

## Capitolo I - Il ciclo fondamentale

### La cornucopia

La quantità di cose che diamo per scontate è stupefacente. Respiriamo, ad esempio: respiriamo, senza interruzione, sedici volte al minuto. Se smettessimo di respirare per circa cinque minuti, moriremmo. Eppure nessuno si chiede come sia possibile che vi sia costantemente qualcosa da respirare.

E respiriamo non solo per introdurre aria: abbiamo bisogno di un particolare gas, l'ossigeno, contenuto appunto nell'aria. L'aria che introduciamo nei polmoni contiene ossigeno nella misura di circa il 21 per cento; parte di questo ossigeno viene assorbita e utilizzata dal nostro organismo. L'aria espirata ne contiene solamente il 16 per cento.

Senza interruzione un 21 per cento di ossigeno entra nei polmoni e un 16 per cento ne esce. Questo vale per ogni uomo sulla Terra, e ogni animale terrestre. Gli animali marini e d'acqua dolce non respirano come noi, ma ricavano e consumano l'ossigeno disciolto nell'acqua.

Anche le piante consumano ossigeno in alcuni dei loro processi vitali. Così pure i batteri nei processi putrefattivi consumano ossigeno, e lo stesso avviene in svariati processi chimici naturali che non coinvolgono forme viventi\*.

[\* vi sono alcuni batteri che non consumano ossigeno, ma essi sono una esigua minoranza rispetto a tutto il consesso degli organismi viventi.]

L'ossigeno quindi viene continuamente consumato, e sia voi che io, in compagnia degli altri viventi consumatori di ossigeno, lo sostituiamo con un altro gas noto come «anidride carbonica», che non è respirabile. La concentrazione di anidride carbonica nell'aria è attualmente così bassa da non recarci alcun danno, ma se aumentasse anche di poco noi moriremmo per asfissia.

Pare che nello svolgimento di tutto l'insieme di processi respiratori e ossidativi che hanno luogo sulla Terra venga consumato ogni secondo qualcosa come mille tonnellate di ossigeno. A questo ritmo l'intera riserva di ossigeno disponibile nell'atmosfera terrestre e negli oceani si esaurirebbe in tremila anni.

E non avremmo da attendere neppure tremila anni per trovarci in serie difficoltà: nel volgere di poche centinaia di anni la concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera soffocherebbe qualsiasi forma di vita animale.

Eppure l'umanità e con essa tutti i viventi consumano ossigeno e producono anidride carbonica non da qualche centinaio o migliaio di anni, ma da almeno qualche centinaio di milioni di anni. E malgrado la continua sottrazione di ossigeno durante tutto questo tempo, l'aria rimane una cornucopia, un corno dell'abbondanza sempre pieno. Nell'aria infatti vi è tanto ossigeno oggi quanto ve ne era in passato, e come in passato pochissima anidride carbonica.

Come mai questo si verifica?

L'unica ipotesi possibile e che vi sia un qualche "processo ciclico": vi è un movimento circolare e ogni cosa viene ripristinata con la stessa velocità con cui viene demolita.

Un esempio di un tale processo lo abbiamo per l'acqua dolce. Da sempre e in continuazione la beviamo, la usiamo per lavare e per scopi industriali. In tutto il mondo ogni minuto se ne consumano milioni di litri e per ogni litro che l'uomo consuma, litri ne scorrono inutilizzati sulla Terra: eppure l'acqua dolce non è mai interamente consumata.

Questo fenomeno paradossale ha però una spiegazione semplice. Tutta l'acqua dolce, sia o no consumata, evapora, o direttamente dove si trova o dopo aver raggiunto il mare. Il calore solare provoca l'evaporazione di grandi quantità di acqua dal mare e dalla superficie terrestre; e solamente l'acqua evapora, non le sostanze in essa disciolte.

Il vapore acqueo ritorna sulla Terra sotto forma di pioggia ripristinando in tal modo la dotazione di acqua dolce con la stessa velocità con cui questa è stata consumata.

Possiamo pensare che sulla Terra vi sia un qualche processo che produce ossigeno con rapidità pari a quella del consumo, da parte nostra e degli altri esseri viventi. Deve d'altro canto esservi un qualche processo che demolisce l'anidride carbonica alla stessa velocità con cui viene prodotta. Solo in questo modo possiamo aspettarci che la concentrazione di ossigeno e di anidride carbonica nell'atmosfera rimanga costante per milioni e milioni di anni.

Tuttavia il processo che ripristina l'ossigeno e demolisce l'anidride carbonica mantenendo l'atmosfera respirabile non è così elementare come quello che porta al ricostituirsi dell'acqua dolce e conserva gradevolmente fresche le campagne e colmi e scintillanti i fiumi e i laghi.

Per giungere alla scoperta di questo processo soffermiamoci un momento a considerare un altro problema, abbastanza simile, che può essere messo bene in rapporto a quello della concentrazione di ossigeno e di anidride carbonica. Si tratta di questo: perché il cibo non si esaurisce mai?

L'ossigeno che inspiriamo si combina con qualche sostanza dei nostri tessuti per produrre l'energia necessaria alla nostra vita. In questo processo non si produce solamente anidride carbonica, che viene espirata, ma anche una varietà di altre sostanze di rifiuto che eliminiamo principalmente con le urine.

Se noi ci limitassimo a respirare, in definitiva le sostanze che compongono i nostri tessuti si combinerebbero con l'ossigeno per produrre energia, in quantità tale da non permetterci di rimanere in vita. Deperiremmo, cresceremmo magri e malaticci, e da ultimo moriremmo.

Per evitare ciò dobbiamo ricostituire i nostri tessuti con la stessa velocità con cui vengono consumati; a questo scopo dobbiamo mangiare. Dobbiamo cioè introdurre sostanze che compongono i tessuti di altri animali, ad esempio, e trasformarle in nostri tessuti.

Ma gli animali che noi mangiamo si sono trovati a loro volta nella stessa nostra situazione di consumare e di dover poi ricostituire i propri tessuti procurandosi cibo. Se ogni animale dovesse provvedere alla ricostruzione dei propri tessuti mangiando altri animali, tutte le specie animali si esaurirebbero ben presto giacché verrebbero consumate tutte le sostanze dei tessuti animali. Infatti gli animali di maggior mole, più forti, catturerebbero quelli di mole minore e poi si divorerebbero a vicenda. In ultimo rimarrebbe un unico animale che morirebbe lentamente di fame. Se gli animali rimangono in vita vuol dire che essi trovano una qualche forma di alimentazione che non ha a sua volta la necessità di consumare cibo, bensì è in grado di produrre "dal nulla" i costituenti dei propri tessuti.

Questo potrebbe sembrare impossibile (se noi non conosciamo in anticipo la risposta) ma non lo è. La soluzione sta nei vegetali. Tutti gli animali mangiano o vegetali, o animali che a loro volta hanno mangiato vegetali, o animali che hanno mangiato animali che hanno mangiato vegetali, e così via. Da ultimo si perviene sempre ai vegetali.

I vegetali sono costituiti di tessuti nei quali si trovano le stesse sostanze complesse dei tessuti animali. Gli animali presi nel loro insieme sopravvivono quindi esclusivamente in quanto possono cibarsi di vegetali, ricavando dal loro tessuti quelle sostanze. La maggior parte degli animali è, in effetti, erbivora, si ciba di vegetali; una minoranza di essi è carnivora e vive in ultima analisi di animali erbivori. Un ristretto numero di specie animali, quali l'uomo, il maiale, il ratto, e onnivora, si ciba cioè di ogni sorta di alimenti, ed è in grado di utilizzare con la stessa facilità sia vegetali che carni o addirittura quasi ogni sorta di sostanze. Nello schema complessivo della vita vegetale e animale gli onnivori godono di regola di particolari possibilità di affermazione e di fatto anche di posizioni abbastanza privilegiate.

Anche i vegetali consumano le sostanze dei propri tessuti per produrre energia: eppure malgrado il fatto che si consumino da sé e che vengano consumate dagli animali, le piante non vanno mai a completo esaurimento. I loro tessuti vengono ripristinati con la stessa velocità con cui vengono consumati, e non richiedono altri tessuti per attuare questo processo di ricostituzione. Si direbbe che costruiscano i tessuti proprio dal nulla.

Grazie a questa particolare capacità dei vegetali, il cibo non viene mai a mancare sulla Terra, al pari dell'ossigeno. Le piante, quindi, in qualche modo forniscono gli alimenti. Ma i tessuti delle piante debbono provenire da qualche parte, non possono venire veramente "dal nulla". Proviamo a prendere in esame una pianta e se scopriremo qualcosa su come si ripristinano le riserve di cibo, potremo anche scoprire qualcosa su come si ricostituiscono le riserve di ossigeno dell'aria.

## **II salice**

È evidente che le piante non producono dal nulla le sostanze di cui sono fatte, almeno non in senso strettamente letterale. Vi sono molte cose che rendono impossibile un siffatto processo.

La pianta è in origine un piccolo seme, ma questo seme non cresce e non si sviluppa sino a che non lo si pone nel terreno.

Una volta nel terreno, la pianticella crescendo emette un complesso sistema di radici che si fanno strada nel terreno in ogni direzione. Se viene strappata dal terreno o se le sue radici vengono in qualche modo recise, la pianticella muore.

È dunque evidente che attraverso le radici le piante traggono dal terreno una qualche forma di nutrimento. Questo è un qualcosa che gli animali non sono in grado di mangiare, ma che evidentemente fa crescere rigogliosamente le piante.

Non tutti i terreni sono ugualmente adatti alla vita delle piante. Vi sono terreni fertili in cui esse crescono con facilità, e terreni aridi nei quali crescono stentatamente o non crescono affatto. Nei terreni fertili vi è certamente qualche sostanza nutritiva che manca in quelli aridi.

E c'è ancora da aggiungere che se un terreno fertile viene utilizzato continuamente per coltivare la medesima specie di vegetale, a poco a poco perde in fertilità come se la sua riserva di sostanze nutritive venisse consumata. Parte di questa fertilità può essere recuperata lasciando incolto per un certo tempo il terreno, oppure cambiando coltivazione. Meglio ancora, il terreno può essere reso più fertile aggiungendovi talune sostanze "fertilizzanti" come i rifiuti animali. Tuttavia il terreno non è l'unico elemento necessario alla vita delle piante, un fattore altrettanto vitale è l'acqua. Tutti i contadini sanno che nessun terreno, per quanto ricco e fertile, dà raccolto se non viene abbondantemente irrigato. Un periodo di siccità è rovinoso per quei contadini le cui colture sono legate a piogge più o meno costanti. I contadini che vivono in vicinanza di corsi d'acqua hanno costruito estesi sistemi di canali per portare l'acqua ai campi, specie nelle regioni ove la pioggia scarseggia.

[Le prime civiltà della storia umana nacquero proprio in vallate bagnate da grandi fiumi: il Nilo in Egitto, l'Eufrate in Mesopotamia, l'Indo in Pakistan, il Fiume Giallo in Cina.]

È facile essere indotti a pensare che dei due elementi - terreno e acqua - sia in realtà il terreno quello più importante. La pianta ci appare come solida, ed è quindi più simile al terreno, solido anch'esso, che non all'acqua che è liquida. È più facile pensare che il materiale solido che costituisce il terreno in qualche modo si trasformi negli elementi solidi della pianta, piuttosto che pensare che l'acqua aumenti di consistenza e si trasformi in qualcosa di vivo.

Potremmo pensare che l'acqua abbia semplicemente la funzione di trasportare sostanze dal terreno all'interno della pianta. Certamente, mancando l'acqua le sostanze del terreno non raggiungerebbero la pianta e ne verrebbe così arrestato lo sviluppo. L'acqua, sotto questo aspetto, sarebbe necessaria alla vita della pianta, ma solo in maniera passiva.

Fu solamente con l'inizio dell'era moderna che qualcuno ebbe l'idea di controllare sperimentalmente questo fatto. Si tratta di Jan-Baptiste Van Helmont, alchimista e medico che visse e operò nel territorio che oggi è il Belgio, allora parte del regno di Spagna.

Van Helmont partiva dall'idea che l'acqua era l'elemento primo dell'universo (come avevano affermato anche taluni filosofi greci). Secondo questa concezione tutto in realtà è acqua: quelle sostanze che hanno un aspetto differente dall'acqua sono acqua che ha assunto forme svariate.

Nel caso in questione, per esempio, l'acqua era necessaria alla vita delle piante: non poteva dunque essere che, a differenza di quanto appariva dall'esterno, i tessuti delle piante venissero costituiti a partire dall'acqua, piuttosto che da sostanze del terreno? Perché non cercare di stabilirlo?

Nel 1648 Van Helmont concludeva il suo importante esperimento, importante non solamente perché forniva risultati di grande interesse e addirittura decisivi, ma perché era il primo esperimento quantitativo mai condotto su un organismo vivente. Era il primo esperimento biologico, in altre parole, in cui erano state pesate esattamente delle sostanze e in cui l'accurata registrazione delle variazioni di peso forniva la soluzione cercata.

Van Helmont aveva iniziato trapiantando una piantina di salice in un grosso recipiente contenente terra. Aveva pesato separatamente salice e terra. Ora, se il salice avesse costruito i propri tessuti assorbendo sostanze dal terreno, il

peso del salice sarebbe aumentato mentre quello del terreno sarebbe diminuito. Van Helmont coprì con cura il terreno a evitare che vi cadessero materiali il cui peso alterasse il risultato finale.

Naturalmente egli dovette bagnare la pianta, che altrimenti non sarebbe cresciuta. Se l'acqua fosse stata solo un mezzo di trasporto avrebbe agito semplicemente trasferendo sostanze dal terreno alla pianta e poi evaporando; l'acqua che egli doveva aggiungere sarebbe solamente servita a rimpiazzare quella andata perduta per evaporazione.

Per cinque anni Van Helmont bagnò la sua pianta con acqua piovana. La pianta crebbe e fiorì, e al termine di questo periodo egli l'atolse con precauzione dal recipiente, scosse il terreno dalle radici e la pesò. In cinque anni il salice era aumentato di 164 libbre.

Benissimo. A questo punto bisognava pesare il terreno dopo averlo lasciato asciugare. Aveva forse perso le 164 libbre acquistate dal salice? Per nulla, aveva perso solo due onces di peso.

Il salice era aumentato notevolmente di peso, ma non a spese del terreno. Quali sostanze, oltre al terreno - si domandò Van Helmont - venivano a contatto con il salice? La risposta fu: l'acqua.

Da questo egli concluse che è dall'acqua che la pianta trae le sue sostanze, e non dal terreno. Egli si fondò sui risultati di questo esperimento per sostenere che l'acqua è veramente la sostanza fondamentale dell'universo: poiché se essa poteva trasformarsi in tessuti vegetali poteva certamente tramutarsi in qualsiasi altra cosa.

### **L'aria**

Ma esaminiamo che cosa in realtà aveva dimostrato Van Helmont. Certamente questo: che il terreno non era la fonte principale dei tessuti vegetali. Diciamo, meglio, che egli lo aveva dimostrato nel caso del salice; possiamo peraltro accettare senza riserve, giacché gli scienziati lo hanno dimostrato largamente da tempo, che questo vale per qualsiasi pianta.

Non si può pensare che lo scopo principale del sistema di radici sia l'assorbimento del terreno, indipendentemente dal suo eventuale trasporto da parte dell'acqua.

Ma allora Van Helmont aveva forse dimostrato che il terreno non è assolutamente una fonte di sostanze nutritive per i tessuti vegetali? Assolutamente no! Vi era una piccola diminuzione di peso del terreno, due onces. Non è molto, e potrebbe sempre essere il risultato di ciò che noi chiamiamo "errore sperimentale", essendo difficile pesare tutto il terreno. Qualche piccola quantità di terra doveva essere rimasta attaccata alle radici; e le bilance dell'epoca non erano altrettanto precise di quelle di oggi; tuttavia due onces in meno sono pur qualcosa. Potrebbero significare la sottrazione dal terreno di sostanze necessarie, anche se in piccole quantità. Le osservazioni di Van Helmont, quindi, pur essendo molto più accurate delle osservazioni precedenti, non le smentivano. Per essere utile una teoria deve spiegare tutte le osservazioni. Ora, ad esempio, malgrado il salice di Van Helmont, rimane il fatto che vi sono terreni fertili e terreni aridi, che il terreno perde in fertilità se viene sfruttato, e la riacquista con l'aggiunta di fertilizzanti.

Il terreno deve partecipare alla costruzione della pianta: se non in maniera esclusiva, almeno in qualcosa: e questo qualcosa deve essere vitale. Facciamo un esempio: se il

terreno non è la fonte principale di nutrimento della pianta, allora deve essere possibile far crescere le piante in acqua, in assenza di terreno. E il caso delle piante marine quali le alghe, ma deve essere vero anche per le piante terrestri, ammesso che il salice sia un esempio valido.

Se le conclusioni di Van Helmont sono corrette e l'acqua è la sola fonte di nutrimento della pianta, questa deve in effetti crescere anche in acqua assolutamente pura, cioè in acqua distillata. Ma questo non avviene: la pianta in realtà cresce in quest'acqua solamente per un breve periodo.

Ma cosa accade se ammettiamo che sostanze presenti nel terreno in piccole quantità siano necessarie all'accrescimento? Una volta identificate, si potrà aggiungerle in piccole quantità all'acqua distillata e la pianta crescerà in assenza di terreno. Questo si rivela effettivamente realizzabile; la coltivazione di piante in soluzioni anziché in terreno è nota come coltivazione "idroponica", o "in vasca".

Ammettiamo quindi che sostanze presenti nel terreno in piccole quantità siano indispensabili alla crescita della pianta ed entrino nei suoi tessuti. Questo però non spiega la notevole mole dei tessuti vegetali. Se noi accettiamo l'idea di Van Helmont che l'acqua è veramente l'unico composto, oltre il terreno, che viene a contatto della pianta, dobbiamo accettare anche la sua conclusione che i tessuti della pianta derivano dall'acqua. Ma la sua idea è veramente esatta?

È chiaro che l'acqua non è il solo composto che viene a contatto della pianta. Anche l'aria viene a contatto di essa. È difficile che Van Helmont non si fosse reso conto che l'aria veniva a contatto della pianta. Eppure egli non si curò di questo fatto.

Prima di lui l'aria veniva comunemente trascurata dai filosofi. Essi certamente ne conoscevano l'esistenza (una raffica di vento e una cosa abbastanza appariscente) ma l'aria non si può vedere o toccare. Sembra un tenue nulla che può soffiare in ogni direzione ma che non interagisce con i liquidi e i solidi, tutte cose che possiamo vedere e toccare. Gli alchimisti e quanti si occupavano della materia dell'universo tendevano perciò a ignorare l'aria.

Gli alchimisti dell'antichità e del Medioevo avevano notato che nelle loro miscele si formavano vapori che si liberavano gorgogliando. Si pensava però che tutti questi vapori fossero forme di aria, e per questo venivano trascurati.

La prima persona che, per quanto sappiamo, prestò attenzione a questi vapori e affermò che essi erano più che semplici forme di aria fu proprio Van Helmont. Egli notò che alcuni dei vapori che egli produceva nel corso dei suoi esperimenti chiaramente non si comportavano come l'aria. Alcuni vapori, per esempio, potevano bruciare con una fiammata, ciò che non avviene con l'aria. Perché allora, dato il particolare interesse di Van Helmont per i vapori, egli ignorò la possibilità che l'aria fosse una fonte di nutrimento per la pianta?

Van Helmont rilevò che quando i vapori infiammabili bruciavano, lasciavano talvolta minuscole gocce di umidità. Questi vapori, perciò, gli parvero altre forme ancora di acqua, diverse da quella ordinaria. L'aria comune non aveva nulla a che fare con l'acqua, per quanto poteva vedere, e pertanto, nella teoria da lui accarezzata, l'aria non poteva essere un composto particolare. Fu sulla base di questi elementi che egli la ignorò come possibile fonte di nutrimento per le piante.

Secondo Van Helmont quei vapori che gli sembravano una forma di acqua differivano dalla comune acqua sotto un aspetto importante. Al pari dell'aria essi non possono

esser visti e percepiti, e non hanno un volume definito; ma al contrario essi sono un tipo di materia che si diffonde ovunque, occupando qualsiasi volume nel quale sono in grado di penetrare.

Gli antichi greci avevano immaginato che l'universo avesse preso origine da una materia distribuita alla rinfusa senza ordine alcuno.

Alla materia in tale stato diedero il nome di "caos". Secondo alcuni Van Helmont diede questo termine ai vapori, pronunciandolo come si sarebbe fatto nei Paesi Bassi. Con la pronuncia di allora, questa parola si legge «gas».

La parola ebbe successo e venne applicata non solamente ai vapori, ma anche all'aria e a tutti quei composti provvisti delle proprietà fondamentali dell'aria.

Fatto singolare, fu proprio Van Helmont a fare menzione per primo di un gas che in seguito si sarebbe rivelato un elemento importante nel problema della nutrizione delle piante. Bruciando legno egli ottenne un gas cui diede il nome di gas sylvestre (cioè ricavato dal legno). Il gas da solo non era infiammabile, ma aveva la tendenza a disciogliersi nell'acqua (o «trasformarsi in acqua», come van Helmont suppose). È il gas che oggi conosciamo come anidride carbonica.

Una delle difficoltà nello studio dei gas è data dal loro comportamento disordinato. Non appena si formano gorgogliano via, si espandono e si mescolano all'aria disperdendosi. Un importante passo avanti, sotto questo aspetto, fu fatto da Stephen Hales, un botanico inglese vissuto nel Settecento. Egli studiò in ogni particolare il modo in cui l'acqua attraversa la pianta, assorbita dalle radici ed emessa, sotto forma di vapore, dalle foglie. La proprietà delle piante di emettere un gas gli fece ritenere possibile che le piante altresì assorbissero dei gas; che esse potessero, in effetti, respirare come gli animali, anche se in maniera meno evidente. E se così era, egli pensò, era possibile che l'aria venisse utilizzata come fonte di nutrimento per una parte almeno dei tessuti della pianta.

Questo lo spinse a studiare i gas e nel 1727 a pubblicare i risultati di questi studi. Egli preparava i suoi gas in maniera tale da impedire loro di sfuggire. Il recipiente in cui questi si formavano era chiuso, fatta eccezione per un tubo curvo che partendo da esso pescava suntuo la superficie dell'acqua contenuta in una vasca aperta. Sotto l'acqua il tubo piegava verso l'alto e si apriva entro la bocca di una boccetta riempita d'acqua e posta capovolta entro la vasca.

Il gas che gorgogliava nella boccetta capovolta si portava in alto costringendo l'acqua a uscire dal basso. Quando tutta l'acqua ne era fuoriuscita si poteva chiudere l'imboccatura della boccetta e togliere questa dalla vaschetta. Essa era adesso piena di un gas particolare, in forma relativamente pura. Si poteva quindi studiare a piacimento il gas ottenuto.

Hales preparò e studiò, con questa tecnica, numerosi gas, compresi quelli che oggi indichiamo con i nomi di idrogeno, anidride solforosa, metano, ossido di carbonio e anidride carbonica.

Hales non ne trasse quanto avrebbe potuto, giacché era convinto che tutti questi gas fossero semplicemente forme di trasformazione dell'aria. Egli non si rese conto che si trattava di composti distinti e differenti. Ciò nonostante il suo metodo di raccogliere i gas diede un impulso allo studio approfondito dell'aria, e di altri composti gassosi, nel secolo XVIII.

## *L'ossigeno*

Il vivo e ininterrotto interesse per i gas mise presto in evidenza, una volta per tutte, che molti gas erano composti distinti assai diversi dall'aria. Anzi, i chimici cominciarono a sospettare che l'aria stessa potesse esser formata da una miscela di più gas.

Un chimico scozzese, Joseph Black, si interessò in particolare dell'anidride carbonica (egli le dava il nome di «aria ferma»). Nel 1756 egli scoprì che essa si combinava con la calce per formare calcare. Il fatto interessante, però, fu che non era necessario aggiungere anidride carbonica alla calce. Semplicemente, se si lasciava all'aria aperta la calce, questa a poco a poco si polverizzava alla superficie trasformandosi in calcare. Evidentemente nell'aria erano presenti piccole quantità di anidride carbonica; cosicché l'aria conteneva almeno un elemento gassoso di secondaria importanza. E se ne conteneva uno, perché non poteva contenerne altri?

Nel 1772 un altro chimico scozzese allievo di Black, Daniel Rutherford, diede una descrizione di quanto avveniva facendo ardere una candela in un recipiente chiuso contenente aria: dopo un certo tempo la candela smetteva di bruciare e l'aria che rimaneva nel recipiente non permetteva la combustione di altre sostanze.

A quel tempo era noto che la combustione delle candele produceva anidride carbonica e che nulla poteva bruciare nell'anidride carbonica. La spiegazione più semplice dell'esperimento, quindi, parve essere questa: la candela bruciando consuma l'aria sostituendola con anidride carbonica.

Si sapeva anche, però, che determinate sostanze chimiche assorbono l'anidride carbonica. L'aria residua alla combustione venne fatta passare attraverso queste sostanze; ma nonostante l'assorbimento dell'anidride carbonica, l'aria non scomparve, come avrebbe dovuto avvenire se fosse stata costituita esclusivamente da anidride carbonica. Ne rimase anzi la maggior parte. Questa parte restante dell'aria non era anidride carbonica; Rutherford pensò che a questo punto, allontanata l'anidride carbonica, una candela avrebbe ripreso a bruciare nell'aria rimasta. Questo, invece, non avvenne.

Dinanzi a questo gas che costituiva la parte preponderante dell'aria, che non era anidride carbonica eppure non permetteva a una candela di bruciare, Rutherford non fu in grado di dare una corretta spiegazione.

Solamente due anni più tardi un ministro della Chiesa Unitaria, Joseph Priestley, dilettante di chimica, aggiunse un altro importante dato alle crescenti conoscenze sui gas. Il suo interesse per i gas era maturato dal fatto occasionale che la sua chiesa a Leeds era contigua a una birreria. Nel processo di produzione della birra si ha la formazione di un gas (quello che forma le bolle della birra) e Priestley poteva disporre di questo gas in quantità. Egli raccoglieva anche altri gas, come aveva fatto Hales, ma facendoli passare attraverso il mercurio, anziché attraverso l'acqua. In questo modo poté isolare e studiare quei gas che erano solubili in acqua e che non si sarebbero potuti raccogliere se fatti gorgogliare attraverso l'acqua.

L'utilizzazione del mercurio fu ciò che portò Priestley alla sua più importante scoperta. Se si riscalda intensamente il mercurio, alla sua superficie si forma una polvere rosso-mattone. Questo è il risultato del suo combinarsi con un componente dell'aria. Priestley raccolse questa polvere rossa, la pose in un recipiente di vetro ben sigillato e la

portò a temperatura elevata mediante un fascio di luce solare concentrato con una lente di ingrandimento.

La polvere si decompose dando nuovamente mercurio e liberando quel componente dell'aria con cui in precedenza si era combinato. Il mercurio si raccolse in forma di piccole goccioline metalliche mentre l'aria liberata si diffuse nel recipiente in forma di vapore invisibile.

Il mercurio si era combinato con quello che era solamente un costituente secondario dell'aria. Liberato nuovamente dal mercurio, il gas era allo stato puro, e Priestley era in grado di osservarne le curiose proprietà. Ponendo un tizzone in un recipiente pieno di questo gas, la scheggia immediatamente prendeva fuoco con una fiamma vivida, cosa che non sarebbe avvenuta se il gas fosse stato semplicemente aria. Questa proprietà del nuovo gas era esattamente l'opposto di quella del gas di Rutherford, nel quale il tizzone e anche una scheggia che bruciasse con una gran fiamma si sarebbero spenti all'istante.

Priestley fu affascinato da questo nuovo gas. Egli scoprì che dei topolini posti sotto una campana chiusa contenente questo gas erano insolitamente vivaci e che anch'egli, se lo respirava, si sentiva leggero e pervaso da un particolare senso di "benessere".

Però, come era avvenuto a Rutherford, egli non capì che cosa avesse scoperto. Questo privilegio andò a un altro studioso, il chimico francese Antoine-Laurent Lavoisier. Intorno al 1775 Lavoisier era giunto alla conclusione che l'aria è costituita principalmente di due gas. Per un quinto dal gas di Priestley, che favorisce la combustione, e per quattro quinti dal gas di Rutherford che non permette la combustione.

Lavoisier diede al gas di Priestley il nome di «ossigeno», cioè «generatore di acido», di "aspro" (dal greco), poiché egli pensava che tutti gli acidi lo contenessero. Egli si sbagliava a questo proposito, poiché alcuni acidi non contengono ossigeno; nondimeno il nome rimase.

Al gas di Rutherford diede il nome di «azoto», cioè «privo di vita» (dal greco), poiché i topolini posti in un recipiente di azoto morivano. Evidentemente l'ossigeno era necessario non solamente alla combustione, ma anche ai processi vitali dell'organismo. Lavoisier pensò che nell'organismo dovesse esservi una sorta di combustione che procedeva assai lentamente, una combustione che forniva l'energia per la vita. Questa lenta combustione interna prende il nome di respirazione; per essa è necessario l'ossigeno, mentre l'azoto, se presente da solo, la impedisce.

In effetti noi sappiamo oggi che l'aria è costituita per circa il 78 per cento da azoto e per il 21 per cento da ossigeno. Questo fa solamente il 99 per cento. Il restante 1 per cento è costituito da una miscela di gas che non sono né ossigeno né azoto. La maggior parte di essi venne scoperta solamente intorno al 1890, e in questa sede non è il caso di occuparcene.

L'unico costituente dell'aria di cui dobbiamo far cenno, oltre l'azoto e l'ossigeno, è l'anidride carbonica, di cui Black aveva in precedenza scoperto l'esistenza. Essa è presente in una quantità irrilevante, qualcosa come lo 0,035 per cento, ma, come vedremo, è di importanza cruciale per la vita sulla Terra.

Lavoisier giunse alla conclusione che il processo della combustione comporta il combinarsi della sostanza che brucia con l'ossigeno (e solamente l'ossigeno) dell'aria. Prendiamo il carbone, ad esempio. È costituito da un elemento che i

chimici denominano «carbonio». Allorché il carbone brucia, il carbonio si combina con l'ossigeno formando un gas, l'anidride carbonica.

Questo gas deriva il proprio nome, quindi, dal fatto che è costituito da una determinata combinazione di carbonio e ossigeno. Fu lo stesso Lavoisier, con altri chimici, a elaborare questo sistema di denominazione dei composti, mettendo insieme i nomi degli elementi più semplici che si univano per formarli.

Le sostanze più semplici (così semplici da non poter essere scisse in altre sostanze chimiche più semplici ancora) le indichiamo oggi con il nome di «elementi»; a quelle più complesse costituite dagli elementi diamo il nome di «composti». L'anidride carbonica è un composto formato da due elementi: carbonio e ossigeno.

Vi è un altro caso semplice e importante di elemento che si combina con l'ossigeno, un caso che interessa un gas infiammabile osservato sia da Van Helmont che da Hales. Questo gas fu studiato nei particolari per la prima volta dal chimico inglese Henry Cavendish, nel 1766. Nel 1784 egli lo fece bruciare nell'aria raccogliendo i vapori che se ne formavano e scoprì che essi condensavano formando acqua.

Allorché venne a sapere di questo esperimento, Lavoisier lo ripeté, e al gas infiammabile diede il nome di «idrogeno» («generatore di acqua»). Lavoisier vide che la combinazione di idrogeno e ossigeno portava alla formazione di acqua.

L'acqua dovrebbe essere correttamente denominata «monossido di idrogeno», ma certamente nulla può indurre a sostituire il vecchio e familiare nome di questo composto.

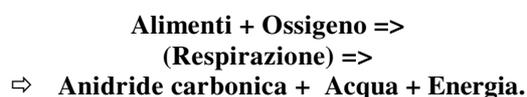
Lavoisier condusse la prima sommaria analisi chimica di composti estratti da sostanze alimentari, e gli risultò chiaro che le complesse sostanze alimentari erano ricche di carbonio e idrogeno. L'ossigeno, introdotto nell'organismo attraverso i polmoni, viene a contatto con il cibo. Carbonio e idrogeno si combinano lentamente con l'ossigeno formando rispettivamente anidride carbonica e acqua.

Per Lavoisier il combinarsi di una sostanza con l'ossigeno era un caso di «ossidazione». Vi sono casi in cui l'ossigeno non si combina direttamente con una sostanza, ma si combina con una parte dell'idrogeno contenuto in essa. Per questa ragione possiamo considerare la ossidazione sia come un'addizione di ossigeno, che come una sottrazione di idrogeno da un composto.

Quando questa ossidazione avviene rapidamente, abbiamo quel processo che comunemente indichiamo come combustione. L'ossidazione rapida produce energia che viene trasferita all'ambiente circostante. Ci si rende facilmente conto del fatto che oggetti che bruciano producono calore e luce.

L'ossidazione all'interno dell'organismo («respirazione») procede molto più lentamente e, è ragionevole pensare, produce energia con molta maggiore lentezza. Ciò nonostante produce un certo grado di calore negli animali a sangue caldo, e in alcuni esseri produce una debole luce. L'energia prodotta in questa lenta ossidazione è attentamente amministrata dall'organismo, e rende possibili tutti i processi (il movimento, per esempio) nei quali si ha consumo di energia, che caratterizzano la vita.

Possiamo riassumere questo concetto nella seguente equazione:



## *L'eliminazione del superfluo*

Come potete constatare ci ritroviamo di fronte ai due problemi posti all'inizio di questo libro. Durante la respirazione consumiamo cibo e ossigeno. Perché allora essi non si esauriscono?

Il cibo viene in qualche maniera nuovamente prodotto dalle piante; secondo gli antichi a partire dal terreno, secondo Van Helmont dall'acqua, o anche forse, secondo Hales, dall'aria. Ma di dove viene l'ossigeno? In qual modo viene ripristinato nell'aria?

È stato Priestley, lo scopritore dell'ossigeno, a tentare per primo di rispondere a tale domanda. Anch'egli, come Rutherford, eseguì i suoi esperimenti su un volume d'aria in un recipiente chiuso in cui aveva messo a bruciare una candela: aria, cioè, che non permetteva più né la combustione né la vita, in quanto, come sappiamo a questo punto, l'ossigeno era stato consumato.

[Oggi i chimici guardano all'ossidazione in modo molto più sofisticato, ma questa definizione «all'antica» va benissimo per i nostri scopi e ha il vantaggio di non introdurre complicazioni non necessarie].

Priestley mise in tale ambiente un topolino, che in breve tempo morì. Egli pensò di provare anche con una pianticella. Se nell'aria sfruttata dalla combustione della candela non è più possibile la vita, ciò avrebbe dovuto essere vero per qualunque forma di vita. Le piante, non diversamente dagli animali, non avrebbero dovuto trovare sostentamento. Priestley pertanto mise un rametto di menta in un bicchiere d'acqua e lo introdusse nel recipiente chiuso contenente l'aria. La pianticella non morì. Crebbe per mesi fin quasi a fiorire, e per di più al termine di questo periodo un topolino posto in quell'ambiente chiuso sopravvisse e la candela bruciò. Priestley non interpretò i risultati in modo corretto, perché né lui, né altri dopo di lui presero in considerazione le idee di Lavoisier su questi problemi. Secondo la teoria di Lavoisier ciò che era accaduto era questo: mentre in un primo tempo la candela bruciando aveva sottratto tutto l'ossigeno dall'aria, la pianta lo aveva ricostituito.

Evidentemente il mondo vegetale non solo rifornisce costantemente di cibo le piante stesse, ma ricostituisce altresì la dotazione di ossigeno.

Un medico olandese, Jan Ingenhousz, venne a conoscenza degli esperimenti di Priestley e decise di andare più a fondo sull'argomento. Nel 1779 eseguì molti esperimenti su questo processo ricostitutivo delle piante e arrivò a una scoperta memorabile: le piante producono ossigeno solo alla luce del sole, e mai di notte.

Considerate le circostanze, sembra ragionevole supporre che l'elaborazione di alimenti e la produzione di ossigeno da parte delle piante facciano parte di un medesimo processo. Nel processo di costruzione degli alimenti, nel terreno, nell'acqua o nell'aria, si ha la formazione di sostanze complesse semplici. I chimici indicano con il termine di «sintesi» questo processo di costruzione di sostanze complesse. Poiché nel caso in questione è indispensabile la presenza della luce, l'intero processo viene indicato con il termine di «fotosintesi». Possiamo perciò dire che Ingenhousz scoprì la fotosintesi. Ma se cibo e ossigeno vengono costruiti, da che cosa si parte per costruirli? Un prete svizzero, Jean Senebier, condusse degli esperimenti che lo portarono nel 1782 a concludere non solo che la luce è indispensabile alle piante per la produzio-

ne dell'ossigeno, ma che è necessario anche qualcosa in più: l'anidride carbonica. Non si svilupperebbe ossigeno se la pianta fosse privata di ogni contatto con l'anidride carbonica presente nell'aria come gas o disciolta nell'acqua (come "bicarbonato").

Nel 1804 un altro studioso svizzero, Nicolas-Théodore de Saussure, affrontò il problema dal punto di vista quantitativo. Egli ripeté quindi l'intero esperimento di Van Helmont, ma avendo in niente l'anidride carbonica, più che il terreno. Egli pertanto misurò con esattezza la quantità di anidride carbonica consumata dalla pianta e l'aumento di peso dei suoi tessuti. L'aumento in peso di questi era notevolmente superiore al peso dell'anidride carbonica consumata, e de Saussure dimostrò in modo abbastanza convincente che l'unica fonte possibile del peso eccedente era l'acqua.

In questo modo sembrava che sia Van Helmont sia Hales fossero in definitiva, ciascuno a suo modo, almeno parzialmente nel giusto. Le piante vengono nutrite sia dall'acqua che dall'aria, e da entrambe traggono parte dei loro composti tessutali.

Possiamo renderci conto che questo era inevitabile sulla base della nuova visione della chimica di Lavoisier. Gli alimenti contengono carbonio e idrogeno e debbono perciò prendere origine da composti più semplici contenenti carbonio e idrogeno. Gli elementi, secondo Lavoisier, non possono essere né creati né distrutti: questa regola viene indicata come «legge della conservazione della materia».\*

\*[Questa regola non è totalmente corretta: ciò fu scoperto all'inizio del nostro secolo. Essa però è abbastanza precisa per gli scopi di questo libro].

Noi sappiamo che l'acqua è costituita da idrogeno e ossigeno, e che l'anidride carbonica è formata da carbonio e ossigeno.

Sia l'acqua che l'anidride carbonica sono sempre a disposizione delle piante, perciò risulta logico concludere che debbono concorrere alla costituzione degli alimenti, vale a dire dei tessuti vegetali. Inoltre, se il carbonio dell'anidride carbonica e l'idrogeno dell'acqua vengono utilizzati per la sintesi degli alimenti, allora l'ossigeno che avanza verrà espulso nell'atmosfera.

È però possibile prescindere completamente dal terreno?

Bisogna ricordare che per la vita della pianta sono necessari elementi di secondaria importanza presenti nel terreno e che, per l'esattezza, i tessuti vegetali non sono costituiti esclusivamente di carbonio, idrogeno e ossigeno. Questi tre elementi rappresentano il 95 per cento circa del peso dei tessuti, ma vi sono anche altri elementi; essi, anche se in piccole quantità, sono tuttavia assolutamente indispensabili per la vita. Tra essi l'azoto, il solfo, il fosforo, il calcio, il magnesio, il ferro, il sodio, il potassio.

Lasciando per il momento da parte l'azoto, possiamo constatare che nessuno degli altri elementi è presente nell'aria o nella pioggia in quantità significative. Tuttavia nel suolo esistono composti che contengono questi elementi. L'acqua che scorre nella terra discioglie alcuni di questi composti in modo che essi arrivano poi alla pianta. L'acqua è quindi indispensabile alla vita della pianta, non solo come fonte dei tessuti vegetali, ma anche come veicolo dei composti del suolo. È chiaro quindi che anche il suolo ha la sua funzione. I composti di secondaria importanza presenti nel suolo, necessari alla vita della pianta, ritornano ad esso quando le piante muoiono e lentamente marciscono. Se le piante vengono utilizzate come

cibo, ritornano al suolo in parte sotto forma di escrementi, e il rimanente quando l'animale muore e imputridisce. Solo quando l'uomo coltiva il terreno in modo intensivo, miete la messe e la porta via, allora il terreno viene lentamente depauperato e diventa arido. Gli agricoltori debbono allora ricostituire le riserve di tali sostanze concimando il terreno con gli escrementi degli animali o con particolari fertilizzanti chimici che sono stati prodotti nell'ultimo secolo.

Questi composti presenti nel terreno vengono incorporati nei tessuti vegetali mediante una serie di reazioni che non coinvolgono la luce e perciò non fanno parte della fotosintesi. In questo libro ci limitiamo a trattare il processo della fotosintesi e i problemi direttamente connessi. Perciò escluderemo ogni aspetto superfluo evitando qualsiasi considerazione sui composti presenti nel terreno che non abbiano un qualche stretto rapporto con l'argomento.

Lo stesso vale, a questo proposito, per la respirazione. La scissione degli alimenti in anidride carbonica e acqua riguarda solamente carbonio, idrogeno e ossigeno. E gli altri elementi senza dubbio presenti negli alimenti? Comunque sia, essi non ci riguardano, parlando di fotosintesi, e pertanto li ignoreremo.

L'azoto occupa una posizione ambigua. Insieme a carbonio, idrogeno e ossigeno, l'azoto è l'elemento più frequentemente presente nei tessuti viventi in generale, animali o vegetali che siano. Esso è una parte essenziale dei più importanti fra i composti dei tessuti viventi: proteine e acidi nucleici. E l'azoto è presente nell'aria: anzi, ne costituisce i quattro quinti. Parrebbe logico, quindi, pensare che l'aria contribuisca alla nutrizione delle piante sia con l'azoto in essa contenuto sia con le sue piccole quantità di anidride carbonica, e che l'azoto partecipi anch'esso alla fotosintesi.

Il primo a condurre esperimenti in tal senso fu un chimico agrario francese, Jean-Baptiste Boussingault. A partire dal 1837 egli preparò un terreno che non conteneva composti azotati e vi fece crescere dei semi, avendo provveduto prima a pesarli accuratamente. Fece ben attenzione a impedire che sostanze azotate raggiungessero le piante in accrescimento, in modo che l'unica via di accesso dell'azoto fosse costituita dall'atmosfera. Costatò che alcune piante crescevano ugualmente anche in tali condizioni di carenza di azoto. I piselli e il trifoglio rosso non solo crescevano e fiorivano, ma i loro tessuti erano ricchi di azoto come quelli delle piante cresciute in terreni contenenti azoto. Piselli e trifoglio rosso avevano evidentemente assorbito il loro azoto dall'atmosfera.

D'altra parte Boussingault osservò che altre piante, quali il grano e l'orzo, non crescevano assolutamente in un terreno privo di azoto.

Queste constatazioni rimasero un enigma sino alla metà del secolo scorso, allorché iniziò lo studio dettagliato dei batteri e se ne comprese in misura maggiore l'importanza nell'economia generale delle attività vitali.

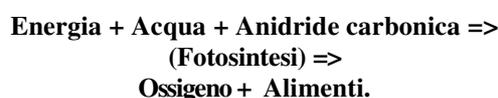
Risultò che vi sono batteri capaci di utilizzare l'azoto dell'aria trasformandolo in composti simili a quelli comunemente presenti nel terreno. Questi batteri tendono a crescere in colonie che si attaccano alle radici di talune piante, e in particolare delle leguminose (piselli, fagioli ecc.) e del trifoglio. I batteri elaborano sostanze azotate in quantità superiore alle proprie necessità, e le piante ne assorbono l'eccedenza. Piselli, fagioli e trifoglio non sfruttano l'azoto dell'atmosfera direttamente, ma solo dopo che i batteri hanno svolto la loro opera. Se queste piante spuntassero in un terreno non sola-

mente privo di azoto, ma anche sterile e privo di batteri, non crescerebbero.

Questo significa che dalla nostra trattazione della fotosintesi possiamo escludere anche l'azoto. Non vi è pianta che possa utilizzare direttamente quello dell'atmosfera, e quindi esso non ha parte nella fotosintesi.

### *Come si chiude il ciclo*

Ci rimangono dunque per il momento tre soli elementi: carbonio, idrogeno e ossigeno. Cerchiamo ora di schematizzare in un'equazione le tappe della fotosintesi, così come abbiamo fatto per la respirazione nell'equazione [1]. Il punto di partenza è rappresentato dall'anidride carbonica e dall'acqua, quello di arrivo dai tessuti vegetali e dall'ossigeno. I tessuti delle piante ci interessano come alimento, per cui li indicheremo senz'altro con tale termine. Teniamo poi presente che la luce del sole è essenziale, e che essa è una forma di energia; aggiungiamo perciò tale energia fra i fattori. Avremo allora:



Confrontando le equazioni [1] e [2] constatiamo che sono esattamente l'una l'inverso dell'altra.

In altri termini, se consideriamo ossigeno e alimenti da una parte e anidride carbonica, acqua ed energia dall'altra, vediamo che la respirazione fa andare tutto in direzione di anidride carbonica, acqua ed energia, e la fotosintesi, al contrario, in direzione di alimenti e ossigeno.

Questo intendiamo dire quando parliamo di ciclo. Le equazioni [1] e [2] possono esser combinate in quello che viene chiamato «ciclo del carbonio», poiché è il carbonio che risulta svolgere la parte fondamentale in esso (anche se a rigore non è di importanza vitale superiore all'idrogeno, all'ossigeno o, come vedremo, a qualche altro elemento). Voglio però chiarire alcuni punti prima di presentare il ciclo. La respirazione ha luogo sia negli animali che nelle piante, anche se tale processo è meno evidente in queste ultime. Alla luce del sole l'effetto della fotosintesi maschera quello della respirazione; di notte, però, quando non si ha fotosintesi, le piante si limitano ad assorbire ossigeno e liberare anidride carbonica come fanno gli animali, come dimostrò per primo il botanico tedesco Julius von Sachs nel 1868. Come bilancio complessivo, comunque, la reazione dominante è la fotosintesi: la produzione di ossigeno non è eguagliata dal consumo di ossigeno della respirazione.

La fotosintesi però avviene solamente nelle piante, non negli animali. (Vi sono certi tipi di batteri capaci di reazioni chimiche molto simili alla fotosintesi.)

Un altro punto da sottolineare è che le equazioni [1] e [2] non sono esattamente l'una l'inverso dell'altra sotto tutti i punti di vista. Nella respirazione l'energia prodotta viene in parte trasformata in calore e in parte immagazzinata sotto forma di determinati composti. L'energia liberata dal la scissione di questi composti viene chiamata «energia chimica». Proprio questa energia chimica ha un'importanza essenziale per la vita; trascuriamo perciò per il momento la produzione di calore, e consideriamo l'energia prodotta con la respirazione come null'altro che energia chimica.

L'energia impiegata nella fotosintesi, però, non è né calore nel senso corrente, né energia chimica. È l'energia della luce solare, che possiamo indicare come «energia solare». Tenendo presenti tutti questi dati, possiamo combinare assieme le equazioni [1] e [2] sotto forma di un ciclo (fig. 1).

Si tratta del ciclo fondamentale che permette lo scorrere ininterrotto della vita. Se il ciclo procede in modo perfetto, alimenti, ossigeno, anidride carbonica e acqua vengono consumati e ricostituiti senza sosta, e il ciclo può durare in eterno.

Ciò che regola il ciclo, come vedremo dettagliatamente in questo libro, è la luce solare, e possiamo dire che la funzione complessiva del ciclo è quella di trasformare l'energia solare in energia chimica. (Questo è stato per la prima volta sottolineato dal medico tedesco Julius Robert von Mayer intorno alla metà del secolo scorso.)

È l'energia chimica che rende possibile tutte le manifestazioni della vita, e fino a che la sua fonte è l'energia solare, la vita intera (noi stessi compresi) dipende interamente dal Sole. Sono proprio le piante che attraverso la fotosintesi rendono possibile l'utilizzazione dell'energia della luce solare, non solamente per sé ma per tutti gli animali.

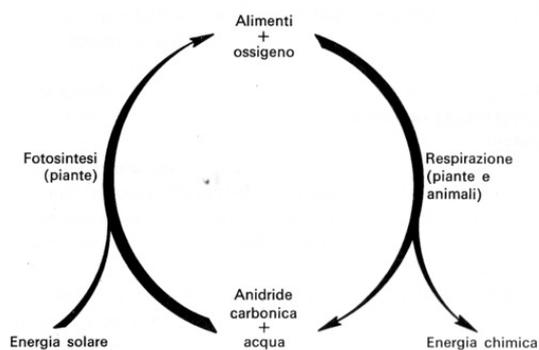


Figura 1  
Il ciclo del carbonio.

2