta si suddivide in: *Full Frame*, *Frame Transfert* e *Interline*:

-Il *Full Frame CCD* (**Fig. 20**) è la tipologia più semplice, dove l'area fotosensibile è completamente esposta alla luce esterna. Il processo di acquisizione è noto come *scansione progressiva*, in cui i dati vengono letti scansionando una riga alla volta della matrice di pixel verso i *readout register* che trasferiscono un pixel alla volta verso il convertitore (Andor Technology). Un problema associato a questo sensore è che le ultime righe che vengono lette sono state esposte per più tempo rispetto alle altre righe. Talvolta per ovviare a questo problema si può utilizzare uno *shutter* meccanico che copra il sensore quando non deve essere esposto (Andor Technology). Ma lo shutter col tempo tende a usurarsi essendo un elemento meccanico. Inoltre, se consideriamo un sensore grande occorrerà utilizzare uno shutter grande, che sarà lento nel movimento portando a diminuire il valore del frame rate della camera.

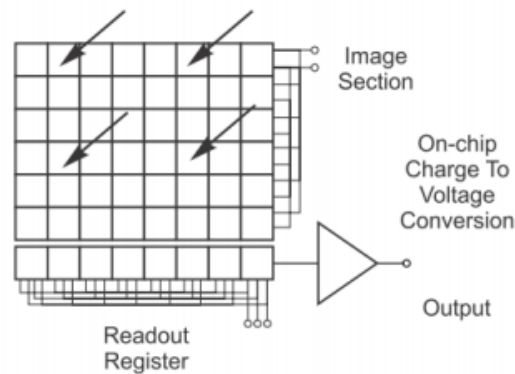


Fig. 20: Full Frame CCD (Andor Technology)

-*Frame Transfert CCD (Fig. 21)*, è un'alternativa migliore al Full Frame. Non c'è uno shutter meccanico ma il sensore è diviso in due parti uguali, una sempre esposta alla luce e un'altra coperta da uno schermo opaco. L'immagine rilevata dalla parte illuminata viene immediatamente trasferita nella parte coperta del sensore e di lì poi letta attraverso il readout register (Andor Technology). In questo modo la parte sensibile del sensore non resta esposta più del dovuto se non per il breve tempo necessario a spostare l'informazione nella parte nascosta del sensore. Per il resto hanno le stesse caratteristiche di un normale CCD a parte il costo che, avendo un sensore di dimensioni praticamente doppie rispetto al necessario, risulta maggiore (Andor Technology).

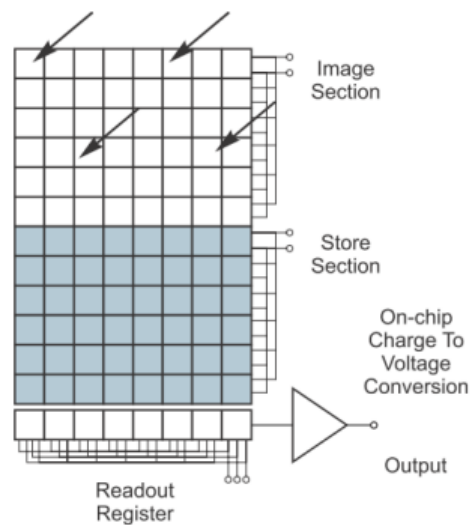


Fig. 21: Frame Transfert CCD (Andor Technology)

-*Interline CCD* (**Fig. 22**), funzionano con lo stesso principio del Frame Transfert ma permette alle cariche di compiere un tragitto minore per raggiungere la zona coperta del sensore costituita da colonne di pixel dette *Interline Masks* (Andor Technology). Questa architettura consente frame rate più alti ma ha come difetto la riduzione della zona utile del sensore e della risoluzione a parità di superficie esposta, problema che viene in parte risolto utilizzando delle microlenti (Andor Technology).

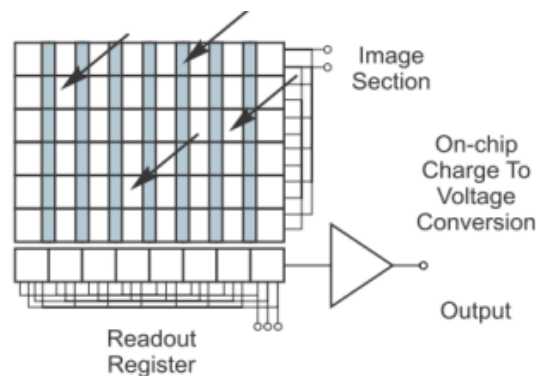


Fig. 22: *Interline CCD* (Andor Technology)

-*Electron Multipling CCD* (EMCCD) è un tipo di sensore avente una maggiore sensibilità, utile a misurare segnali luminosi molto deboli.

-*Intensified CCD* (ICCD) è anch'esso una tipologia di sensore adatto a rilevare segnali deboli. ICCD combina un amplificatore e un CCD. Un vantaggio è che la presenza dell'amplificatore permette di avere tempi di esposizione molto brevi.

-*CMOS* (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) o *Active Pixel Sensor* (APS) (**Fig. 23**) è un sensore in cui, a differenza del CCD, ogni pixel contiene gran parte delle funzionalità necessarie per la rilevazione. Il sensore APS è costituito da un circuito integrato e una matrice di pixel. Ciascun pixel contiene un sensore di luce e un amplificatore di segnale. Inoltre, il circuito integrato è provvisto di un convertitore A/D e un controllore digitale. La luce attraversa le lenti dell'obiettivo,

viene elaborata dal filtro di colore per poi raggiungere la matrice di pixel. Ciascun pixel converte la radiazione incidente in una tensione amplificata che verrà elaborata dal resto del sensore.

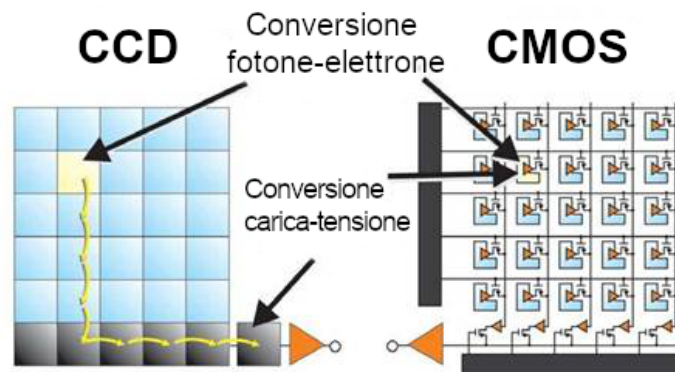


Fig. 23: I CCD spostano la carica generata dai fotoni da pixel a pixel e la convertono in tensione su un nodo di uscita. I CMOS convertono la carica in tensione all'interno di ogni pixel (riadattata da Meroli, 2020).

#### 4.7 Confronto tra i sensori CMOS e CCD

Avendo ora familiarità con i sensori più diffusi facciamo un confronto di alcune caratteristiche dei CMOS e CCD:

- (i) *Costo*: un sensore CMOS è tipicamente meno costoso da produrre di un sensore CCD, in quanto gli elementi di cattura e di rilevamento dell'immagine possono essere combinati nello stesso circuito integrato con una costruzione più semplice richiesta (Meroli, 2020);
- (ii) *Qualità dell'immagine*: le telecamere con sensori CMOS di ultima generazione hanno una buona qualità d'immagine. Tuttavia, i CCD forniscono generalmente una migliore sensibilità e fedeltà rispetto ai CMOS e la qualità dell'immagine delle telecamere CCD di ultima generazione è ancora migliore (Herres, 2019). Quindi, secondo Hain et

al. (2007) bisognerebbe utilizzare una telecamera con sensore CCD per misure di alta precisione. Inoltre, le immagini campionate con sensori CMOS sono meno uniformi, hanno rumore a schema fisso causato dall'irregolarità tra i singoli pixel e dall'uso di più convertitori A/D che leggono le colonne dei pixel;

- (iii) *Blooming*: è un problema che possono avere i sensori CCD dovuto alle cariche elettriche dei pixel troppo saturi che si diffondono a quelli vicini. Questo effetto si manifesta come punti luminosi nell'immagine che mancano di dettagli. La capacità di riempimento in un sensore CCD è un parametro che si riferisce al fatto che un CCD in modalità di raccolta della luce ha un numero massimo di elettroni che possono essere immagazzinati sotto un singolo pixel (Herres, 2019);
- (iv) *Velocità di raccolta dati*: i sensori CCD sono più lenti perché hanno il problema di dover trasferire tutti i dati collezionati dai singoli pixel verso il convertitore (Herres, 2019), il quale convertirà la carica elettrica in differenza di potenziale. L'amplificatore e il trasformatore devono lavorare su un'elevata quantità di dati e questo ne compromette la velocità. I CMOS hanno una velocità di raccolta dati superiore a quella dei CCD (Moudgil, 2019), ogni pixel è dotato di un convertitore e di un amplificatore e i dati vengono elaborati individualmente piuttosto che in un unico nodo circuitale come nel CCD;
- (v) *Consumo energetico*: i sensori CMOS consumano molta meno energia dei CCD. Questo risparmio energetico è dovuto al fatto che trasferire una differenza di potenziale non richiede potenza come nel caso dello spostamento di carica elettrica. In più, a parità di canali del CMOS, al variare della sua dimensione non varia il consumo. Mentre nel caso del CCD, all'aumentare della dimensione aumenta il numero di elettroni da spostare e quindi aumenta il consumo energetico;
- (vi) *Effetto rolling shutter*: Un sensore CMOS cattura tipicamente una riga alla volta e questo può risultare in un effetto noto come *rolling shutter*,

in cui l'immagine presenta una distorsione obliqua, con una deformazione inclinata a sinistra o a destra, a seconda della direzione della fotocamera o del movimento del soggetto. I sensori CCD frame transfer o i sensori CMOS global shutter non hanno questo problema perché catturano l'intera immagine in una volta sola;

- (vii) *Rumore*: Un vantaggio che i sensori CCD hanno sempre avuto in passato è stata la loro capacità di catturare immagini con un rumore inferiore ai CMOS (Group, Techbriefs Media, 2020). Ma questo vantaggio è terminato nel 2020, i moderni sensori CMOS disponibili sono in grado di superare i sensori CCD. Inoltre, poiché i CMOS consumano meno, si surriscaldano meno e introducono meno rumore dovuto alla temperatura rispetto al CCD;
- (viii) *Area*: i CMOS hanno una parte di area sulla superficie del dispositivo che non è sensibile alla luce, riducendo l'efficienza di rilevamento dei fotoni del dispositivo. Ma similmente anche il CCD Frame Transfer ha circa la metà dell'area non sensibile mentre il sensore Full Frame ha la sua area completamente esposta;

In generale non esiste un tipo di sensore migliore degli altri, i confronti elencati sopra mettono in luce come la scelta di un sensore piuttosto che un altro dipenda dal particolare utilizzo ed esigenze richieste per la misura.

## Capitolo 5

# Spettroscopia di campo

### 5.1 Geometria della spettroscopia di campo

La spettroscopia di campo si occupa dello studio delle relazioni tra le informazioni spettrali degli oggetti e i loro attributi biofisici nell'ambiente di campo. Si tratta di una tecnica di fondamentale importanza nel telerilevamento, sia da un punto di vista della ricerca che nelle applicazioni pratiche. Tuttavia, la vasta gamma di strumenti disponibili e le molte tecniche diverse utilizzate hanno portato a problemi di confronto dei dati tra gli studi che rischiano di compromettere seriamente il valore a lungo termine di tali dati (Milton, 1986). È perciò altamente importante che tutte le misure spettrali effettuate sul campo siano accompagnate da precise informazioni sulle condizioni di misurazione. Compiere delle accurate misure di riflettanza spettrale nell'ambiente di campo è difficile, ma è necessario perché l'approccio alternativo di portare i campioni in laboratorio di solito comporta un disturbo eccessivo (Longshaw, 1974). Oltre al problema di conservare in maniera ottimale il campione bisogna anche assicurarsi di garantire che quanto prelevato sia effettivamente rappresentativo della popolazione da cui è stato raccolto. Un altro problema riguarda il simulare la radiazione naturale in laboratorio. Le foglie in natura sono illuminate dalla radiazione diretta dal Sole e dalla radiazione diffusa dall'intero emisfero di cielo. Le interazioni sulla superficie fanno sì che una parte di questa radiazione incidente venga riflessa, o direttamente dalla superficie o dopo interazioni multiple dall'interno della superficie. Le foglie non riflettono la luce in maniera perfettamente diffusa, non sono superfici lambertiane, è quindi necessario considerare che l'intensità della radiazione riflessa varia con l'angolo con cui lascia la superficie. La geometria dell'ambiente di campo è mostrata in **Fig. 24**. Le posizioni della sorgente di radiazione, generalmente il Sole e del sensore ottico sono

determinate da due angoli ciascuno. Un angolo è quello zenitale, formato con la normale al piano e un secondo angolo, detto angolo azimutale, è contenuto nel piano orizzontale ed è definito da una direzione di riferimento.

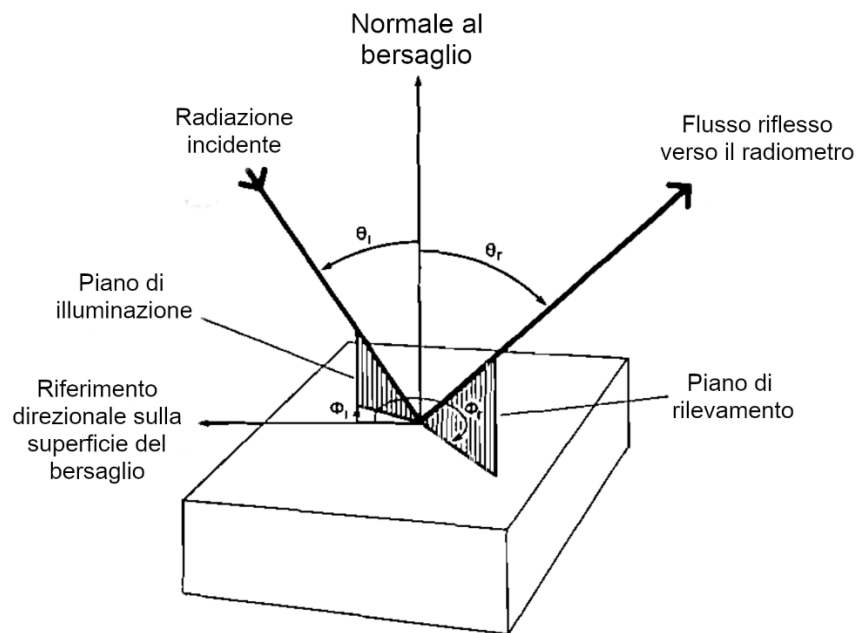


Fig. 24: Geometria della radiazione di campo. Riadattata da Milton, 1986

Se ignoriamo la luce del cielo, il flusso di radiazione del Sole e il flusso che viene riflesso verso il sensore possono essere assunti come all'interno di due coni stretti e lunghi. Tali coni sottendono un piccolo angolo solido sopra la superficie dell'oggetto in esame. Se questi angoli solidi possono considerarsi sufficientemente piccoli possiamo definire la riflettanza della bersaglio come

$$f(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL(\theta_r, \phi_r)}{dE(\theta_i, \phi_i)}$$



dove  $dL$  è la radianza ( $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ) la radiazione riflessa per unità di angolo solido e  $dE$  è l'intensità radiante. I pedici 'i' e 'r' indicano rispettivamente i raggi incidenti e riflessi. Sia la radianza che l'intensità radiante variano al variare dello zenit e dell'azimut. Idealmente l'obiettivo sarebbe quello di ottenere la *funzione di distribuzione bidirezionale della riflettanza* (BRDF), che descrive come la luce viene riflessa da una superficie al variare della direzione del raggio incidente e di osservazione (**Fig. 25**). La BRDF è una funzione a quattro variabili, due variabili sono l'angolo azimutale e zenitale del raggio incidente e le altre due sono l'angolo azimutale e zenitale del raggio riflesso. Per ottenere una misura molto precisa di BRDF sarebbe necessario misurare la riflettanza in tutte le possibili posizioni della sorgente e del sensore, cosa solitamente non possibile nell'ambiente di campo.

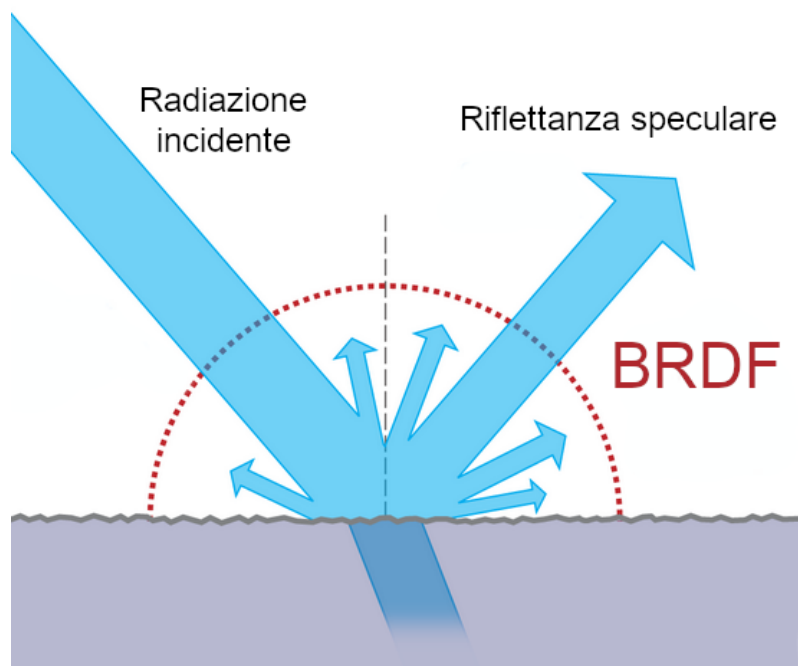


Fig. 25: Rappresentazione grafica della riflettanza che viene considerata dalla funzione di distribuzione bidirezionale della riflettanza (BRDF). Riadattata da Jurohi, 2006.

Un'alternativa si trova attraverso la misura della radianza riflessa da un *pannello standard*, un pannello bianco assunto come diffusore perfetto la cui radianza riflessa viene misurata nelle stesse condizioni di illuminazione e nella stessa geometria del bersaglio. A seguito della misura della radianza del pannello verrà

misurata la radianza del bersaglio tramite una proporzione che considera la radianza del pannello. Nella pratica non esiste un pannello perfettamente riflettente, perciò occorre effettuare una correzione. Quindi

$$R(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_b(\theta_r, \phi_r)}{dL_p(\theta_i, \phi_i)} k(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)$$

dove  $dL_b$  è la radianza del bersaglio e  $dL_p$  è la radianza del pannello nelle stesse condizioni di illuminazione e visione, e  $k$  è il fattore di correzione del pannello. Anche  $k$  dipende anche dalla configurazione angolare, poiché i pannelli standard perfettamente lambertiani sono impossibili da ottenere in pratica. Questo risulta nel fattore di riflettanza bidirezionale (BRF), che può essere correlato al BRDF come segue:

$$R(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \pi f(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)$$

Il termine bidirezionale in questo contesto si riferisce alle due direzioni coinvolte nella misura, una che identifica la posizione della sorgente e una per la posizione del sensore. Tutti i termini nelle equazioni riportate sopra dipendono anche dalla lunghezza d'onda, ma per agevolare la lettura è stato ommesso il pedice  $\lambda$ .

## 5.2 Fattori che influenzano le misure

Sono diversi gli autori che hanno pubblicato suggerimenti pratici e fattori ambientali da considerare per migliorare la coerenza e la precisione dei dati raccolti sul campo usando radiometri e spettroradiometri (vedi, per esempio, Milton 1986, Robinson & Biehl 1979 e Jackson et al. 1980). Questo è importante se la

metodologia della spettroscopia di campo deve essere raffinata e standardizzata tra diversi gruppi di ricerca, inoltre, sottovalutare determinati parametri può portare a una maggior difficoltà nell'interpretare i valori misurati di riflettanza di una copertura vegetale. Si elencano in seguito alcuni importanti fattori da tenere in considerazione in campo:

- (1) Dagli studi di Pinter et al. (1985) la riflettanza di una copertura vegetale dipende dalle caratteristiche architettoniche delle singole piante. Sono state osservate importanti differenze tra le riflettanze di piante che avevano livelli simili di biomassa verde, ma che variavano notevolmente nell'inclinazione e nelle dimensioni delle foglie. Pinter et al. (1985) hanno trovato che le riflettanze in tutte le bande erano solitamente più alte per le chiome planofile, con foglie disposte orizzontalmente al terreno, che per quelle erettofile, con foglie quasi perpendicolari al suolo. Inoltre, hanno osservato che le riflettanze delle chiome erettofile variavano maggiormente al variare dello zenit e dell'azimut del Sole. Mentre le chiome planofile, d'altra parte, avevano una risposta spettrale più uniforme durante il giorno;
- (2) È necessario considerare i cambiamenti, su diverse scale temporali, nella radiazione dovuti all'atmosfera. In primo luogo, i flussi di particolato atmosferico causano fluttuazioni di brevissimo periodo, dell'ordine di pochi millisecondi, che portano a un errore nella misura della radiazione di circa l'1% per cento (Slater, 1980). Secondo Duggin (1974) altri cambiamenti periodici su scale temporali dell'ordine dei secondi e minuti che portano a errori del 5% si suppone siano causati dalla presenza di cirri ad alta quota, invisibili ad occhio nudo. E ovviamente effetti più importanti si hanno quando le nuvole passano davanti al Sole. L'utilizzo di un solarimetro a registrazione continua al centro dell'area del campo durante il tempo delle misurazioni permette di quantificare la variabilità atmosferica su una serie di scale temporali e quindi di analizzare e possibilmente correggere qualsiasi anomalia nei dati del sensore primario (vedi Richardson, 1981);

- (3) Le raffiche di vento possono portare a errori fino al 60% nella misura del BRF dell'orzo nelle lunghezze d'onda del rosso (Lord et al., 1985). Lord et al. (1985) hanno misurato variazioni fino al 12% nel BRF anche se le raffiche erano molto deboli, capaci solo di far svolazzare le foglie. In queste circostanze, l'uso del BRF medio per caratterizzare un sito risulterà in una sovrastima del vero BRF e la mediana può essere una stima migliore. Wright (1986) ha riportato simili variazioni nel rapporto di radianza infrarossa e rossa dall'orzo a causa dell'effetto del vento;
- (4) Chi effettua le misure dovrebbe indossare abiti scuri e inginocchiarsi a una certa distanza dal bersaglio durante le misurazioni. Kimes et al. (1983) hanno dimostrato che gli errori nella misurazione della radianza nelle lunghezze d'onda del rosso e del vicino infrarosso possono avvicinarsi al 10% e al 12% rispettivamente a causa della presenza di una persona in abiti bianchi inginocchiata a mezzo metro dal bersaglio, mentre una persona in abiti neri inginocchiata alla stessa distanza comporterebbe un errore inferiore al 2% in entrambe le bande;
- (5) È importante utilizzare un palo o un treppiede in modo da garantire una geometria fissa tra il sensore, il pannello standard e il bersaglio. Le misure a mano sono meno precise a causa della geometria variabile coinvolta e a causa della prossimità di chi effettua la misura al bersaglio e del bersaglio al radiometro;
- (6) Assicurarsi che il sensore sia almeno a 1 m, ma preferibilmente 2 m, sopra la superficie superiore del bersaglio;
- (7) A meno che non si stiano studiando le variazioni della riflettanza con l'azimut è importante essere coerenti nell'orientare il supporto orizzontale del sensore e posizionare le altre attrezzature da campo, comprese le persone, nelle stesse posizioni rispetto al Sole;
- (8) Controllare che il pannello standard riempia il campo visivo di tutte le bande del sensore e che non sia ombreggiato dal sensore o altri oggetti.

Una volta garantito ciò durante la misura è importante che i dati raccolti siano associati alle condizioni di misurazione, come ad esempio:

- (i) posizione del sito (latitudine e longitudine);
- (ii) ora della misurazione, con precisione del minuto almeno;
- (iii) condizioni del cielo, in particolare il tipo e la quantità di copertura nuvolosa, se presente;
- (iv) nome dello strumento utilizzato e numero di serie;
- (v) presenza di ombre e le caratteristiche dello sfondo come la riflettanza del suolo;
- (vi) il tipo di pannello di riferimento, i dettagli della sua calibrazione (spettrale e angolare) e la relazione tra questa e uno standard nazionale riconosciuto;
- (vii) la geometria di osservazione e se lo strumento è stato tenuto in mano o sostenuto da un palo o treppiede;
- (viii) l'altezza dello strumento dal suolo;
- (ix) l'altezza dello strumento sopra la superficie superiore dell'obiettivo al suolo;
- (x) la dimensione effettiva dell'area di campionamento sulla superficie del bersaglio;
- (xi) le curve di risposta spettrale di ogni banda campionata;
- (xii) l'intervallo di campionamento e la larghezza di banda istantanea.

## Conclusioni

L'utilizzo di spettrometri che misurano la riflettanza fogliare a specifiche lunghezze d'onda permette di rilevare precocemente lo stress nutrizionale nelle piante e gestire le fertilizzazioni in maniera dinamica, somministrando fertilizzante alla pianta quando è cruciale per il suo sviluppo e ciò ha particolare importanza nei sistemi di coltivazione intensiva. La luce incidente su una foglia può essere riflessa, assorbita o trasmessa. La riflessione può essere divisa in due componenti: riflessione speculare e riflessione diffusa. La riflessione speculare è dovuta all'interazione tra radiazione e superficie fogliare, aumenta all'aumentare degli angoli di incidenza e di osservazione, ed è polarizzata. La radiazione che non viene riflessa dalla superficie penetra all'interno della foglia, subisce numerose riflessioni e rifrazioni fuoriuscendo in numerose direzioni. Se la radiazione esce dalla superficie rivolta verso la sorgente sarà considerata come riflettanza diffusa, altrimenti se esce dalla superficie opposta verrà misurata come trasmittanza. La riflettanza diffusa non è polarizzata e varia poco al variare dell'angolo di incidenza. Poiché la riflettanza speculare è polarizzata è possibile distinguere dalla riflettanza diffusa che contiene informazioni sui tessuti interni e sullo stato di N delle foglie e valutare separatamente le due componenti della riflettanza. Con la ricerca svolta, sono stati analizzati e confrontati i sensori ottici più diffusi in commercio, sono stati esaminati il funzionamento di un sensore ottico generico, i principali parametri che lo caratterizzano e sono stati presi in considerazione i fattori che influenzano le misure nell'ambiente di campo. Una buona comprensione dei fenomeni fisici legati all'interazione tra radiazione elettromagnetica e piante permette di avere una migliore comprensione delle misure di riflettanza delle chiome con l'obiettivo di avere misure sempre più precise e una maggiore confrontabilità tra diversi studi.

## Bibliografia

Allen, W. A., Gausman, H. W., & Richardson, A. J. (1973). Willstätter-Stoll theory of leaf reflectance evaluated by ray tracing. *Applied optics*, 12(10), 2448-2453.

Andor Technology, Digital Camera Fundamentals.

Blackmer, T. M., Schepers, J. S., & Varvel, G. E. (1994). Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. *Agronomy Journal*, 86(6), 934-938.

Campari, E., Montedoro, V., Lombini, D. M., & Matteucci, D. G. (2015). Realizzazione di una camera iperspettrale per uso industriale.

Campbell, G. S., & Norman, J. M. (2000). *An introduction to environmental biophysics*. Springer Science & Business Media.

Daughtry, C. S., Walthall, C. L., Kim, M. S., De Colstoun, E. B., & McMurtrey Iii, J. E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote sensing of Environment*, 74(2), 229-239.

Duggin, M. J. (1974). On the natural limitations of target differentiation by means of spectral discrimination techniques (ERTS remote sensors). In *International Symposium on Remote Sensing of Environment, 9 th, Ann Arbor, Mich* (pp. 499-515).

Evans JR. 1999. Leaf anatomy enables more equal access to light and CO<sub>2</sub> between chloroplasts. *New Phytologist* 143: 93–104.

Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1965). The feynman lectures on physics; vol. i. *American Journal of Physics*, 33(9), 750-752.

Fitzgerald, G. J. (2010). Characterizing vegetation indices derived from active and passive sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 31(16), 4335-4348.

Gates, D. M., Keegan, H. J., Schleter, J. C., & Weidner, V. R. (1965). Spectral properties of plants. *Applied optics*, 4(1), 11-20.

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828-831.

- Giannoni, L., Lange, F., & Tachtsidis, I. (2018). Hyperspectral imaging solutions for brain tissue metabolic and hemodynamic monitoring: past, current and future developments. *Journal of Optics*, 20(4), 044009.
- Gianquinto, G., Orsini, F., Fecondini, M., Mezzetti, M., Sambo, P., & Bona, S. (2011). *A methodological approach for defining spectral indices for assessing tomato nitrogen status and yield*. *European Journal of Agronomy*, 35(3), 135-143.
- Gianquinto, G., Orsini, F., Sambo, P., & D'Urzo, M. P. (2011). *The use of diagnostic optical tools to assess nitrogen status and to guide fertilization of vegetables*. *HortTechnology*, 21(3), 287-292.
- Grant, L. (1987). *Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance*. *Remote Sensing of Environment*, 22(2), 309-322.
- Grant, L., Daughtry, C. S. T., & Vanderbilt, V. C. (1987). Variations in the polarized leaf reflectance of Sorghum bicolor. *Remote sensing of environment*, 21(3), 333-339. ISO 69
- Group, Techbriefs Media. "CCD and CMOS Sensors". *www.techbriefs.com*. Retrieved 28 March 2020.
- Gutschick, V. P. (1999). Biotic and abiotic consequences of differences in leaf structure. *The New Phytologist*, 143(1), 3-18.
- Hain, R., Kähler, C. J., & Tropea, C. (2007). Comparison of CCD, CMOS and intensified cameras. *Experiments in fluids*, 42(3), 403-411.
- Jackson, R. D., Pinter Jr, P. J., Reginato, R. J., & Idso, S. B. (1980). *Hand-held radiometry: a set of notes developed for use at the workshop of hand-held radiometry* (No. JSC-17118).
- Katsoulas, N., Elvanidi, A., Ferentinos, K. P., Kacira, M., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2016). *Crop reflectance monitoring as a tool for water stress detection in greenhouses: A review*. *biosystems engineering*, 151, 374-398. ISO 690
- Kimes, D. S., Newcomb, W. W., Schutt, J. B., Pinter Jr, P. J., & Jackson, R. D. (1984). Directional reflectance factor distributions of a cotton row crop. *Remote Sensing*, 5(2), 263-277.
- Knipling, E. B. (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote sensing of environment*, 1(3), 155-159.



- Kumar, R., & Silva, L. (1973). Light ray tracing through a leaf cross section. *Applied Optics*, 12(12), 2950-2954.
- Lichtenthaler, Hartmut K. "Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy." *Current Protocols in Food Analytical Chemistry* 1.1 (2001): F4.3.1–F4.3.8. Web.
- Longshaw, T. G. (1974). Field spectroscopy for multispectral remote sensing: an analytical approach. *Applied optics*, 13(6), 1487-1493.
- Lord, D., Desjardins, R. L., & Dube, P. A. (1985). Influence of wind on crop canopy reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 18(2), 113-123.
- McCree Keith J. "Photosynthetically active radiation." *Physiological plant ecology* I. Springer, Berlin, Heidelberg, 1981. 41-55.
- McMurtrey Iii, J. E., Chappelle, E. W., Kim, M. S., Meisinger, J. J., & Corp, L. A. (1994). Distinguishing nitrogen fertilization levels in field corn (*Zea mays* L.) with actively induced fluorescence and passive reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 47(1), 36-44.
- Meroli Stefano "CMOS vs CCD sensor. Who is the clear winner?". *meroli.web.cern.ch*. Retrieved 28 March 2020.
- Milton, E. J. (1986, May). Principles of field spectroscopy and its role in remote sensing. In *Ground Truth for Remote Sensing. Proceedings of a Remote Sensing Workshop, Department of Geography, The University of Nottingham* (pp. 14-39).
- Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (1990). *Principles of environmental physics* Second edition. *Edward Arnold, London, 291pp*.
- Moudgil, Aditya. (2019). AI & MACHINE LEARNING IN AUTOMOTIVE INDUSTRIES.
- Ollinger, S. V. (2011). Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytologist*, 189(2), 375-394.
- Padilla, F. M., Gallardo, M., Peña-Fleitas, M. T., De Souza, R., & Thompson, R. B. (2018). *Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops: A review*. *Sensors*, 18(7), 2083.
- Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. In *Advances in agronomy* (Vol. 67, pp. 1-85). Academic Press.

- Pinter Jr, P. J., Jackson, R. D., Elaine Ezra, C., & Gausman, H. W. (1985). *Sun-angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars*. *International Journal of Remote Sensing*, 6(12), 1813-1825.
- Qin, J., Chao, K., Kim, M. S., Lu, R., & Burks, T. F. (2013). Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality. *Journal of Food Engineering*, 118(2), 157-171.
- Ranganath, G. S. (2008). *Black-body radiation*. *Resonance*, 13(2), 115-133.
- Richardson, A. J. (1981). Measurement of reflectance factors under daily and intermittent irradiance variations. *Applied Optics*, 20(19), 3336-3340.
- Ryer, A. *The Light Measurement Handbook*, International Light Technologies.
- Robinson, B., & Biehl, L. L. (1979, November). Calibration procedures for measurement of reflectance factor in remote sensing field research. In *Measurements of optical radiations* (Vol. 196, pp. 16-26). International Society for Optics and Photonics.
- Rondeaux, G., & Herman, M. (1991). Polarization of light reflected by crop canopies. *Remote Sensing of Environment*, 38(1), 63-75.
- Sinclair, T. R., Schreiber, M. M., & Hoffer, R. M. (1973). Diffuse Reflectance Hypothesis for the Pathway of Solar Radiation Through Leaves 1. *Agronomy Journal*, 65(2), 276-283.
- Slater, P. N. (1986). Absolute calibration of field reflectance radiometers. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 52(2), 189-196.
- Solari, F., Shanahan, J., Ferguson, R., Schepers, J., & Gitelson, A. (2008). Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. *Agronomy Journal*, 100(3), 571-579.
- Tremblay, N., Wang, Z., Ma, B. L., Belec, C., & Vigneault, P. (2009). A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. *Precision Agriculture*, 10(2), 145-161.
- Vanderbilt, V. C., Grant, L., & Daughtry, C. S. T. (1985). Polarization of light scattered by vegetation. *Proceedings of the IEEE*, 73(6), 1012-1024.

Vigneau, N., Ecartot, M., Rabatel, G., & Roumet, P. (2011). Potential of field hyperspectral imaging as a non destructive method to assess leaf nitrogen content in Wheat. *Field Crops Research*, 122(1), 25-31.

Vouillot, M. O., Huet, P., & Boissard, P. (1998). Early detection of N deficiency in a wheat crop using physiological and radiometric methods. *Agronomie*, 18(2), 117-130.

Woolley, J. T. (1971). Reflectance and transmittance of light by leaves. *Plant physiology*, 47(5), 656-662.

Wright, G. G. (1986). Some observations of the effect of wind turbulence on the near infrared/red ratio. *International Journal of Remote Sensing*, 7(1), 173-178.

Xue, L., Cao, W., Luo, W., Dai, T., & Zhu, Y. (2004). Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance. *Agronomy Journal*, 96(1), 135-142. ISO 690

## Immagini

[https://online.scuola.zanichelli.it/esploriamolachimica/files/2013/10/Zanichelli\\_esploriamolachimica\\_cap\\_08.pdf](https://online.scuola.zanichelli.it/esploriamolachimica/files/2013/10/Zanichelli_esploriamolachimica_cap_08.pdf)

Lennart Kudling, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons

Jurohi, 2006 (talk) (Uploads), CC BY-SA 3.0

<<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons

## Sitografia

[https://meroli.web.cern.ch/lecture\\_cmos\\_vs\\_ccd\\_pixel\\_sensor.html](https://meroli.web.cern.ch/lecture_cmos_vs_ccd_pixel_sensor.html)

Herres, 2019 "The difference between CCD and CMOS image sensing".

[www.testandmeasurementtips.com](http://www.testandmeasurementtips.com).