

## **CHE COSA E'**

Le piogge acide sono precipitazioni piovose con maggiore composizione di particelle e gas altrimenti sospese in atmosfera con valore di pH inferiore a 5,6.

Come il nome suggerisce, si tratta di una pioggia contenente acidi. La pioggia diviene acida a causa di alcuni gas che si combinano con l'acqua formando vari acidi. La pioggia è di solito leggermente acida, a causa dell'anidride carbonica disciolta in acqua (che proviene dalla respirazione degli animali) e per la presenza di una piccola quantità di cloro (proveniente dal sale marino).

Questo porta a un valore del pH della pioggia intorno a 5 e, in qualche parte del mondo, esso può scendere a 4 (questo è tipico delle zone intorno ai vulcani, in cui le emissioni di anidride solforosa e solfuro di idrogeno portano alla formazione di acido solforico nella pioggia). Prima della Rivoluzione Industriale, il valore tipico del pH della pioggia era tra 5 e 6, per cui il termine pioggia acida è utilizzato per le piogge con un pH inferiore a 5.

Queste particelle tendono a depositarsi al suolo mediante la deposizione umida come la pioggia, la neve o la nebbia. I principali componenti acidi presenti nelle piogge sono gli ossidi di zolfo (SO<sub>x</sub>) e gli ossidi d'azoto (NO<sub>x</sub>). La loro presenza in atmosfera è in parte naturale. Le attività umane hanno però aumentato la loro quantità nell'atmosfera, dando quindi luogo alla loro ricaduta umida al suolo tramite le cosiddette "piogge acide".

La ricaduta delle particelle può avvenire in due modi:

- ricaduta "umida" (le piogge, la neve ecc.);
- ricaduta "secca" (deposizione al suolo);

Nei casi di ricaduta "secca" la forma acida tende a formarsi solo successivamente alla deposizione sul terreno. Quando invece la ricaduta avviene in modo "umido" tendono a formarsi acidi prima ancora che l'acqua si depositi sul terreno. Gli ossidi di zolfo a contatto con l'acqua si trasformano in acido solforico, gli ossidi di azoto in acido nitrico.

## **LE CAUSE**

Tale fenomeno è causato essenzialmente dall'aumento nell'atmosfera di componenti gassosi quali l'anidride solforosa (SO<sub>2</sub>) e solforica (SO<sub>3</sub>) provenienti dalle attività industriali e dalle combustioni in genere, il monossido e il biossido di azoto (NO, NO<sub>2</sub>), l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>). Questi gas possono essere trasformati in pochi giorni in acidi tramite varie reazioni quali la combinazione con l'acqua (H<sub>2</sub>O) o con il radicale

ossidrilie  $\text{OH}^-$ . Tali reazioni sono le seguenti:



L'emissione di questi ossidi, oltre a rendere possibile la loro trasformazione chimica, produce una dispersione ad ampio raggio; così le sostanze acide vengono deposte su vaste aree sottovoce che ne subiscono gli effetti. La ricaduta a terra degli inquinanti acidi avviene in due modi: attraverso le deposizioni "umide" e "secche". Le prime sono le più note e si verificano sia sotto forma di pioggia acida, sia come neve, rugiada e nebbie acide. Queste precipitazioni si possono formare a grandi distanze rispetto ai punti di emissione degli ossidi originari; di conseguenza sovente il paese inquinato si trova molto lontano da quello inquinante.

Le deposizioni secche consistono nella ricaduta al suolo di sostanze acide in forma di gas o di particelle microscopiche, senza si renda necessaria la loro soluzione. Questo processo in genere si verifica soprattutto nelle aree più vicine ai punti di emissione.

I gas responsabili delle precipitazioni acide sono presenti nell'atmosfera anche per cause naturali quali *eruzioni vulcaniche, temporali, processi di degradazione batterica delle sostanze organiche, respirazione di piante e animali*. Per questo motivo l'acqua piovana in condizioni normali non è neutra (pH 7), ma risulta debolmente acida (pH 5,6).

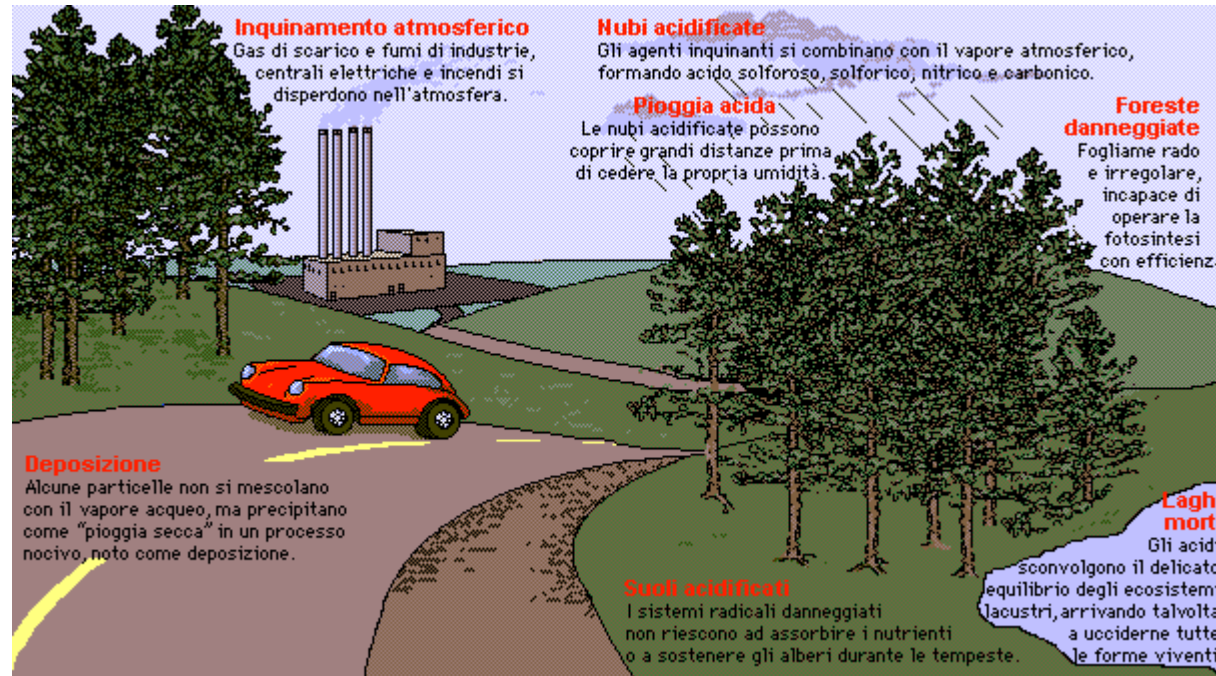
A partire dalla Rivoluzione Industriale, però, le quantità di anidridi gassose riversate nell'atmosfera sono molto aumentate come conseguenza del crescente consumo di combustibili fossili. Il *carbone* e il *petrolio* contengono infatti piccole quantità di zolfo che si combina, durante i processi di combustione, con l'ossigeno dell'aria, determinando la formazione di  $\text{SO}_2$ , responsabile principale del fenomeno delle piogge acide; l'anidride solforosa, poi, si ossida nell'aria ad anidride solforica.



Gli ossidi di azoto sono invece prodotti da qualsiasi processo di combustione ad alta temperatura che avvenga in presenza di aria: i principali componenti dell'atmosfera, l'azoto gassoso ( $\text{N}_2$ ) e l'ossigeno ( $\text{O}_2$ ), per effetto del calore, si combinano chimicamente formando  $\text{NO}$  ed  $\text{NO}_2$ . Tali ossidi provengono soprattutto dai gas di scarico dei *veicoli a motore* e degli *impianti industriali*.

Va ricordata inoltre l'emissione crescente di  $\text{CO}_2$  che deriva da ogni processo di combustione, compresa la respirazione degli organismi animali

e vegetali. La massiccia immissione nell'atmosfera di gas inquinanti proviene anche da altre fonti, ad esempio dalla *combustione di biomassa vegetale*, tecnica utilizzata soprattutto nelle zone tropicali per attuare la deforestazione e creare nuovo suolo da destinare a pascoli e terre coltivabili. Il fenomeno delle piogge acide é quindi legato alle molteplici attività svolte dall'uomo nei vari settori dell'economia e le conseguenze di tale problema sono decisamente rilevanti.



## EFFETTI SULLE ACQUE SUPERFICIALI

Le piogge acide colpiscono anche le acque superficiali determinando un'alterazione chimica delle acque di falda, dei laghi, dei fiumi e delle acque marine lungo le coste. I bacini imbriferi, nei quali si raccoglie la pioggia, presentano una certa capacità neutralizzante l'acidità, dovuta alle caratteristiche geologiche del suolo, variabile a seconda del tipo di substrato roccioso del bacino e dell'acidità più o meno elevata delle piogge. Ne deriva che un corpo idrico con un'elevata alcalinità (contenuto di ioni in grado di neutralizzare l'acidità) é meno sensibile all'azione delle piogge acide, ma l'effetto tampone può ridursi nel tempo perdendo così la sua efficacia.

Le acque di bacini con fondali costituiti da rocce siliciche, quali graniti e gneiss sono le più vulnerabili al processo di acidificazione, in quanto rocce acide. L'acqua con un pH inferiore alla media provoca gravi danni agli ecosistemi idrici; viene così modificato l'habitat acquatico idoneo a diverse piante e specie animali, dando luogo pertanto a comunità biologiche anomale.

Man mano che il valore del pH si abbassa, viene prima inibito lo sviluppo degli embrioni di rana e delle uova di salamandra, poi scompaiono piccoli crostacei, molluschi e gli anfibi stessi. Al di sotto di un pH di 5,5-5 si ha la scomparsa dei salmonidi, fino a giungere alla scomparsa totale della fauna ittica per la presenza di metalli tossici come mercurio e alluminio, che vengono liberati dal terreno a causa dell'acidità delle precipitazioni. L'acidificazione delle acque provoca anche la riduzione della diversificazione della fauna acquatica perché i suoi effetti possono essere trasmessi lungo la catena alimentare dai cambiamenti della popolazione: si ha perciò una semplificazione nella struttura dell'intero ecosistema. Nelle acque acide si osserva inoltre la riduzione della microflora: ciò consente alla luce di penetrare nell'acqua a maggior profondità; pertanto i laghi acidi sono generalmente cristallini e di colore bluastrò. Spesso le macrofite (piante acquatiche più grandi) diminuiscono, cedendo il posto al muschio SPHAGNUM e alle alghe filamentose, che colonizzano i letti dei laghi acidi formando talora coltri impenetrabili.

## **EFFETTI SULLA VEGETAZIONE**

Il problema del deperimento forestale emerse per la prima volta agli inizi degli anni Settanta nella Germania occidentale. La situazione andò aggravandosi negli anni Ottanta quando danni ambientali vennero riscontrati anche in Scandinavia e Gran Bretagna.

Per quanto riguarda l'Italia, secondo un'indagine condotta nel 1988, il 10% del patrimonio boschivo di tutta la penisola risulta colpito dagli effetti delle piogge acide. Questi effetti consistono in un generale indebolimento delle piante (rese più vulnerabili dall'aggressione di parassiti o dagli effetti di condizioni climatiche avverse) e la conseguenza è il rapido declino di alcune foreste. Le piante colpite presentano modificazioni nella chioma (rallentato accrescimento; ingiallimento e precoce caduta delle foglie; ramificazione alterata e meno attiva) e un apparato radicale che risulta meno sviluppato. Il meccanismo di aggressione delle piogge acide è duplice:

-*diretto*, attraverso il fogliame (esposto direttamente alle precipitazioni, alle nebbie e alla caduta "a secco" di agenti inquinanti);

-*indiretto*, attraverso la modificazione nella composizione chimica del terreno (l'acidificazione infatti compromette la disponibilità di sostanze nutritive nel suolo).

L'aggressione diretta provoca danni sulle strutture di protezione superficiale delle foglie; l'aggressione indiretta provoca invece, attraverso l'acidificazione del suolo, danni all'apparato radicale, rallentamento della crescita e addirittura morte precoce della pianta.

Il terreno tuttavia può possedere una "difesa" di fronte a questo attacco, denominata "effetto tampone", che consiste nella capacità di tollerare livelli di acidità notevoli, mantenendo costante il proprio pH. La capacità tamponante dipende dalla natura dei terreni; tuttavia anche in quelli meno sensibili all'acidificazione (che derivano da rocce sedimentarie contenenti carbonati), l'effetto tampone, a lungo andare, può venire meno.

L'aumento dell'acidità del suolo è responsabile anche di alcuni effetti biologici quali: -l'alterazione dei complessi equilibri chimico-fisici del suolo e la conseguente diminuzione di componenti essenziali per la vita delle piante (come ioni calcio, magnesio, potassio e sodio);

-il rilascio di ioni metallici che vanno a danneggiare i sottili peli radicali della pianta. Inoltre vengono gravemente compromesse le popolazioni

di batteri azotofissatori (capaci di arricchire il terreno di azoto, catturandolo direttamente dall'atmosfera) e dei microrganismi responsabili della decomposizione di sostanze organiche: ciò può quindi ridurre ulteriormente l'apporto nutritivo alla pianta. Conseguenze visibili di tutto questo sono l'ingiallimento del fogliame (dovuto ad una carenza di magnesio, componente essenziale della clorofilla) e un rallentato accrescimento della pianta a causa della difficoltà di fornire nutrimento alle parti alte della stessa.

## **EFFETTI SULLA SALUTE UMANA**

L'inquinamento atmosferico può compromettere la salute umana direttamente e indirettamente.

1) Gli effetti diretti sono quelli che comportano danni al corpo umano derivanti dall'esposizione alle sostanze inquinanti. Le piogge acide di per sé (deposizioni umide) non hanno effetti diretti sulla salute umana diversamente dagli inquinanti acidi allo stato gassoso o di aerosol (deposizioni a secco).

I danni maggiori sono provocati dall' $\text{SO}_2$  che causa un restringimento temporaneo dei bronchi: la respirazione diventa difficoltosa e aumenta l'irritazione agli occhi; tali disturbi colpiscono soprattutto gli anziani, gli affetti da malattie cardiache e i soggetti con problemi polmonari preesistenti.

La maggior parte degli effetti succitati non è comunque letale e causa solo problemi passeggeri alle persone esposte temporaneamente a livelli atmosferici elevati di  $\text{SO}_2$ , mentre può provocare gravi effetti nel caso di esposizioni prolungate. In base a studi epidemiologici si è inoltre rilevato che anche il biossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ) è molto nocivo, in quanto può compromettere seriamente la funzionalità polmonare. Emerge dunque che le deposizioni a secco di acidi ( $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$ ) possono causare, se inalate, danni diretti all'organismo umano, soprattutto disturbi bronchiali e polmonari.

2) Due sono le principali vie indirette attraverso le quali le piogge acide possono compromettere la salute umana: l'acqua potabile e i cibi. In entrambi i casi entrano in gioco i metalli pesanti quali rame, zinco, mercurio, cadmio, alluminio e manganese, che vengono liberati quando terreni e sedimenti diventano acidi. Questi agenti mobilizzati si disciolgono nell'umidità del suolo e possono quindi contaminare l'acqua potabile filtrando dal terreno nei bacini di raccolta o corrodendo i serbatoi e i sistemi di distribuzione.

I metalli pesanti possono anche essere assorbiti dalle piante e, in una seconda fase, concentrarsi nei ruminanti che di tali piante si cibano ed infine, risalendo lungo la catena alimentare, arrivare all'uomo.

Anche nei pesci provenienti da laghi acidificati si è spesso riscontrata una concentrazione rilevante di tali sostanze.

L'organismo umano non è in grado di eliminare tali agenti tossici, che quindi vengono accumulati anche in alte concentrazioni, potenzialmente molto nocive. Le ricerche sulle conseguenze che l'assunzione di acqua con elevati livelli di metalli pesanti può provocare sulla salute umana sono ancora in corso.

## EFFETTI SUI MONUMENTI

L'azione delle piogge acide é ben visibile anche sul patrimonio monumentale (edifici storici, manufatti in pietra calcarea, statue in metallo, etc.). Numerosi reperti fotografici testimoniano come molte opere d'arte, dopo aver resistito per secoli senza subire danni notevoli, sono andate incontro, negli ultimi decenni, a un rapidissimo deterioramento.

Le piogge acide agiscono sui materiali esposti all'aperto con un duplice meccanismo:

-un'azione chimica di corrosione;

-un'azione meccanica di rimozione del materiale stesso, reso precedentemente friabile e solubile.

L'acqua, condensando sulle pareti dei manufatti, fa da veicolo per gli agenti inquinanti solidi, liquidi e gassosi che penetrano nelle porosità. La condensazione é facilitata sulle superfici fredde, quali sono quelle di statue o di palazzi disabitati. Infine l'umidità facilita la fissazione diretta dei gas a molecola polare. E' forse questo il meccanismo che sottrae la maggior parte di SO<sub>2</sub> all'atmosfera, depositandola sui monumenti. I monumenti in pietra calcarea sono i più colpiti, perché l'acido solforico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), contenuto nelle deposizioni acide, corrode il carbonato di calcio (CaCO<sub>3</sub>) di cui sono costituiti e lo trasforma in solfato di calcio (CaSO<sub>4</sub>), che viene facilmente dilavato dalle acque piovane; così la nuova superficie risulta esposta ad ulteriori aggressioni e viene letteralmente consumata.

I materiali lapidei vanno incontro a vere e proprie malattie, tra cui le principali sono l'esfoliazione, l'alveolizzazione e la disgregazione sabbiosa.

Nell'esfoliazione lo strato superficiale (da 0,1 a qualche mm) si solleva e si stacca dagli strati sottostanti, formando lamelle a placche. Al di sotto di queste si crea un strato polveroso o gessoso che viene trascinato via, in parte, quando la placca si stacca. L'alveolizzazione si manifesta con il distacco sabbioso del materiale, con velocità diverse da zona a zona: sulla pietra appaiono degli "alveoli" allineati.

Nella disgregazione sabbiosa, invece, l'erosione avviene in modo uniforme su tutta la superficie.

Anche i metalli vengono sensibilmente corrosi dall'acidità delle piogge, e in particolare dall'acido solforico. Sul rame e quindi anche sul bronzo, che é una lega di rame e stagno, le precipitazioni acide determinano la formazione di una tipica patina verdastra, dovuta a sali di rame.

Gli ioni nitrato NO<sub>3</sub><sup>-</sup> contenuti nelle piogge acide, oltre a concorrere alla corrosione dei metalli, penetrano nelle porosità dei mattoni e dei laterizi, determinandone lo sgretolamento progressivo.

Per la conservazione dei monumenti, se non é possibile un loro riparo in ambienti coperti, si ricorre oggi a tecniche ancora sperimentali, consistenti nel rivestire le superfici con prodotti che, oltre ad essere ovviamente incolori, chimicamente inerti ed insolubili, devono essere anche permeabili al vapore acqueo (per consentire all'umidità presente sulle superfici di sfuggire liberamente). Inoltre il trattamento

dev'essere reversibile, per garantire la possibilità di un intervento in caso di necessità. Per ora i soli prodotti con queste proprietà sono i perfluoropolietteri (composti chimici di sintesi organica).

## **POSSIBILI RIMEDI**

Il vero rimedio consiste nella prevenzione e quindi nella riduzione delle emissioni di anidridi di zolfo e di azoto. Smettere di bruciare combustibili fossili per i trasporti e per la produzione di energia nelle centrali elettriche significherebbe eliminare il problema alla radice. Comunque è importante sottolineare che le tecnologie innovative offrono la possibilità di ridurre il contenuto di zolfo e azoto:

a) *prima della combustione* (con riduzione del contenuto di azoto); in questo caso si parla di tecnica di desolforazione dei combustibili, che può essere attuata sia sul carbone sia sul petrolio. In questo modo l'emissione nell'aria di SO<sub>2</sub> da tutte le centrali termoelettriche potrebbe diminuire del 30 - 40 %.

b) *durante la combustione* (con riduzione del contenuto di azoto); si considera il fatto che l'azoto proviene dall'aria introdotta durante la combustione e che la formazione degli ossidi (NO<sub>x</sub>) dipende dalla temperatura della caldaia. Dunque un metodo è quello di rendere minima la quantità di aria presente nell'impianto e di ridurre la temperatura massima raggiunta durante i processi di combustione.

c) *dopo la combustione* (con riduzione del contenuto di zolfo e azoto). In questo caso si prevede la desolforazione dei prodotti gassosi della combustione e la riduzione dei livelli di NO<sub>x</sub>.

L'operazione sugli ossidi di azoto è molto più difficoltosa di quella attuata per la riduzione di SO<sub>2</sub>, anche perché gli NO<sub>x</sub> sono molto stabili (non reagiscono velocemente con gli assorbenti). La migliore soluzione consisterebbe nella eliminazione delle vecchie centrali termoelettriche con la conseguente ristrutturazione degli impianti, adattandoli a nuovi cicli produttivi (in modo da poter ridurre le emissioni di biossido di zolfo dell'80% e degli ossidi di azoto del 50%).

Un ulteriore problema (non legato alle emissioni delle centrali) è la massiccia emissione di ossidi di azoto prodotta dai veicoli. Fra i rimedi emerge quello che prevede la modifica dei motori o dei tubi di scarico, installando dei dispositivi adeguati come le marmitte catalitiche etc.

Un'altra possibilità riguarderebbe la pianificazione della circolazione dei mezzi di trasporto rendendo ad esempio il traffico più scorrevole nelle aree maggiormente congestionate. Inoltre, poiché le emissioni di NO<sub>x</sub> aumentano bruscamente con l'aumento della velocità dei veicoli, sarebbe necessario intervenire con leggi adeguate sui limiti di velocità (leggi in parte già approvate in Italia).

L'obiettivo primario è quello di *sensibilizzare l'opinione pubblica* al problema, convincendo tutti a servirsi dei mezzi pubblici, soprattutto nelle ore di punta. Tra l'altro questo tipo di piano per la gestione del traffico presenta ulteriori vantaggi, quali la riduzione del sovraffollamento e dei rumori nei centri urbani nonché la diminuzione degli incidenti.

L'Unione Europea, pur prendendo atto della Convenzione, non ha, allo stato attuale, la forza necessaria per imporre al mondo economico una

politica di rispetto sostanziale del valore ambientale. E' evidente che a ciò si dovrà giungere e ci auguriamo che avvenga al più presto, nella convinzione che a seguito di qualsiasi provvedimento, molto tempo passa prima di una fattiva applicazione.

## **EMISSIONI DI SO<sub>2</sub> E DI NO<sub>x</sub>**

Alcune ricerche hanno preso in esame la produzione di inquinanti gassosi nel nostro Paese. Secondo tali stime oltre il 50% delle emissioni di SO<sub>2</sub> e di NO<sub>x</sub> del territorio nazionale sono imputabili all'Italia settentrionale. In quest'area il traffico veicolare é responsabile del 30% delle emissioni di SO<sub>2</sub>, mentre il resto va attribuito a centrali termoelettriche e ad impianti industriali.

Per l'NO<sub>x</sub>, invece, il maggior contributo (60%) é dato dai gas di scarico dei veicoli a motore.

Confrontando i dati del 1980 con quelli del 1986 si osserva un calo delle emissioni totali di SO<sub>2</sub>, (per la graduale sostituzione del gasolio con metano, nonché per l'utilizzo di combustibili a minor contenuto di zolfo), mentre in sostanziale stabilità sono quelle di NO<sub>x</sub>.

| <b>Sorgenti</b>                      | <b>SO<sub>2</sub> - 1980</b> | <b>SO<sub>2</sub> - 1986</b> | <b>NO<sub>x</sub> - 1980</b> | <b>NO<sub>x</sub> - 1986</b> |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>Centrali termoelettriche</b>      | 1300                         | 1000                         | 350                          | 400                          |
| <b>trasporti</b>                     | 170                          | 100                          | 760                          | 810                          |
| <b>Industrie</b>                     | 1300                         | 800                          | 300                          | 220                          |
| <b>Settore domestico-commerciale</b> | 600                          | 150                          | 90                           | 70                           |
| <b>Totale</b>                        | <b>3370</b>                  | <b>2050</b>                  | <b>1500</b>                  | <b>1500</b>                  |