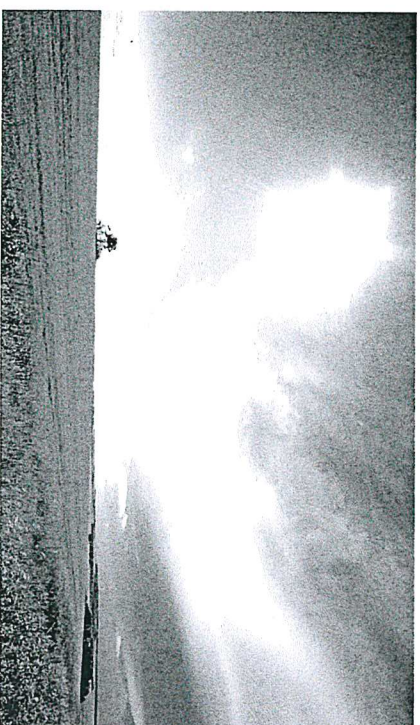


LE PIANTE E I CAMBIAMENTI CLIMATICI

di MARCELLO IRTI, SARA VITALINI, GELSOMINA FICO
Orto Botanico G. E. Ghirardi

Negli ultimi decenni, i cambiamenti che il sistema climatico terrestre sta subendo su scala globale rappresentano una problematica di crescente rilievo. Col termine "cambiamenti climatici globali" si fa riferimento ad una serie di eventi principalmente legati all'innalzamento della temperatura superficiale del pianeta, fenomeno a sua volta dovuto all'eccessiva emissione dei cosiddetti "gas-serra". Dal punto di vista fisico, tali composti gassosi hanno la proprietà di bloccare la radiazione solare riflessa dalla superficie terrestre. Poiché la lunghezza d'onda e ricca di calore, tale fenomeno, noto come "effetto serra", genera un innalzamento della temperatura negli strati bassi dell'atmosfera. In realtà, l'effetto serra, che sfrutta la capacità di alcuni gas atmosferici di comportarsi proprio come i teli o i vetri di un'immensa serra, è un processo naturale che, nel corso della coevoluzione tra biosfera e geosfera, ha reso possibile la vita sul pianeta. Infatti, in sua assenza, la temperatura media annuale sul pianeta, attualmente pari a circa 15°C, si abbasserebbe di parecchi gradi al di



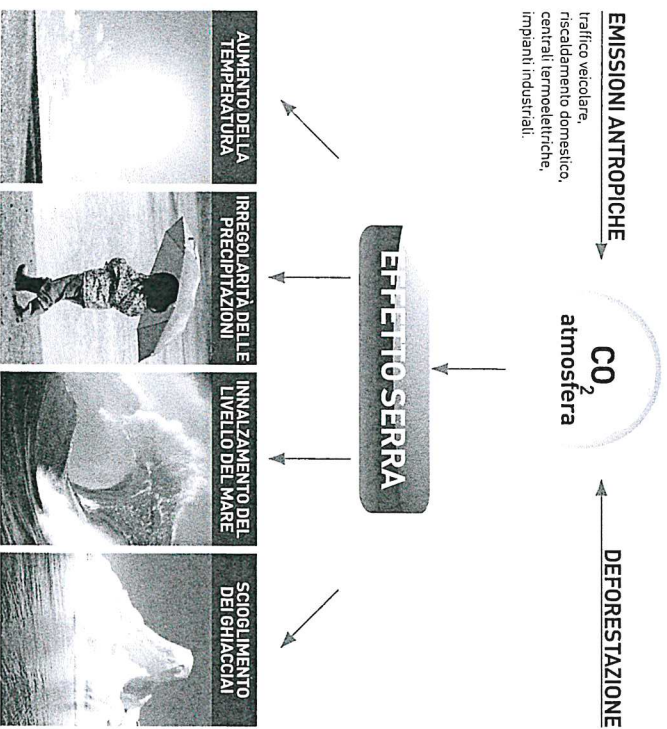


Fig. 1 Cambiamenti climatici globali causati dall'effetto serra.

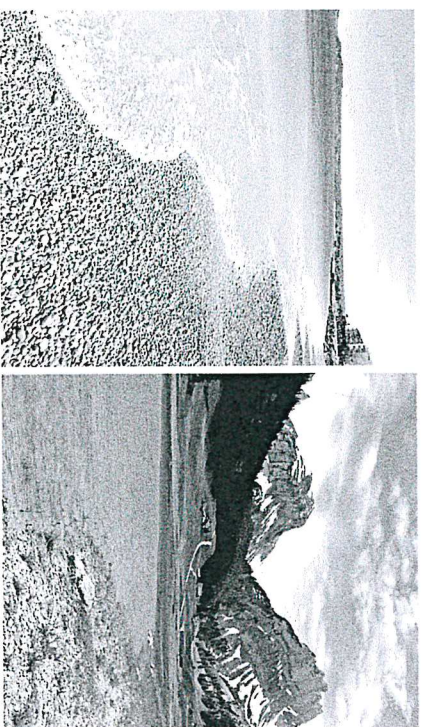
sotto dello zero (circa $-18^{\circ}C$), ben oltre il limite compatibile con la vita. Tuttavia, in epoca industriale, le continue emissioni di natura antropica di gas-serra hanno aumentato l'effetto serra, causando una serie di squilibri che, nel loro insieme, caratterizzano i cambiamenti climatici globali. L'anidride carbonica (CO_2) rappresenta il più importante gas serra, in virtù della sua crescente concentrazione atmosferica, assieme al metano (CH_4), agli ossidi di azoto (NO_x), ai clorofluorocarburi (CFC) e all'ozono troposferico (degli strati bassi dell'atmosfera O_3). Qualsiasi processo di combustione, nel quale vengano impiegati combustibili fossili (greggio, petroliero, gas naturale e carbone), produce, inevitabilmente, una certa quantità di CO_2 ; pertanto, le principali emissioni di questo gas sono legate al traffico veicolare, al riscaldamento domestico, alle centrali termoelettriche e ad impianti industriali di vario genere. Accanto a tali tipologie di inquinamento, esistono altri processi, anch'essi fortemente di origine antropica, che contribuiscono ad incrementare la quantità di CO_2 nell'atmosfera, come ad esempio la deforestazione. Tale pratica, seppur non produca direttamente CO_2 , contribuisce in maniera rilevante a mantenere un'elevata concentrazione nell'atmosfera, riducendo la quantità di tale gas assorbito ed organicato dalla vegetazione forestale (fig. 1).

I CAMBIAMENTI CLIMATICI

Negli ultimi 30 anni, la temperatura media della superficie terrestre ha subito un innalzamento medio di circa $0,2^{\circ}C$ per decade, cosicché 11 dei 12 anni più caldi registrati dal 1850 si sono verificati tra il 1995 ed il 2006, con la sola eccezione del 1996. Tuttavia, il cambiamento globale della temperatura non è ugualmente distribuito nelle varie fasce latitudinali, essendo più esteso tra i $40^{\circ}N$ (gradi di latitudine nord) e i $70^{\circ}N$, la fascia comprendente, pressappoco, il continente europeo.

L'aumento della temperatura globale genera, a sua volta, un'alterazione del ciclo idrogeologico, aumentando sia il tasso di evaporazione che delle precipitazioni atmosferiche, anche in questo caso a seconda della latitudine. Pertanto, sempre nell'emisfero boreale (setentrionale), è stato osservato un incremento medio delle precipitazioni annue nelle zone comprese tra $30^{\circ}N$ e $70^{\circ}N$, mentre nell'area compresa tra $0^{\circ}N$ e $30^{\circ}N$ si è verificata una loro generale riduzione. Oltre ai suddetti cambiamenti globali, sono rilevabili anche variazioni su scala regionale nella media delle precipitazioni.

Negli ultimi 100 anni, il livello del mare si è sollevato di circa 10-12 centimetri. Se, da un lato, tale innalzamento è considerato la fase conclusiva di un processo che perdura dall'ultima glaciazione (circa 12000 anni fa), dall'altro è pur vero che il livello del mare è cresciuto in maniera più evidente negli ultimi 50 anni, probabilmente, a causa degli effetti del riscaldamento globale sui ghiacciai e sulle calotte polari. I ghiacciai dell'Europa alpina hanno perso circa il 50% del loro volume nell'ultimo secolo, probabilmente a causa delle estati più lunghe e calde. Ancora una volta, le aree maggiormente interessate dalla riduzione di estensione dei ghiacciai si trovano alle medie e basse latitudini dell'emisfero boreale.



In conclusione, dal punto di vista meteorologico, è evidente che i cambiamenti climatici globali non si manifestano con i medesimi effetti nelle varie aree geografiche del pianeta. Infatti, alcune regioni possono essere interessate da intensi fenomeni di precipitazione atmosferica, mentre in altre possono subentrare o protrarsi lunghi periodi di condizioni siccitose. Inoltre, in una determinata area, potrebbe variare anche solo la frequenza delle precipitazioni, anziché il loro tasso medio per anno, con episodi meno ricorrenti, ma più abbondanti. Proprio in questo scenario si collocano i sempre più frequenti e catastrofici eventi meteorologici estremi, dai violenti temporali delle zone temperate fino ai cicloni tropicali ed extra tropicali.

In tabella 1 sono riportati alcuni dati quantitativi relativi ai livelli ed alle emissioni di CO₂ nell'atmosfera, dall'epoca pre-industriale ai nostri giorni e fino al 2100, oltre alla stima previsionale dell'incremento futuro della temperatura media annua della superficie terrestre, in assenza di un'adeguata politica ambientale.

Concentrazione atmosferica di CO ₂ in epoca pre-industriale	280 ppmv
Concentrazione atmosferica di CO ₂ in epoca industriale (attuale)	380 ppmv
Concentrazione atmosferica di CO ₂ nel 2050 (previsione)	450-600 ppmv
Concentrazione atmosferica di CO ₂ nel 2100 (previsione)	700-1000 ppmv
Emissione cumulativa di c da combustibili fossili dal 1800	330 GtC
Emissione di C da combustibili fossili (attuale)	8 GtC y ⁻¹
Accumulo di C in seguito a deforestazione (attuale)	1,6 GtC y ⁻¹
Emissione di C da combustibili fossili nel 2050 (previsione)	9-20 GtC y ⁻¹
Incremento della temperatura media superficiale nel 2050-2100 (previsione)	1,5-5,5°C

ppmv: parti per milione per volume; GtC y⁻¹: gigatonnellate (10⁹ t) di carbonio per anno.

Tabella 1. Dati quantitativi relativi ai livelli ed alle emissioni di CO₂ nell'atmosfera dall'epoca pre-industriale fino al 2100, e previsione dell'incremento della temperatura media annua della superficie terrestre



EFFETTI SULLA VEGETAZIONE

Data l'importanza delle relazioni che intercorrono tra il clima e l'ecosistema, risulta evidente come i cambiamenti climatici possano generare delle ripercussioni sulle biocenosi (le comunità dei viventi), in termini sia di flusso di energia che di trasferimento di nutrienti all'interno di una data rete trofica. È altresì noto che le condizioni ottimali (optimum) di sviluppo, crescita e riproduzione di qualsiasi organismo vivente siano comprese entro più o meno ampi, ma precisi, intervalli di temperatura, piovosità, umidità e altre condizioni strettamente legate al clima. Il riscaldamento globale ha pertanto alterato, in alcuni casi, gli areali di distribuzione di molte specie, sia vegetali che animali, con l'ingresso di specie tipiche nord africane nell'area mediterranea o di specie mediterranee nell'area europea continentale (fig. 21).

Questo è valido anche per le colture agronomiche, come è dimostrato ad esempio dalla sempre più diffusa coltivazione del grano duro, una specie tradizionalmente coltivata nelle regioni del mezzogiorno d'Italia e nell'area padana. Cambiamenti simili sono stati registrati anche secondo un gradiente altitudinale, oltre che latitudinale, come attestato dall'espansione della flora alpina e del limite della vegetazione verso quote più elevate.

Generalmente, l'incremento di CO₂ nell'atmosfera stimola positivamente il metabolismo primario della pianta, favorendone lo sviluppo ed alcuni processi fisiologici. Con un incremento dell'attività fotosintetica ed una riduzione della traspirazione per unità di superficie fogliare. L'effetto favorevole sulla fotosintesi è per lo più dovuto ad una riduzione della competizione tra CO₂ e O₂ nei confronti della ribuloso-1,5-difosfato carbossilasi-ossigenasi (RUBISCO), l'enzima chiave nella regolazione di due processi antitetici quali la fotosintesi e la fotorespirazione (fig. 21).

Normalmente, la concentrazione atmosferica di O₂ limita l'assorbimento di CO₂ da parte della

pianta, per cui un incremento del rapporto CO₂/O₂, dovuto, a sua volta, alle emissioni di CO₂ nell'atmosfera, tenderebbe a ridurre l'inibizione della fotosintesi indotta da O₂. Nel contempo, in tali condizioni atmosferiche verrebbe anche ridotta la fotorespirazione, un processo che non porta alla fissazione di CO₂, né alla sintesi di glucosio.



L'aumento di CO₂ porta anche ad un miglioramento nell'efficienza di utilizzo di acqua e azoto (fig. 2). L'incremento della concentrazione di CO₂ nella camera sottostomatica (una cavità del tessuto dove si accumulano i gas atmosferici penetrati all'interno della foglia) stimola, infatti, la chiusura degli stomi (soluzioni di continuità sull'epidermide fogliare preposte alla regolazione degli scambi gassosi della pianta), limitando, nel contempo, la traspirazione (perdita di acqua in forma di vapor acqueo attraverso le aperture stomatiche).

Tuttavia l'innalzamento della temperatura atmosferica esercita un effetto negativo sulla produttività di molte piante coltivate, in parte dovuto ad un più veloce ciclo vegetativo e riproduttivo della coltura.

In tali condizioni, inoltre, la chiusura stomatica indotta da CO₂ ridurrebbe la dissipazione di calore dalla foglia dovuta al flusso traspirativo, contribuendo ad un bilancio termico ancora più positivo.

Lo stretto legame tra l'andamento climatico delle stagioni e la vegetazione fa sì che l'alterazione di alcuni parametri climatici si ripercuota innanzitutto a livello fenologico, ossia modificando le fasi di sviluppo delle piante nei diversi ambienti (fig. 2). Nella pratica agricola, ad esempio, le date di semina e di raccolta variano strettamente in dipendenza degli eventi climatici. Inoltre, notevolmente alterate risultano essere anche le interazioni tra i differenti livelli trofici dell'ecosistema, come in particolare le relazioni pianta-insetto e pianta-microorganismo/patogeno. Pertanto, per molte specie, l'impatto più importante dovuto ai cambiamenti climatici riguarda l'alterazione della sincronizzazione dei cicli vitali tra i predatori e le loro prede, come ad esempio tra insetti fitofagi e piante ospiti (fig. 2).

Allo stesso modo, la variazione temporale dello stadio fenologico delle fioritura o della maturazione del frutto porterebbe alla perdita della sincronizzazione tra pianta e impollinatori o vettori della disseminazione (processo di dispersione dei semi). (fig. 2) In tal senso, oltre che sugli stadi fenologici legati alla crescita e alla riproduzione, il riscaldamento globale può avere delle ripercussioni anche sul tasso



di natalità o di mortalità degli insetti, con un incremento della loro fecondità, in termini di numero di generazioni, e una maggiore resistenza degli stadi larvali ad inverni sempre più miti. Anche le relazioni pianta/patogeno risultano profondamente influenzate. (fig. 2)

L'incremento della fitomassa causato dalla CO₂ porta, inevitabilmente, ad una alterazione delle condizioni predisponenti le infezioni fungine e batteriche a livello fogliare. Infatti, l'eccessiva rigogliosità della vegetazione, facilitando il ristagno di umidità al suo interno, favorirebbe la penetrazione di patogeni adattati ad un clima caldo-umido. Al contrario, i patogeni il cui processo d'infezione viene ostacolato dall'elevata umidità sulla vegetazione verrebbero ostacolati da tali condizioni microclimatiche, indipendentemente dalla densità della chioma. La medesima considerazione è valida per la relazione tra pianta/patogeno dell'apparato radicale, in base alle condizioni di umidità del suolo. Anche l'alterato rapporto pianta/insetto, come precedentemente detto, potrebbe modificare l'incidenza delle virosi (infezioni virali), malattie trasmesse alle piante sane da insetti vettori, dopo l'acquisizione di particelle virali da un ospite infetto (fig. 2).

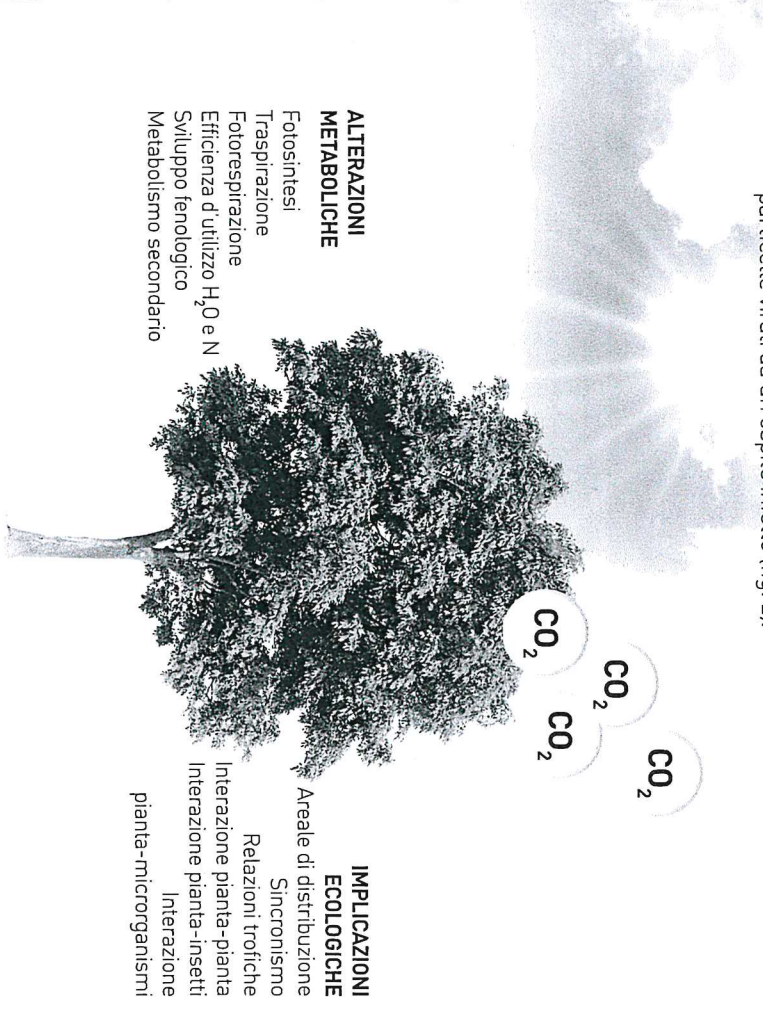


Figura 2. Effetti dell'innalzamento della CO₂ atmosferica e della temperatura sul metabolismo e l'ecologia vegetale

PIANTE, CAMBIAMENTI CLIMATICI E METABOLISMO SECONDARIO

Oltre che a carico del metabolismo primario, sono note anche alterazioni indotte dalle mutazioni climatiche sul metabolismo secondario della pianta, seppur meno studiate (fig. 2). Il metabolismo secondario raggruppa le vie biosintetiche che portano alla sintesi di composti implicati nelle interazioni tra la pianta ed il proprio ecosistema. Pertanto, i rapporti tra la pianta, il proprio ambiente fisico e gli organismi viventi che la circondano, siano essi simbionti (batteri radicali), competitori (piante di un'altra specie), parassiti (patogeni, insetti, piante infestanti) o anche impollinatori (pronubi), vengono regolati da una serie vastissima di metaboliti secondari, la cui sintesi impone un costo energetico per la pianta.

Per alcuni importanti inquinanti atmosferici, come ad esempio l'ozono (O_3), sono stati riportati effetti sulle principali vie biosintetiche secondarie di alcune specie vegetali, con un generalizzato incremento della produzione di metaboliti indotto da esposizioni all'inquinante di tipo sia acuto che cronico. Per quanto riguarda il legame tra CO_2 , temperatura e metabolismo secondario, nonostante la frammentarietà dei dati, è possibile affermare che la sintesi di metaboliti con un più elevato contenuto di carbonio, in particolare i composti fenolici (lozonioprenoidi) e i terpeni (isoprenoidi), sia maggiormente stimolata rispetto a quella di altri metaboliti quaternari (contenenti azoto oltre a carbonio, idrogeno e ossigeno), come ad esempio gli alcaloidi (fig. 3). Questa tendenza rispecchia la riduzione del contenuto di azoto nei tessuti fogliari esposti ad elevate concentrazioni di CO_2 o ad elevate temperature, in relazione al fatto che i prodotti finali del metabolismo primario costituiscono i precursori dei metaboliti secondari.



Un ampio e diversificato gruppo di isoprenoidi, collettivamente denominati composti organici volatili di origine biogenica (BVOCs, biogenic volatile organic compounds), sono prodotti ed emessi dalle piante con la funzione di mediare le proprie relazioni con gli insetti, siano essi impollinatori o fitofagi. Questi metaboliti sono anche coinvolti nelle cosiddette relazioni tritrofiche, ossia in quel complesso scambio di segnali chimici tra piante, insetti erbivori ed insetti carnivori. In questa particolare forma di interazione, le lesioni indotte dai fitofagi a carico dei tessuti vegetali provocano l'emissione di BVOCs, i quali, a loro volta, fungono da attrattori per gli insetti predatori dei fitofagi stessi. Alcuni inquinanti atmosferici, come l'ozono troposferico, e le elevate temperature possono incrementare l'emissione di BVOCs dalle piante, alterando i meccanismi di difesa della pianta nei confronti degli artropodi. Sembra, infatti, che l'emissione di BVOCs abbia anche la funzione di proteggere l'apparato fotosintetico e le membrane biologiche dallo stress indotto dalle elevate temperature o da alcune tipologie di inquinanti. Inoltre, l'emissione di elevate quantità di BVOCs potrebbe contribuire, assieme ai VOCs di origine antropica, a creare forme di inquinamento su scala regionale, essendo tali composti tra i precursori dell'inquinamento fotochimico.

In esperimenti condotti su *Digitalis lanata* Ehrh., specie appartenente alla famiglia delle Scrophulariaceae, originaria dell'Europa Centro-Meridionale, sia in condizioni controllate (fitotroni o camere di crescita) che in pieno campo, l'esposizione ad una concentrazione atmosferica di CO_2 di circa tre volte superiore rispetto alla norma ha indotto un aumento considerevole sia della biomassa, che del contenuto di digossina (glicoside cardiaco di origine steroidica, utilizzato con successo nel trattamento dell'insufficienza cardiaca) per unità di peso secco, con una conseguente duplicazione della resa di tale composto per ettaro di pianta coltivata. Inoltre, una moderata carenza idrica ha ulteriormente stimolato sia la produzione di biomassa che la sintesi di digossina. Risultati analoghi sono stati riportati su imenocallide (*Hymenocallis littoralis* Jacq., Salisb.), una pianta tropicale della famiglia delle Amarillydaceae, originaria dell'America Centrale, con un incremento sia della biomassa dei bulbi sotterranei che del loro contenuto di pancreatostatina e narciclasina, due alcaloidi dall'elevata attività antitumorale.

In uno studio effettuato su tabacco (*Nicotiana tabacum* L.) e stramonio (*Datura stramonium* L.), della famiglia delle Solanaceae, l'innalzamento della CO_2 atmosferica e della temperatura ha prodotto risultati contrastanti sugli alcaloidi prodotti dalle due specie. A carico della CO_2 si è riscontrata una riduzione della concentrazione di nicotina in tabacco, ed un incremento del contenuto di scopolamina nello stra-

monio. La temperatura, al contrario, non ha prodotto alcun effetto su nicotina e scopolamina, incrementando invece i livelli di atropina. Atropina e scopolamina sono alcaloidi tropanici in grado di modulare le funzioni della muscolatura liscia e delle cellule delle ghiandole esocrine, così come la frequenza cardiaca, respiratoria e le funzioni del sistema nervoso centrale.

La nicotina è un alcaloide piridinico con proprietà di sostanza stupefacente. In piccole dosi, ha un effetto stimolante sull'attività fisica, l'attenzione e la memoria, aumenta la frequenza cardiaca, la pressione sanguigna e riduce l'appetito.

Infine, analoghe considerazioni possono essere poste per alcuni principi attivi il cui utilizzo esula dall'uso a fini terapeutici, come ad esempio per l'urusciole, un olio altamente irritante per la cute e in grado di scatenare anche gravi reazioni allergiche, presente in alcune piante della famiglia delle Anacardiaceae, come l'edera velenosa [*Toxicodendron radicans* (L.) Kuntze]. In condizioni di elevata CO₂, può essere favorita la sintesi di alcuni costituenti particolarmente irritanti di quest'olio, esacerbando le proprietà tossiche ed allergizzanti di questa specie.

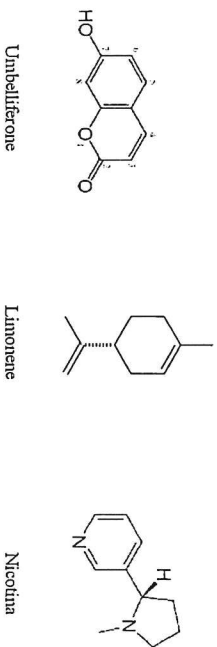


Figura 3. Struttura di un fenilpropanoide (umbelliferone), di un isoprenoide (limonene) e di un alcaloide (nicotina)

GLOSSARIO

ALCALOIDI. Composti di origine vegetale contenenti azoto, derivanti, per lo più, da aminoacidi, e dalle proprietà medicamentose o tossiche, a seconda del tipo di molecola e della dose.

ANTROPICO. Relativo all'uomo ed alle sue attività.

ARTROPODI. Ampio e diversificato gruppo di invertebrati comprendente il gruppo dei crostacei, insetti, aracnidi (ragni) e miriapodi (millepiedi).

BIOCENOSI. La comunità delle specie che vive in un determinato ambiente (biotopo, v.), a sua volta comprendente organismi animali (zoocenosi) e vegetali (fitocenosi).

BIODIVERSITÀ. L'insieme delle forme viventi, animali, vegetali e microorganismi, geneticamente differenti, presenti nella biosfera (v.).

BIOMASSA. La massa degli organismi vegetali (v. fitomassa) ed animali presenti in una data superficie.

BIOSFERA. L'insieme delle zone del pianeta nelle quali le condizioni climatiche consentono lo sviluppo di forme di vita.

BIOTOPO. Ambiente nel quale vivono organismi appartenenti alla stessa specie o a specie differenti.

CATENA ALIMENTARE. v. rete trofica

CONSUMATORI O ETEROTROFI. Organismi che dipendono dai produttori primari (v.) per il proprio sostentamento; si suddividono in consumatori primari (erbivori) e secondari (carnivori), occupanti i gradini più elevati della piramide alimentare (v.).

ECOSISTEMA. L'insieme della biocenosi (v.) e del biotopo (v.).

EFFETTO SERRA. Processo naturale di riscaldamento degli strati bassi dell'atmosfera per effetto della radiazione infrarossa (v.) proveniente dal sole, la cui riflessione ad opera della superficie terrestre viene limitata dal gas serra (v.).

FENILPROPANOIDI O COMPOSTI FENOLICI. Composti di origine vegetale derivanti dall'aminoacido aromatico fenilalanina.

FENOLOGIA. Disciplina che studia gli stadi di sviluppo (o fenologici) di un organismo vivente [ad es. la comparsa, la modificazione o la perdita di un organo].

FITOFAGO. Qualsiasi organismo che si nutra di tessuti vegetali, per lo più vertebrati e insetti erbivori.

FITOMASSA. Biomassa (v.) costituita dal peso degli organismi vegetali presenti in una data superficie.

FONTI ENERGETICHE ALTERNATIVE. Fonti rinnovabili di energia (solare, eolica, geotermica, idroelettrica) alternative a quelle esauribili (combustibili fossili) e in grado di garantire uno sviluppo sostenibile.

FOTORESPIRAZIONE. Processo nel quale la pianta consuma ossigeno e libera anidride carbonica, senza produrre substrati energetici, in competizione con la fotosintesi (v.).

FOTOSINTESI CLOROFILLIANA. Processo di organizzazione nel quale

molecole inorganiche come l'anidride carbonica e l'acqua, in presenza di luce, vengono trasformate in sostanze organiche (glucosio). GASSERRA. Gas di origine sia naturale che antropica presenti nell'atmosfera e in grado di assorbire la radiazione infrarossa, causando così l'effetto serra (v.).

GLACIAZIONE. Lungo periodo (migliaia o milioni di anni) caratterizzato da un abbassamento generalizzato della temperatura sul pianeta, seguito dall'espansione delle calotte glaciali in direzione dell'equatore e da una conseguente recrudescenza climatica (l'ultima glaciazione è terminata circa 12000 anni fa).

INTERAZIONE TRITROFICA. Relazione ecologica tra tre differenti organismi viventi in relazione alle risorse alimentari, come ad esempio tra pianta, insetto fitofago (v.) e insetto carnivoro predatore di quest'ultimo. ISOPRENOIDI O TERPENI. Classe di metaboliti di natura lipidica, sia primari che secondari e di origine sia vegetale che animale.

LATTUDINE GEOGRAFICA. Coordinata geografica individuata sul globo terrestre dai paralleli, circonferenze di diametro decrescente dall'equatore (0°) ai poli (90°N o 90°S) e delimitanti le fasce latitudinali.

METABOLISMO PRIMARIO. Insieme delle vie metaboliche essenziali per l'organismo (biosintesi degli acidi nucleici, lipidi, proteine e carboidrati). METABOLISMO SECONDARIO. Insieme delle vie metaboliche che portano alla sintesi di composti coinvolti nelle relazioni tra la pianta ed il proprio ecosistema (v. alcaloidi, fenilpropanoidi e isoprenoidi). METABOLITI SECONDARI BIOATTIVI. Prodotti del metabolismo secondario delle piante aventi attività antiossidante, antitumorale, cardioprotettiva, neuroprotettiva, antinfiammatoria ed immunomodulante; possono giungere all'uomo attraverso la catena alimentare (v.).

OZONO STRATOSFERICO. Strato di ozono naturalmente presente negli strati alti dell'atmosfera, dove svolge un ruolo protettivo nello schermare la radiazione ultravioletta (v.); la sua deplezione, ad opera di CFC (clorofluorocarburi, gas utilizzati come propellenti nelle bombole spray), nota come 'buco dell'ozono', riduce l'effetto protettivo di tale scudo sugli organismi viventi.

OZONO TROPOSFERICO. Ozono presente come inquinante di origine antropica negli strati bassi dell'atmosfera (troposfera), potenzialmente tossico per le piante e per gli animali.

PIRAMIDE ALIMENTARE. v. rete trofica.

PRODOTTORI PRIMARI O AUTOTROFI. Organismi, come le piante, in grado di sintetizzare sostanze organiche da semplici composti inorganici (v. fotosintesi clorofilliana); occupano la base delle piramidi o catena alimentare (v.).

RADIAZIONE INFRAROSSA. Radiazione elettromagnetica con una lunghezza d'onda maggiore rispetto a quella della luce visibile e ricca di calore. RADIAZIONE ULTRAVIOLETTA. Radiazione elettromagnetica con una lunghezza d'onda minore rispetto a quella della luce visibile e altamente nociva per gli organismi viventi.

RETE TROFICA. L'insieme delle complesse relazioni che si instaurano tra produttori primari (v.) e consumatori (v.).

STOMA. Aperture naturali attraverso le quali avvengono gli scambi gassosi (v.) tra l'atmosfera e i tessuti vegetali, e i cui flussi sono regolati da cellule di guardia altamente specializzate.

SCAMBI GASSOSI. Passaggio dell'anidride carbonica, dell'ossigeno e del vapore acqueo attraverso gli stomi (v.).

SVILUPPO SOSTENIBILE. Sviluppo economico, industriale, agricolo che abbia il minor impatto ambientale sul pianeta, al fine di preservare le risorse per le generazioni future.

TRASPIRAZIONE. Perdita di acqua sotto forma di vapore dai tessuti vegetali (v. scambi gassosi).

Bibliografia essenziale

- Chakraborty S, Tiedemann AV, Teng PS (2000) Climate change: potential impact on plant diseases. *Environmental Pollution* 108: 317-326
- Fulmer J (2003) Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone and global climate change. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 97: 1-20
- Hansen J, Sato M, Ruedy R, Lo K, Lea DW, Medina-Elizade M (2006) Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 103: 14288-14293
- Idso SB, Idso KE (2001) Effects of CO₂ enrichment on plant constituents related to animal and human health. *Environmental and Experimental Botany* 45: 179-199
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Irti M, Faoro F (2008) Oxidative stress, the paradigm of ozone toxicity in plants and animals. *Water, Air and Soil Pollution* 187: 285-301
- Irti M, Di Maro A, Bernasconi S, Burlini N, Simonetti P, Picchi V, Panigada C, Gerosa G, Parente A, Faoro F (2009) Nutritional traits of bean (*Phaseolus vulgaris*) seeds from plants chronically exposed to ozone pollution. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57: 201-208
- Kesselmeier J, Staudt M (1999) Biogenic volatile organic compounds (BVOC): an overview on emission, physiology and ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry* 33: 23-88
- Li F, Kang S, Zhang J, Cohen S (2003) Effects of atmospheric CO₂ enrichment, water status and applied nitrogen on water- and nitrogen use efficiency of wheat. *Plant and Soil* 254: 279-289
- Mohan JE, Ziska LH, Schlesinger WH, Thomas RB, Sicher RC, George K, Clark JS (2006) Biomass and toxicity responses of poison ivy (*Toxicodendron radicans*) to elevated atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 103: 9086-9089
- Parmesan C (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate changes. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 37: 637-669
- Penuelas J, Estiarte M (1998) Can elevated CO₂ affect secondary metabolism and ecosystem function? *Trends in Ecology and Evolution* 13: 20-24
- Rosenzweig C, Hillel D (2000) Climate change and extreme weather events: implications for food production, plant diseases and pests. *Global Change and Human Health* 2: 90-104
- Sala et al. (2000) Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287: 1770-1774
- Thomas et al. (2004) Extinction risk from climate change. *Nature* 427: 145-148
- Walter G-R (2003) Plants in a warmer world: Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics.
- Ziska LH, Enche SD, Johnson EL, Reed DR, Sicher RC (2005) Alterations in the production and concentration of selected alkaloids as a function of rising atmospheric carbon dioxide and air temperature: implications for ethno-pharmacology. *Global Climate Biology* 11: 1798-1807