

Comprende versione
ebook



Agronomia

a cura di
Paolo Ceccon

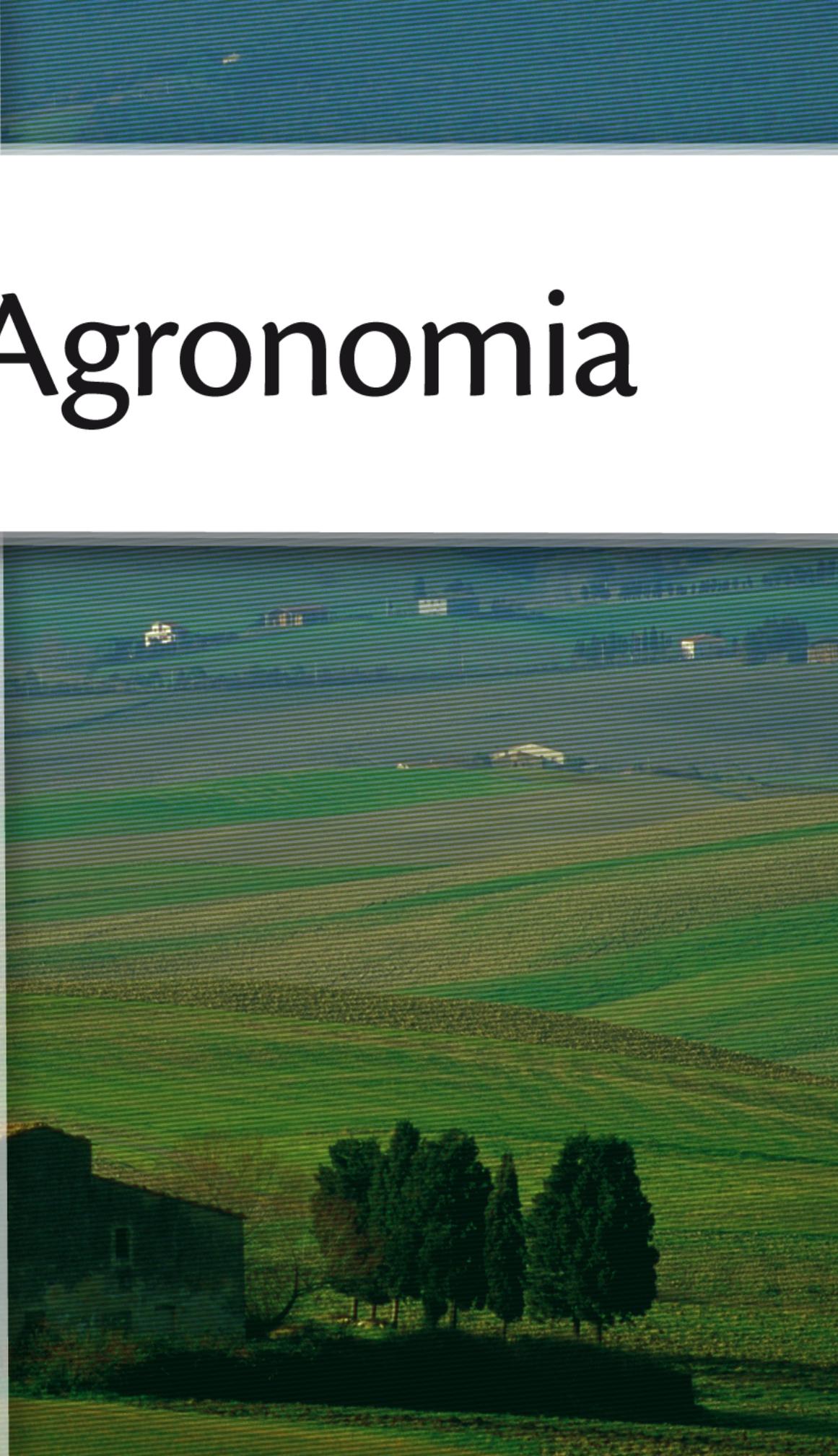
Massimo Fagnano

Carlo Grignani

Michele Monti

Simone Orlandini

Società Italiana di
Agronomia



Agronomia

A cura di

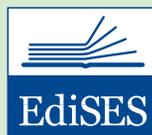
Paolo Ceccon

Massimo Fagnano

Carlo Grignani

Michele Monti

Simone Orlandini



Agronomia

A cura di Paolo Ceccon, Massimo Fagnano, Carlo Grignani, Michele Monti, Simone Orlandini

Copyright © 2017 EdiSES S.r.l. – Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

2021 2020 2019 2018 2017

Le cifre sulla destra indicano il numero e l'anno dell'ultima ristampa effettuata

A norma di legge è vietata la riproduzione, anche parziale, del presente volume o di parte di esso con qualsiasi mezzo.

L'Editore

L'editore ha effettuato quanto in suo potere per richiedere il permesso di riproduzione del materiale di cui non è titolare del copyright e resta comunque a disposizione di tutti gli eventuali aventi diritto.

Foto in copertina:

Per gentile concessione di Alessandro Masoni

Fotocomposizione:

Vcolore di Francesco Omaggio - Pordenone

Stampato presso:

Tipolitografia Sograte S.r.l. - Zona Ind. Regnano - Città di Castello (PG)

per conto della:

EdiSES S.r.l. – Piazza Dante, 89 – Napoli

www.edises.it info@edises.it

ISBN 978 88 7959 965 8

Autori

*Per ciascun capitolo, il primo nome indica l'autore responsabile,
mentre gli altri autori sono elencati in ordine alfabetico*

MARCO ACUTIS
Università di Milano

GIORGIO ALBERTI
Università di Udine

ARTURO ALVINO
Università del Molise

MARIANA AMATO
Università della Basilicata

PAOLO BÀRBERI
*Scuola Superiore di Studi Universitari
"Sant'Anna", Pisa*

GIANCARLO BARBIERI
Università di Napoli Federico II

BRUNO BASSO
Università della Basilicata

LUCA BECHINI
Università di Milano

PAOLO BENINCASA
Università di Perugia

ANTONIO BERTI
Università di Padova

MARCO BINDI
Università di Firenze

STEFANO BOCCHI
Università di Milano

ENRICO BONARI*
*Scuola Superiore di Studi Universitari
"Sant'Anna", Pisa*

GIORGIO BORREANI
Università di Torino

LORENZO BRILLI
Università di Firenze

ENIO CAMPIGLIA
Università della Toscana

SALVATORE CAREDDA
Università di Sassari

RAFFAELE CASA
Università della Toscana

PAOLO CECCON
Università di Udine

FRANCESCO DANUSO
Università di Udine

LAURA ERCOLI
*Scuola Superiore di Studi Universitari
"Sant'Anna", Pisa*

MASSIMO FAGNANO
Università di Napoli Federico II

ALDO FERRERO
Università di Torino

MARCELLA MICHELA GIULIANI
Università di Foggia

FRANCESCO GIUNTA
Università di Sassari

CARLO GIUPPONI
Università Ca' Foscari di Venezia

CARLO GRIGNANI
Università di Torino

LUCIANO GRISTINA
Università di Palermo

MARCELLO GUIDUCCI
Università di Perugia

LUIGI LEDDA
Università di Sassari

TOMMASO MAGGIORE*
Università di Milano

PIETRO MARINO GALLINA
Università di Milano

ROBERTA MASIN

Università di Padova

ALESSANDRO MASONI*

Università di Pisa

GIOVAN BATTISTA MATTII

Università di Firenze

GIOVANNI MAUROMICALE

Università di Catania

MARCO MAZZONCINI

Università di Pisa

MICHELE MONTI

Università Mediterranea di Reggio Calabria

FRANCESCO MORARI

Università di Padova

GIULIANO MOSCA*

Università di Padova

ROSELLA MOTZO

Università di Sassari

ENRICO NOLI

Università di Bologna

SIMONE ORLANDINI

Università di Firenze

EURO PANNACCI

Università di Perugia

NICOLA PECCHIONI

Università di Modena e Reggio Emilia

MICHELE PERNIOLA

Università della Basilicata

MICHELE PISANTE

Università di Teramo

GIORGIO PROSDOCIMI GIANQUINTO

Università di Bologna

AMEDEO REYNERI

Università di Torino

PIER PAOLO ROGGERO

Università di Sassari

PAOLA ROSSI*

Università di Bologna

RODOLFO SANTILOCCHI

Università Politecnica delle Marche

GIOVANNA SEDDAIU

Università di Sassari

NICOLA SILVESTRI

Università di Pisa

FABIO STAGNARI

Università di Teramo

VINCENZO TABAGLIO

Università Cattolica del Sacro Cuore, Piacenza

FRANCESCO TEI

Università di Perugia

GIACOMO TOSTI

Università di Perugia

CONCETTA VAZZANA*

Università di Firenze

FRANCESCA VENTURA

Università di Bologna

GIANPIERO VENTURI*

Università di Bologna

MARCO VOLTERRANI

Università di Pisa

CAMILLO ALESSANDRO ZANCHI*

Università di Firenze

GIUSEPPE ZANIN

Università di Padova

* in quiescenza

*Solo col lavoro agricolo può aversi una vita
razionale, morale. L'agricoltura indica cos'è più e
cos'è meno necessario. Essa guida razionalmente la
vita. Bisogna toccare la terra*

Lev Tolstoj

C'è stato un tempo in cui i migliori professori universitari scrivevano il proprio libro sulla materia di cui erano maestri. Era una sfida con se stessi e con l'enorme bagaglio di nozioni, spiegazioni, esempi e illustrazioni che l'opera richiedeva a un'unica persona di sintetizzare.

Oggi ai professori universitari si chiede tutto, ma non di scrivere libri di testo: stranamente questo è diventato un lusso. È così capitato che la Società Italiana di Agronomia (SIA), deputata a promuovere il progresso della ricerca scientifica, della sua divulgazione e dell'insegnamento delle materie agronomiche, si è ritrovata ad osservare il progressivo pensionamento degli illustri maestri il cui nome generazioni di allievi avevano associato all'idea stessa di Agronomia. Nessuno però riusciva a raccoglierne il testimone. Era evidente il rischio che lo studio universitario di questa disciplina perdesse di nitidezza e che il sapere che regge la complessa gestione dell'agro-ecosistema si disperdesse in molte branche specialistiche, ciascuna di per sé importante, ma non valorizzate dalla prospettiva di sistema caratteristica dell'agronomo.

Questo nuovo libro di Agronomia è un testo di studio e approfondimento, progettato da una ampia comunità di studiosi della disciplina e scritto a molte mani da professori che insegnano in corsi di laurea o laurea magistrale di diverse sedi universitarie d'Italia.

Già una lettura rapida dell'indice suggerisce che il profilo dell'opera è innovativo, ma non rinuncia agli inderogabili concetti di base e alle definizioni, nel continuo sforzo di quantificare i processi biofisici che regolano il funzionamento degli agroecosistemi a supporto di chi deve prendere le decisioni per la progettazione e la gestione. L'analisi dell'ecosistema che genera produzione agraria, che è da questa modellato, integrando la dimensione produttiva e quella ambientale, è il tratto unificatore dell'opera. Le esemplificazioni sono ampie e frequenti sono gli esempi e i riferimenti ai sistemi colturali. Lo studente scoprirà anche che il testo scritto introduce ad un ambiente multimediale che continuerà a crescere anche dopo la pubblicazione a stampa soprattutto per la parte relativa agli "Esercizi di Agronomia". Non poteva essere diverso nel 2017.

Come per tutte le opere collettive, la realizzazione è stata possibile solo perché un coeso gruppo di coordinamento ha costantemente lavorato sollecitando gli autori ed esigendo l'uniformità di stile che rende facile la lettura e possibile uno studio del libro in modo sistematico di tutti i capitoli, o anche per studio di singole parti. Al curatore Paolo Ceccon, al gruppo dei coordinatori e a tutti gli autori del libro, vanno i ringraziamenti dei Presidenti SIA che hanno contribuito a costruire e sviluppare l'idea. A nome della comunità scientifica nazionale, auguriamo a tutti buona lettura e buono studio dell'Agronomia.

*Carlo Grignani, Luciano Cosentino, Pier Paolo Roggero
(Presidenti dal 2008 della Società Italiana di Agronomia)
Torino, 11 luglio 2017*

Nel panorama editoriale della manualistica per l'Università, la pubblicazione di un nuovo libro di testo è, per quasi tutte le discipline, un evento assai poco frequente. Non fa eccezione l'Agronomia, di cui si contano sulle dita di una mano i testi pubblicati nell'ultimo mezzo secolo. Contraddizione solo apparente se si considera che, a fronte della necessità di aggiornamento delle conoscenze – che è compito primario di ogni attività formativa – il valore delle opere in uso ha consentito a esse di reggere l'impatto dei tempi con ammirevole disinvoltura.

La riforma degli ordinamenti didattici, con il passaggio allo schema articolato nella sequenza laurea triennale – laurea magistrale, ha tuttavia reso necessaria una profonda rilettura della modalità di trasmissione delle conoscenze – sia in termini quantitativi, sia in termini qualitativi – e dei relativi materiali a uso degli studenti. L'affermazione di discipline ancillari all'Agronomia e proprie dei Corsi di Studio nel frattempo attivati nelle diverse sedi universitarie ha rafforzato tale necessità, associata alla richiesta di testi dai contenuti flessibili e adattabili alle variabili esigenze didattiche.

Tali riflessioni si incrociano in un contesto storico caratterizzato, grazie alla pervasività delle tecnologie digitali e telematiche, da una estrema facilità di accesso alla conoscenza, che rende peraltro evidente, forse ancora più che in passato, l'utilità di dispositivi che la organizzino in modo guidato, per evitare quella che numerosi osservatori hanno definito disinformazione da eccesso di informazione.

Sulla scorta di tali premesse, il Consiglio Direttivo della Società Italiana di Agronomia ha inteso promuovere tra la comunità accademica a essa facente riferimento la progettazione e la redazione di un manuale di Agronomia, affidandone al sottoscritto il coordinamento.

Il progetto si è sviluppato intorno ai seguenti principi e obiettivi:

- realizzare un libro di testo universitario rivolto prioritariamente agli studenti dei corsi di laurea triennale ma che, grazie alla sua struttura modulare, possa essere utilizzato anche da studenti delle lauree magistrali nei corsi di completamento della formazione agronomica;
- arricchire i contenuti del libro con sussidi didattici quali riassunti e domande di autovalutazione, con un glossario e con un vocabolario italiano-inglese dei termini agronomici maggiormente utilizzati;
- prevedere, accanto alla tradizionale edizione a stampa, una versione on-line arricchita di materiale didattico inadatto alla restituzione su carta (esercizi, fogli di calcolo, immagini, filmati) e personalizzabile sia dagli studenti, con l'introduzione di appunti, note, commenti, sia dai docenti, i quali potranno a loro volta rendere disponibili interi capitoli integrativi;
- conciliare una impostazione di stampo quantitativo con un taglio di natura culturale, si direbbe un approccio umanistico all'agricoltura, più tipico dei nostri tradizionali testi di Agronomia; si è pertanto cercato di realizzare una "narrazione agronomica" per descrivere la ricchezza di condizioni culturali tipica del nostro Paese e, quando possibile, trattarla matematicamente, ovvero, per ogni aspetto trattato, dare le informazioni necessarie per misurare, stimare e valutare.

Ma la scrittura di un libro di Agronomia si è rivelata anche una formidabile opportunità di riflessione sul significato ontologico della nostra disciplina, ridefinendone principi, obiettivi e strumenti e uniformandone concetti, approcci e terminologie, in sintonia con quanto già in atto a livello internazionale. È stata infine una occasione per valorizzare la ricchezza di competenze, anche di carattere

geografico, propria del mondo accademico nazionale, di modo che il volume può essere effettivamente considerato espressione della Società Italiana di Agronomia e dell'Agronomia italiana *tout court*, rappresentandone allo stesso tempo la più ampia pluralità di vedute.

Giunto al termine di questa esaltante esperienza, è comprensibile come l'elenco dei soggetti ai quali desidero rivolgere un caloroso ringraziamento sia molto nutrito.

Ringrazio lo staff della casa editrice EDISES per la professionalità e la leggerezza con la quale ha saputo assecondare ogni mia più puntigliosa richiesta; ringrazio tutti gli autori per la qualità dei contributi e per la disponibilità ad adattarsi alle esigenze del progetto editoriale; ringrazio i componenti del comitato di redazione – Massimo Fagnano, Michele Monti e Simone Orlandini – con i quali ho condiviso le scelte editoriali più importanti e che mi hanno coadiuvato nella revisione dei testi, dimostrando una attenzione e un acume da fuoriclasse; ringrazio i Presidenti della Società Italiana di Agronomia che si sono succeduti in questi ultimi anni – Pier Paolo Roggero, Salvatore Cosentino e Carlo Grignani – per il convinto sostegno e il continuo incoraggiamento.

Ringrazio infine i miei maestri, perché molto di quello che c'è in questo libro viene da loro.

*Paolo Ceccon
Udine, 4 luglio 2017*

Crediti fotografici

CAPITOLO 1

- **Bottello:** foto di Pier Paolo Roggero
- **Figura 1.9B:** local girls bringing back firewood near Jinka, Southern Ethiopia. Foto di David Stanley, <https://www.flickr.com/photos/davidstanleytravel/12013986513/in/photolist-ji-CPCv>, copyright (CC BY 2.0), modificata
- **Figura 1.26:** foto di Marc Tarlock, <https://www.flickr.com/photos/mtarlock/2830215808/in/album-72157607126954294/>, copyright (CC BY-SA 2.0), modificata.
- **Figura 1.29:** wheat harvest. Foto di USDA/Scott Bauer, <https://www.flickr.com/photos/usfwshq/8426360417/in/photolist-dQBioa-MKLaM1-MtjXdEdT7Qs2-dkiGwK-dkijpA-dkij6J-dkiEMk-MSSech-zi-GpbU-sfDas-fxFESK-dTdoRX-dT7hJL-ixSu3V-dTdnsK-9m3AmE-dTj3PS-dTdkJp-oic4sQ-dTdoca-dRaBJR-dTdnak-adhDie-adhDt2-9zKeYF-adhDAX-9zGjeX-5fB563-ixRFiK-ixRWer-f2hXy7-eiWslX-gTKPXV-adkssY-d6WHJqgTKQat-adkyJb-pCRiLf-gTJYZL-9S8yiW-roKy58-dTj1RG-9S5AyH-dTdosZ-9S5DrD-dTdkTT-9S5DhM-9S8vJW-bqzifd>, copyright (CC BY 2.0), modificata.

CAPITOLO 2

- **Bottello:** soil science. Foto di John A. Kelley, <https://www.flickr.com/photos/soilscience/>, copyright (CC BY 2.0), modificata.

CAPITOLO 3

- **Bottello:** foto di Francesca Ventura

CAPITOLO 4

- **Bottello:** <http://cropwatch.unl.edu/wheat/relaycrop>, modificata.

CAPITOLO 5

- **Bottello:** foto di Simone Orlandini

CAPITOLO 6

- **Bottello:** foto di USDA, <https://www.flickr.com/photos/usdagov/5869008676/in/photolist-9WCcNL-biCuDr-rNvMdd-eZHyVH-hqMGoY-azdrNA-aAVsX6-fBph4K-hd2Pvo-a9d9Vu-hqSoNN-f11cGu-dbyAq4-hbymm2-cC176C-nvqvbk-eZHEek-smXfxF-dQujV2-fMyv3p-fEG9ss-9HVatg-ha2Cbi-gYETyA-vRgk2p-rke8JH-avDVLd-fMR7jJ-fbWC8S-kUw6yM-i2SoXB-fkyDp8-cDgpv7-cDer4u-kUvQN4-nhLB8p-ekGfBP-V6rodz-em5ASc-nMVA3R-oNsNLE-fEptnc-c4nQwS-i2T18W-rNEMNp-bEZgHe-fe6fXp-UJmoQG-hphmSg-gYERmu>, copyright (CC BY-ND 2.0), modificata.
- **Figura 6.15:** wheat cultivation. Foto di Jeff Vanuga/USDA, <https://www.flickr.com/photos/48722974@N07/5250022350/in/photolist-8ZVJBE-7tTZg8-jUWxnj-8ZVJJJ-BURwp-Vb7fn-dkuiVY-9DiyWTbMxbM6-fAbLmE-9CsTPA-kGZVtm-ft45TK-kGXMAk-BURwx-8ZVJPb-6gWWMF-8N2Q73-8ZVJt9-9eCaM1-8ZSDSF-jeCxm-p9nV1-8ZVJMb-bq8mCs-aBLF1c-8RPM4Q-8RLENp-bD3hAK-63WoBS-8RLfXK-bq8mzW-drd49z-cE52b5-aBLGz4-gT96Ki-8hqw8v-RtP8Ff-MRjCUr-C8eyH8-nFCrrv-ktc8jN-e74JMd-aBLEpz>, copyright (CC BY 2.0), modificata
- **Figura 6.19:** foto di USDA, <https://www.flickr.com/photos/usdagov/6941308866/in/photolist-bzo2i5-gV6LVu-i2SWL4-sbUyQj-g-V6wmpP-QKccRe-gV65zs-gV6kH4-8zikL6-RKzT2L-g-V6REB-gV6bBs-R8swd2-gV69ZF-bzo2HA-r7oGNHgWA88v-gWxm4q-R8svVZ-SbjmjH-gWxkN6-hd3YfzbXgWpK-SiPQ7G-tmjQTr-RpuptN-sck7X5-SH7xEXgWyUqE-SWD2FH-azdrHW-8L9QYp-u5cMnK-wvCwaoh7TDSa-sc3ZQX-9nrkaQ-h12BH9-gZYya3-qaVHsz-b-NhFAe-rffvxZ-f2cW5e-aAVsX6-6BPDty-azVztZ-9p2uM3-vRgk2p-d1pkR7-9WCcNL>, no copyright, modificata

CAPITOLO 7

- **Bottello:** open field strawberries. Foto di Horticulture Group, <https://www.flickr.com/photos/mmwhortgroup/8951106932/in/photolist-eCSyec-eCSCNX-eCYMff-eCYM6E-eCYLeS-eCYGhE-eCYGrY-eCSy84-eCSB6T-eCSDXa-eCYKaL-eCYJUQ-eCSD3H-eCYJFU-eCSBMB-eCYL2C-eCYJdG-eCYLNq-eCSASa-eCSA5i>, copyright (CC BY 2.0), modificata.

CAPITOLO 8

- **Bottello:** ploughed Wimpole fields. Foto di Tim Regan, <https://www.flickr.com/photos/dumbledad/10113565854/in/photolist-UdsjDW-StHPFP-7UhnQo-4BPc8m-qwtz56-dJKFDt-5AJyDr-5v5MfZ-5ANP2d-rmYuvB-QE7AbA-rzCyzf-egjJFr-bQKpKV-6zLjVV-cdd7aj-pLP5gT-Cv5Jjd-Ufp1x9-no8az6-6gnZMB-LzNT6v-gpGEM5-mLNfjk-Ufp1fa-ncQbGo-gpH3rD-a8X9XS-ei4mMB-aCS7tM-nnxWrX-Ufp1nQ-gWnTHQ-nzBHEX-8rCj6-6e4Ta9-7Xfn3f-8crKV6-UUrFhv-9wXeKH-eia6ws-zaQqjD-a2447q-ei4k46-8S74KR-h6bdzh-mLNj9T-ei4jfd-TojZMy-8DreHK/>, copyright (CC BY 2.0), modificata.

CAPITOLO 9

- **Bottello:** foto di Alessandro Masoni

CAPITOLO 11

- **Bottello:** seed blog. Foto di USDA, <https://www.flickr.com/photos/usdagov/14464606763/in/photolist-o3bTDM-gjWL7p-nE4U6t-iRrFNH-gs44N4-gs459K-fEWCri-fEvbbj-fEdAzF-fEvaqC-fEdzWx-fEvaNj-fEvbx-d-fEdAhZ-dTj5x3-fEWC9Z-gs4MvR-gs4xCy-gs4y1C-gs4M9i-fEWCsi-gs48bM-gs4xpY-fFecT3-fFecNG-fFecPC-fFecJE-fEWBic-fFebEA-fFecQf-fFecHd-fEWBJe-fFecNb-fEWCvR-fFec6f-fEWCpP-fFec53-fEWBGk-fEhMtR-gs46w4-fEfwoB-fFecxf-fEWCcz-fFecuW-fEwKmY-fFec6Y-opDToX-dWBQLe-dXgy6E-fEzbWs>, copyright (CC BY 2.0), modificata.

CAPITOLO 12

- **Bottello:** foto di Antonio Berti

CAPITOLO 13

- **Bottello:** soybean harvest. United Soybean Board, <https://www.flickr.com/photos/unitedsoybean/10059859375/in/photolist-gjXYsp-gs3Hgn-gjZegk-gs49by-gjYF1a-5nikCW-W1juya-9qUVhC-gjYSUm-gjYrko-gjXDJW-gjXieA-gjXq9D-gs3cUq-gjXDTJ-gs42z6-gjYHLR-gs37Ny-gs42co-grUQLB-gs4g9Z-gs3vyU-gjXhMJ-gjZfke-gjXkS2-gjT72q-5tLkY>, copyright (CC BY 2.0), modificata.

CAPITOLO 15

- **Bottello:** foto di Barberi

CAPITOLO 16

- **Bottello:** Sicily. Foto di Scott Wylie, <https://www.flickr.com/photos/scotbot/8463656122/in/album-72157632743920426/>, copyright (CC BY 2.0), modificata.

CAPITOLO 17

- **Bottello:** foto di Federico Pelosi

CAPITOLO 18

- **Bottello:** golf course at Birmingham. Foto di Ralph Daily, <https://www.flickr.com/photos/ralphandjenny/2750374217/in/photolist-5c3or8-7BCBgr-Vt7B9S-9kzpq5-UuhdV6-54A7qD-TwFyNo-9T8wV5-ecA6Vj-8cZ43-cju4kj-ecA6Nf-9J8wJJ-6sp5xC-ecutjT-nCvhNE-6sjWki-d7V2eE-d7UZQo-8kW4fh-nHZgZM-ecA6PC-9EXTL5-Uuhfmc-eaQTZ5-6sjX7p-6sjVKV-6sjWG8-fAzbT2-54A7fH-9FGzZS-nHZfrB-9FF7oz-9EXTTo-9EUWBz-9EUY12-7BS669-d7V1w7-3Xw1Xe-d7pskA-54EjVw-9EXSwC-d7psqC-9FDDsR-6J95jY-9FEJip-VHMCX2-7BNeyg-9EXQwb-9FDttT>, copyright (CC BY 2.0), modificata.

CAPITOLO 19

- **Bottello:** foto di Amedeo Reyneri

CAPITOLO 20

- **Bottello:** desert agriculture - outside Zagora, Morocco. Foto di Richard Allaway, https://www.flickr.com/photos/geographyalltheway_photos/5491998960/in/album-72157629710683685/, copyright (CC BY 2.0), modificata.

CAPITOLO 21

- **Bottello:** elaborazione di Francesco Danuso

Parte prima

AGROECOSISTEMA E SUE COMPONENTI

Capitolo 1 AGROECOSISTEMA

1.1	Agroecosistema: un concetto utile per la gestione sostenibile delle risorse agrarie e ambientali	4
1.2	Obiettivi degli AES	8
▲ 1.2.1	Prodotti	9
▲ 1.2.2	Servizi	10
	1.2.2.1 Interrelazioni tra servizi ecosistemici	12
	1.2.2.2 Esempi di servizi ecosistemici	13
	1.2.2.3 Pagamenti dei servizi ecosistemici	14
▲ 1.2.3	Le dinamiche locali e globali	15
1.3	La componente sociale negli AES: i socio-ecosistemi agricoli	19
▲ 1.3.1	Definizioni e concetti	19
▲ 1.3.2	Esempi di socio-ecosistemi agricoli	19
▲ 1.3.3	Approcci e strumenti per l'analisi dei socio-ecosistemi agricoli	20
1.4	Componenti biofisiche costitutive e funzionali degli AES	22
▲ 1.4.1	I fattori dell'ambiente	22
▲ 1.4.2	Componenti funzionali	25
▲ 1.4.3	Catene alimentari e piramidi ecologiche	25
▲ 1.4.4	Energia naturale e produttività	27
▲ 1.4.5	Energia ausiliaria e impatti	30
▲ 1.4.6	Cicli degli elementi	30
1.5	Progettazione degli AES	35
▲ 1.5.1	Elementi tecnici	36
▲ 1.5.2	Elementi di contesto	37
1.6	Gli AES nel contesto territoriale	40
▲ 1.6.1	L'AES e la sostenibilità delle risorse naturali	40
▲ 1.6.2	Il modello territoriale	41
▲ 1.6.3	Metodi e strumenti di analisi territoriale	43
▲ 1.6.4	Uno schema generale per l'analisi agronomica territoriale	44
Box 1.1	CAMBIAMENTI CLIMATICI	21
Box 1.2	L'AGRONOMIA E LA SOSTENIBILITÀ DEL SISTEMA TERRA	42

Capitolo 2 SUOLO

2.1	Funzioni del suolo	50
2.2	Genesi dei suoli	52
2.3	Descrizione e classificazione dei suoli	53
2.4	Suolo come sistema polifasico	53

XIV Indice generale

2.5	Proprietà fisiche del suolo	54
▲ 2.5.1	Tessitura	54
▲ 2.5.2	Struttura	58
▲ 2.5.3	Porosità, massa volumica apparente e reale, macro e microporosità	60
2.6	Proprietà chimiche del suolo	62
▲ 2.6.1	Reazione del terreno (pH)	62
▲ 2.6.2	Capacità di scambio cationico (CSC)	63
▲ 2.6.3	Elementi nutritivi	64
▲ 2.6.4	Salinità del terreno	66
2.7	Sostanza organica del terreno	66
▲ 2.7.1	Ruolo della componente organica sulle proprietà statiche e dinamiche del terreno	73
2.8	Proprietà idrauliche: potenziale e ritenzione idrica, costanti idrologiche	75
2.9	Proprietà del suolo sottoposto a sollecitazioni	81
▲ 2.9.1	Proprietà meccaniche	82
▲ 2.9.2	Proprietà elettriche	83
2.10	Misura delle proprietà del suolo e indici di qualità	84
▲ 2.10.1	Tessitura	86
▲ 2.10.2	Contenuto idrico	86
▲ 2.10.3	Potenziale matriciale	87
▲ 2.10.4	Massa volumica apparente	88
▲ 2.10.5	Caratteristiche idrologiche	88
▲ 2.10.6	Conducibilità idrica satura	88
2.11	Indici biologici di qualità dei suoli	90
Box 2.1	LA COMMISSIONE EUROPEA E LA PROTEZIONE DEL SUOLO	51
Box 2.2	LA DIMENSIONE DELLE PARTICELLE SOLIDE E IL COMPORTAMENTO DEL SUOLO	56
Box 2.3	IL RAPPORTO C/N	68
Box 2.4	L'HUMUS	69
Box 2.5	CONOSCENZE EMERGENTI SULLE SOSTANZE UMICHE E SUI MECCANISMI DI PROTEZIONE DELLA SOSTANZA ORGANICA	71
Box 2.6	LA RIZOSFERA	76
Box 2.7	LE FUNZIONI DI PEDOTRASFERIMENTO	81
Box 2.8	COME CAMPIONARE UN SUOLO	85
Capitolo 3	ATMOSFERA	93
3.1	Caratteristiche fisiche e chimiche dell'atmosfera	94
▲ 3.1.1	Struttura fisica	94
▲ 3.1.2	Composizione chimica	96
3.2	Bilancio radiativo e bilancio energetico	99
▲ 3.2.1	Radiazione solare	99
▲ 3.2.2	Bilancio radiativo	101
▲ 3.2.3	Bilancio energetico	102
▲ 3.2.4	Effetti della radiazione sulle piante	103
3.3	Variabili meteorologiche	104
▲ 3.3.1	Temperatura	104
▲ 3.3.1.1	Temperatura dell'aria e del terreno	104

	3.3.1.2 Effetti della temperatura sulle piante	105
	3.3.1.3 Misura della temperatura	105
▲ 3.3.2	Umidità dell'aria	107
▲ 3.3.3	Le precipitazioni	108
	3.3.3.1 Pioggia	108
	3.3.3.2 Strumenti di misura delle precipitazioni	110
	3.3.3.3 Grandine	110
	3.3.3.4 Neve	111
	3.3.3.5 Nebbia	111
▲ 3.3.4	Vento	112
▲ 3.3.5	Evapotraspirazione	114
	3.3.5.1 Definizioni	114
	3.3.5.2 Metodi di stima di ETo	115
▲ 3.3.6	La stazione agrometeorologica	122
3.4	Meteorologia e climatologia	123
▲ 3.4.1	Definizione di tempo atmosferico e di clima	123
▲ 3.4.2	La macchina del clima	124
▲ 3.4.3	Classificazioni agro-climatiche	124
▲ 3.4.4	Indici climatici e bioclimatici	126
	3.4.4.1 Indice di Continentalità	126
	3.4.4.2 Indici di valutazione della disponibilità termica	126
	3.4.4.3 Indici di valutazione della disponibilità idrica	126
	3.4.4.4 Indici di stress da freddo e da caldo di Mitrakos	127
3.5	Cambiamenti climatici	127
▲ 3.5.1	Cause dei cambiamenti climatici	127
▲ 3.5.2	Entità dei cambiamenti climatici	129
▲ 3.5.3	Risposta delle colture agrarie	129
▲ 3.5.4	Strategie di adattamento	130
▲ 3.5.5	Strategie di mitigazione	131
▲ 3.5.6	Strumenti per lo studio degli impatti dei cambiamenti climatici	132
Box 3.1	L'OZONO, UN GAS CONTROVERSO	97
Box 3.2	ESPLORANDO L'ATMOSFERA DEL PASSATO	98
Box 3.3	LE LEGGI FONDAMENTALI DELLA RADIAZIONE	100
Capitolo 4	PRODUTTIVITÀ DELLE COMUNITÀ VEGETALI	135
4.1	Produttività degli agroecosistemi	136
▲ 4.1.1	Produttività potenziale	137
▲ 4.1.2	Produttività raggiungibile: fattori limitanti	137
▲ 4.1.3	Produttività effettiva: fattori riducenti	138
▲ 4.1.4	Strategie per il superamento dei fattori limitanti e riducenti	138
4.2	Struttura delle colture e concetti base della competizione	140
▲ 4.2.1	Coltivazione di specie agrarie in coltura pura e in consociazione	140
▲ 4.2.2	Interazioni tra piante nelle colture pure	142
▲ 4.2.3	Interazioni tra piante in consociazione: competizione e facilitazione	144
▲ 4.2.4	Aspetti agronomici delle consociazioni: il LER	145
4.3	Intercettazione della radiazione solare, fotosintesi, respirazione e partizione degli assimilati	146
▲ 4.3.1	Assorbimento e distribuzione della PAR nelle colture	147
	4.3.1.1 Intercettazione e trasmissione della PAR	148
	4.3.1.2 Coefficiente di estinzione e ambiente luminoso all'interno della canopy	148

XVI Indice generale

	4.3.1.3 Distribuzione della radiazione all'interno della canopy	150
	4.3.1.4 Riflessione della PAR	151
	4.3.1.5 Misura e stima della PAR assorbita	151
▲ 4.3.2	Assimilazione lorda delle colture	151
	4.3.2.1 Assimilazione fogliare e intensità radiativa	152
	4.3.2.2 Assimilazione lorda delle colture	153
▲ 4.3.3	Respirazione delle colture	156
	4.3.3.1 Respirazione di mantenimento	156
	4.3.3.2 Respirazione di crescita	157
▲ 4.3.4	Assimilazione netta e tassi di crescita della canopy	158
	4.3.4.1 Assimilazione netta	158
	4.3.4.2 Tassi di crescita ed efficienza energetica delle colture	158
	4.3.4.3 Assimilazione, respirazione e accumulo di biomassa	159
▲ 4.3.5	Ripartizione della biomassa e componenti della resa	162
	4.3.5.1 Capacità di accumulo	163
	4.3.5.2 Componenti della resa	164
▲ 4.3.6	Relazioni idriche e tassi di crescita	165
	4.3.6.1 CGR in condizioni idriche limitanti	166
4.4	Sviluppo	167
▲ 4.4.1	Sviluppo e crescita	167
▲ 4.4.2	Fenologia e scale fenologiche	168
▲ 4.4.3	Tasso di sviluppo	169
▲ 4.4.4	Fattori ambientali che controllano lo sviluppo	170
	4.4.4.1 Temperatura	170
	4.4.4.2 Fotoperiodo	175
	4.4.4.3 Fenologia e adattamento	178
Box 4.1	CALCOLO DELL'ASSIMILAZIONE LORDA IN UNA CANOPY DI UNA COLTURA PLANOFILA CON DISTRIBUZIONE SFERICA DEGLI ANGOLI FOGLIARI	153
Box 4.2	CALCOLO DEL CGR E DEL RENDIMENTO ENERGETICO MASSIMI TEORICI DI UN CEREALE IN UNA GIORNATA ESTIVA ALLE MEDIE LATITUDINI	159
Box 4.3	ANALISI DELLA CRESCITA DELLE PIANTE E DELLE COLTURE	160
Box 4.4	CALCOLO DEL TEMPO TERMICO	172

Parte seconda

SISTEMI COLTURALI: TECNICHE DI GESTIONE DEI PROCESSI PRODUTTIVI 183

Capitolo 5 INTERVENTI SULLA MORFOLOGIA DEL TERRITORIO: SISTEMAZIONI IDRAULICO-AGRARIE 185

5.1	Principi e classificazioni	186
5.2	Sistemazioni di pianura	188
▲ 5.2.1	Affossatura	188
▲ 5.2.2	Tradizionali schemi sistematori di pianura	189

	5.2.2.1 Sistemazione a piantata	189
	5.2.2.2 Sistemazione a proda o rivale	190
	5.2.2.3 Sistemazione a cavalletto	191
	5.2.2.4 Sistemazione a cavino	191
▲ 5.2.3	5.2.3 Criteri attuali per le aree di pianura	191
	5.2.3.1 Sistemazione a larghe o alla ferrarese	192
	5.2.3.2 Sistemazione alla toscana	192
	5.2.3.3 Sistemazioni temporanee di pianura	192
5.3	Sistemazioni di collina	193
▲ 5.3.1	5.3.1 Sistemazioni di traverso e a rittochino	193
▲ 5.3.2	5.3.2 Canali trasversali alla pendenza	197
	5.3.2.1 Fossi livellari	197
	5.3.2.2 Strade-fosso livellari	197
	5.3.2.3 Canali terrazza	198
	5.3.2.4 Argini trasversali	198
▲ 5.3.3	5.3.3 Sistemazioni con consistenti interventi di modificazione della morfologia del versante	199
	5.3.3.1 Ciglionamento e scogliere	199
	5.3.3.2 Terrazzamento	199
	5.3.3.3 Ripiani raccordati	199
	5.3.3.4 Girapoggio e cavalcapoggio	200

Box 5.1 EROSIONE IDRICA 194

Capitolo 6 **INTERVENTI SUL CONTENUTO IDRICO DEL SUOLO: DRENAGGIO E IRRIGAZIONE**

		201
6.1	Bilancio idrico	202
6.2	Controllo dell'acqua in eccesso: drenaggio	203
▲ 6.2.1	6.2.1 Drenaggio a fognatura	204
▲ 6.2.2	6.2.2 Drenaggio con aratro talpa	204
▲ 6.2.3	6.2.3 Drenaggio tubolare	204
6.3	Controllo della carenza idrica: irrigazione	209
▲ 6.3.1	6.3.1 Variabili irrigue	209
▲ 6.3.2	6.3.2 Volume di adacquamento	210
▲ 6.3.3	6.3.3 Momento di intervento irriguo	210
▲ 6.3.4	6.3.4 Tecnica irrigua	210
▲ 6.3.5	6.3.5 Principi di risparmio idrico	213
▲ 6.3.6	6.3.6 Metodi irrigui	214
	6.3.6.1 Irrigazione per sommersione	215
	6.3.6.2 Irrigazione per scorrimento	215
	6.3.6.3 Irrigazione per infiltrazione laterale da solchi	216
	6.3.6.4 Irrigazione per aspersione o irrigazione a pioggia	216
	6.3.6.5 Irrigazione a microportata di erogazione	218
	6.3.6.6 Subirrigazione	220
▲ 6.3.7	6.3.7 Uniformità di distribuzione dell'acqua irrigua	221
▲ 6.3.8	6.3.8 Qualità dell'acqua di irrigazione	221
▲ 6.3.9	6.3.9 Uso di acque reflue depurate	223
▲ 6.3.10	6.3.10 Risposta delle colture all'irrigazione	224

Box 6.1 ESEMPIO DI CALCOLO DEL VOLUME DI ADACQUAMENTO 212

Box 6.2 RISPOSTA DELLE PIANTE ALLO STRESS IDRICO 225

XVIII Indice generale

Capitolo 7	INTERVENTI SULLE CARATTERISTICHE METEOROLOGICHE: APPRESTAMENTI PROTETTIVI	231
7.1	Difesa dalle avversità atmosferiche	232
▲ 7.1.1	Difesa dalle gelate	232
▲ 7.1.2	Difesa dalle alte temperature, dalle ondate di calore e da bruciature dovute alla radiazione solare diretta	236
▲ 7.1.3	Difesa dalla grandine	237
▲ 7.1.4	Difesa dal vento	238
7.2	Apprestamenti protettivi	241
▲ 7.2.1	Pacciamatura	241
▲ 7.2.2	Cassoni, tunnel e serre	243
▲ 7.2.3	Materiali di copertura	245
▲ 7.2.4	Impianti di climatizzazione	245
▲ 7.2.5	Altri impianti	246
Box 7.1	METODI STORICI DI DIFESA DALLA GRANDINE	238
Box 7.2	EROSIONE EOLICA	239
Capitolo 8	INTERVENTI SULLE CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUOLO: LAVORAZIONI	249
8.1	Classificazione delle lavorazioni del terreno	250
▲ 8.1.1	Le condizioni di lavorabilità del terreno	251
8.2	Tecniche convenzionali	254
▲ 8.2.1	Tecniche e attrezzi per i lavori di messa a coltura	254
8.2.1.1	Disboscamento e decespugliamento	254
8.2.1.2	Spietramento	254
8.2.1.3	Sistemazione della superficie	255
8.2.1.4	Dissodamento e scasso	255
▲ 8.2.2	Tecniche e attrezzi per le lavorazioni principali	255
8.2.2.1	Aratura	255
8.2.2.2	Vangatura	260
8.2.2.3	Discissura	260
▲ 8.2.3	Tecniche e attrezzi per le lavorazioni complementari	261
8.2.3.1	Fresatura	261
8.2.3.2	Erpicoltura	262
8.2.3.3	Estirpatura	264
▲ 8.2.4	Tecniche e attrezzi per le lavorazioni consecutive	264
8.2.4.1	Sarchiatura	264
8.2.4.2	Rullatura	264
8.2.4.3	Rincazzatura	265
8.2.4.4	Semina	265
▲ 8.2.5	Lavorazioni e principali caratteristiche del terreno	265
8.2.5.1	Lavorazioni e caratteristiche fisiche del terreno	266
8.2.5.2	Lavorazioni e caratteristiche chimiche del terreno	268
8.2.5.3	Lavorazioni e caratteristiche biologiche del terreno	268
8.3	Tendenze attuali nella lavorazione dei terreni	268
▲ 8.3.1	Le lavorazioni a due strati	269
▲ 8.3.2	La minima lavorazione	269
▲ 8.3.3	La non lavorazione	270

8.4	Risposta delle colture alle lavorazioni del terreno	273
▲ 8.4.1	Cereali autunno-vernini	273
▲ 8.4.2	Colture da rinnovo	274
Box 8.1	COMPATTAMENTO DEL TERRENO	253
Box 8.2	VANTAGGI E SVANTAGGI DELLE TECNICHE DI LAVORAZIONE PRINCIPALE DEL TERRENO	271
Box 8.3	LE LAVORAZIONI DEL TERRENO COME SISTEMA	275
Capitolo 9	INTERVENTI SULLE CARATTERISTICHE CHIMICHE E BIOLOGICHE DEL SUOLO: FERTILIZZAZIONE	279
9.1	Fertilizzazione	280
9.2	Concimazione	280
▲ 9.2.1	Nutrizione minerale	281
▲ 9.2.2	Flusso di nutrienti nel sistema pianta-terreno	281
9.3	Piano di concimazione	282
▲ 9.3.1	Azoto	282
	9.3.1.1 Determinazione della dose di azoto da distribuire	283
	9.3.1.2 Efficienza agronomica apparente dell'azoto	290
	9.3.1.3 Frazionamento della concimazione azotata	291
▲ 9.3.2	Fosforo	293
	9.3.2.1 Determinazione della dose di fosforo da distribuire	294
▲ 9.3.3	Potassio	295
	9.3.3.1 Determinazione della dose di potassio da distribuire	296
	9.3.3.2 Frazionamento della concimazione potassica	297
9.4	Concimi	297
▲ 9.4.1	Reazione dei concimi	297
▲ 9.4.2	Titolo dei concimi	298
▲ 9.4.3	Criteri per la classificazione dei concimi	298
▲ 9.4.4	Concimi minerali semplici	300
	9.4.4.1 Concimi azotati	300
	9.4.4.2 Concimi fosforici	303
	9.4.4.3 Concimi potassici	305
▲ 9.4.5	Concimi minerali composti e complessi	305
	9.4.5.1 Concimi binari	306
	9.4.5.2 Concimi ternari	306
▲ 9.4.6	Fertilizzanti organici	306
	9.4.6.1 Letame	307
	9.4.6.2 Liquame	308
	9.4.6.3 Digestato	309
	9.4.6.4 Prodotti della separazione solido/liquida dei liquami e dei digestati	309
	9.4.6.5 Compost	309
	9.4.6.6 Altri concimi organici	311
	9.4.6.7 Bilancio unico del terreno	312
▲ 9.4.7	Fertirrigazione	312
9.5	Ammendanti	313
9.6	Fertilizzazione verde o sovescio	313
9.7	Correzione del terreno	316
▲ 9.7.1	Correzione dei terreni acidi	316
▲ 9.7.2	Mitigazione dei difetti dei terreni calcarei	317

XX Indice generale

▲ 9.7.3	Classificazione e problematiche dei terreni sodici, salini e salino-sodici	318
▲ 9.7.4	Correzione dei terreni sodici	318
▲ 9.7.5	Correzione dei terreni salini	319
9.8	Fitorisanamento dei suoli inquinati	319
Box 9.1	ESEMPIO DI CALCOLO DELL'AZOTO DERIVANTE DALLA MINERALIZZAZIONE DELLA SOSTANZA ORGANICA	288
Box 9.2	METODO DI STIMA DEL COEFFICIENTE DI LISCIVIAZIONE (K_d)	289
Box 9.3	ESEMPIO DI CALCOLO DELLA DOSE DI AZOTO DA DISTRIBUIRE AL FRUMENTO TENERO	292
Box 9.4	CALCOLO DELLE DOSI DI AZOTO DA APPLICARE AL MAIS TRAMITE FERTIRRIGAZIONE	314

Capitolo 10	INTERVENTI SULLE AVVERSITÀ BIOLOGICHE: DIFESA DALLE INFESTANTI E DAGLI ALTRI ORGANISMI DANNOSI	325
10.1	Principi di malerbologia	326
▲ 10.1.1	Classificazione delle malerbe	326
10.1.1.1	Gruppi biologici	326
10.1.1.2	Gruppi ecofisiologici	327
▲ 10.1.2	Produzione di semi e loro caratteristiche	328
▲ 10.1.3	Produzione di gemme	332
10.2	Dannosità delle malerbe	332
▲ 10.2.1	Danno primario diretto	333
10.2.1.1	Allelopatia	333
10.2.1.2	Competizione	333
▲ 10.2.2	Danno primario indiretto	335
▲ 10.2.3	Danno secondario	335
▲ 10.2.4	Perché il controllo delle malerbe è difficile?	335
10.3	Scienza e tecnologia del controllo delle malerbe	337
▲ 10.3.1	Mezzi di controllo fisici	337
10.3.1.1	Pirodiserbo	337
10.3.1.2	Solarizzazione	338
10.3.1.3	Pacciamatura	338
10.3.1.4	Schiuma calda-Foamstream	339
▲ 10.3.2	Mezzi di controllo ecologici	339
▲ 10.3.3	Mezzi di controllo meccanici	339
▲ 10.3.4	Mezzi di controllo preventivi	340
▲ 10.3.5	Mezzi di controllo chimici	341
10.3.5.1	Meccanismi d'azione	341
10.3.5.2	Modalità di penetrazione e traslocazione nella pianta	343
10.3.5.3	Utilizzo agronomico degli erbicidi	344
10.3.5.4	Selettività	347
10.3.5.5	Colture resistenti OGM e non OGM	348
10.3.5.6	Resistenza e sua gestione	349
10.3.5.7	Erbicidi e terreno	350
10.3.5.8	Erbicidi naturali	353
10.4	Difesa da patogeni e parassiti	354
▲ 10.4.1	Importanza delle pratiche agronomiche	354
10.4.1.1	Lavorazioni del terreno	355
10.4.1.2	Avvicendamento e gestione dell'ambiente culturale	357
10.4.1.3	Fertilizzazione	358
10.4.1.4	Irrigazione	359

	10.4.1.5 Controllo delle malerbe	359
	▲ 10.4.2 Aspetti agronomici dei trattamenti antiparassitari	360
	▲ 10.4.3 Significato agronomico della difesa	361
Box 10.1	LE GEMME	332
Box 10.2	STRATEGIE DI DISERBO DEL GRANO	345
Box 10.3	STRATEGIE DI DISERBO DEL MAIS	346
Box 10.4	STRATEGIE DI DISERBO DEL RISO	346
Box 10.5	PERSISTENZA DI UN ERBICIDA NEL TERRENO	353
Box 10.6	LE MICOTOSSINE NELLE DERRATE AGRICOLE E NEGLI ALIMENTI	362

Capitolo 11 **INTERVENTI SUI CORPI RIPRODUTTORI: RIPRODUZIONE E PROPAGAZIONE**

		365
11.1	Meccanismi riproduttivi e propagazione delle colture	366
	▲ 11.1.1 Addomesticamento e sistemi riproduttivi	366
	▲ 11.1.2 Propagazione gamica e vegetativa delle colture	367
11.2	Risorse genetiche e miglioramento genetico	369
	▲ 11.2.1 Storia e metodi del miglioramento genetico	369
	▲ 11.2.2 Scelta varietale	369
11.3	Produzione e commercio dei materiali di propagazione	371
	▲ 11.3.1 La costituzione varietale	371
	▲ 11.3.2 Iscrizione al Registro	373
	▲ 11.3.3 Selezione conservatrice	373
	▲ 11.3.4 Moltiplicazione dei materiali	374
	▲ 11.3.5 Tecnologia del seme	375
	▲ 11.3.6 Commercio delle sementi	376
	▲ 11.3.7 Il sistema sementiero nazionale	377
Box 11.1	L'UNIONE PER LA PROTEZIONE DEGLI OTTENIMENTI VEGETALI (UPOV)	367
Box 11.2	GLI ORGANISMI GENETICAMENTE MODIFICATI (OGM)	370
Box 11.3	INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION (ISTA)	377

Capitolo 12 **DISTRIBUZIONE SPAZIALE E CRONOLOGIA DEI CICLI DI PRODUZIONE: CONSOCIAZIONE E AVVICENDAMENTO**

		381
12.1	Consociazione o policoltura	382
12.2	Rotazione e avvicendamento	384
	▲ 12.2.1 Gestione delle avversità biotiche	386
	▲ 12.2.2 Qualità chimico-fisica del suolo	387
	▲ 12.2.3 Gestione dei nutrienti	387
	▲ 12.2.4 Erosione	387
	▲ 12.2.5 Impiego del lavoro e dei mezzi	388
	▲ 12.2.6 Organizzazione delle tecniche colturali nella rotazione	388
	▲ 12.2.7 Avvicendamento e resa delle colture	389
Box 12.1	CENNI STORICI	385
Box 12.2	SUCCESSIONI DINAMICHE	386
Box 12.3	ALCUNI PRINCIPI BASE DELLE SUCCESSIONI COLTURALI	389
Box 12.4	ALCUNI ESEMPI DI ROTAZIONI	392

Parte terza

SISTEMI AZIENDALI: ORGANIZZAZIONE E SOSTENIBILITÀ PRODUTTIVA 395

Capitolo 13 **AGRICOLTURA CONVENZIONALE** 397

- 13.1** Breve storia dell'agricoltura in Italia 398
- 13.2** Il contesto internazionale: Norman Borlaug e la rivoluzione verde 400
- 13.3** Agricoltura convenzionale 401
- 13.4** Intensificazione sostenibile 403

Capitolo 14 **AGRICOLTURA CONSERVATIVA** 409

- 14.1** Cenni storici, principi agronomici, transizione 410
- 14.2** Diffusione nel Mondo, in Europa e in Italia 415
- 14.3** Aspetti ambientali: protezione del suolo e dell'acqua e biodiversità 416
- 14.4** Aspetti climatici: adattamento e mitigazione 418

Capitolo 15 **AGRICOLTURE DI TIPO BIOLOGICO** 421

- 15.1** Tipologie di agricoltura biologica, loro principi e obiettivi 422
 - ▲ **15.1.1** Agricoltura biodinamica 422
 - ▲ **15.1.2** Agricoltura naturale 423
 - ▲ **15.1.3** Permacoltura 424
 - ▲ **15.1.4** Agricoltura sinergica 424
 - ▲ **15.1.5** Agricoltura biologica propriamente detta 424
 - ▲ **15.1.6** Principi e obiettivi delle agricolture di tipo biologico 425
- 15.2** Organizzazione dei processi e uso dei mezzi di produzione in agricoltura biologica 426
 - ▲ **15.2.1** Pianificazione dell'avvicendamento colturale 426
 - ▲ **15.2.2** Lavorazione del terreno 427
 - ▲ **15.2.3** Scelta varietale 428
 - ▲ **15.2.4** Semina e trapianto 429
 - ▲ **15.2.5** Gestione della fertilità del terreno 430
 - ▲ **15.2.6** Gestione dell'irrigazione 431
 - ▲ **15.2.7** Gestione della vegetazione infestante 432
 - ▲ **15.2.8** Gestione dei fitofagi, patogeni e nematodi 434
- 15.3** Produttività e sostenibilità dei processi 436
 - ▲ **15.3.1** Produttività 436
 - ▲ **15.3.2** Efficienza d'uso delle risorse e dell'energia 437
 - ▲ **15.3.3** Sostenibilità ambientale 437
 - ▲ **15.3.4** Sostenibilità socio-economica 438

Box 15.1 NOTA STORICA 423

Box 15.2 NOTA LEGISLATIVA 424

Box 15.3 RICERCA E PROSPETTIVE FUTURE 436

Capitolo 16 **ARIDOCOLTURA** 441

- 16.1** Ambienti climatici di riferimento 442
 - ▲ **16.1.1** Il clima mediterraneo 444

16.2	Tecniche di coltivazione in aridocoltura	445
▲ 16.2.1	Incremento del contenuto d'acqua del suolo	446
▲ 16.2.2	Contenimento delle perdite dell'acqua immagazzinata	447
	16.2.2.1 Interventi sul suolo e sul clima	447
	16.2.2.2 Interventi sulla coltura	448
16.3	Sistemi colturali	451
Box 16.1	GESTIONE CONSERVATIVA DEL SUOLO IN ARIDOCOLTURA	446
Box 16.2	EFFICIENZA D'USO DELL'ACQUA	449

Capitolo 17	AGRICOLTURA DI PRECISIONE	453
17.1	Principi e obiettivi	454
▲ 17.1.1	Cause della variabilità spaziale e temporale	454
▲ 17.1.2	Georeferenziazione	455
▲ 17.1.3	Gestione agronomica sito-specifica: in continuo o per zone uniformi?	456
17.2	Sensoristica	458
▲ 17.2.1	Sensori per determinare le proprietà del suolo	458
▲ 17.2.2	Sensori per determinare lo stato della coltura	460
17.3	Gestione tecnica	462
▲ 17.3.1	Fertilizzazione a rateo variabile	463
▲ 17.3.2	Diserbo sito-specifico	465
Box 17.1	LA MAPPATURA DELLA RESA	456

Parte quarta

SISTEMI AGRICOLI: STRATEGIE DI ADATTAMENTO	467
---	-----

Capitolo 18	AGRICOLTURE IN FILIERE E CONTESTI SPECIFICI	469
18.1	Sistemi colturali nell'azienda zootecnica intensiva da latte della Pianura Padana	470
▲ 18.1.1	Ottimizzazione dei sistemi colturali per l'azienda intensiva da latte	471
▲ 18.1.2	Due casi di sistemi foraggeri da latte	472
18.2	Sistemi pascolivi estensivi insulari	472
▲ 18.2.1	Il miglioramento dei pascoli	473
▲ 18.2.2	Sistemi foraggeri	474
18.3	Tappeti erbosi	475
▲ 18.3.1	Principali benefici del tappeto erboso	475
▲ 18.3.2	Scelta delle specie e loro insediamento	475
▲ 18.3.3	Sistemi costruttivi	476
▲ 18.3.4	Principali strategie di manutenzione	476
18.4	Sistemi ortofloricoli	477
▲ 18.4.1	Ortofloricoltura intensiva	477
▲ 18.4.2	Fattori critici per i sistemi orticoli	478
18.5	Filiera della biomassa legnosa da colture dedicate	479
18.6	Filiera del vino	481
▲ 18.6.1	Fattori di qualità	481
18.7	Agricoltura nelle aree protette	482
▲ 18.7.1	Gestione delle aree protette	482
▲ 18.7.2	L'agricoltura fra vincoli e opportunità	483
▲ 18.7.3	Il ruolo dell'agricoltura	484

XXIV Indice generale

Capitolo 19	AGRICOLTURE PER LA PRODUZIONE DI COMMODITY	487
19.1	Caratteristiche generali della produzione di commodity agricole	488
19.2	Casi di studio	490
▲ 19.2.1	Caso di studio: frumento duro	491
▲ 19.2.2	Caso di studio: riso	493
▲ 19.2.3	Caso di studio: frumento tenero	495
▲ 19.2.4	Caso di studio: mais	497
▲ 19.2.5	Caso di studio: soia	499

Capitolo 20	AGRICOLTURE NELLE AREE TROPICALI	505
20.1	Sistemi agrari: strategie per l'immagazzinamento e l'utilizzazione della pioggia in aree tropicali	506
20.2	Sistemi aziendali: strategie di controllo della fertilità dei suoli	508
20.3	Sistemi colturali: strategie di intensificazione della produzione di riso	510

Capitolo 21	VALUTAZIONE DEI SISTEMI COLTURALI, AZIENDALI E AGRICOLI	513
21.1	Ambiti della valutazione	514
21.2	Sviluppo del modello valutativo	516
▲ 21.2.1	Criteri, indicatori e variabili	516
▲ 21.2.2	Aggregazione e sintesi: gli indici di valutazione	518
▲ 21.2.3	Normalizzazione	519
▲ 21.2.4	Attribuzione dei pesi	520
▲ 21.2.5	Aggregazione di indicatori continui	522
▲ 21.2.6	Aggregazione di indicatori categorici	523
▲ 21.2.7	Classificazione dell'indice	524
▲ 21.2.8	Convalida del modello di valutazione	525
▲ 21.2.9	Restituzione e spazializzazione dei dati	525
21.3	Metodologie di valutazione territoriale	526
▲ 21.3.1	Capacità d'uso dei suoli (Land Capability)	526
▲ 21.3.2	Idoneità del territorio (Land Suitability)	527
▲ 21.3.3	Procedure FAO per la valutazione agronomica del territorio	528
▲ 21.3.4	Zonazione	528
21.4	Casi di studio	529
▲ 21.4.1	Indice di successione colturale	529
▲ 21.4.2	Vocazione colturale del territorio	529
▲ 21.4.3	Valutazione della sostenibilità e dell'impatto ambientale	531

Box 21.1 INDICATORI E INDICI AGRO-AMBIENTALI 518

Parte quinta

APPENDICI	535
Appendice 1 - Principi di metrologia	536
Appendice 2 - Teoria degli errori	540
Appendice 3 - Elenco dei simboli utilizzati nel testo	543
Appendice 4 - Elenco delle abbreviazioni e delle sigle utilizzate	547
Appendice 5 - Glossario	549
Appendice 6 - Vocabolario italiano-inglese	564

INDICE ANALITICO	571
-------------------------	-----



Capitolo 3

Francesca Ventura, Marco Bindi, Lorenzo Brilli, Paola Rossi

ATMOSFERA

- ▲ 3.1 Caratteristiche fisiche e chimiche dell'atmosfera
- ▲ 3.2 Bilancio radiativo e bilancio energetico
- ▲ 3.3 Variabili meteorologiche
- ▲ 3.4 Meteorologia e climatologia
- ▲ 3.5 Cambiamenti climatici



BOX

- 3.1 L'ozono, un gas controverso
- 3.2 Esplorando l'atmosfera del passato
- 3.3 Le leggi fondamentali della radiazione

Premessa

Lo studio e la comprensione dell'atmosfera che circonda la Terra, e dei fenomeni che vi avvengono, è imprescindibile dallo studio dell'agronomia, così come è impossibile ignorare l'effetto delle condizioni meteorologiche sulla vita delle piante e sul successo dell'agricoltura.

Per molti secoli le relazioni tra agricoltura e tempo meteorologico sono state descritte e tramandate in modo tradizionale, mentre adesso questo strumento non è più valido, poiché il clima sta cambiando in maniera piuttosto rapida.

Al termine dello studio di questo capitolo lo studente conoscerà le basi del funzionamento del clima, le principali grandezze meteorologiche e agrometeorologiche, le interazioni degli organismi vegetali con l'ambiente circostante, sarà in grado di effettuare le misure e le elaborazioni dei dati meteoroclimatici e di stimare l'evapotraspirazione delle principali colture. Sarà inoltre in grado di raccogliere, interpretare e comunicare dati e informazioni per formulare giudizi autonomi e riflessioni sulle attuali problematiche ambientali e del cambiamento climatico.

I contenuti di questo capitolo sono conoscenze di base. Sono richieste competenze di matematica e di scienze, in particolare chimica e fisica.

PAROLE CHIAVE:

- METEOROLOGIA
- CLIMATOLOGIA
- ATMOSFERA
- RADIAZIONE SOLARE
- EVAPORAZIONE
- CAMBIAMENTO CLIMATICO

3.1 Caratteristiche fisiche e chimiche dell'atmosfera

La Terra è circondata da un fluido gassoso, comunemente chiamato atmosfera, dello spessore di alcune decine di chilometri, che è parte integrante del pianeta. L'atmosfera è formata dall'aria, una miscela di gas che funge da filtro nei confronti della radiazione solare incidente. Gli scambi di energia tra Terra, Sole e atmosfera generano quello che viene chiamato clima.

3.1.1 Struttura fisica

Alcune delle principali caratteristiche fisiche dell'atmosfera, quali la temperatura e la pressione, variano all'allontanarsi dalla superficie terrestre; nel caso della temperatura, in particolare, le variazioni sono discontinue: tali discontinuità sono utilizzate per una classificazione dell'atmosfera in strati sovrapposti.

Il fatto che la temperatura diminuisca all'aumentare dell'altitudine è noto da tempo. Anticamente si credeva che la temperatura diminuisse

indefinitamente fino a raggiungere lo zero assoluto (-273°C), ma all'inizio del XX secolo misure dirette di temperatura dell'atmosfera, effettuate con palloni sonda, portarono alla corretta descrizione del profilo verticale di temperatura (FIGURA 3.1). Allontanandosi dalla superficie terrestre si ha dunque un primo strato detto troposfera, nel quale la temperatura diminuisce con l'altitudine a un tasso medio di circa $6,5^{\circ}\text{C}$ al chilometro (gradiente termico verticale). Lo spessore di questo strato è variabile con la latitudine, oscillando da circa 16 km all'equatore fino a circa 8 km o meno ai poli. Più ci si avvicina alla superficie terrestre, maggiore è la turbolenza in questo strato, e la temperatura della superficie ha grande influenza sullo spessore e sui fenomeni fisici che vi avvengono. In pratica tutti i fenomeni meteorologici avvengono nella troposfera. Al di sopra di essa si trova la stratosfera, nella quale la temperatura aumenta con l'altitudine; la fascia di transizione tra le due, nella quale la temperatura si mantiene relativamente costante, è detta tropopausa. La stratosfera si estende fino a circa 50 km di altitudine; a essa segue un'altra fascia a temperatura costante detta stratopausa e una nuova inversione di gradiente. La crescita del-

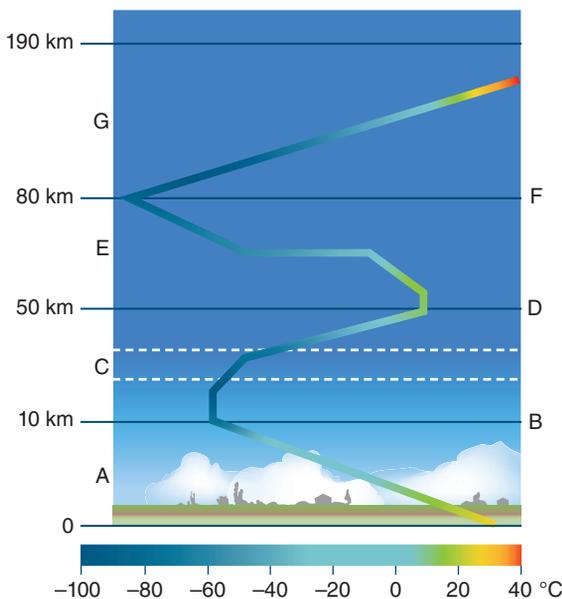


FIGURA 3.1 Struttura termica dell'atmosfera al variare dell'altitudine, ovvero della distanza dalla superficie terrestre. A = troposfera; B = tropopausa; C = stratosfera (le linee tratteggiate indicano lo strato di ozono); D = stratopausa; E = mesosfera; F = mesopausa; G = termosfera.

la temperatura nella stratosfera è legata alla presenza di ozono (O_3), un gas che assorbe la radiazione ultravioletta proveniente dal Sole, e ne fa aumentare l'energia. Al di sopra, nella mesosfera, la temperatura decresce ancora fino alla mesopausa, posta a circa 80 km di altezza, dove raggiunge circa -90°C . L'ultimo strato, la termosfera, non ha un limite superiore ben definito, estendendosi fino a qualche centinaio di chilometri. In essa la temperatura cresce fino a oltre 1.000°C , a causa dell'elevata energia cinetica posseduta dalle molecole di gas.

L'atmosfera è caratterizzata da una densità (massa per unità di volume) decrescente con l'altitudine. L'effetto della densità sulla superficie terrestre è la pressione atmosferica, ovvero la forza esercitata dalla colonna d'aria sull'unità di superficie. La pressione atmosferica diminuisce all'allontanarsi dalla superficie terrestre secondo una relazione esponenziale inversa, come rappresentato in **FIGURA 3.2**. In condizioni standard e al livello del mare, la pressione atmosferica ha un valore di 1013,25 hPa (1 Atm).

Il 75% della massa dell'atmosfera si trova al di sotto dei 10 km di altezza, ovvero all'interno della troposfera, mentre al di sopra dei 100 km si trova

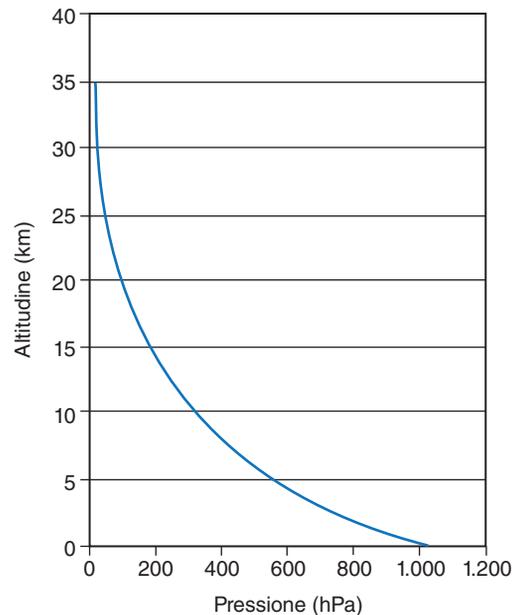


FIGURA 3.2 Variazione della pressione atmosferica con l'altitudine.

solo lo 0,00003% della massa totale. Oltre a variazioni della pressione atmosferica lungo la verticale, si possono comunemente riscontrare differenze di pressione tra zone diverse della superficie terrestre. Queste variazioni locali sono all'origine dei movimenti delle masse d'aria che chiamiamo venti, nonché delle più importanti manifestazioni del tempo meteorologico. Esse sono provocate prevalentemente da differenze di temperatura dell'aria alla superficie terrestre, a loro volta conseguenti principalmente da differenti livelli di insolazione: l'aria calda, meno densa, si espande e, al contrario, l'aria fredda, più densa, si contrae, generando variazioni di pressione atmosferica.

Si è già detto che la grande maggioranza dei fenomeni meteorologici avvengono nella troposfera, che è dunque lo strato più interessante per la vita sulla Terra; in particolare, occupandosi l'agronomia dei rapporti suolo-pianta-atmosfera, l'interesse si concentra sulla parte della troposfera più vicina alla superficie della Terra, detta strato limite atmosferico (Atmospheric Boundary Layer, ABL). Lo strato limite atmosferico ha un'altezza di pochi metri, ed è quello nel quale le caratteristiche della superficie (es. temperatura, copertura vegetale) influenzano direttamente le condizioni atmosferiche. Esso viene particolar-

mente studiato dagli agrometeorologi e le sue caratteristiche sono utilizzate nei modelli per le previsioni meteorologiche.

▲ 3.1.2 Composizione chimica

Il termine aria viene comunemente utilizzato per indicare la miscela di gas che compone l'atmosfera terrestre, nella quale sono sospese quantità variabili di particelle liquide e solide dette aerosol.

Se si escludono vapore acqueo e aerosol, presenti in percentuali molto variabili, la miscela di gas che compone l'atmosfera ha una composizione costante fino a un'altezza di circa 80 km. Nella **TABELLA 3.1** si vede come due elementi (azoto e ossigeno) da soli formano il 99% del volume dell'aria secca; del rimanente 1% la maggior parte è formata da gas inerti, mentre altri gas sono presenti in tracce. I dati della Tabella 3.1 si riferiscono all'aria secca; come già ricordato, il vapore acqueo è presente in quantità molto variabili a seconda della latitudine e della natura della superficie: ai tropici, siti caldi e umidi, la concentrazione può raggiungere il 4% del volume, mentre ai poli o al di sopra dei deserti è prossima a zero. Il vapore acqueo in atmosfera ha un ruolo particolarmente importante, non solo nel ciclo dell'acqua, come sorgente di nubi e precipitazioni, ma anche per la sua capacità di assorbire la radiazione solare e la radiazione emessa dalla Terra. Nel

bilancio energetico dell'atmosfera esso quindi ha un ruolo simile alla CO_2 e ad altri gas serra come CH_4 e N_2O . Inoltre, poiché alle temperature e pressioni comunemente presenti sulla Terra l'acqua può coesistere nei tre stati della materia (solido, liquido e gassoso), cambiando di stato l'acqua assorbe o rilascia calore (detto calore latente) il quale può essere trasferito a grandi distanze, da un punto all'altro della Terra, tramite i venti. Il calore latente così liberato rappresenta la principale fonte di energia di eventi tipici dell'atmosfera, quali temporali, grandine, uragani.

I componenti principali dell'atmosfera (azoto e ossigeno) non influenzano in alcun modo il clima del pianeta. Ci sono però altre componenti, dette secondarie, che sono presenti in tracce e hanno un ruolo importantissimo.

L'anidride carbonica (CO_2) è un gas dotato di una accentuata capacità di assorbimento dell'energia emessa dalla Terra, e dunque ne influenza i flussi all'interno dell'atmosfera. Il ruolo della CO_2 come responsabile del cosiddetto effetto serra è noto fin dal 1861, quando fu dimostrato per la prima volta dal fisico britannico John Tyndall; nel 1959, Gilbert Plass ipotizzò che l'aumento della concentrazione di CO_2 provocato dall'attività umana potesse avere conseguenze sul clima. Poiché la CO_2 ha un tempo di vita in atmosfera molto elevato, la sua concentrazione media è relativamente uniforme in tutto il pianeta, indipendentemente dai punti nella quale viene emessa. Tale concentrazione ha subito nel tempo rilevanti variazioni, ma soprattutto negli ultimi 100 anni è aumentata in maniera particolarmente accentuata. I dati rilevati presso l'osservatorio di Mauna Loa nelle Hawaii, dove la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera viene misurata dal 1958, evidenziano un trend in costante aumento e valori massimi che nel corso del 2015 hanno superato i 400 ppm.

Un'altra importante componente secondaria dell'atmosfera è l'ozono, la forma triatomica dell'ossigeno (O_3). Esso è presente in atmosfera a due diverse altitudini, dove esercita effetti opposti: nella stratosfera è utile come filtro della radiazione ultravioletta, in troposfera è considerato dannoso in quanto tossico per gli organismi viventi.

Un altro componente secondario dell'atmosfera, i cui effetti hanno grande importanza dal punto di vista meteorologico e ambientale, è rappresen-

TABELLA 3.1 Composizione dell'aria secca

Componente	% in volume	ppm in volume
Azoto (N_2)	78,1	
Ossigeno (O_2)	20,9	
Argon (Ar)	0,9	
Anidride carbonica (CO_2)	0,04	405
Gas inerti (He, Xe, Kr, Ne)		24,5
Metano (CH_4)		1,6
Idrogeno (H_2)		0,5

L'OZONO, UN GAS CONTROVERSO

Nella stratosfera si osserva un picco di concentrazione di ozono (6-9 ppb) a un'altitudine di circa 25 km. L'ozono è il risultato di reazioni chimiche a carico dell'ossigeno (reazione di Chapman, FIGURA 3.3) che avvengono principalmente a queste altitudini per la presenza della radiazione ultravioletta (UV). In virtù dell'elevata affinità di tale gas nei confronti della radiazione ultravioletta, l'ozono stratosferico esercita una importante funzione filtrante, limitando il flusso di raggi UV – fortemente energetici e quindi dannosi per gli organismi viventi – alla superficie terrestre. L'assottigliamento della strato di ozono rilevato in particolare sui poli aveva fatto sorgere in un recente passato un allarme ambientale correlato alla ridotta capacità di filtrazione della radiazione UV e al conseguente incremento della sua presenza sulla superficie (buco dell'ozono). A partire dagli anni '70 del XX secolo il bando dell'uso di alcuni gas industriali, identificati come responsabili del fenomeno (clorofluorocarburi, CFC), ha diminuito sostanzialmente le emissioni. Attualmente pare accertato che il buco dell'ozono sui poli si sia ridotto, sia come spessore che come estensione.

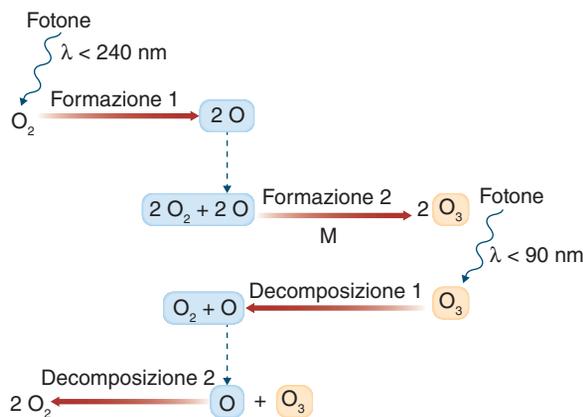


FIGURA 3.3 Reazione di Chapman.

In troposfera, dove l'ozono può raggiungere concentrazioni di 40-100 ppb, esso è considerato un inquinante secondario, perché si forma dall'interazione della radiazione solare con inquinanti primari, quali gli ossidi di azoto (NO_x) e i composti organici volatili (VOC). Questi ultimi sono prodotti in gran quantità dai motori a combustione e dall'uso dei solventi organici. Questo

particolare effetto viene detto smog fotochimico (FIGURA 3.4). La quantità di ozono presente in troposfera dipende quindi sia dal trasporto verso il basso di ozono stratosferico, sia dalle reazioni di distruzione e produzione in troposfera, dovute alla energia della radiazione solare e alla presenza di ossidi di azoto. In presenza di radiazione solare con $\lambda < 430 \text{ nm}$, il diossido di azoto (NO_2) si scinde in monossido di azoto (NO) e O atomico, il quale reagisce con le molecole di ossigeno (O_2) presenti nell'aria, producendo ozono (O_3). L'ozono a sua volta reagisce con il monossido di azoto per produrre diossido di azoto e ossigeno, ristabilendo l'equilibrio iniziale. In aria inquinata da scarichi di autoveicoli, quindi in presenza di VOC incombusti, l' NO viene sequestrato formando altri inquinanti secondari (es. nitrato di perossiacetile, PAN): poiché la reazione di distruzione dell'ozono non avviene, si determina accumulo di O_3 oltre i valori di fondo (20-30 ppb). Lo smog fotochimico si forma pertanto principalmente in presenza di combustione (traffico veicolare, riscaldamento) e radiazione solare (ore centrali del giorno).

L'ozono entra nelle piante attraverso gli stomi: l'effetto più visibile si manifesta sui cloroplasti, che assumono una colorazione verde chiara e si rompono facilmente, disperdendo la clorofilla nel citoplasma cellulare. Ciò provoca una riduzione di crescita delle piante, una diminuzione della fotosintesi, necrosi e prematuro invecchiamento delle foglie colpite. Recenti studi hanno dimostrato un effettivo calo delle rese in presenza di alte concentrazioni di ozono, soprattutto in quelle aree, come il Nord Europa, in altri fattori ambientali (es. carenza idrica, stress salino) possono determinare una riduzione dell'apertura stomatica e quindi dell'ingresso dell' O_3 all'interno dei tessuti vegetali.

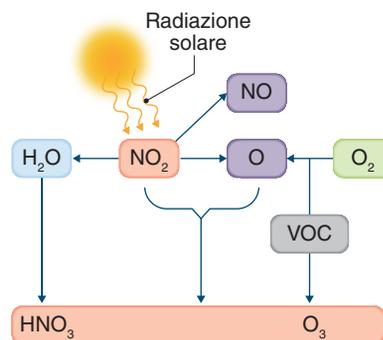


FIGURA 3.4 Lo smog fotochimico.

ESPLORANDO L'ATMOSFERA DEL PASSATO

La dinamica dell'atmosfera, la sua composizione chimica e le sue variazioni vengono studiate con particolare attenzione da un secolo a questa parte. Ciononostante, le serie storiche di dati che sono disponibili alla comunità scientifica per studi di paleoclimatologia sono relativamente brevi, e la precisione del dato diminuisce con l'aumentare della distanza dall'attualità. La conoscenza dei climi del passato è peraltro importantissima per la comprensione e la previsione dei cambiamenti climatici in atto, oltre che per comprendere il comportamento degli ecosistemi in condizioni diverse. Per supplire a questa lacuna sono stati sviluppati metodi indiretti, che utilizzano dati diversi da quelli misurati, e che in inglese vengono chiamati proxy: a partire da osservazioni diverse vengono ricostruite le condizioni climatiche passate.

Importanti indicazioni sugli ecosistemi del passato provengono da studi condotti sui sedimenti oceanici. I prelievi vengono effettuati sul fondo degli oceani da navi attrezzate per eseguire carotaggi dei sedimenti marini, anche a grandi profondità. Tali sedimenti contengono, in strati sovrapposti, i resti degli organismi che un tempo vivevano in prossimità della superficie degli oceani dei quali, utilizzando i moderni metodi geochimici di datazione, si può ottenere il passo temporale. In questo modo si possono derivare dati sulla composizione dell'atmosfera e sugli ecosistemi fino a milioni di anni fa.



FIGURA 3.5 Studio della dendrocronologia.

La conoscenza dei climi di un passato più recente è desumibile dalla dendrocronologia, ovvero dallo studio degli anelli degli alberi (FIGURA 3.5). Lo spessore e la densità degli anelli sono infatti proporzionali alle condizioni di precipitazione e temperatura a cui si è sviluppato l'albero in ciascun anno della sua vita. Questi

studi possono essere condotti su alberi vivi, ma anche morti o fossilizzati, ovvero da siti archeologici, eventualmente affiancando a essi una datazione al carbonio.

Dati sulla composizione dell'atmosfera del passato sono infine ricavabili dai ghiacciai, principalmente della Groenlandia e dell'Antartide. L'indagine è basata sul prelievo di carote di ghiaccio a profondità proporzionali alla distanza dall'attualità, essendo gli strati più profondi quelli formati a seguito delle precipitazioni verificatesi nei tempi più remoti. Il metodo di indagine si basa sull'analisi contestuale delle bollicine d'aria intrappolate all'interno del ghiaccio e del ghiaccio stesso, materiali sui quali è possibile effettuare, attraverso tecniche isotopiche (^{18}O e ^2H), la datazione, la stima della temperatura dell'aria e l'analisi chimica per determinare la composizione dell'atmosfera dell'epoca. Una tra le più famose serie di carote di ghiaccio è quella di Vostok, estratta in Antartide orientale da un team di scienziati francesi, russi e statunitensi. Qui è stato prelevato il nucleo di ghiaccio più profondo mai recuperato, raggiungendo una profondità di 3.623 m. Da questo ghiaccio si è ricavata la composizione atmosferica e il clima degli ultimi quattro cicli glaciale-interglaciale. I risultati dimostrano che il susseguirsi delle variazioni in ogni ciclo climatico è stato simile, e che le proprietà dell'atmosfera e del clima sono oscillate entro limiti stabili. Le concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica e metano sono risultate ben correlate con la temperatura dell'aria in Antartico durante questi periodi. I dati della carota di Vostok (FIGURA 3.6) consentono di dedurre che gli attuali valori atmosferici di CO_2 e CH_4 non si sono mai riscontrati nel corso degli ultimi 420.000 anni.

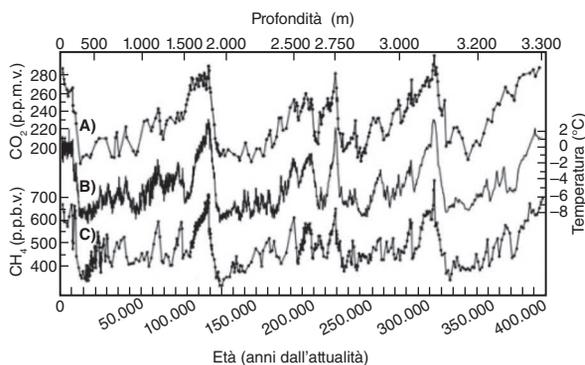


FIGURA 3.6 Dati ottenuti dall'estrazione della carota di Vostok. (A) concentrazione di anidride carbonica; (B) differenza di temperatura dall'attualità; (C) concentrazione di metano.

tato dagli aerosol. Gli aerosol sono costituiti dall'insieme di particelle liquide e solide disperse in atmosfera, con dimensioni che vanno dai nanometri a qualche decina di micron. Tali particelle si possono formare ed essere immesse direttamente in atmosfera (aerosol primario), oppure possono formarsi a partire da gas precursori che reagiscono chimicamente condensando e formando raggruppamenti di molecole e particelle nanometriche (aerosol secondario). L'aerosol secondario si origina dunque da gas reattivi, che in atmosfera si trasformano in altre sostanze chimiche non più allo stato gassoso. Le particelle che formano l'aerosol possono essere di origine naturale (es. polveri, spray marino, polline) o antropogenica (es. polveri da edilizia, fumi e residui di combustione, metallurgia, processi industriali). Independentemente dall'origine, essi hanno due effetti principali:

- intercettano la radiazione solare, diminuendo la quantità che raggiunge la superficie terrestre e diminuendo l'effetto di riscaldamento del suolo; in particolare le particelle carboniose assorbono la radiazione, aumentando la temperatura dell'aria;
- fungono da nuclei di condensazione per il vapore acqueo, la stessa quantità di vapore condensa in un numero maggiore di gocce, di diametro inferiore, diminuendo la probabilità di pioggia. Questo tipo di nubi ha grande persistenza e riflette molto la radiazione solare, ovvero ha effetto di raffreddamento della superficie terrestre.

Gli aerosol hanno inoltre effetti negativi diretti sulle piante, sia a causa della deposizione secca sulle foglie, sia perché acidificano le precipitazioni, portando al danneggiamento i tessuti vegetali.

La presenza dei gas serra e degli aerosol nell'atmosfera è legata sia a fonti naturali che artificiali. In questo contesto, le eruzioni vulcaniche rappresentano un importante fattore naturale che contribuisce a immettere nell'atmosfera ingenti quantità di ceneri e triossido di zolfo che, rimanendo in sospensione, intercettano la radiazione solare. Tra le emissioni antropiche, quelle di origine agricola rappresentano una componente rilevante: a livello mondiale, si stima che il settore agricoltura, con le foreste e gli altri usi del suolo contribuisca per poco meno di un quarto al totale delle emissioni di gas

serra di origine antropica (10-12 Gt CO₂ equivalente anno⁻¹), principalmente a causa della deforestazione, delle emissioni da parte del bestiame, della gestione del suolo e dei nutrienti.

3.2 Bilancio radiativo e bilancio energetico

3.2.1 Radiazione solare

La radiazione solare è l'energia prodotta dalle reazioni termonucleari che avvengono nel Sole e che viene emessa con continuità nello spazio sotto forma di radiazione elettromagnetica. Questa forma di energia si propaga nel vuoto a varie lunghezze d'onda fino a raggiungere la Terra. Tuttavia, considerando la dimensione del pianeta e la sua distanza dal Sole, non tutta l'energia della radiazione solare raggiunge le soglie dell'atmosfera. Infatti, prendendo in considerazione la porzione di angolo solido terrestre esposta al Sole, la potenza radiante per unità di superficie (densità di flusso radiativo) che arriva sulla Terra si definisce costante solare (R^*). Tale potenza, pari a 1.367 W m^{-2} , viene misurata considerando una superficie perpendicolare ai raggi del Sole e ai limiti superiori dell'atmosfera. Essa viene ulteriormente attenuata nel passaggio attraverso l'atmosfera, dove può essere assorbita, trasmessa (deviata) o riflessa dalle nubi, da alcuni gas presenti in atmosfera (CO₂, CH₄, O₃) e dagli aerosol, cosicché anche in condizioni di cielo sereno e con il Sole posizionato direttamente perpendicolare sopra la testa dell'osservatore (zenit), l'energia della radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre risulta inferiore rispetto alla costante solare: tale grandezza viene denominata radiazione globale (R_g). L'entità della radiazione globale è influenzata da fattori come la latitudine, il mese dell'anno e l'ora del giorno, l'altitudine, le condizioni meteorologiche locali.

La radiazione globale può essere separata in due componenti:

- la radiazione diffusa (R_d) è quella frazione della radiazione globale il cui angolo d'incidenza è cambiato rispetto alla traiettoria originale a causa dell'interazione con le particelle dell'atmosfera;

LE LEGGI FONDAMENTALI DELLA RADIAZIONE

Siamo debitori delle conoscenze sulla radiazione alle ricerche condotte all'inizio del secolo scorso da un gruppo di fisici di scuola tedesca che ne hanno formulato i presupposti teorici e li hanno sperimentalmente verificati.

La prima legge fondamentale della radiazione è quella di Planck (1900), che descrive la trasmissione della radiazione elettromagnetica in quanti, definendone gli aspetti energetici con la nota equazione:

$$E = h \cdot \nu$$

dove E = energia di un quanto (J), h = costante di Planck ($6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$), ν = frequenza della radiazione (s^{-1}). Successivamente, Planck studiò le proprietà della radiazione emessa e assorbita da un corpo che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente senza rifletterla (meglio definito come corpo nero), in funzione della sua temperatura:

$$E_{\lambda,T} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

dove $E_{\lambda,T}$ = radiazione emessa da un corpo alla temperatura T per unità di lunghezza d'onda λ ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$), T = temperatura del corpo (K), C_1 e C_2 = costanti. Nella **FIGURA 3.7** è rappresentato lo spettro radiativo di corpi neri a temperature diverse.

Dalla legge di Planck sono successivamente derivate altre due leggi. La legge di Stefan-Boltzmann esprime l'energia emessa da un corpo nero in funzione della quarta potenza della sua temperatura assoluta:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

dove E = quantità di radiazione emessa dal corpo (W m^{-2}), T = temperatura del corpo (K), ε = emissività del corpo, σ = costante di Stefan-Boltzmann ($5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

La legge di Wien considera la lunghezza d'onda di massima emissione da parte di un corpo nero in funzione della sua temperatura assoluta:

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{T}$$

dove λ_{\max} = lunghezza d'onda di massima emissione (m), c = costante dello spostamento di Wien (2895 Km^{-1}) T = temperatura del corpo (K).

Nel tempo la formulazione di tali leggi è risultata fondamentale nello spiegare fenomeni come i movimenti dei flussi di calore all'interno del bilancio radiativo ed energetico.

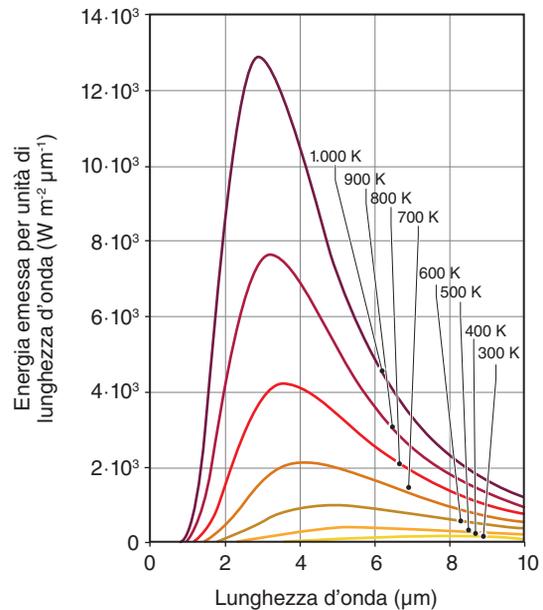


FIGURA 3.7 Spettro radiativo di corpi neri a temperature diverse.

- la radiazione diretta (R_b) rappresenta la frazione di radiazione globale che non ha subito deviazioni di traiettoria. Sintetizzando:

$$R_g < R^* \quad (\text{eq. 3.1})$$

$$R_g = R_d + R_b \quad (\text{eq. 3.2})$$

Una parte della radiazione globale che raggiunge la superficie può essere da questa riflessa verso

l'atmosfera in misura proporzionale all'albedo della superficie stessa, caratteristica che dipende da proprietà della superficie quali il colore e lo stato idrico.

Oltre che ad alterazioni di tipo quantitativo, l'attenuazione provocata dall'interazione con l'atmosfera modifica anche il profilo dello spettro elettromagnetico della radiazione solare, che assume una caratteristica forma irregolare. Risulta, per esempio, fortemente ridotta la presenza di radiazione

ultravioletta per effetto dell'assorbimento operato nella fascia stratosferica dall'ozono, così come quella di alcune bande del vicino infrarosso in conseguenza della presenza in troposfera di anidride carbonica e vapore acqueo.

Gli strumenti utilizzati per la misura della radiazione sono genericamente chiamati radiometri; essi si differenziano in base al tipo di radiazione che sono in grado di misurare. Per quanto riguarda la radiazione globale si utilizzano strumenti detti solarimetri (o piranometri) a termopila, il cui sensore copre lo spettro della radiazione compreso tra 0,3 e 3 μm , o a cella fotovoltaica, che convertono l'energia radiante in energia elettrica anche a bassi livelli di radiazione. La radiazione diretta viene misurata con uno strumento detto pireliometro, costituito da un piranometro montato su un sistema a inseguimento solare in maniera da mantenere il raggio del Sole sempre diretto nel campo di vista dello strumento; la radiazione diffusa viene misurata con il diffusometro, un piranometro caratterizzato da un sistema a ombreggiamento montato su un meccanismo rotante per seguire l'andamento solare. L'albedo delle superfici viene misurata con l'albedometro, costituito da due piranometri, uno orientato verso la sorgente e uno verso la superficie riflettente.

Tutti questi strumenti esprimono le relative grandezze radiative in termini di densità di flusso di energia, ossia di energia per unità di tempo e per unità di superficie. L'unità di misura di tali grandezze, secondo il Sistema Internazionale, è il $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2} = \text{W m}^{-2}$. I fattori di conversione con altre unità di uso comune sono riportati nelle appendici.

▲ 3.2.2 Bilancio radiativo

La radiazione netta, grandezza risultante dalla soluzione del bilancio radiativo, rappresenta la differenza tra la quantità di radiazione solare in entrata e la quantità di radiazione in uscita da una generica superficie di riferimento, ossia la quantità di energia effettivamente disponibile per il funzionamento dell'ecosistema:

$$R_n = R_g \cdot (1 - \alpha) - RL_{\uparrow} + RL_{\downarrow} \quad (\text{eq. 3.3})$$

dove R_n = radiazione netta, R_g = radiazione globale (a onda corta), α = albedo, RL_{\uparrow} = radiazione a onda lunga in uscita, RL_{\downarrow} = radiazione a onda lun-

ga in entrata. Tutte le grandezze sono espresse in W m^{-2} . La superficie terrestre, riscaldandosi, emette infatti radiazione a onda lunga (RL_{\uparrow}), in parte assorbita dall'atmosfera, che a sua volta la rimette verso la Terra (controradiazione, RL_{\downarrow}).

La radiazione a onda lunga si misura con strumenti detti pirgeometri a termopila, sensibili alla banda spettrale di lunghezza d'onda superiore a 3 μm . La radiazione netta si misura invece con uno strumento (radiometro netto) costituito da due coppie di piranometri e pirgeometri, orientati allo scopo di misurare separatamente la radiazione a onda corta e a onda lunga in entrata e in uscita.

L'equilibrio del bilancio radiativo è importante poiché consente di mantenere la temperatura media del pianeta intorno ai 14°C. Per mantenere tale stato di equilibrio, la quantità di energia in entrata deve essere bilanciata da una uguale quantità di energia in uscita; in caso contrario verrebbero a crearsi le condizioni per un progressivo surriscaldamento o di raffreddamento. I fattori che influenzano il bilancio radiativo hanno pertanto un effetto diretto sul clima.

All'interno dell'atmosfera, alcuni fenomeni sono in grado di incidere direttamente sul bilancio radiativo. L'effetto serra, fenomeno grazie al quale alcuni gas presenti in atmosfera trattengono la radiazione a onda lunga in uscita e la rimettono verso la superficie, rappresenta un elemento fondamentale nel bilancio radiativo della Terra in quanto contribuisce a stabilizzare l'equilibrio del bilancio radiativo stesso. Viceversa, un suo incremento può causare, come effetto primario, l'innalzamento della temperatura terrestre e, conseguentemente, condurre a uno squilibrio generale del clima. Tra i gas a effetto serra, i più importanti sono considerati il vapore acqueo (H_2O), l'anidride carbonica (CO_2), il metano (CH_4) e il protossido di azoto (N_2O), mentre secondari risultano essere l'ozono (O_3) e gli alocarburi (CFC e HCFC). La maggiore o minore rilevanza climatica di ciascuno di essi risiede nelle specifiche caratteristiche ottiche, quantificate attraverso il proprio potenziale di riscaldamento globale (Global Warming Potential, GWP), che esprime l'attitudine di una sostanza a generare un incremento di temperatura rapportata a quella della CO_2 , e dal tempo di permanenza nell'atmosfera. Il vapore acqueo,

per esempio, ha un potenziale di riscaldamento globale superiore a quello della CO₂ ed è responsabile di quasi due terzi di tutto l'effetto serra naturale, ma il suo tempo di permanenza nell'atmosfera è assai ridotto rispetto all'anidride carbonica, che permane invece per un periodo di tempo tra i 50 e i 200 anni. Il vapore acqueo, invece, influenza il bilancio radiativo principalmente attraverso la formazione delle nubi le quali, in funzione della loro forma e altezza all'interno dell'atmosfera, giocano un ruolo diverso nella riflessione dei raggi solari in entrata e nell'assorbimento della radiazione emessa dalla Terra. Nubi medio-alte, infatti, sono in grado di riflettere meno di quelle medio-basse, le quali hanno un maggior potere riflettente; le prime, tuttavia, posizionandosi a quote più elevate, sono in grado di trattenere maggiormente la radiazione solare in uscita. A differenza del vapore acqueo e degli altri gas serra, gli aerosol sono in grado di diminuire la temperatura dell'atmosfera a causa della loro capacità schermante nei confronti della radiazione solare, controbilanciando, perciò, l'effetto di surriscaldamento generato dai gas serra.

▲ 3.2.3 Bilancio energetico

Affinché la temperatura media della Terra si mantenga costante, i flussi di energia in entrata e in uscita devono essere della stessa entità. L'energia della radiazione in ingresso viene assorbita dalla materia terrestre, provocandone un aumento di temperatura. Se questo processo avvenisse solo in questa direzione, la temperatura della Terra crescerebbe in maniera indefinita. Ciò non si verifica perché la materia restituisce parte di questa energia sotto forma di energia termica nella banda spettrale dell'infrarosso. Più comunemente, questa forma di energia termica è chiamata calore e viene definita come l'energia generata da una reazione chimica che si trasferisce da un sistema all'altro, o tra due parti di uno stesso sistema, muovendosi da zone a temperatura maggiore verso zone a temperatura minore. Nel bilancio energetico Sole-Terra, la superficie del nostro pianeta gioca un ruolo fondamentale poiché la quantità di calore che la Terra stessa è capace di irradiare verso lo spazio risulta essere ben superiore all'aumento di temperatura provocato dalla radiazione proveniente dal Sole.

All'interno degli ecosistemi terrestri, l'energia derivante dal bilancio radiativo (Rn) viene ripartita generando flussi per conduzione (nel suolo), per convezione (in atmosfera) e per trasferimento di massa come calore latente in presenza di un cambiamento di stato dell'acqua (evaporazione). L'equazione del bilancio energetico descrive in termini quantitativi i rapporti tra tali flussi (W m⁻²):

$$Rn = G + H + \lambda E \quad (\text{eq. 3.4})$$

dove Rn = radiazione netta, G = flusso di calore superficiale, H = flusso di calore sensibile in atmosfera, λE = flusso di calore latente per evaporazione, con λ = calore latente di vaporizzazione (J kg⁻¹) ed E = massa di acqua evaporata (kg m⁻² s⁻¹).

Il flusso di calore superficiale (G) si sviluppa attraverso il fenomeno della conduzione che permette al suolo di agire come serbatoio di calore durante il giorno e fonte di calore durante la notte. Il flusso di calore sensibile (H), invece, si sviluppa attraverso il fenomeno della convezione tra la superficie terrestre e l'atmosfera soprastante, portando a un trasferimento di energia tra superficie e aria, nel quale si tende a riequilibrare la differenza di temperatura tra essi. Infine, il flusso di calore latente (λE) si verifica quando vi è un passaggio di stato, come nel caso della condensazione del vapore acqueo nei fenomeni di precipitazione.

La disponibilità energetica influenza in modo marcato il comportamento delle colture. La radiazione netta delle colture è generalmente positiva durante il giorno, con valori elevati nelle ore centrali a causa di una maggiore densità di flusso della radiazione solare; viceversa, essa risulta nulla o negativa durante la notte. All'interno delle superfici vegetate la disponibilità energetica innesca una serie di flussi energetici specifici: per esempio, meno del 5% della radiazione netta viene conservata nei legami chimici dei composti che le piante sintetizzano attraverso la fotosintesi (M), mentre una quota significativa (2-30% della radiazione netta) viene conservata attraverso il riscaldamento degli strati di terreno sottostanti la superficie (G) o dissipata sotto forma di calore (H); la rimanente parte è alla base del processo evapotraspirativo (λE). Pertanto, in base al principio di conservazione dell'energia, il bilancio energetico a livello di superficie vegetata viene espresso come:

$$Rn - H - \lambda E - G - M = 0 \quad (\text{eq. 3.5})$$

▲ 3.2.4 Effetti della radiazione sulle piante

La radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre interagisce con la componente vegetale principalmente attraverso il pigmento clorofilliano. Tale pigmento riesce a catturare l'energia luminosa dei fotoni e a convertirla in energia chimica necessaria per la sintesi dei carboidrati strutturali. Tuttavia ciò avviene solo per una frazione della radiazione solare, la cosiddetta radiazione fotosinteticamente attiva (Photosynthetically Active Radiation, PAR), che si estende nelle bande spettrali del blu e del rosso tra 400 e 700 nm. L'intercettazione della radiazione da parte di una pianta avviene in base alla sua copertura fogliare e alle condizioni di ombreggiamento o insolazione che si possono verificare in certi ambienti.

Un esempio di diverso adattamento alla radiazione solare è rappresentato proprio dalle condizioni di ombreggiamento, in cui i punti di saturazione della luce e il massimo livello di fotosintesi risultano più bassi in piante cresciute in condizioni di piena luminosità. Questo fenomeno è probabilmente causato da una minor concentrazione della Rubisco, l'enzima responsabile della fase di organizzazione del ciclo di Calvin. La non dipendenza del ridotto tasso fotosintetico dall'attività della Rubisco crea un feedback negativo, tale per cui minore è il tasso fotosintetico, minore è l'utilizzo di energia e risorse da parte della pianta per produrre tale enzima. Un altro fenomeno legato all'ombreggiamento è la riduzione della respirazione delle piante, le quali hanno minori costi energetici e, quindi, tassi di respirazione più bassi. Questo fatto porta, dal canto suo, a ridurre anche il livello di fotosintesi che serve a compensare il tasso di respirazione, richiedendo quindi un ridotto livello di compensazione della luce.

Per quanto riguarda il processo fotosintetico, inoltre, è possibile evidenziare una netta differenza tra piante C_3 e C_4 . Le prime, infatti, svolgono la fase di organizzazione della CO_2 a livello delle cellule del mesofillo, mentre nelle seconde l'organizzazione avviene sia nelle cellule del mesofillo che in quelle della guaina del fascio. La maggior efficienza nei confronti della radiazione di piante C_4 rispetto alle C_3 , è dovuta alla mancanza del processo di fotorespirazione e quindi, della fase di ossidazione dell'enzima PEP carbossilasi, che migliora l'efficienza di fissazione.

Un ulteriore effetto tipico della mancanza di luce è riscontrabile a livello della superficie fogliare specifica ($cm^2 g^{-1}$) che rappresenta la superficie fogliare prodotta per grammo di biomassa destinato alle foglie. Come dimostrano vari studi, le piante cresciute in zone ombreggiate risultano più grandi e sottili rispetto a quelle cresciute in condizioni di piena luminosità. Questo aumento di superficie fogliare specifica è dovuto alla necessità di incrementare l'area di fotosintesi quando la luce diventa una risorsa limitante. Inoltre, il maggior aumento di area fogliare è dovuto alla disponibilità di risorse che la pianta destina alle foglie rispetto alle radici. In carenza di radiazione solare, infatti, l'accrescimento radicale è ridotto rispetto a quello fogliare a causa di una diversa assegnazione del carbonio all'interno della pianta. Tuttavia, non è solo tra piante esposte a diverse condizioni di luminosità che si notano dei cambiamenti morfo-fisiologici, ma anche tra foglie della stessa pianta. Basti pensare alle parti superiori e inferiori della chioma di un albero, per capire come la diversa distribuzione della superficie fogliare possa essere influenzata da tale livello di radiazione. Le foglie che si trovano più in basso, in quanto ombreggiate, avranno una superficie fogliare maggiore delle foglie che si trovano più in alto e che, invece, devono far fronte a elevati livelli di radiazione.

La radiazione influenza l'apertura stomatica delle foglie, regolata da un pigmento, la zeaxantina, il quale percependo la radiazione luminosa blu, prevalente prima dell'alba, attiva la pompa protonica ATPasi che attiva il flusso di K^+ all'interno delle cellule con la conseguente apertura stomatica.

Un ulteriore effetto della radiazione solare sulle piante è il fenomeno del fotoperiodismo, che dipende dai periodi di luce o di oscurità a cui le specie vegetali sono soggette a livello giornaliero o stagionale. La durata del giorno varia in base alla latitudine; per questo motivo, le piante che vivono nelle diverse aree del pianeta si sono adattate alle differenti lunghezze del giorno, potendo essere raggruppate in piante a giorno lungo, a giorno corto o neutre rispetto al fotoperiodo. Sono specie a giorno lungo quelle in grado di fiorire quando il periodo di illuminazione supera le 14 ore giornaliere (es. avena, erba medica, orzo, patata) e specie a giorno corto quelle che fioriscono quando il pe-

Agronomia

Accedi all'ebook e ai contenuti digitali > Espandi le tue risorse > con un libro che **non pesa** e si **adatta** alle dimensioni del tuo **lettore**



All'interno del volume il **codice personale** e le istruzioni per accedere alla versione **ebook** del testo e agli ulteriori servizi. L'accesso alle risorse digitali è **gratuito** ma limitato a **18 mesi dalla attivazione del servizio**.

