

CORSO CHIMICA AMBIENTALE A.A. 2021-22

2 – 3b

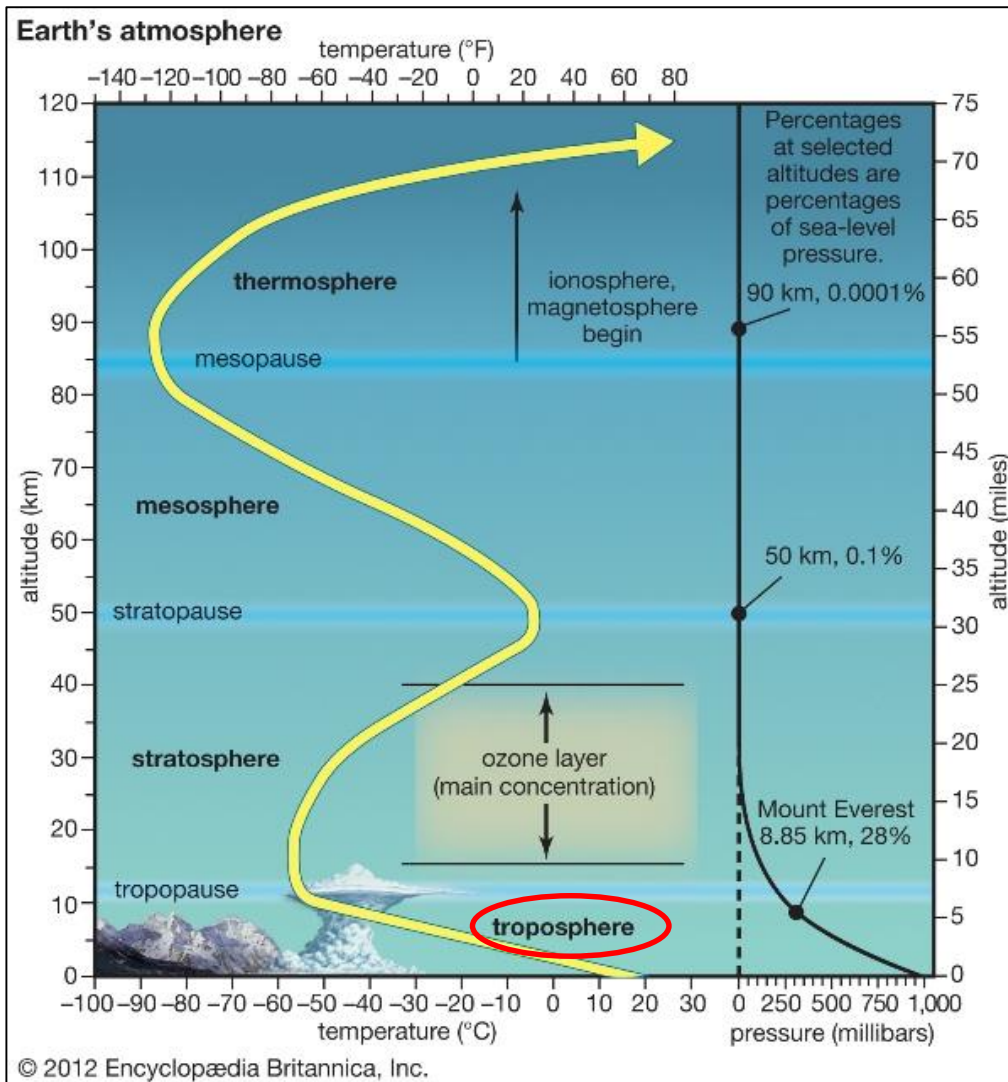
Chimica Atmosferica - Chimica della Troposfera

Slides della Dr. Sabina Licen, elaborate da slides di P. Barbieri

La troposfera

Troposfera:

- si estende dal livello del mare a 10-16 Km di altezza;
- è caratterizzata da una distribuzione omogenea dei gas maggiori a causa di un costante rimescolamento;
- la temperatura diminuisce con l'allontanarsi dalla superficie radiante della terra (mediamente 15°C a livello del mare e -56°C nel limite superiore);
- la formazione delle nubi, evaporazione e precipitazioni comportano una disomogeneità nella distribuzione dell'acqua.



Sostanze e processi chimici nella troposfera

Origine: naturale o antropica

Molecole presenti allo stato **gassoso**
(gas inorganici e composti organici volatili)

Molecole presenti nel **particolato**
(composti organici e inorganici, metalli)



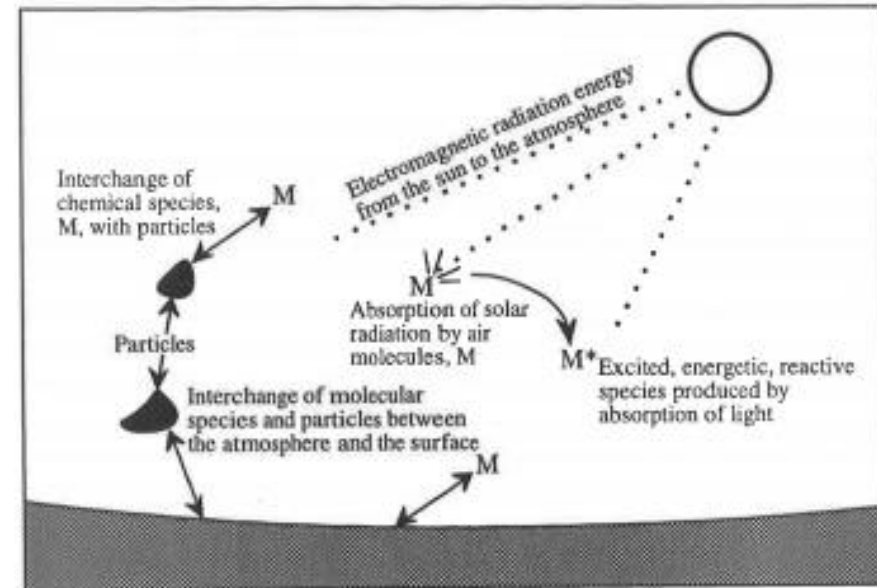
Microinquinanti
("micro" riferito alla quantità,
non alla pericolosità!)

Tipologia:

- "componenti primarie": vengono introdotte come tali in atmosfera dalle sorgenti;
- "componenti secondarie": si formano nell'atmosfera a partire da quelle primarie;

Processi:

- condensazione;
- reazioni chimiche e fotochimiche;
- adsorbimento;
- rimozione attraverso precipitazioni secche e umide.



Per ciascuna specie chimica si possono individuare le sorgenti e i "pozzi" (*sink*)

Principali gas inorganici presenti nella troposfera

Composti del carbonio:

- CO
- CO₂

Composti dello zolfo:

- H₂S
- SO₂

Composti dell'azoto:

- NO
 - NO₂
 - N₂O
 - NH₃
- } NO_x

Composti del cloro:

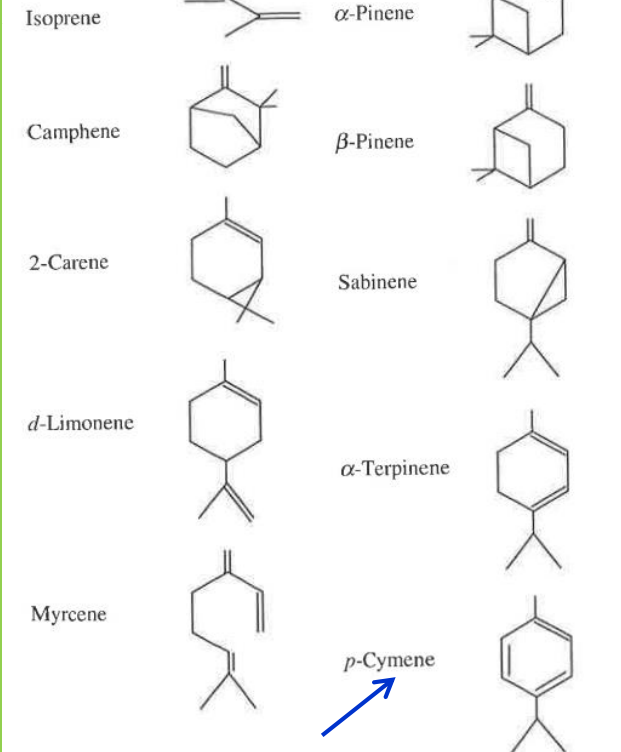
- HCl

Principali composti organici volatili (VOC) presenti nella troposfera

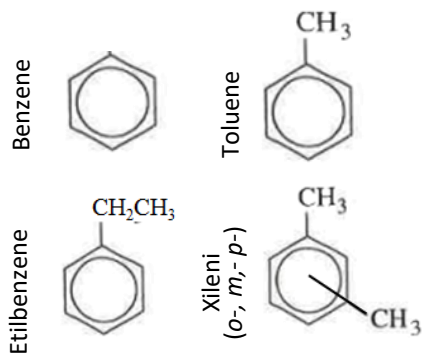
TABLE 2.8 Some Atmospheric Organic Species

Class	Compound	Formula	Typical Source	Sink
Alkanes	Methane	CH ₄	Microbial processes, natural gas	OH
	Ethane	C ₂ H ₆	Motor vehicles	OH
Alkenes	Hexane	C ₆ H ₁₄	Motor vehicles	OH
	Ethene	C ₂ H ₄	Motor vehicles, microbial processes	OH, O ₃
	Propene	C ₃ H ₆	Motor vehicles	OH, O ₃
	Isoprene	C ₅ H ₈	Vegetation	OH, O ₃
Alkynes	Acetylene	C ₂ H ₂	Motor vehicles	OH
Aromatics	Benzene	C ₆ H ₆	Motor vehicles	OH
	Toluene	C ₇ H ₈	Motor vehicles	OH
Aldehydes	Formaldehyde	HCHO	Motor vehicles	hν, OH
	Acetaldehyde	CH ₃ CHO	Motor vehicles	hν, OH
	Acrolein	CH ₂ CHCHO		
Ketones	Acetone	CH ₃ C(O)CH ₃		hν, OH
Acids	Formic acid	HCOOH		Rain
	Acetic acid	CH ₃ COOH		Rain
Alcohols	Methanol	CH ₃ OH		OH

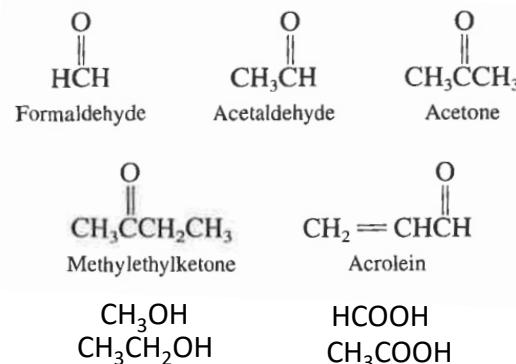
Terpeni:



Composti aromatici:



Composti ossigenati:

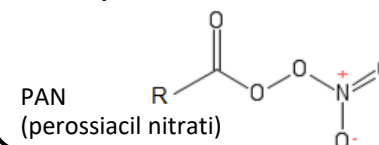


Composti alogenati: Composti dello zolfo:

- CH₃Br
- CH₃Cl
- CFC

- CS₂
- OCS
- CH₃SH
- CH₃SCH₃ (DMS)
- CH₃S₂CH₃
- CH₃SO₃H (MSA)

Composti dell'azoto:



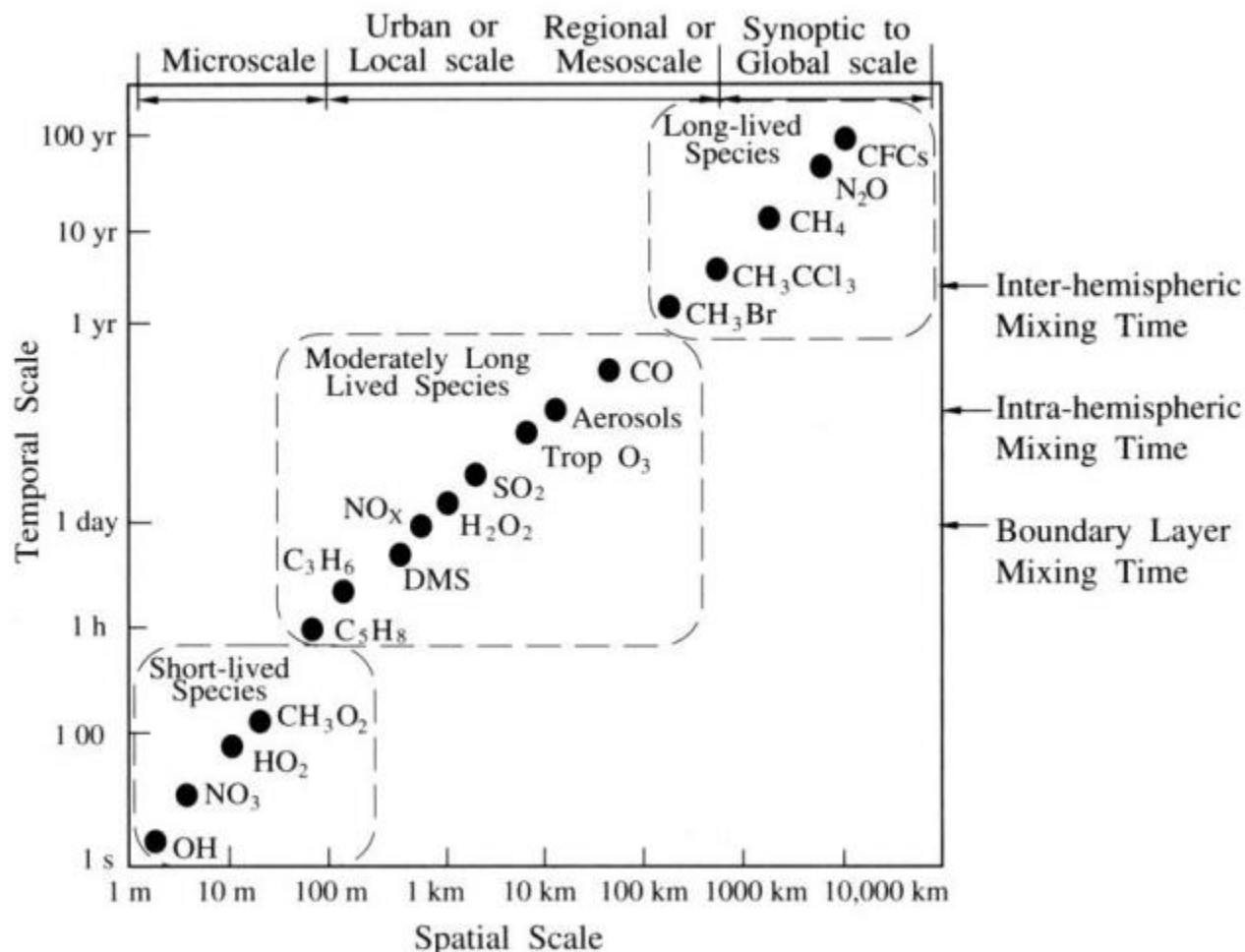
Origine delle specie chimiche presenti nella troposfera

Table 1 Gaseous chemical composition of the atmosphere (1 ppt = 10^{-12} , 1 ppb = 10^{-9} , 1 ppm = 10^{-6}).

<i>Constituent</i>	<i>Chemical formula</i>	<i>Mole fraction in dry air</i>	<i>Major sources</i>
Nitrogen	N ₂	78.084%	Biological
Oxygen	O ₂	20.948%	Biological
Argon	Ar	0.934%	Inert
Carbon dioxide	CO ₂	360 ppm	Combustion, ocean, biosphere
Neon	Ne	18.18 ppm	Inert
Helium	He	5.24 ppm	Inert
Methane	CH ₄	1.7 ppm	Biogenic, anthropogenic
Hydrogen	H ₂	0.55 ppm	Biogenic, anthropogenic, photochemical
Nitrous oxide	N ₂ O	0.31 ppm	Biogenic, anthropogenic
Carbon monoxide	CO	50–200 ppb	Photochemical, anthropogenic
Ozone (troposphere)	O ₃	10–500 ppb	Photochemical
Ozone (stratosphere)	O ₃	0.5–10 ppm	Photochemical
NMHC	C _x H _y	5–20 ppb	Biogenic, anthropogenic
Chlorofluorocarbon 12	CF ₂ Cl ₂	540 ppt	Anthropogenic
Chlorofluorocarbon 11	CFCl ₃	265 ppt	Anthropogenic
Methylchloroform	CH ₃ CCl ₃	65 ppt	Anthropogenic
Carbon tetrachloride	CCl ₄	98 ppt	Anthropogenic
Nitrogen oxides	NO _x	10 ppt–1 ppm	Soils, lightning, anthropogenic
Ammonia	NH ₃	10 ppt–1 ppb	Biogenic
Hydroxyl radical	OH	0.05 ppt	Photochemical
Hydroperoxyl radical	HO ₂	2 ppt	Photochemical
Hydrogen peroxide	H ₂ O ₂	0.1–10 ppb	Photochemical
Formaldehyde	CH ₂ O	0.1–1 ppb	Photochemical
Sulfur dioxide	SO ₂	10 ppt–1 ppb	Photochemical, volcanic, anthropogenic
Dimethyl sulfide	CH ₃ SCH ₃	10–100 ppt	Biogenic
Carbon disulfide	CS ₂	1–300 ppt	Biogenic, anthropogenic
Carbonyl sulfide	OCS	500 ppt	Biogenic, volcanic, anthropogenic
Hydrogen sulfide	H ₂ S	5–500 ppt	Biogenic, volcanic

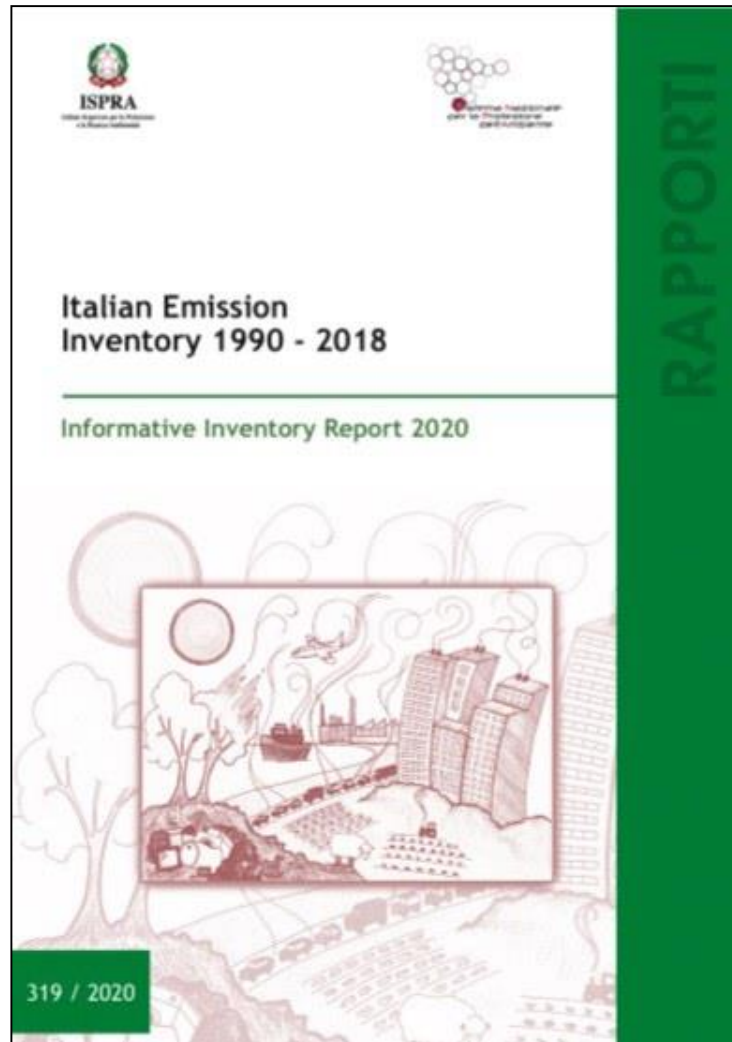
Source: Brasseur *et al.* (1999) and Prinn *et al.* (2000).

Tempi di vita e distribuzione spaziale



Inventario delle emissioni

ISPRA: Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale



2 ANALYSIS OF KEY TRENDS BY POLLUTANT

2.1	MAIN POLLUTANTS.....
2.1.1	Sulphur dioxide (SO_x).....
2.1.2	Nitrogen oxides (NO_x)
2.1.3	Ammonia (NH_3).....
2.1.4	Non methane volatile organic compounds (NMVOC)
2.1.5	Carbon monoxide (CO).....
2.2	PARTICULATE MATTER
2.2.1	PM10.....
2.2.2	PM2.5.....
2.2.3	Black Carbon (BC)
2.3	HEAVY METALS (Pb, Cd, Hg)
2.3.1	Lead (Pb)
2.3.2	Cadmium (Cd).....
2.3.3	Mercury (Hg)
2.4	PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS (POPs)
2.4.1	Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)
2.4.2	Dioxins
2.4.3	Hexachlorobenzene (HCB)
2.4.4	Polychlorinated biphenyl (PCB)

Ossidanti in atmosfera

Molti composti chimici sono emessi in atmosfera, ma processi di rimozione chimica prevengono accumuli eccessivi di queste sostanze.

Le specie inorganiche possono essere rimossi dall'atmosfera attraverso deposizioni secche o umide.

Per le sostanze organiche è più facile la rimozione se sono ossidate in sostanze più solubili e meno volatili.

Le tre più importanti specie ossidanti in atmosfera sono:

- Il radicale ossidrile $\text{HO}^\bullet$
- Il radicale nitrato NO_3
- L'ozono O_3

Il radicale idroperossido può in alcuni casi essere un'altra specie ossidante importante $\text{HOO}^\bullet$

Tra queste specie la più importante è il radicale ossidrile $\text{HO}^\bullet$

Radicale ossidrile

Il radicale ossidrile, pur non reagendo con N₂, O₂, CO₂ o H₂O presenti nell'atmosfera, è considerata una specie estremamente reattiva in grado di ossidare la maggior parte dei composti chimici presenti in troposfera, esso è conosciuto come "detergente dell'atmosfera".

<i>Classe di reattività</i>	<i>Tempo di mezza vita (approx.) in atmosfera</i>	<i>Composti in ordine crescente di reattività</i>
I	> 10 d	metano
II	24 h – 10 d	CO, acetilene, etano
III	2.4-24 h	benzene, propano, <i>n</i> -butano, isopentano, metiletilchetone, 2-metilpentano, toluene, <i>n</i> -propilbenzene, isopropilbenzene, etilene, <i>n</i> -esano, 3-metilpentano, etilbenzene
IV	15 min – 2.4 h	<i>p</i> -xilene, <i>p</i> -etiltoluene, <i>o</i> -etiltoluene, <i>o</i> -xil., metilisobutilchetone, <i>m</i> -etiltoluene, <i>m</i> -xil., 1,2,3-trimetilbenzene, propilene, <i>cis</i> -2-butene, α -pinene, 1,3-butadiene
V	< 15 min	2-metil-2-butene, 2,4-dimetil-2-butene, <i>d</i> -limonene

Radicale ossidril

Il radicale ossidril, pur non reagendo con N_2 , O_2 , CO_2 o H_2O presenti nell'atmosfera, è considerata una specie estremamente reattiva in grado di ossidare la maggior parte dei composti chimici presenti in troposfera, esso è conosciuto come "detergente dell'atmosfera".

<i>Classe di reattività</i>	<i>Tempo di mezza vita (approx.) in atmosfera</i>	<i>Composti in ordine crescente di reattività</i>
I	> 10 d	metano
II	24 h – 10 d	CO, acetilene, etano
III	2.4-24 h	benzene, propano, <i>n</i> -butano, isopentano, metiletilchetone, 2-metilpentano, toluene, <i>n</i> -propilbenzene, isopropilbenzene, etilene, <i>n</i> -esano, 3-metilpentano, etilbenzene
IV	15 min – 2.4 h	<i>p</i> -xilene, <i>p</i> -etiltoluene, <i>o</i> -etiltoluene, <i>o</i> -xil., metilisobutilchetone, <i>m</i> -etiltoluene, <i>m</i> -xil., 1,2,3-trimetilbenzene, propilene, <i>cis</i> -2-butene, α -pinene, 1,3-butadiene
V	< 15 min	2-metil-2-butene, 2,4-dimetil-2-butene, <i>d</i> -limonene

Tempo di vita piuttosto lungo nella troposfera

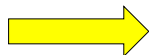
Radicale ossidril

Il radicale ossidril, pur non reagendo con N_2 , O_2 , CO_2 o H_2O presenti nell'atmosfera, è considerata una specie estremamente reattiva in grado di ossidare la maggior parte dei composti chimici presenti in troposfera, esso è conosciuto come "detergente dell'atmosfera".

Classe di reattività	Tempo di mezza vita (approx.) in atmosfera	Composti in ordine crescente di reattività
I	> 10 d	metano
II	24 h – 10 d	CO, acetilene, etano
III	2.4-24 h	benzene, propano, <i>n</i> -butano, isopentano, metiletilchetone, 2-metilpentano, toluene, <i>n</i> -propilbenzene, isopropilbenzene, etilene, <i>n</i> -esano, 3-metilpentano, etilbenzene
IV	15 min – 2.4 h	<i>p</i> -xilene, <i>p</i> -etiltoluene, <i>o</i> -etiltoluene, <i>o</i> -xil., metilisobutilchetone, <i>m</i> -etiltoluene, <i>m</i> -xil., 1,2,3-trimetilbenzene, propilene, <i>cis</i> -2-butene, α -pinene, 1,3-butadiene
V	< 15 min	2-metil-2-butene, 2,4-dimetil-2-butene, <i>d</i> -limonene

Tempo di vita piuttosto lungo nella troposfera

Non reagisce con CFC

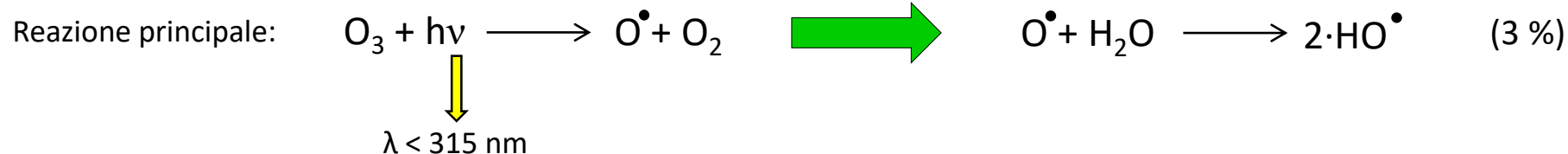


Quindi problema di rimozione di specie di origine antropogenica

Radicale ossidrile (2)

Il radicale ossidrile è estremamente reattivo ed è in grado di ossidare la maggior parte dei composti chimici presenti in troposfera, esso è conosciuto come "detergente dell'atmosfera".

Reazioni di generazione del radicale ossidrile in atmosfera:

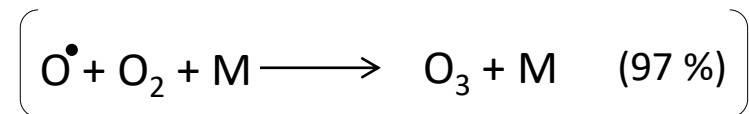
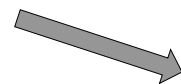
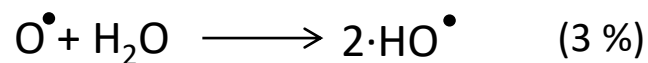
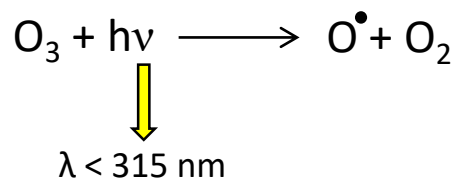


Radicale ossidrile (2)

Il radicale ossidrile è estremamente reattivo ed è in grado di ossidare la maggior parte dei composti chimici presenti in troposfera, esso è conosciuto come "detergente dell'atmosfera".

Reazioni di generazione del radicale ossidrile in atmosfera:

Reazione principale:

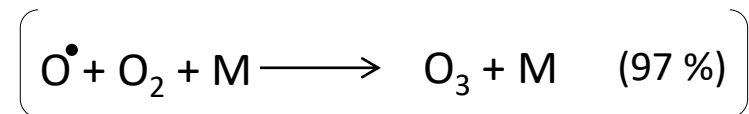
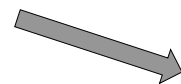
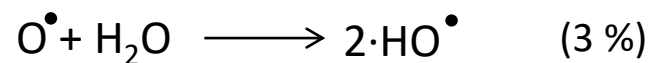
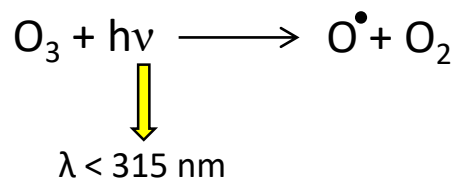


Radicale ossidrile (2)

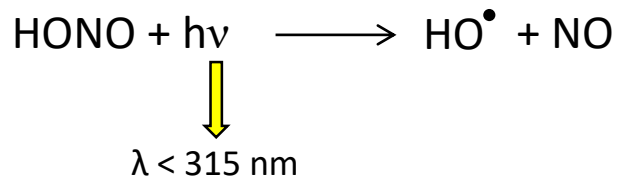
Il radicale ossidrile è estremamente reattivo ed è in grado di ossidare la maggior parte dei composti chimici presenti in troposfera, esso è conosciuto come "detergente dell'atmosfera".

Reazioni di generazione del radicale ossidrile in atmosfera:

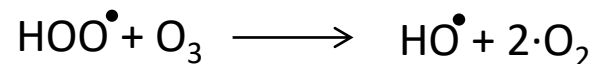
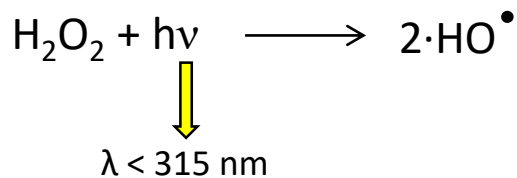
Reazione principale:



Altre reazioni:



(l'acido nitroso si accumula durante la notte in atmosfera urbana, poi viene fotodecomposto di giorno)



Radicale ossidrile (3)

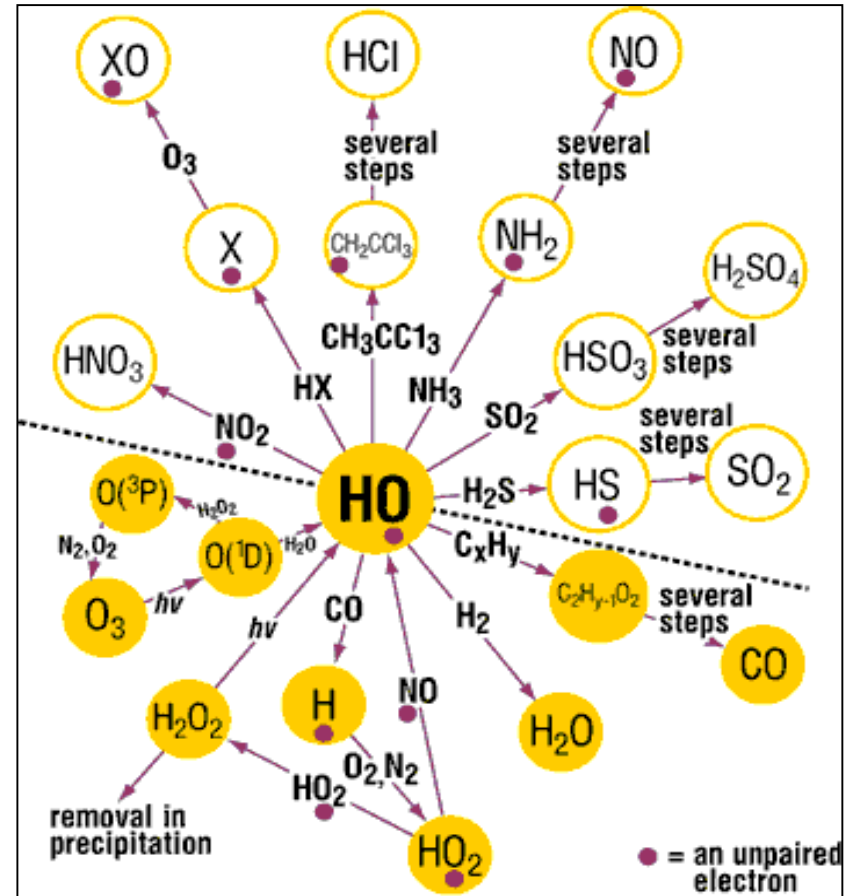
La concentrazione in troposfera del radicale ossidrile dipende da diversi fattori:

- a causa della sua elevata reattività il suo tempo di vita medio è di meno di un secondo;
- poiché la sua generazione è legata all'attività solare, mostra un ciclo giornaliero;
- ad elevate altitudini la sua concentrazione è minore perché l'aria è più secca, quindi c'è meno H₂O a disposizione;
- in presenza di sorgenti biogeniche importanti (grandi foreste) la sua concentrazione è più bassa perché reagisce con le specie organiche biogeniche presenti nella troposfera.

Radicale ossidrile (3)

La concentrazione in troposfera del radicale ossidrile dipende da diversi fattori:

- a causa della sua elevata reattività il suo tempo di vita medio è di meno di un secondo;
- poiché la sua generazione è legata all'attività solare, mostra un ciclo giornaliero;
- ad elevate altitudini la sua concentrazione è minore perché l'aria è più secca, quindi c'è meno H_2O a disposizione;
- in presenza di sorgenti biogeniche importanti (grandi foreste) la sua concentrazione è più bassa perché reagisce con le specie organiche biogeniche presenti nella troposfera.



Il monossido di carbonio (CO)

Le principali emissioni naturali sono dovute a:

- incendi delle foreste;
- eruzioni dei vulcani;
- emissioni da oceani e paludi;
- ossidazione del metano ad opera del radicale ossidrile $\text{HO}^\bullet$;
- ossidazione di idrocarburi emessi naturalmente in atmosfera (es. la degradazione della clorofilla nei mesi autunnali libera ~ 20% del carico annuale di CO).

Il monossido di carbonio (CO)

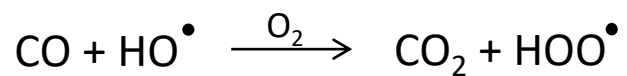
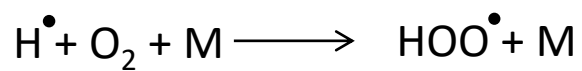
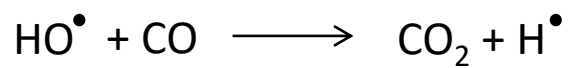
Le principali emissioni naturali sono dovute a:

- incendi delle foreste;
- eruzioni dei vulcani;
- emissioni da oceani e paludi;
- ossidazione del metano ad opera del radicale ossidrile $\text{HO}^\bullet$;
- ossidazione di idrocarburi emessi naturalmente in atmosfera (es. la degradazione della clorofilla nei mesi autunnali libera ~ 20% del carico annuale di CO).

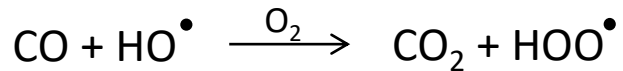
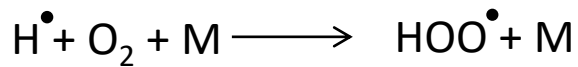
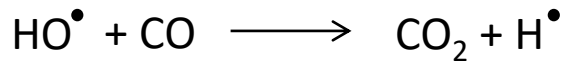
La principale fonte antropogenica è dovuta a utilizzo di combustibili fossili in:

- combustione nel motore a scoppio di autoveicoli (90 % del contributo antropogenico);
- combustione in impianti domestici e industriali;
- impianti siderurgici;
- raffinerie di petrolio.

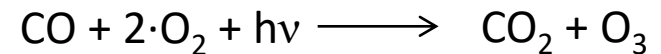
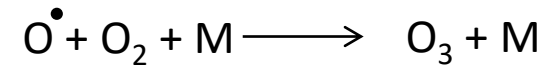
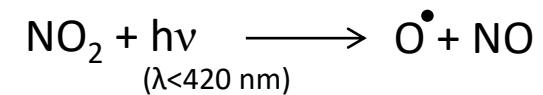
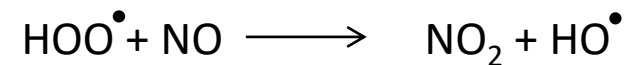
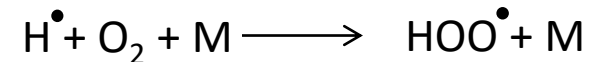
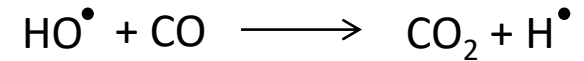
Ossidazione del CO



Ossidazione del CO

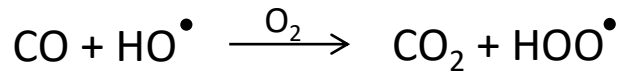
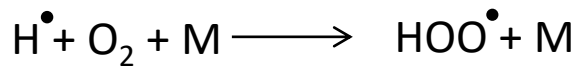
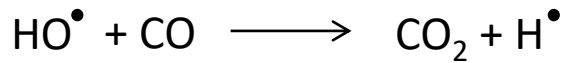


In presenza di alte
concentrazioni di
NO, le reazioni
proseguono

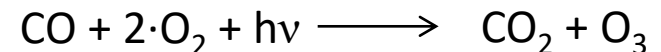
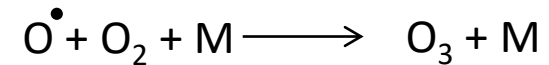
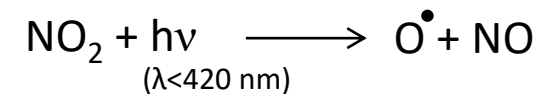
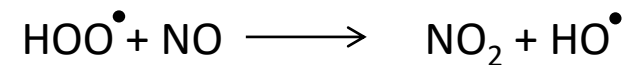
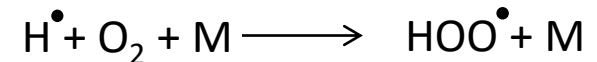
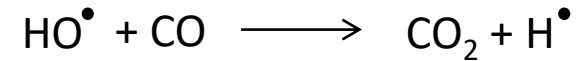



Può essere vista come un'ossidazione catalitica di CO a CO₂ perché né il radicale ossidrile, né l'idroperossido vengono consumati

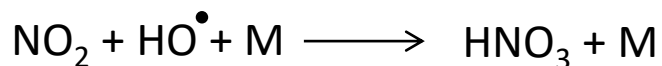
Ossidazione del CO



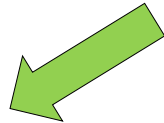
In presenza di alte concentrazioni di NO, le reazioni proseguono



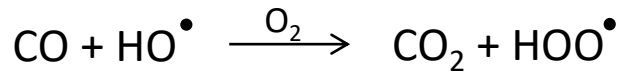
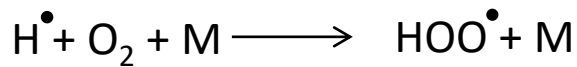
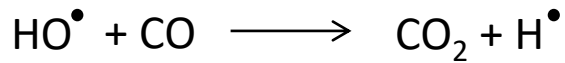
Il ciclo viene terminato se si forma acido nitrico, in presenza di NO₂:



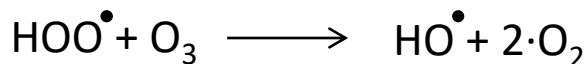
Può essere vista come un'ossidazione catalitica di CO a CO₂ perché né il radicale ossidrile, né l'idroperossido vengono consumati



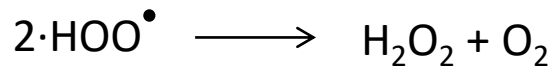
Ossidazione del CO



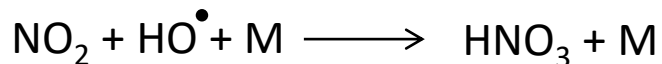
In presenza di basse concentrazioni di NO, tramite reazione con ozono viene rigenerato il radicale ossidrile, oppure si può formare acqua ossigenata



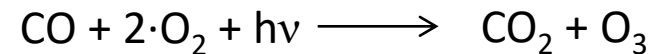
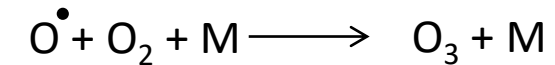
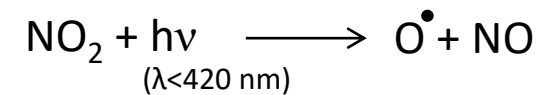
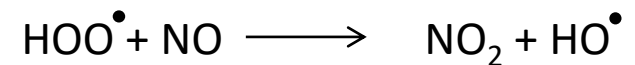
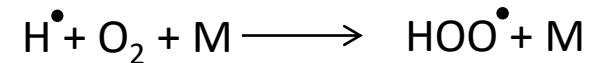
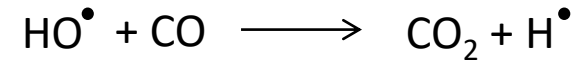
oppure



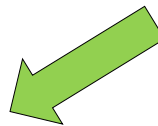
Il ciclo viene terminato se si forma acido nitrico, in presenza di NO₂:



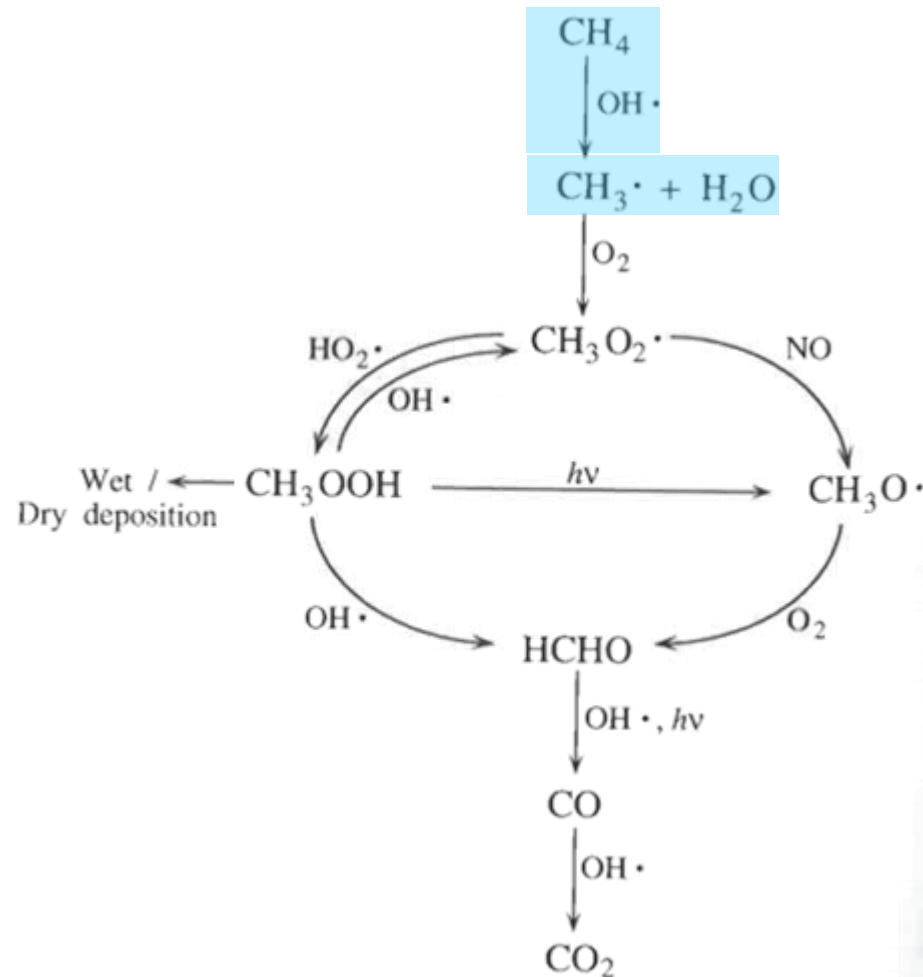
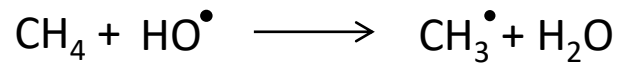
In presenza di alte concentrazioni di NO, le reazioni proseguono



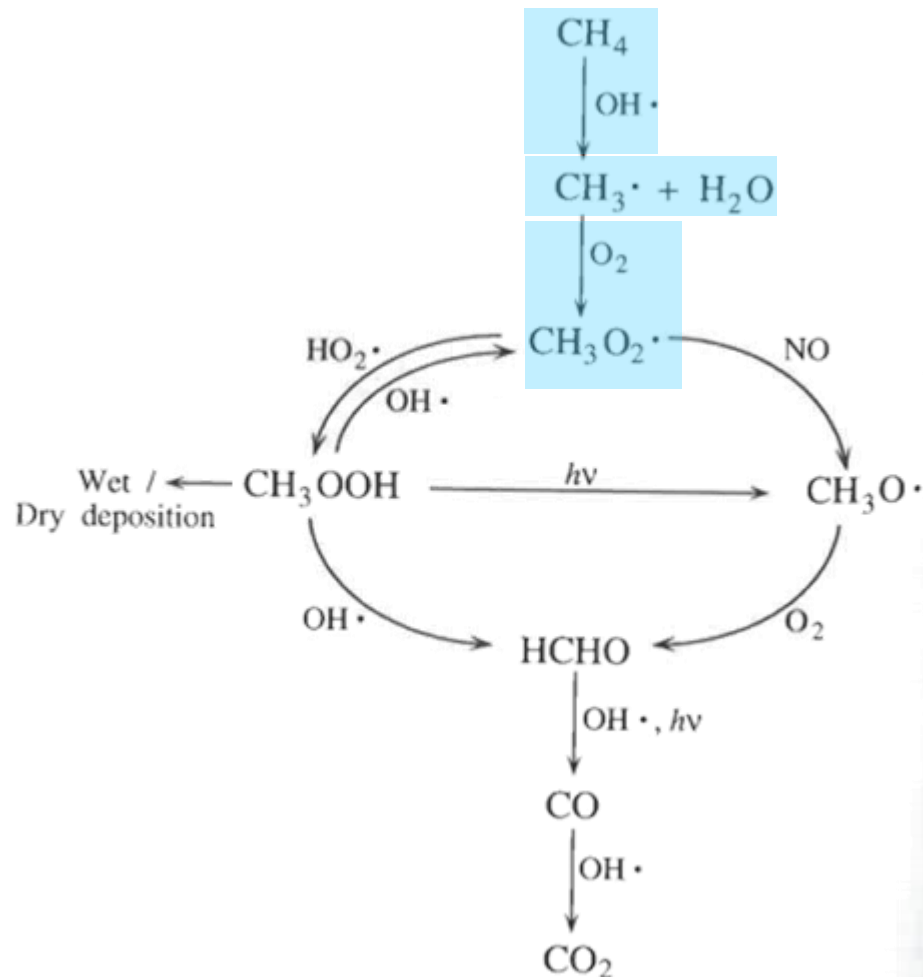
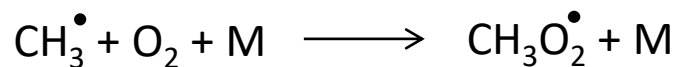
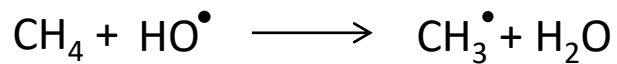
Può essere vista come un'ossidazione catalitica di CO a CO₂ perché né il radicale ossidrile, né l'idroperossido vengono consumati



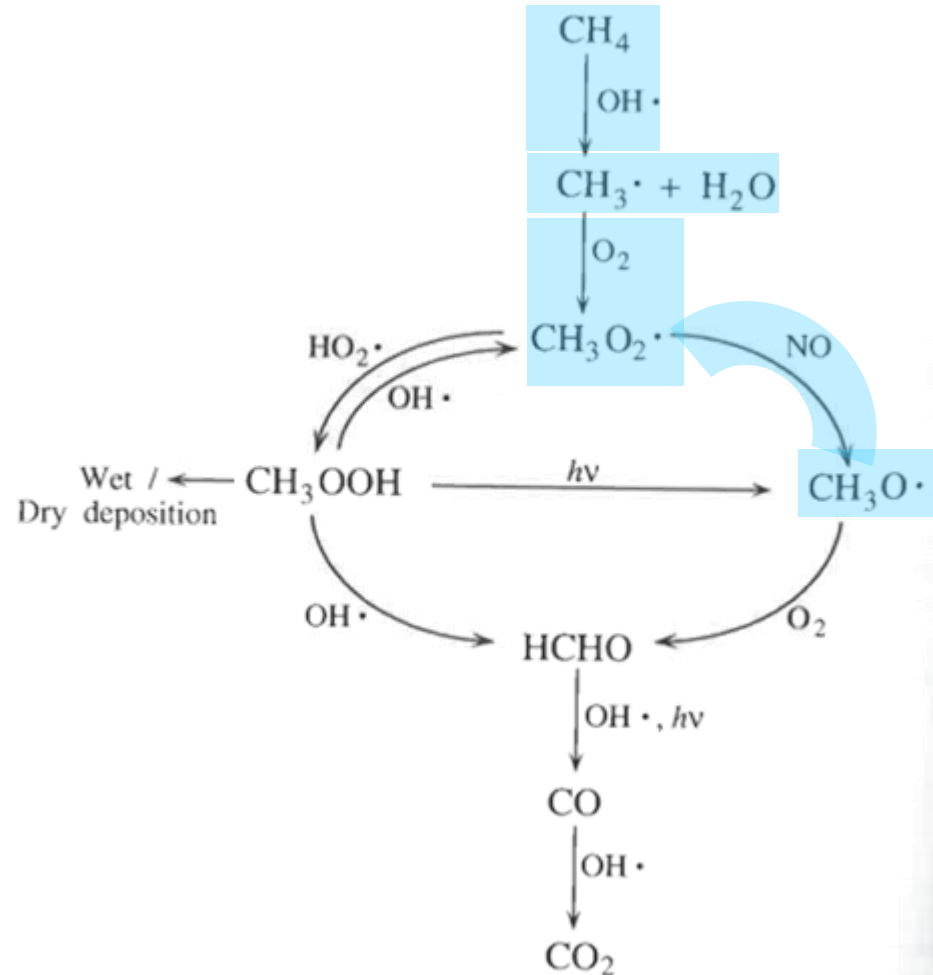
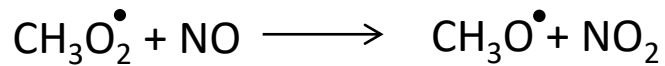
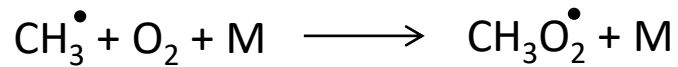
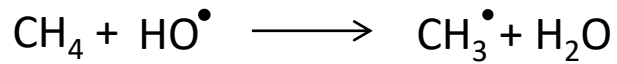
Ciclo di ossidazione del metano



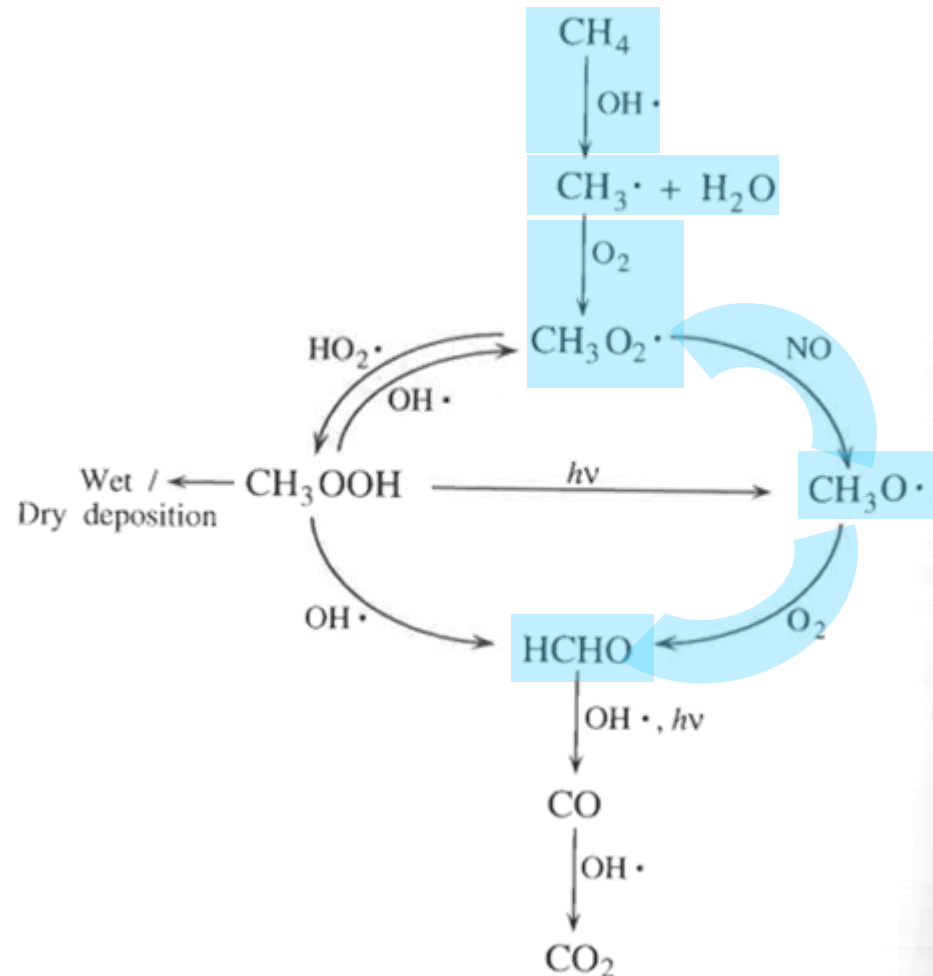
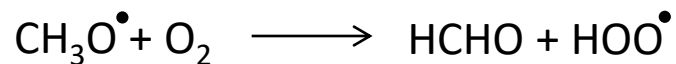
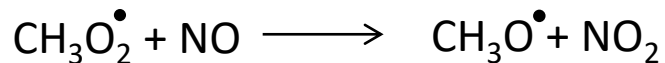
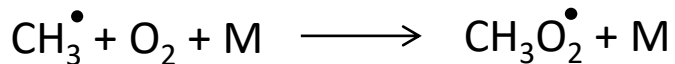
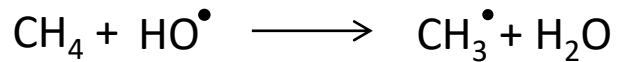
Ciclo di ossidazione del metano



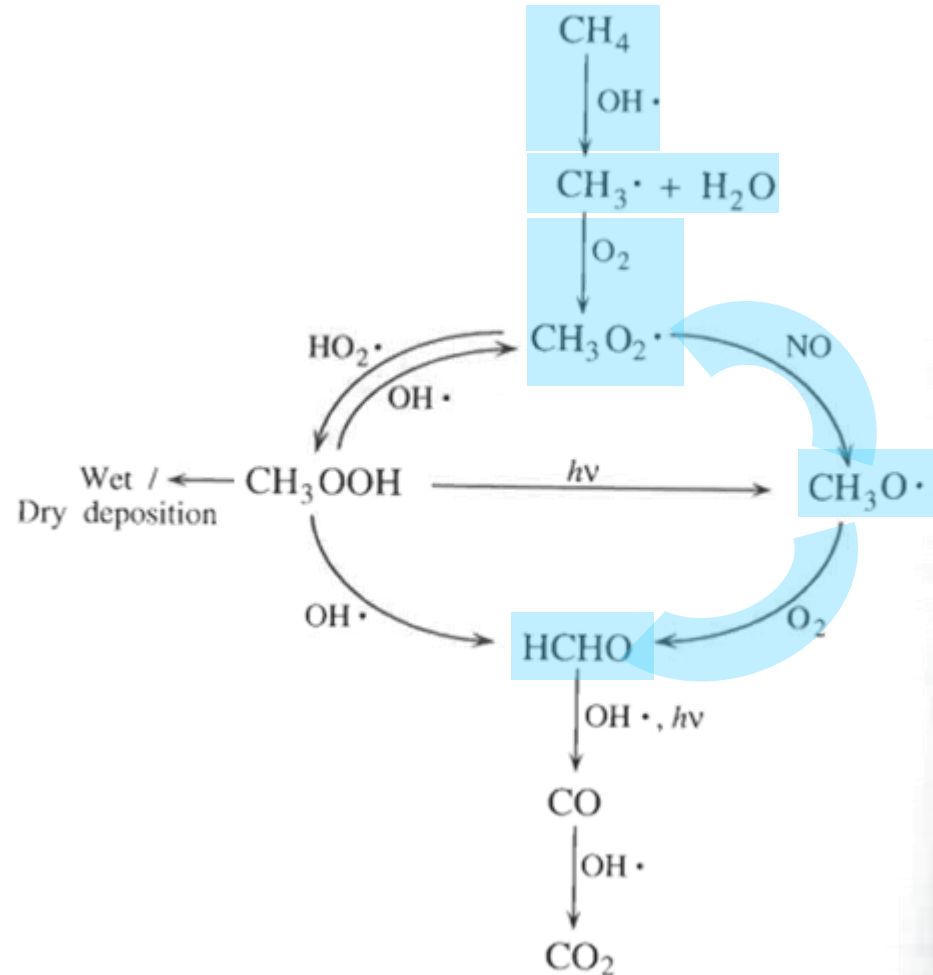
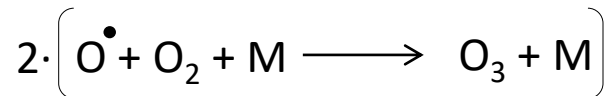
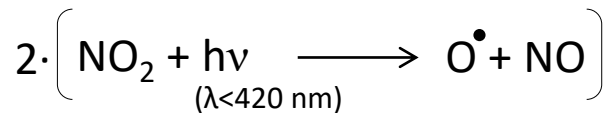
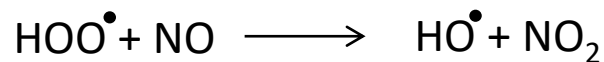
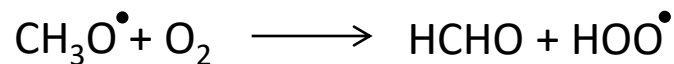
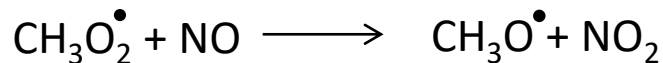
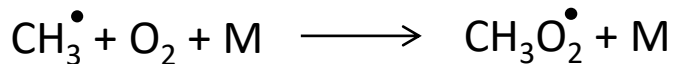
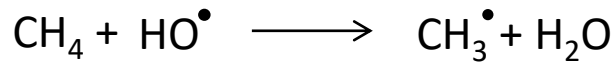
Ciclo di ossidazione del metano



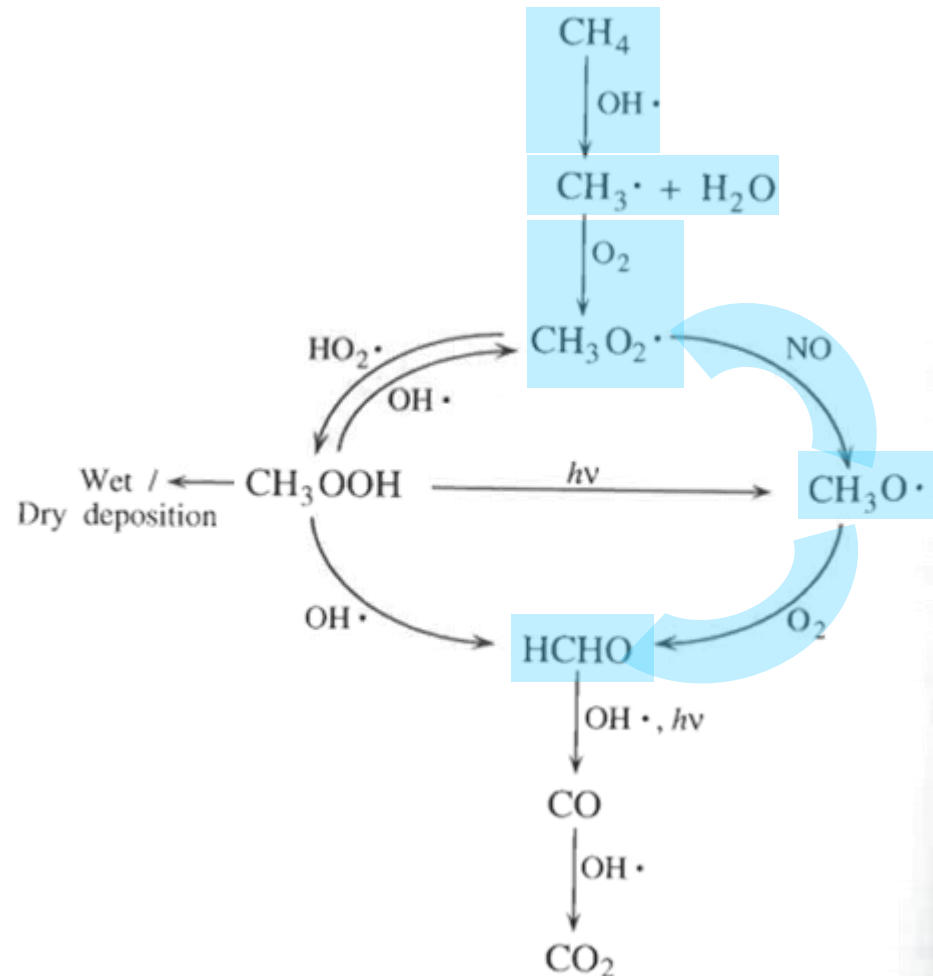
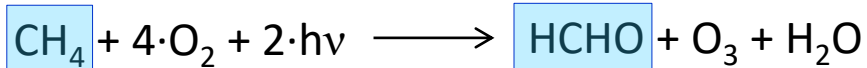
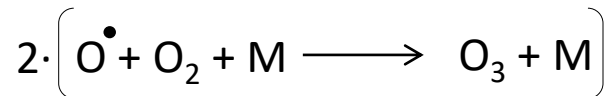
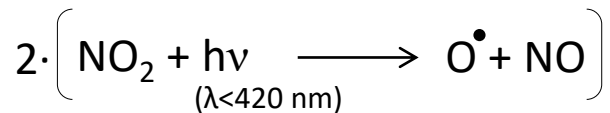
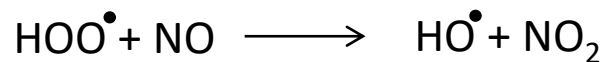
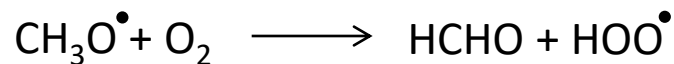
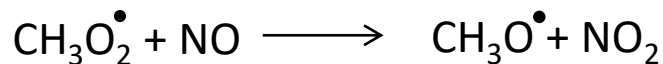
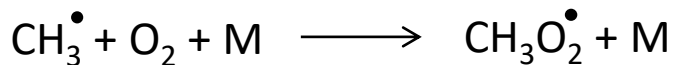
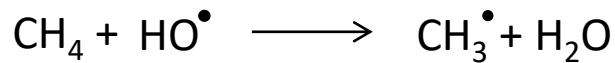
Ciclo di ossidazione del metano



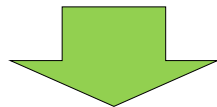
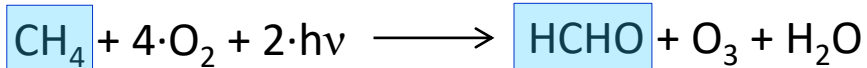
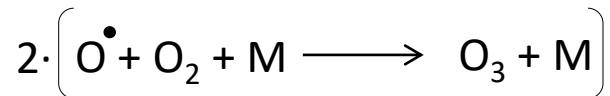
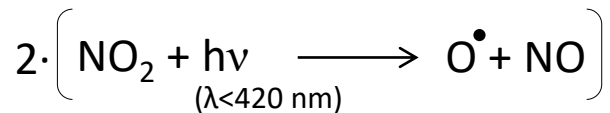
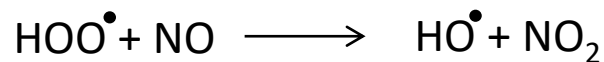
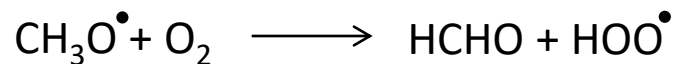
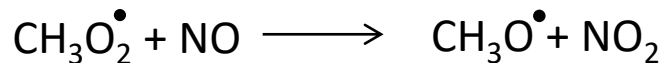
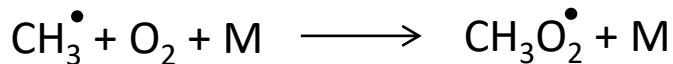
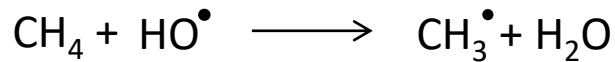
Ciclo di ossidazione del metano



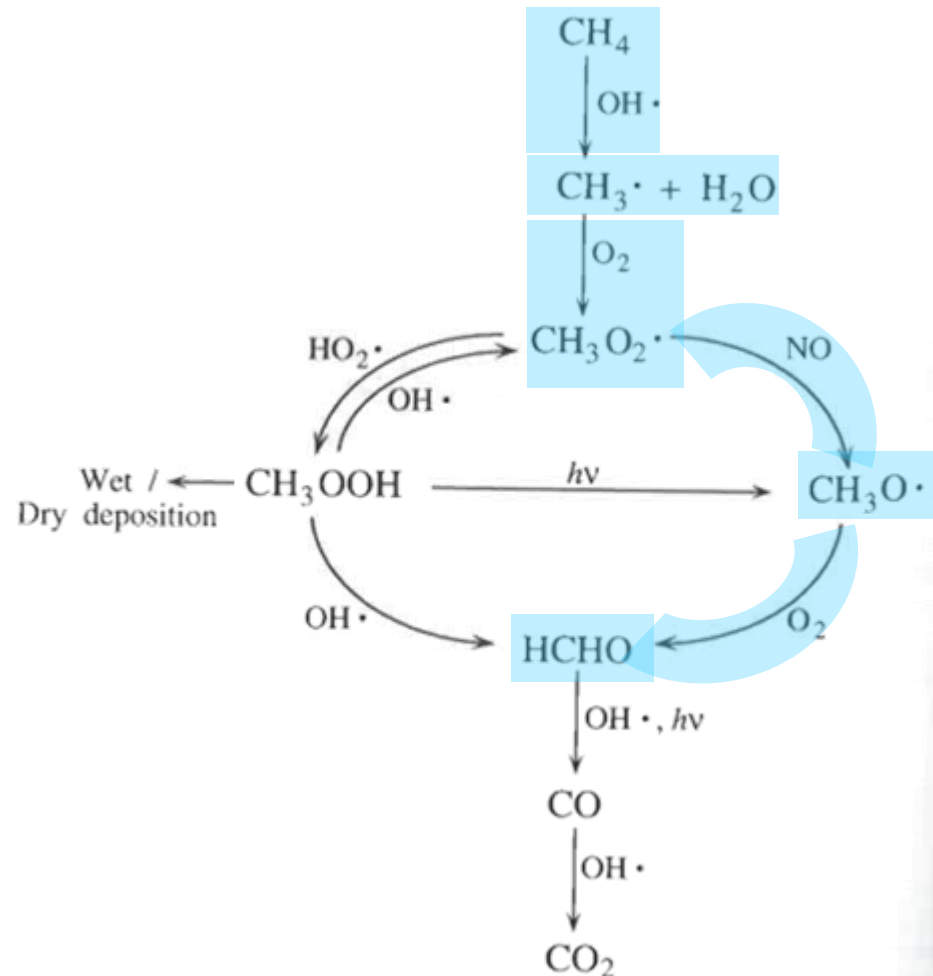
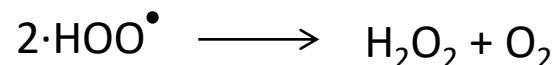
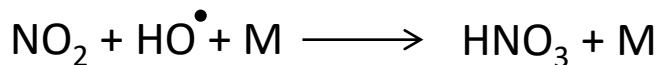
Ciclo di ossidazione del metano



Ciclo di ossidazione del metano

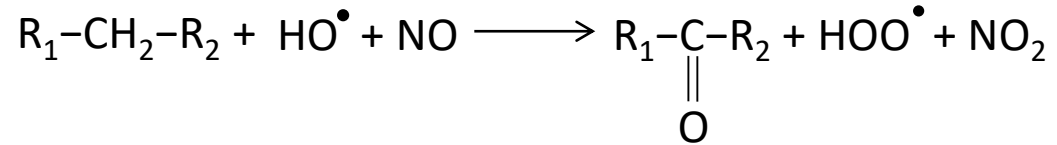
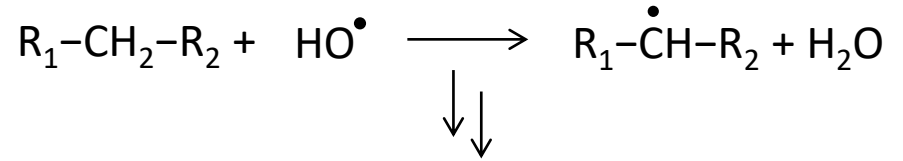


Il ciclo viene terminato se si forma acido nitrico, oppure acqua ossigenata:



Ossidazione di alcani

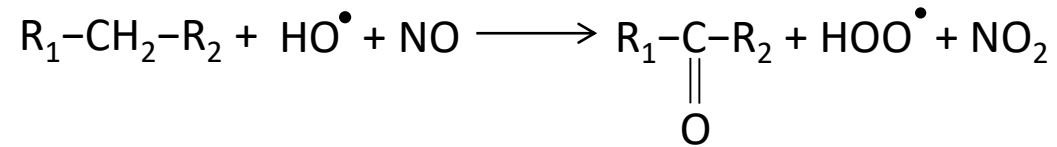
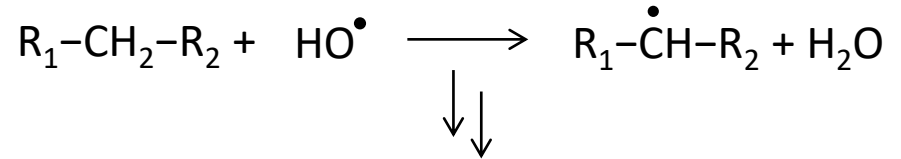
L'ossidazione di alcani inizia allo stesso modo che per il metano, con l'estrazione di un idrogeno da parte del radicale ossidrile. Vengono prodotti aldeidi o chetoni.



Se $\text{R}_2 = \text{H}$ si ottiene un'aldeide

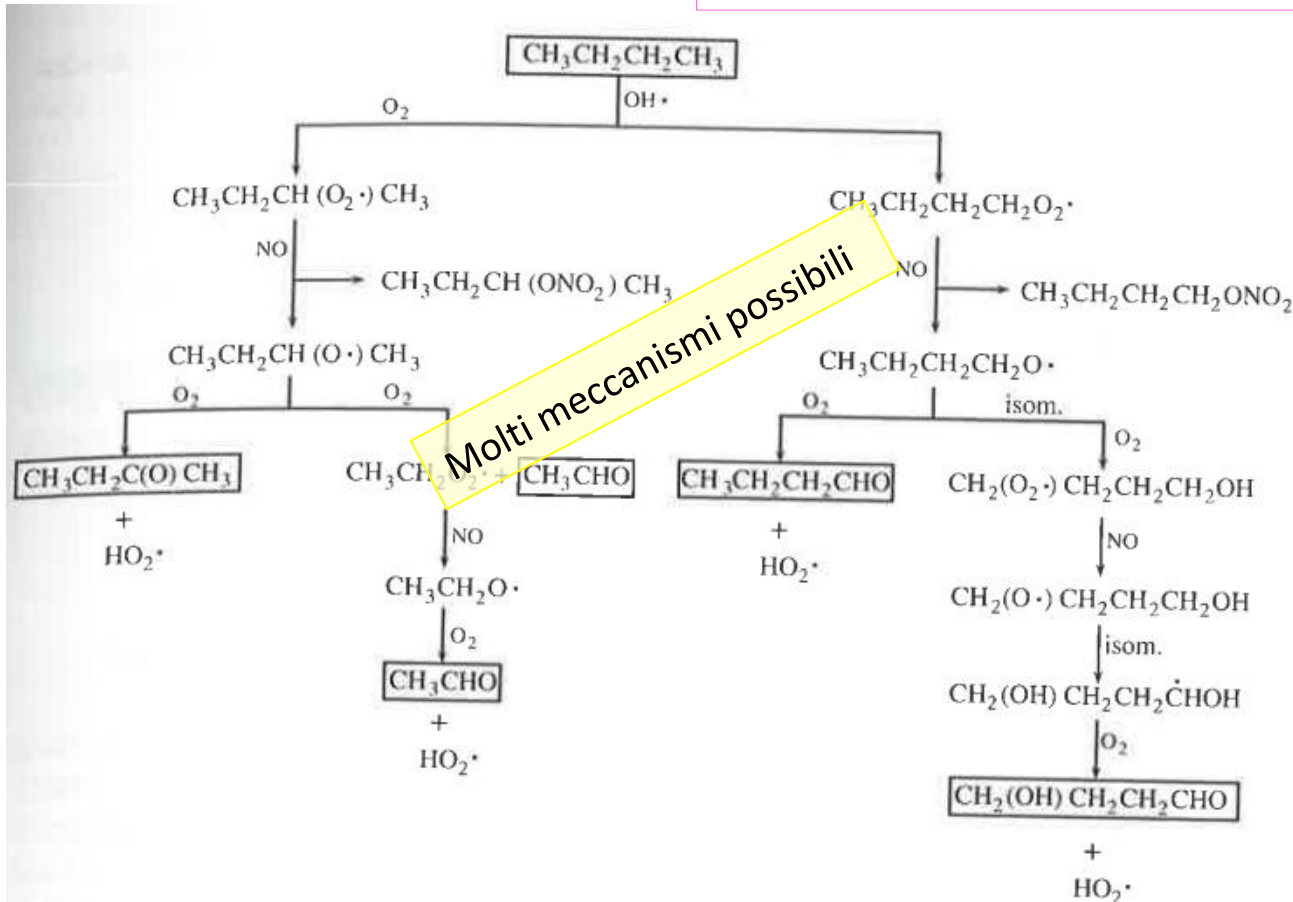
Ossidazione di alcani

L'ossidazione di alcani inizia allo stesso modo che per il metano, con l'estrazione di un idrogeno da parte del radicale ossidrilico. Vengono prodotti aldeidi o chetoni.



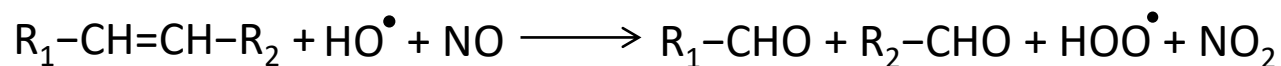
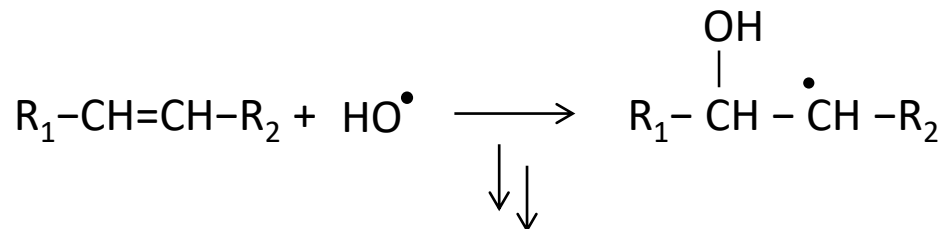
Se $R_2 = H$ si ottiene un'aldeide

Esempio del butano:



Ossidazione di alcheni

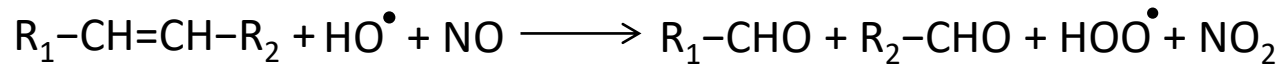
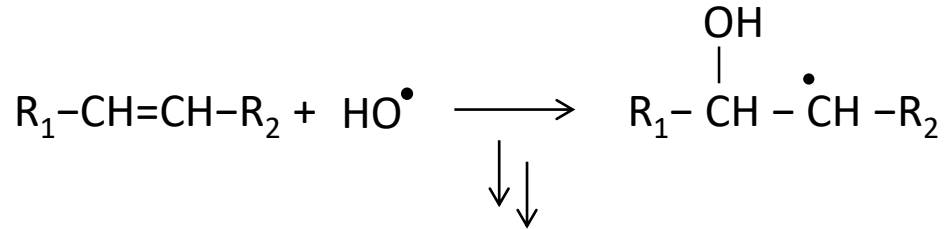
L'ossidazione di alcheni inizia con l'addizione del radicale ossidrile al doppio legame. Vengono prodotte aldeidi.



Se R_1 o $\text{R}_2 = \text{H}$ si ottiene formaldeide

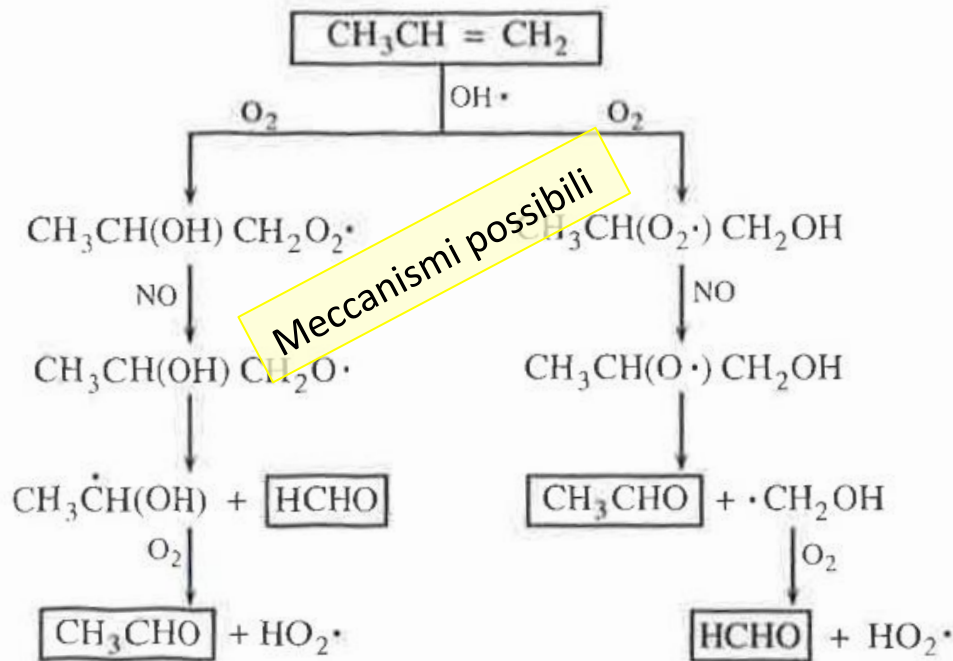
Ossidazione di alcheni

L'ossidazione di alcheni inizia con l'addizione del radicale ossidrile al doppio legame. Vengono prodotte aldeidi.



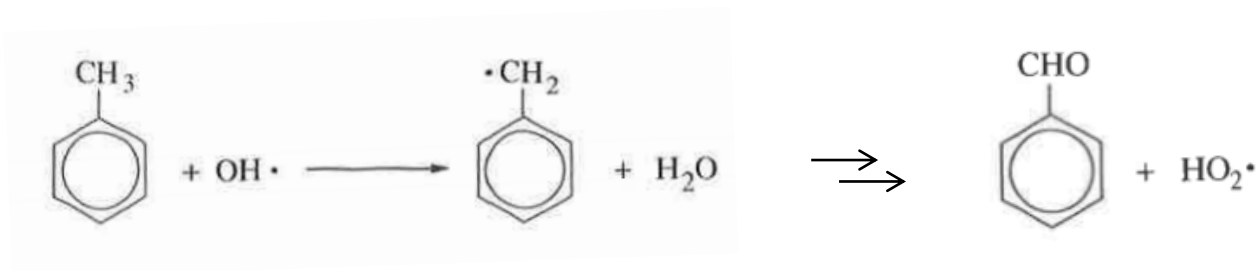
Se R_1 o $R_2 = H$ si ottiene formaldeide

Esempio del propene:



Ossidazione di idrocarburi aromatici

L'ossidazione di idrocarburi aromatici può avvenire per estrazione di un idrogeno (10%) oppure per addizione di radicale ossidrile (90%).

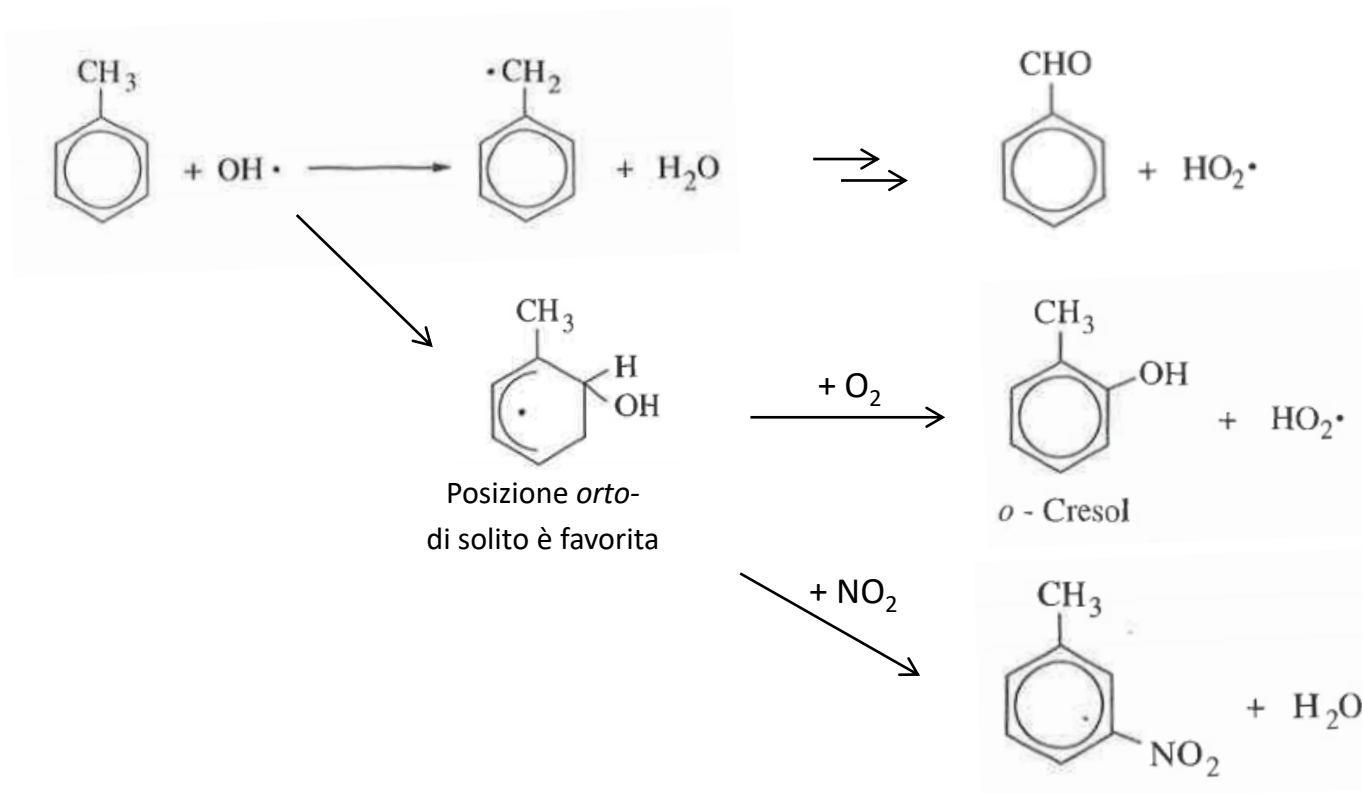


Esempio del toluene:

Ossidazione di idrocarburi aromatici

L'ossidazione di idrocarburi aromatici può avvenire per estrazione di un idrogeno (10%) oppure per addizione di radicale ossidrile (90%).

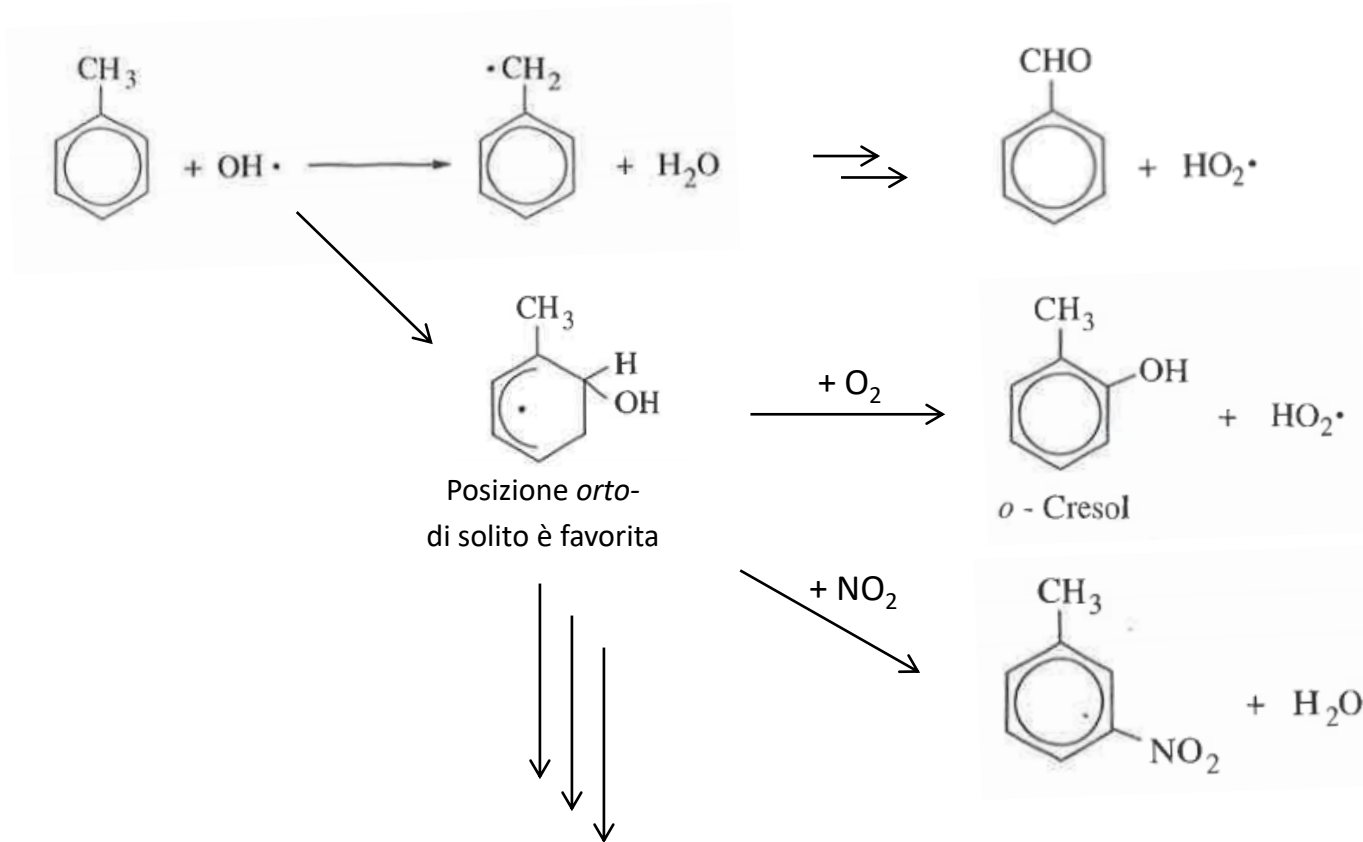
Esempio del toluene:



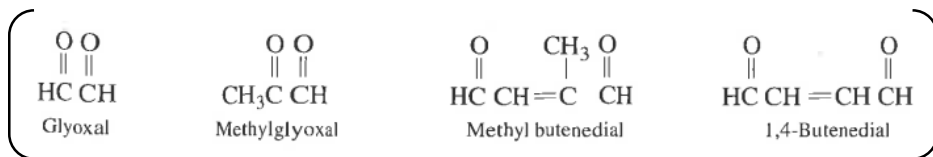
Ossidazione di idrocarburi aromatici

L'ossidazione di idrocarburi aromatici può avvenire per estrazione di un idrogeno (10%) oppure per addizione di radicale ossidrile (90%).

Esempio del toluene:



Prodotti di
ossidazione/frammentazione,
es. dialdeidi e chetoaldeidi



Ozono troposferico

Fonti: reazioni chimiche *in situ*; migrazione dell'ozono stratosferico (è residuale);

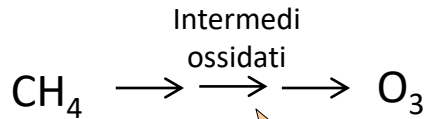
Pozzi: decomposizione chimica *in situ*; deposizione secca sulla superficie terrestre.

Ozono troposferico

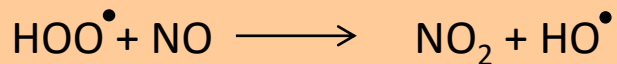
Fonti: reazioni chimiche *in situ*; migrazione dell'ozono stratosferico (è residuale);

Pozzi: decomposizione chimica *in situ*; deposizione secca sulla superficie terrestre.

La **fonte** principale di O_3 da reazioni chimiche *in situ* è quella derivata dal ciclo di ossidazione del metano:



Ruolo fondamentale di NO, che reagisce con il radicale idroperossido:

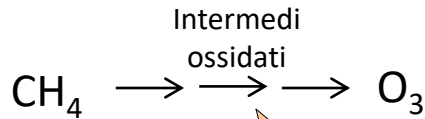


Ozono troposferico

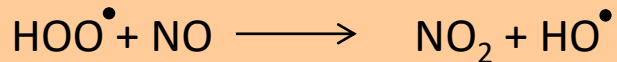
Fonti: reazioni chimiche *in situ*; migrazione dell'ozono stratosferico (è residuale);

Pozzi: decomposizione chimica *in situ*; deposizione secca sulla superficie terrestre.

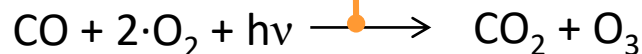
La **fonte** principale di O_3 da reazioni chimiche *in situ* è quella derivata dal ciclo di ossidazione del metano:



Ruolo fondamentale di NO, che reagisce con il radicale idroperossido:



Altra fonte di O_3 deriva dall'ossidazione del CO:

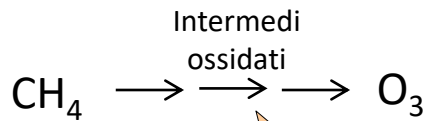


Ozono troposferico

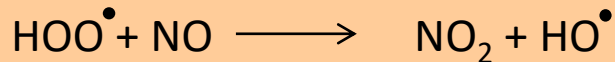
Fonti: reazioni chimiche *in situ*; migrazione dell'ozono stratosferico (è residuale);

Pozzi: decomposizione chimica *in situ*; deposizione secca sulla superficie terrestre.

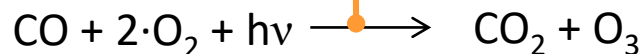
La **fonte** principale di O_3 da reazioni chimiche *in situ* è quella derivata dal ciclo di ossidazione del metano:



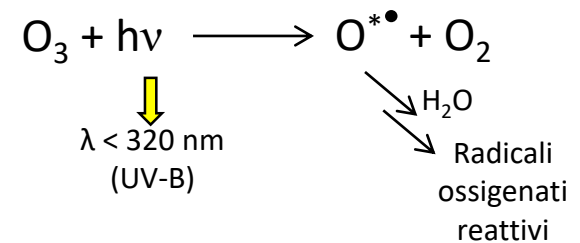
Ruolo fondamentale di NO, che reagisce con il radicale idroperossido:



Altra fonte di O_3 deriva dall'ossidazione del CO:



La principale reazione chimica di **decomposizione** *in situ* è per via fotolitica:

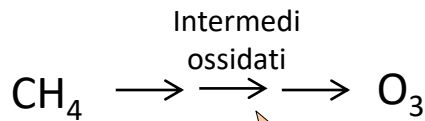


Ozono troposferico

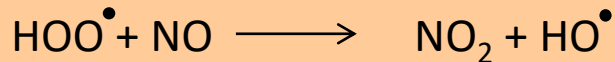
Fonti: reazioni chimiche *in situ*; migrazione dell'ozono stratosferico (è residuale);

Pozzi: decomposizione chimica *in situ*; deposizione secca sulla superficie terrestre.

La **fonte** principale di O_3 da reazioni chimiche *in situ* è quella derivata dal ciclo di ossidazione del metano:



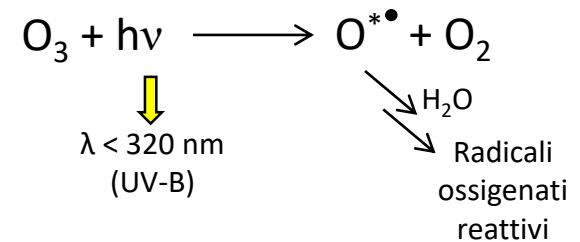
Ruolo fondamentale di NO, che reagisce con il radicale idroperossido:



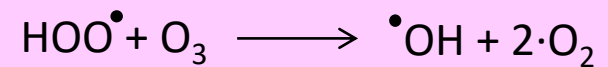
Altra fonte di O_3 deriva dall'ossidazione del CO:



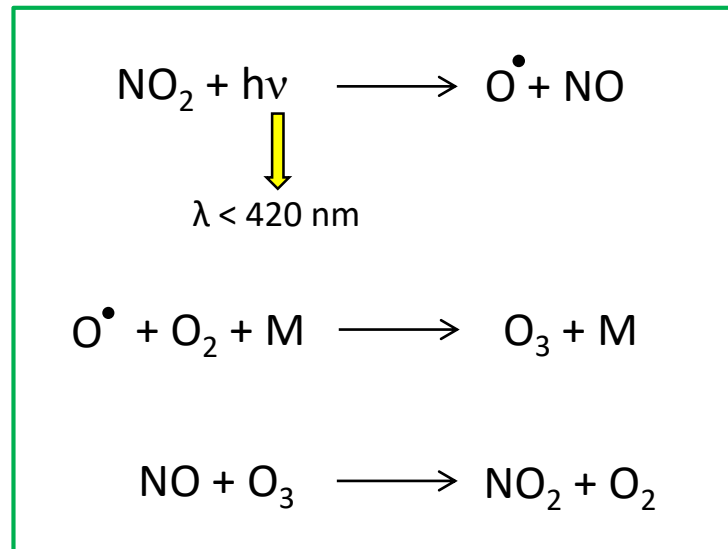
La principale reazione chimica di **decomposizione** *in situ* è per via fotolitica:



A concentrazioni basse di NO, invece si ha **decomposizione** chimica:

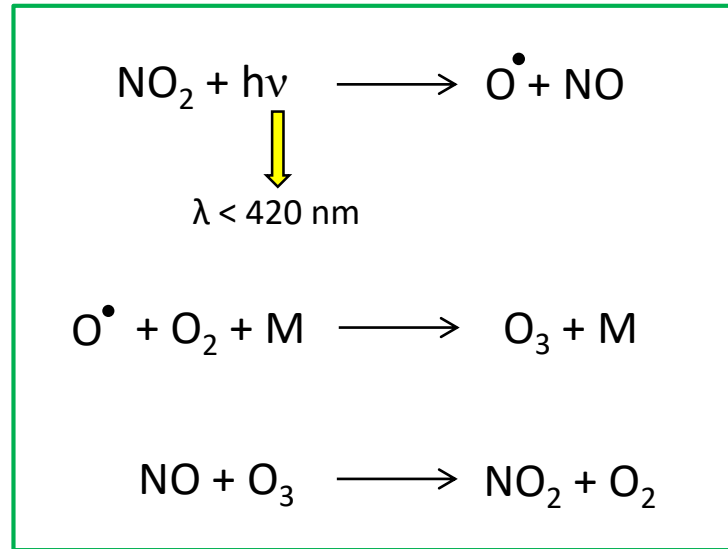


Ciclo fotostazionario dell'ozono troposferico

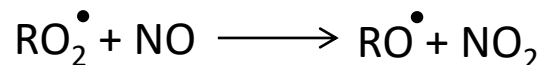


- In una atmosfera "pulita" questo ciclo si trova in uno **stato quasi-stazionario**, poiché l'ossigeno molecolare è presente in eccesso e l'ossigeno radicale monoatomico reagisce nella seconda reazione ad una velocità simile a quella di formazione durante la prima reazione.
- Può anche essere denominato **ciclo nullo** (*null cycle*) poiché non c'è né aumento né diminuzione netta di alcuna delle specie coinvolte.

Ciclo fotostazionario dell'ozono troposferico



- In una atmosfera "pulita" questo ciclo si trova in uno **stato quasi-stazionario**, poiché l'ossigeno molecolare è presente in eccesso e l'ossigeno radicale monoatomico reagisce nella seconda reazione ad una velocità simile a quella di formazione durante la prima reazione.
- Può anche essere denominato **ciclo nullo** (*null cycle*) poiché non c'è né aumento né diminuzione netta di alcuna delle specie coinvolte.
- Lo stato quasi-stazionario viene **perturbato** quando **NO reagisce con altre specie** presenti nell'atmosfera e quindi viene **sottratto** alla reazione di decomposizione dell'ozono (terza reazione).

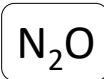


$\text{O}_3 \uparrow$ Aumenta!

Specie azotate presenti nella troposfera



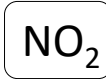
Azoto
molecolare



Protossido
di azoto

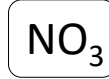


Ossido di
azoto

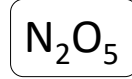


Biossido di
azoto

NO_x



Triossido
di azoto



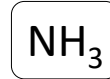
Anidride
nitrica



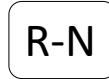
Acido
nitroso



Acido
nitrico



Ammoniaca



Composti
organici
azotati

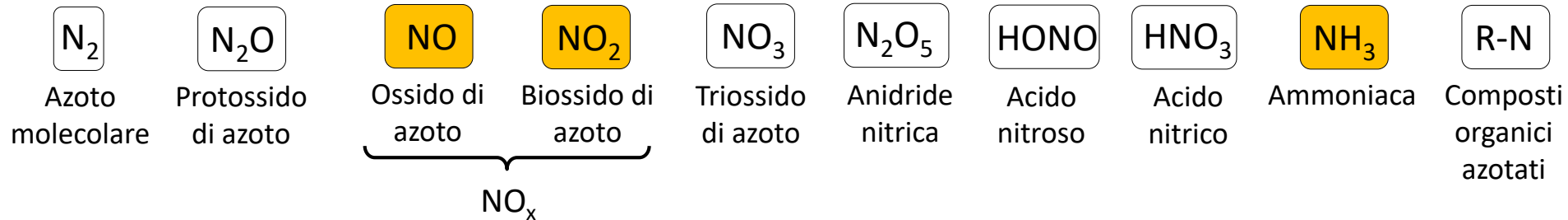
Specie azotate presenti nella troposfera

N_2	N_2O	NO	NO_2	NO_3	N_2O_5	HONO	HNO_3	NH_3	R-N
Azoto molecolare	Protossido di azoto	Ossido di azoto	Biossido di azoto	Triossido di azoto	Anidride nitrica	Acido nitroso	Acido nitrico	Ammoniaca	Composti organici azotati
		NO_x							

Le principali emissioni naturali sono dovute a:

- denitrificazione batterica (N_2O e in parte N_2 , a partire da NO_3^- nel suolo);
- deiezioni animali e decomposizione di resti organici nel suolo e nelle acque (NH_3);
- incendi delle foreste (NO_x e NH_3);
- eruzioni dei vulcani (NO_x).

Specie azotate presenti nella troposfera



Le principali emissioni naturali sono dovute a:

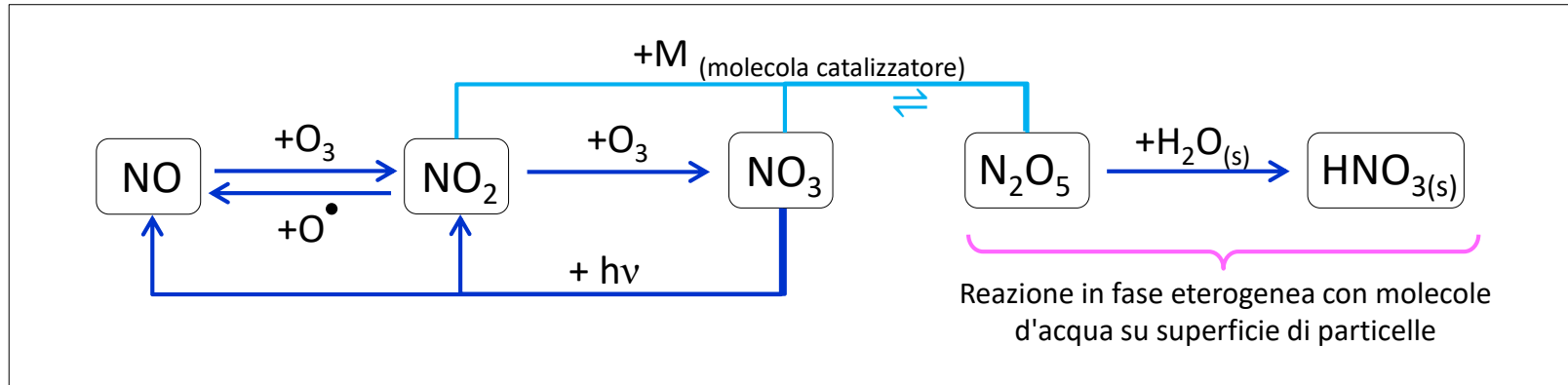
- denitrificazione batterica (N_2O e in parte N_2 , a partire da NO_3^- nel suolo);
- deiezioni animali e decomposizione di resti organici nel suolo e nelle acque (NH_3);
- incendi delle foreste (NO_x e NH_3);
- eruzioni dei vulcani (NO_x).

Le principali fonti antropogeniche sono:

- combustione nel motore a scoppio di autoveicoli (NO_x);
- combustione in impianti domestici e industriali (NO_x);
- combustione di biomasse (NO_x e NH_3);
- deiezioni animali di allevamento (NH_3);
- trattamento di liquami fognari (NH_3);
- fertilizzanti azotati (NH_3).

Reattività degli ossidi di azoto nella troposfera

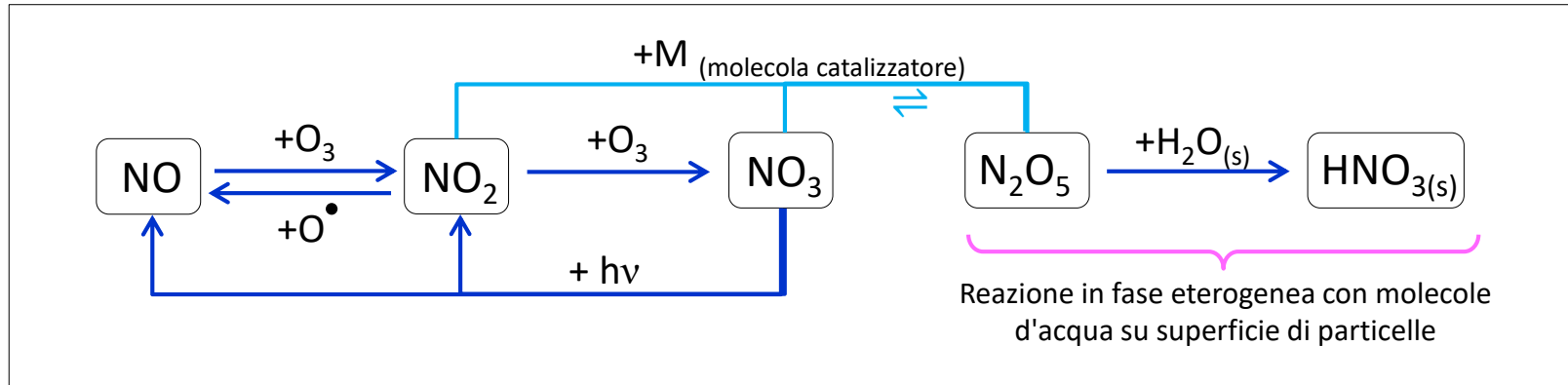
Parte della reattività avviene come nella stratosfera:



➡ Nella troposfera c'è una maggiore presenza di umidità, quindi sono possibili più tipi di reazioni in fase acquosa (es. nelle nuvole).

Reattività degli ossidi di azoto nella troposfera

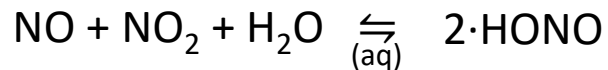
Parte della reattività avviene come nella stratosfera:



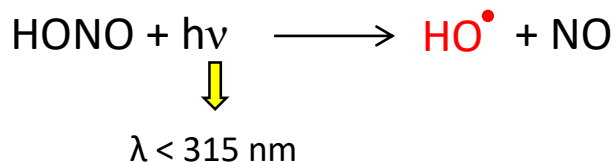
Nella troposfera c'è una maggiore presenza di umidità, quindi sono possibili più tipi di reazioni in fase acquosa (es. nelle nuvole).

Acido nitroso

a) si accumula di notte secondo la reazione:

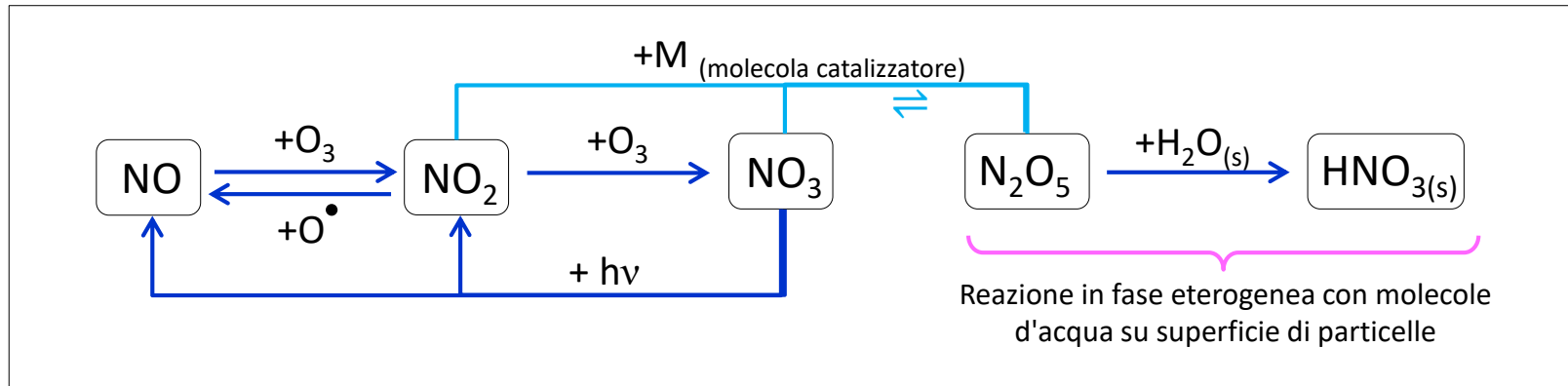


b) viene fotodecomposto di giorno:



Reattività degli ossidi di azoto nella troposfera

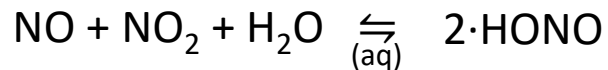
Parte della reattività avviene come nella stratosfera:



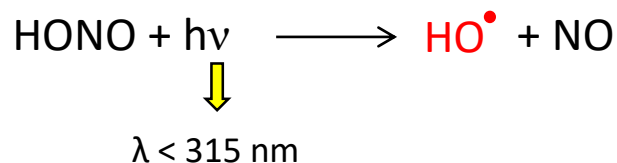
Nella troposfera c'è una maggiore presenza di umidità, quindi sono possibili più tipi di reazioni in fase acquosa (es. nelle nuvole).

Acido nitroso

a) si accumula di notte secondo la reazione:

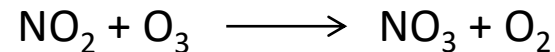


b) viene fotodecomposto di giorno:

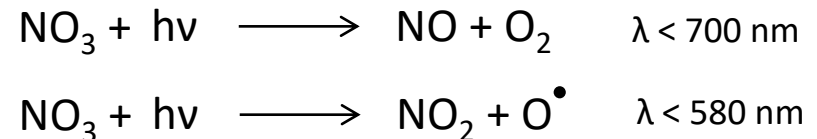


Radicale nitrato

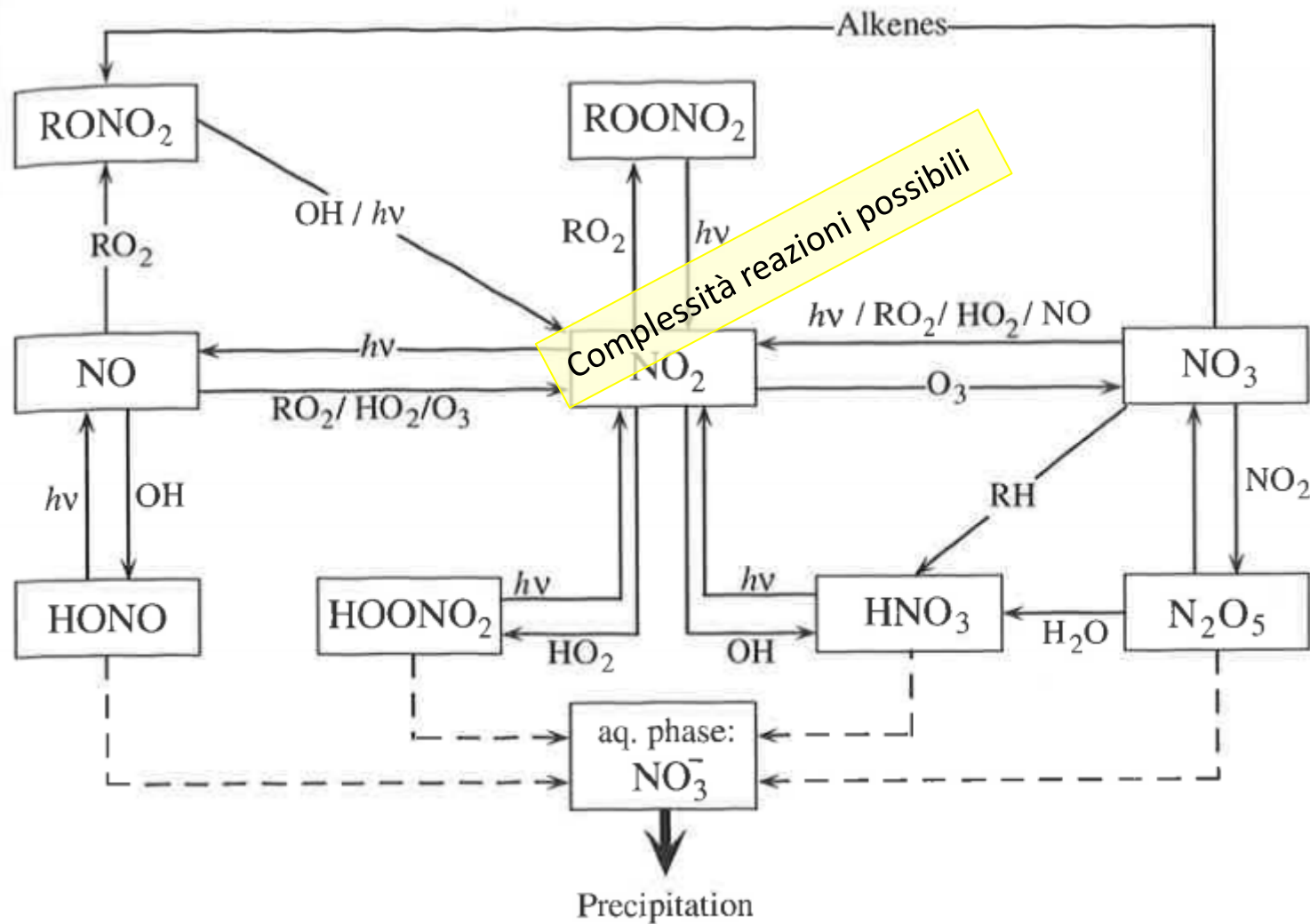
a) si accumula maggiormente di notte secondo la reazione:



b) viene fotodecomposto di giorno:

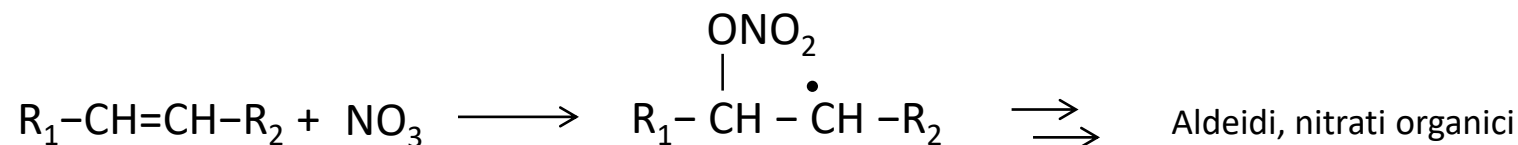


Riassunto reazioni degli ossidi di azoto



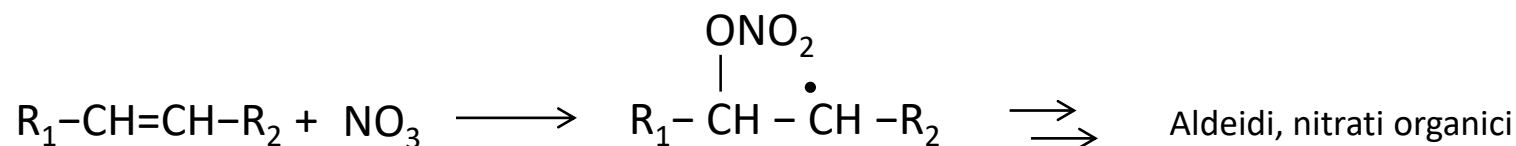
Reazione del radicale nitrato con alcheni

Il radicale nitrato (NO_3) reagisce con alcheni più lentamente rispetto al radicale ossidrile, quindi la sua attività aumenta di notte quando la concentrazione del radicale ossidrile diminuisce a causa dell'assenza di reazioni fotochimiche che lo generano.

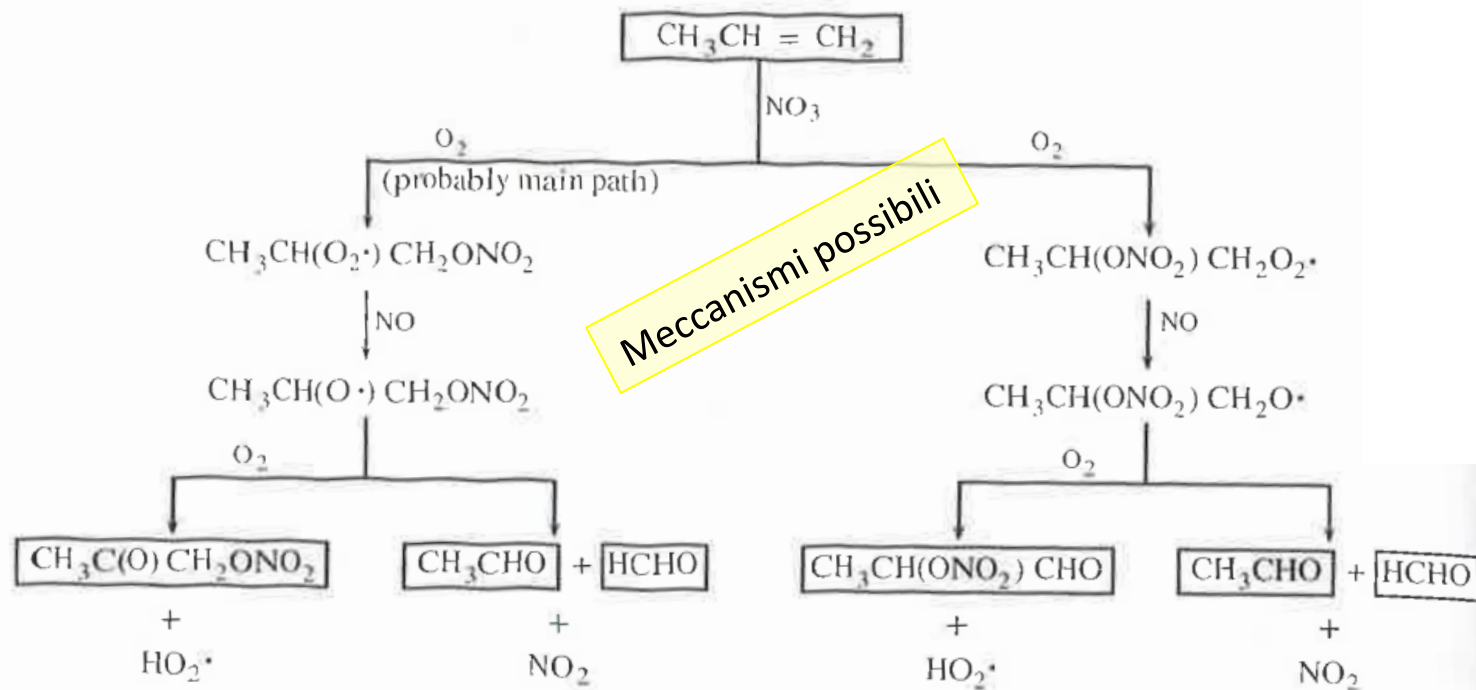


Reazione del radicale nitrato con alcheni

Il radicale nitrato (NO_3) reagisce con alcheni più lentamente rispetto al radicale ossidrilico, quindi la sua attività aumenta **di notte** quando la concentrazione del radicale ossidrilico diminuisce a causa dell'assenza di reazioni fotochimiche che lo generano.

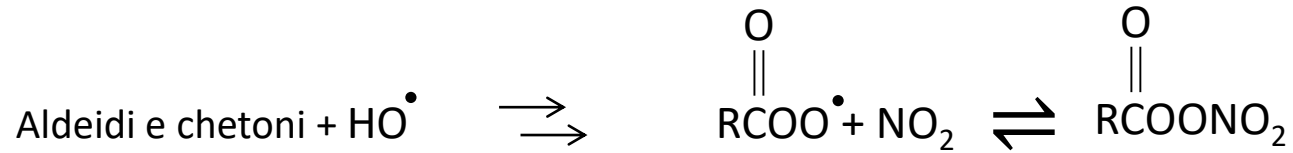


Esempio del propene:



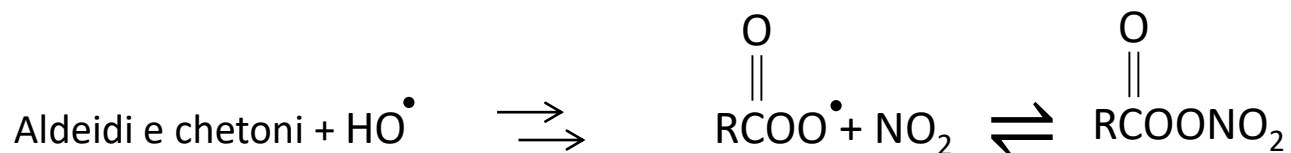
I perossiacilnitrati (PAN)

I PAN vengono prodotti dalla reazione di NO_2 con radicali perossiacilici (prodotti di reazione di aldeidi e chetoni con radicale ossidrile).

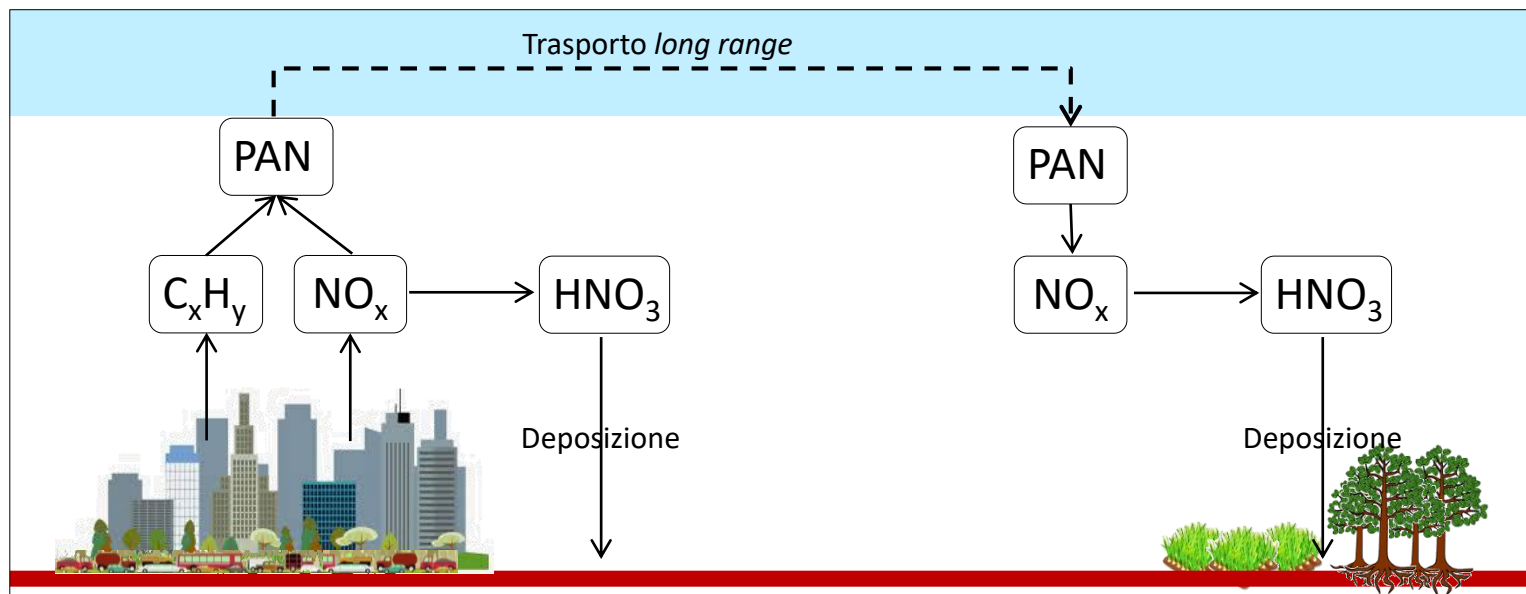


I perossiacilnitrati (PAN)

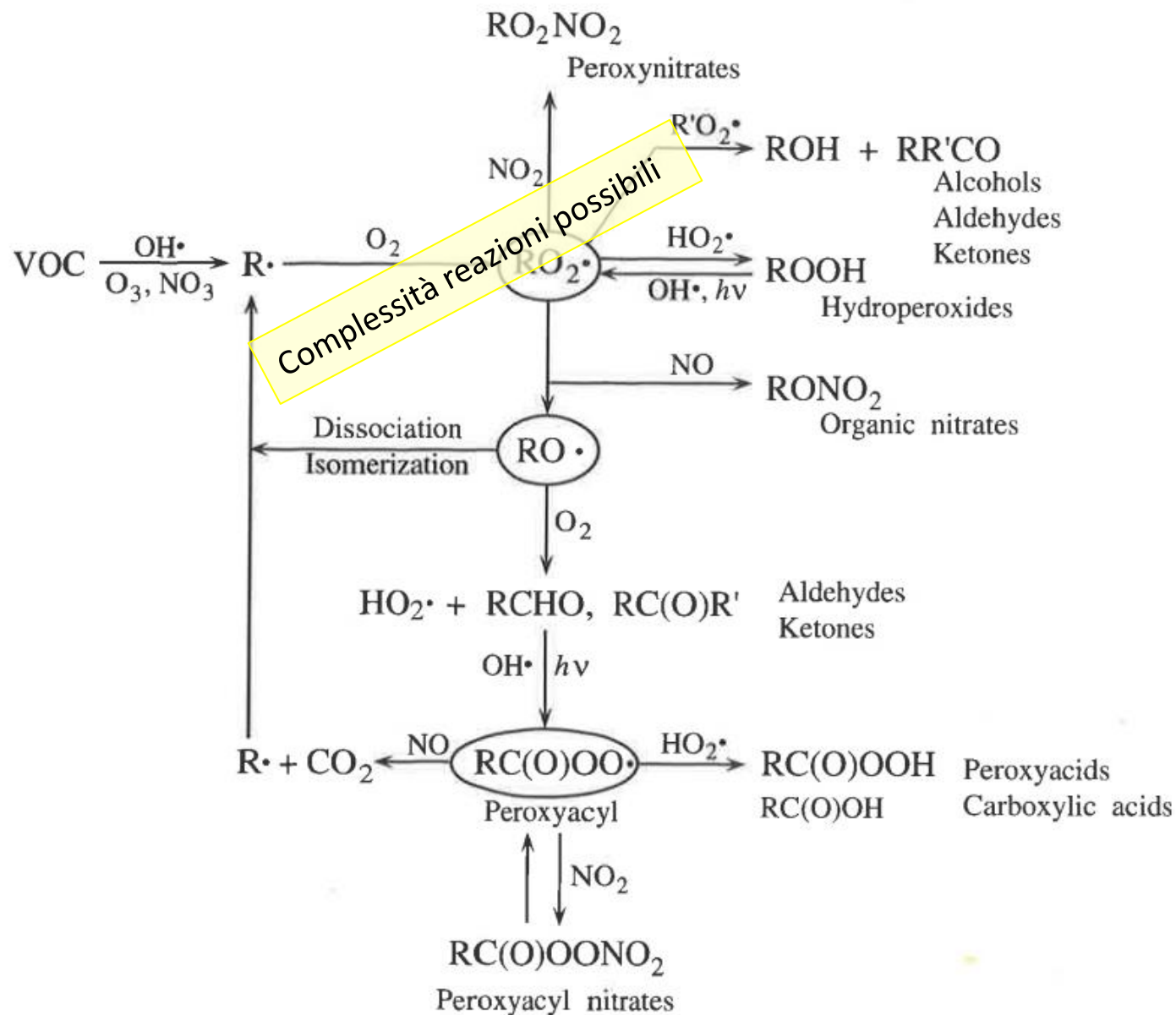
I PAN vengono prodotti dalla reazione di NO_2 con radicali perossiacilici (prodotti di reazione di aldeidi e chetoni con radicale ossidrile).



I PAN sono piuttosto stabili a basse temperature, quindi possono essere trasportati a lunga distanza se si formano o migrano nella parte alta della troposfera.



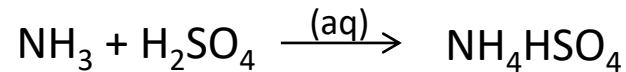
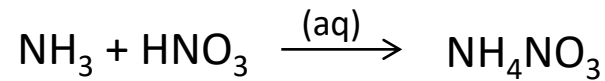
Riassunto reazioni di ossidazione dei VOC



Ammoniaca

L'ammoniaca viene rimossa dall'atmosfera a causa della sua affinità con l'acqua oppure per la sua reattività come base.

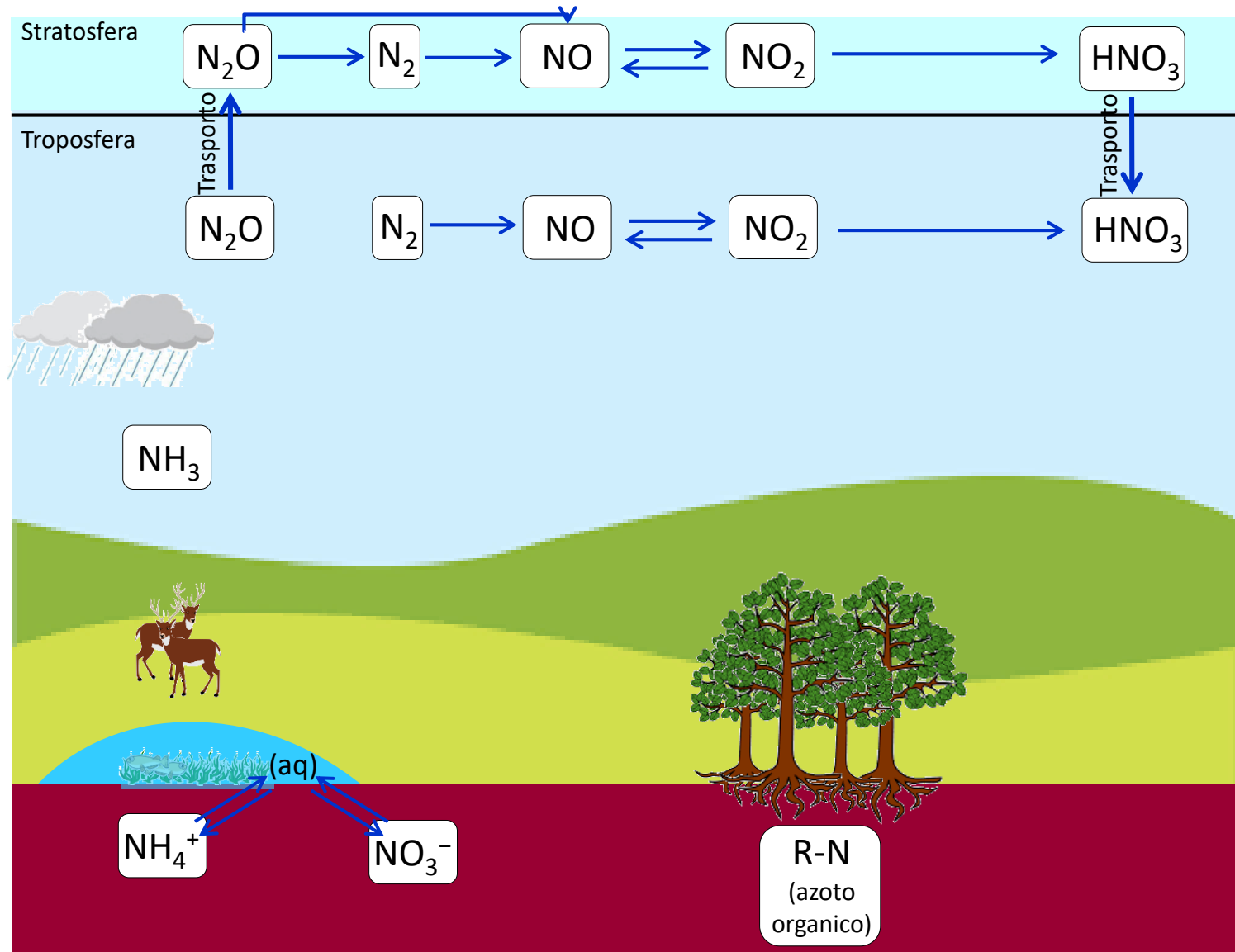
E' una specie chiave nella neutralizzazione di acidi presenti nell'aerosol atmosferico che genera nitrati e solfati:



I sali di ammonio sono molto corrosivi.

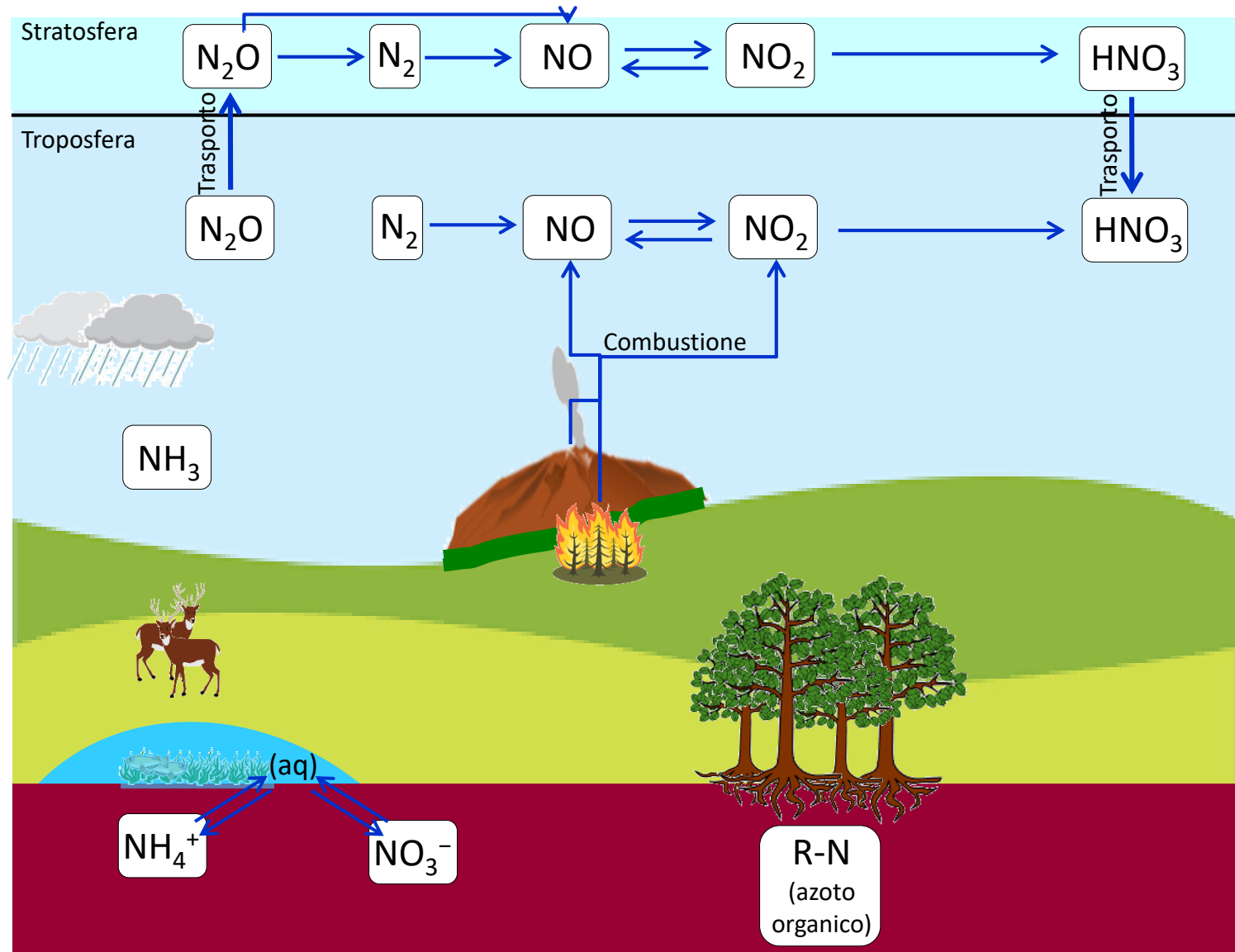
Ciclo biogeochimico dell'azoto

In assenza di contributo antropico:



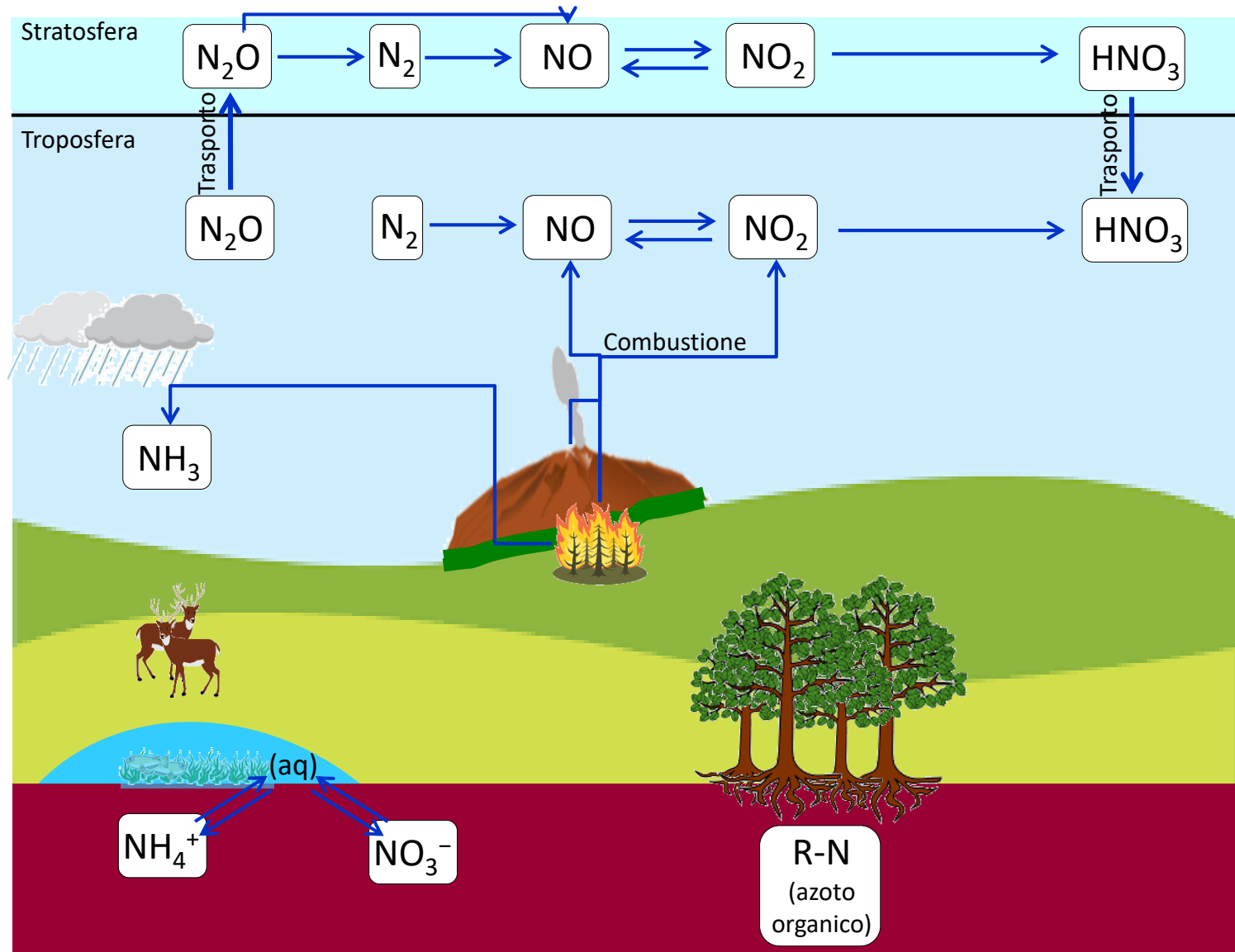
Ciclo biogeochimico dell'azoto

In assenza di contributo antropico:



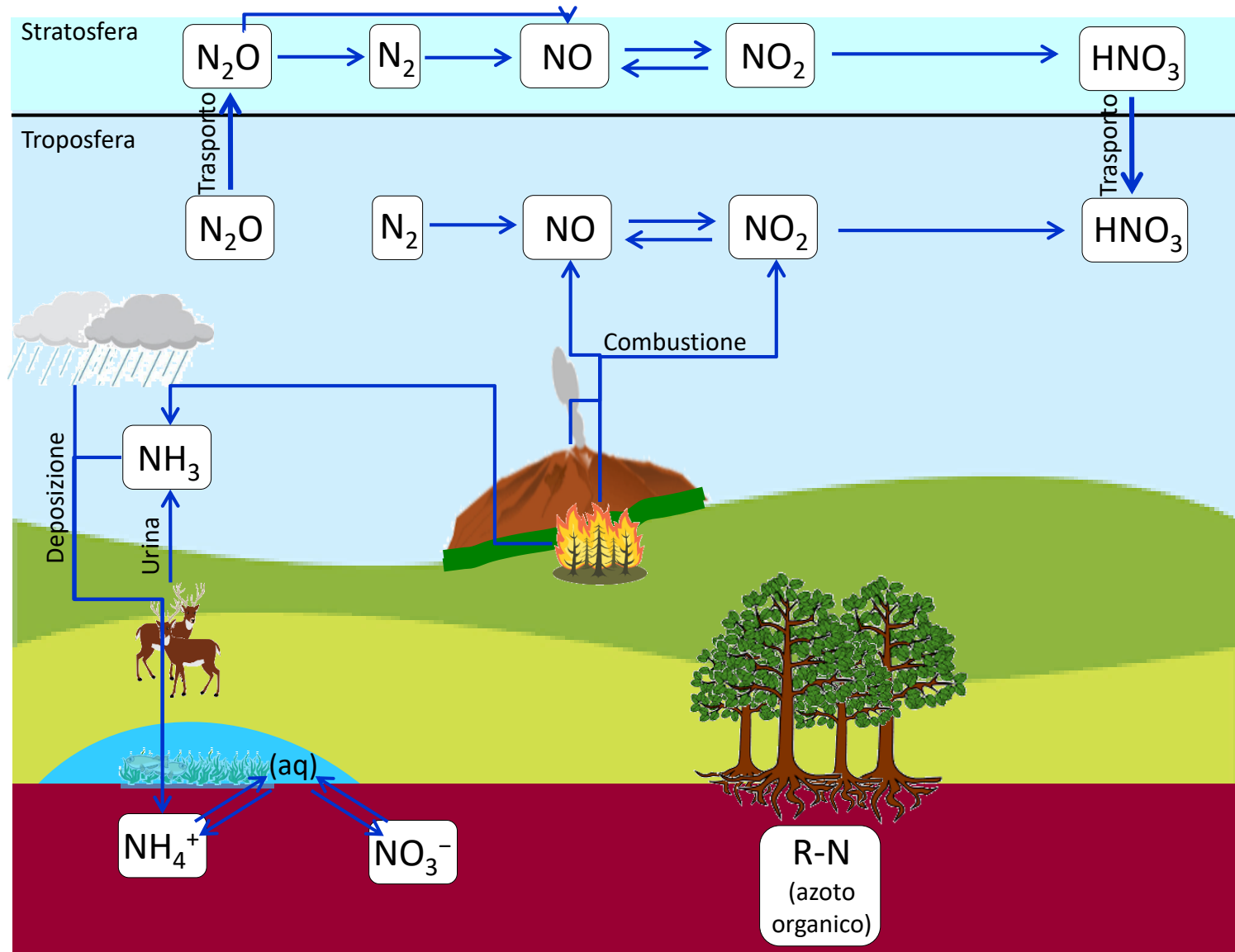
Ciclo biogeochimico dell'azoto

In assenza di contributo antropico:



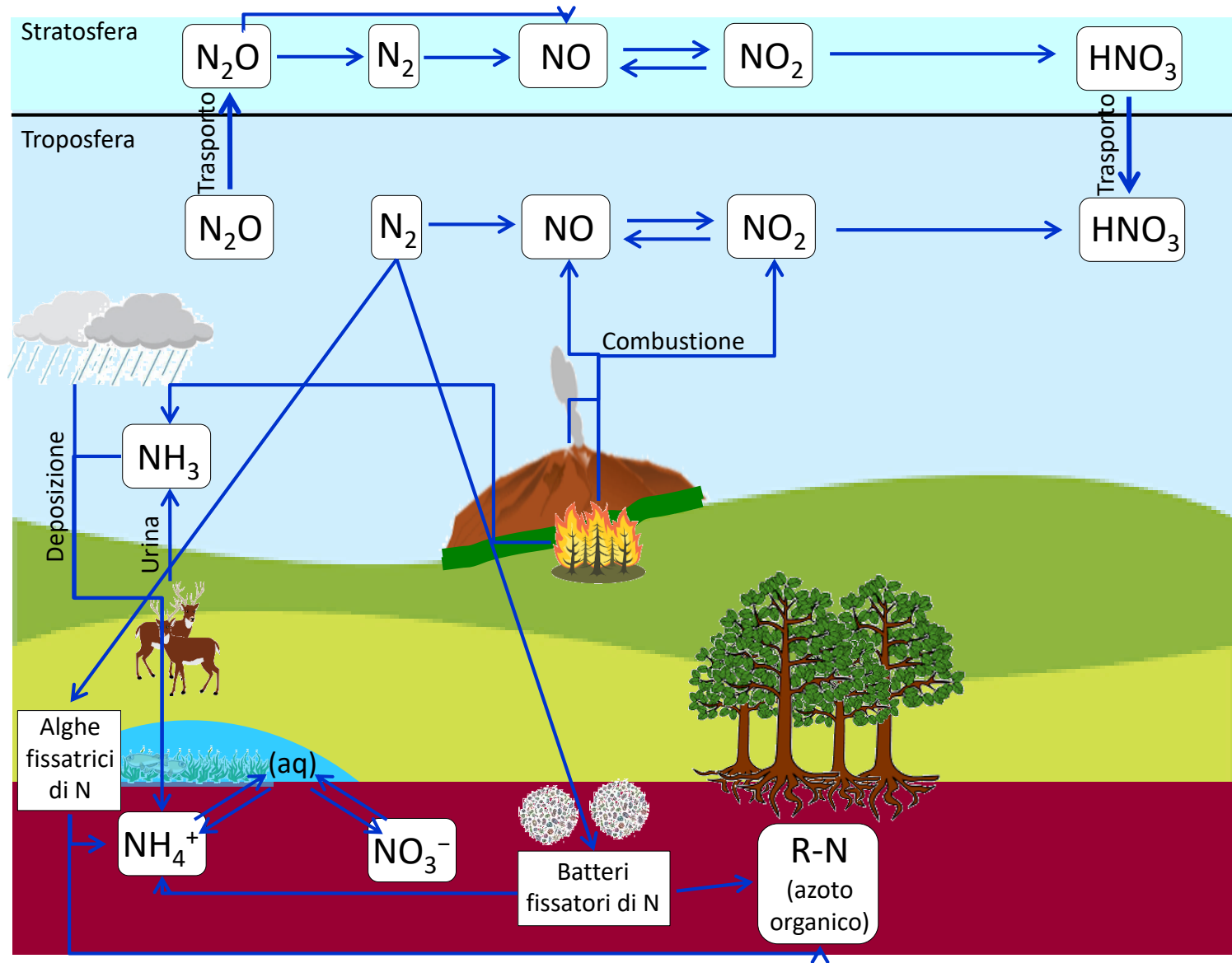
Ciclo biogeochimico dell'azoto

In assenza di contributo antropico:



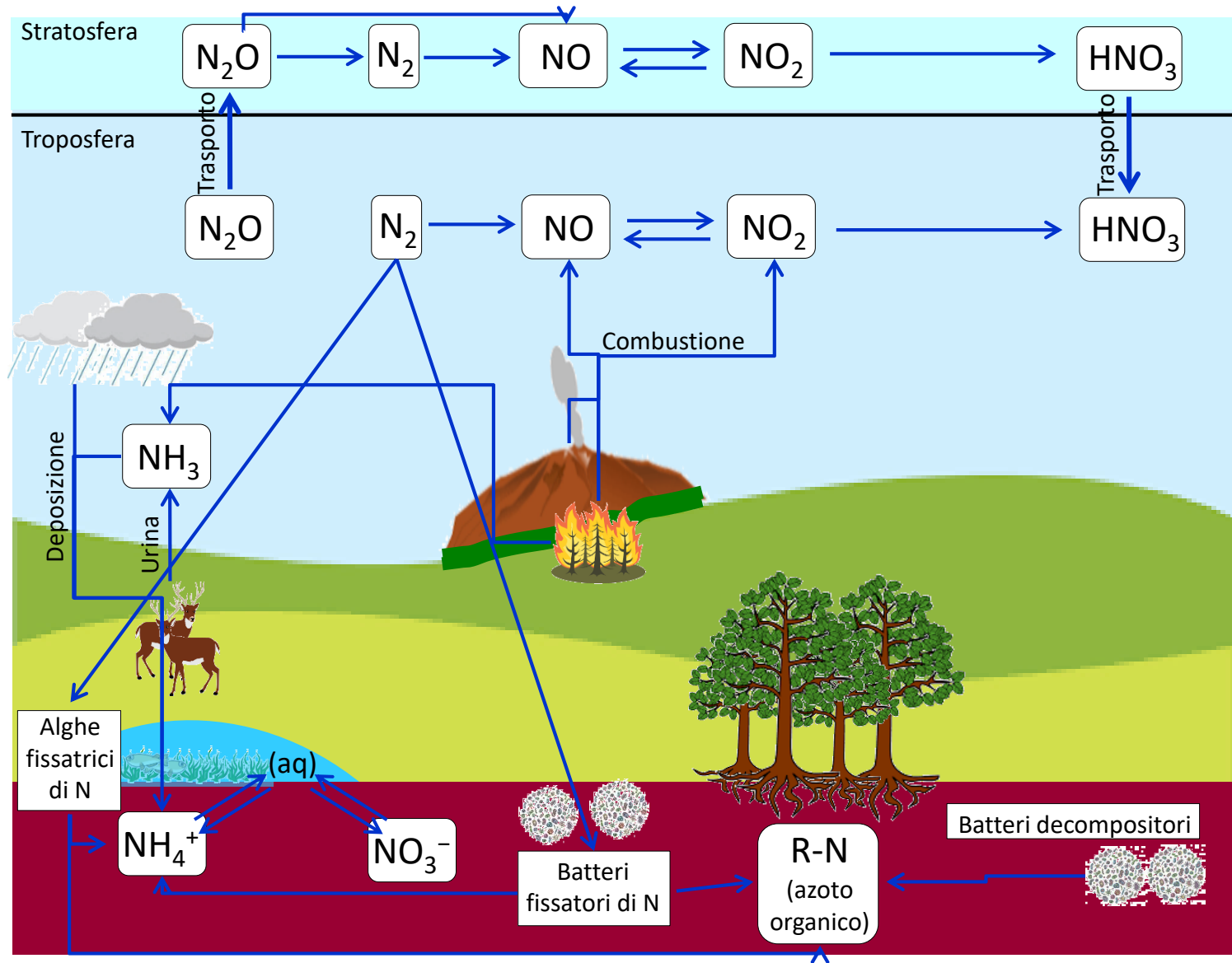
Ciclo biogeochimico dell'azoto

In assenza di contributo antropico:



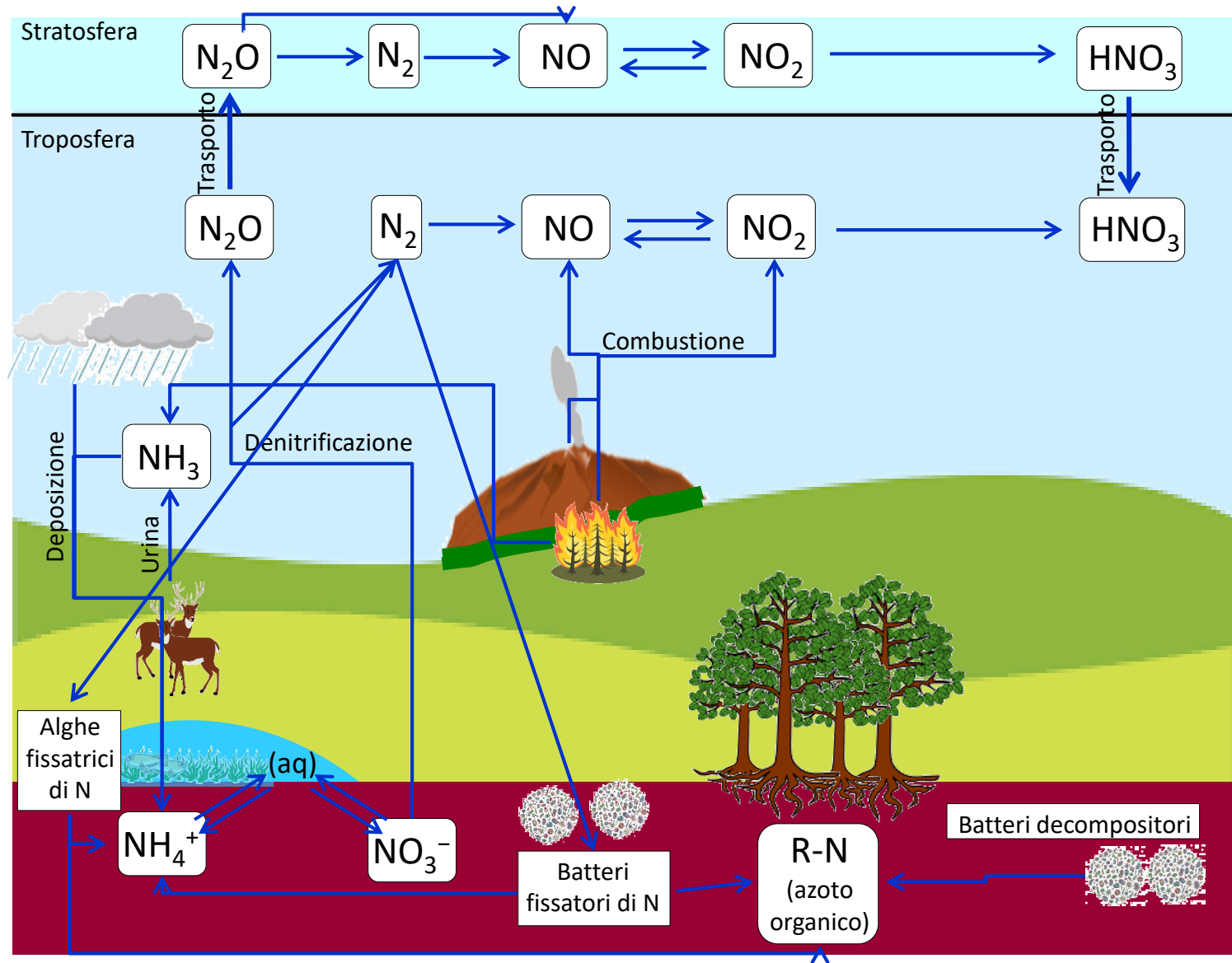
Ciclo biogeochimico dell'azoto

In assenza di contributo antropico:



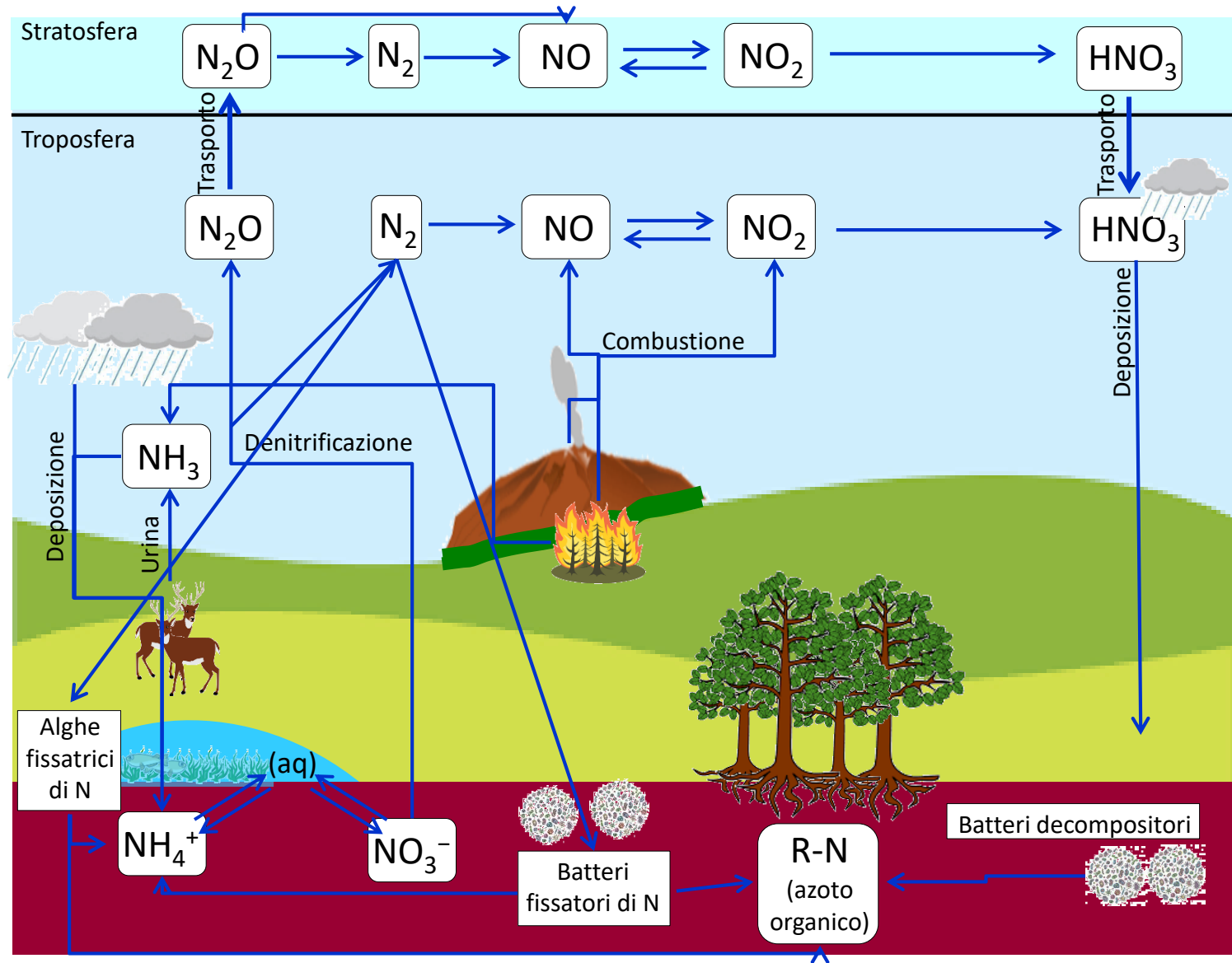
Ciclo biogeochimico dell'azoto

In assenza di contributo antropico:



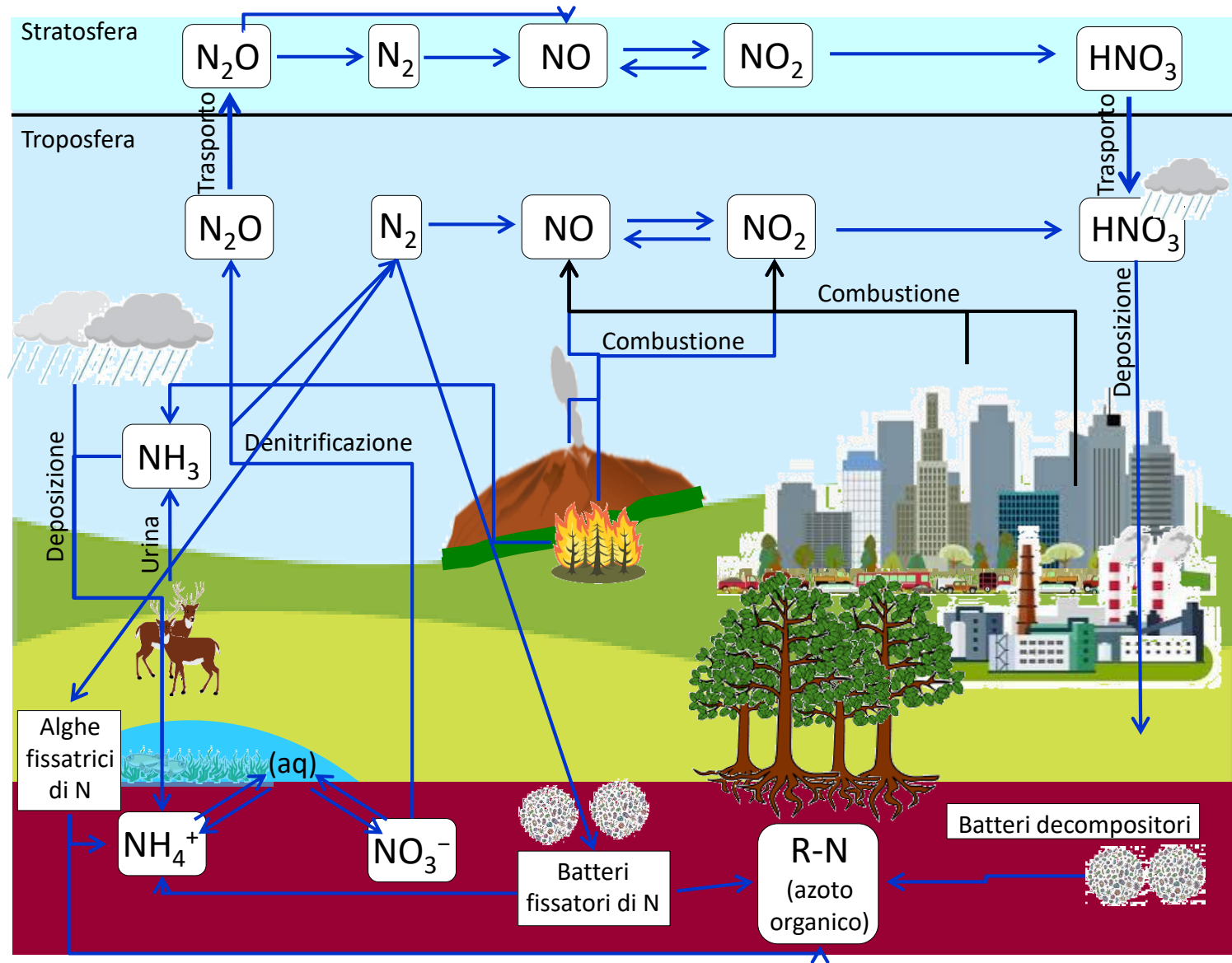
Ciclo biogeochimico dell'azoto

In assenza di contributo antropico:



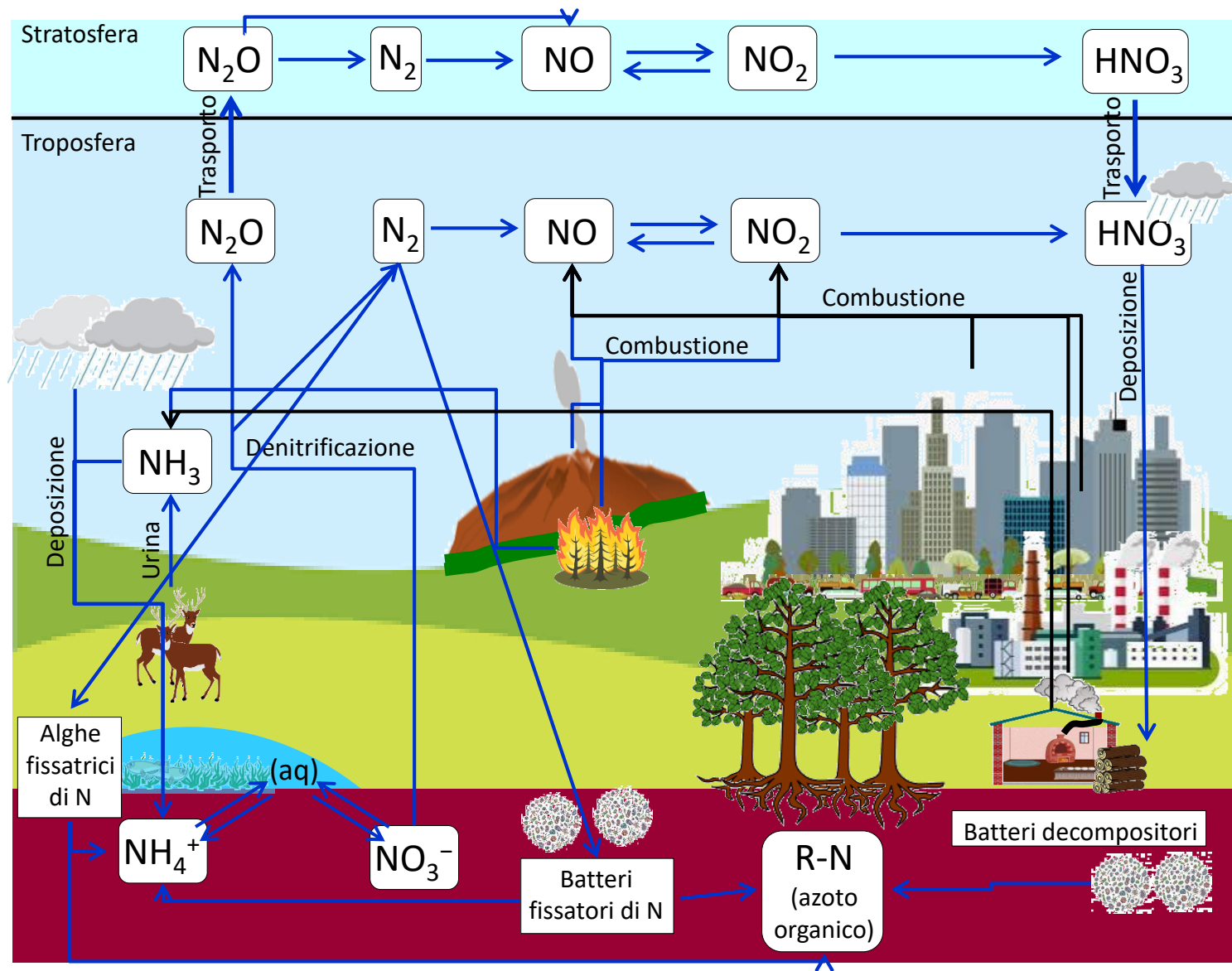
Ciclo biogeochimico dell'azoto

In PRESENZA di contributo antropico:



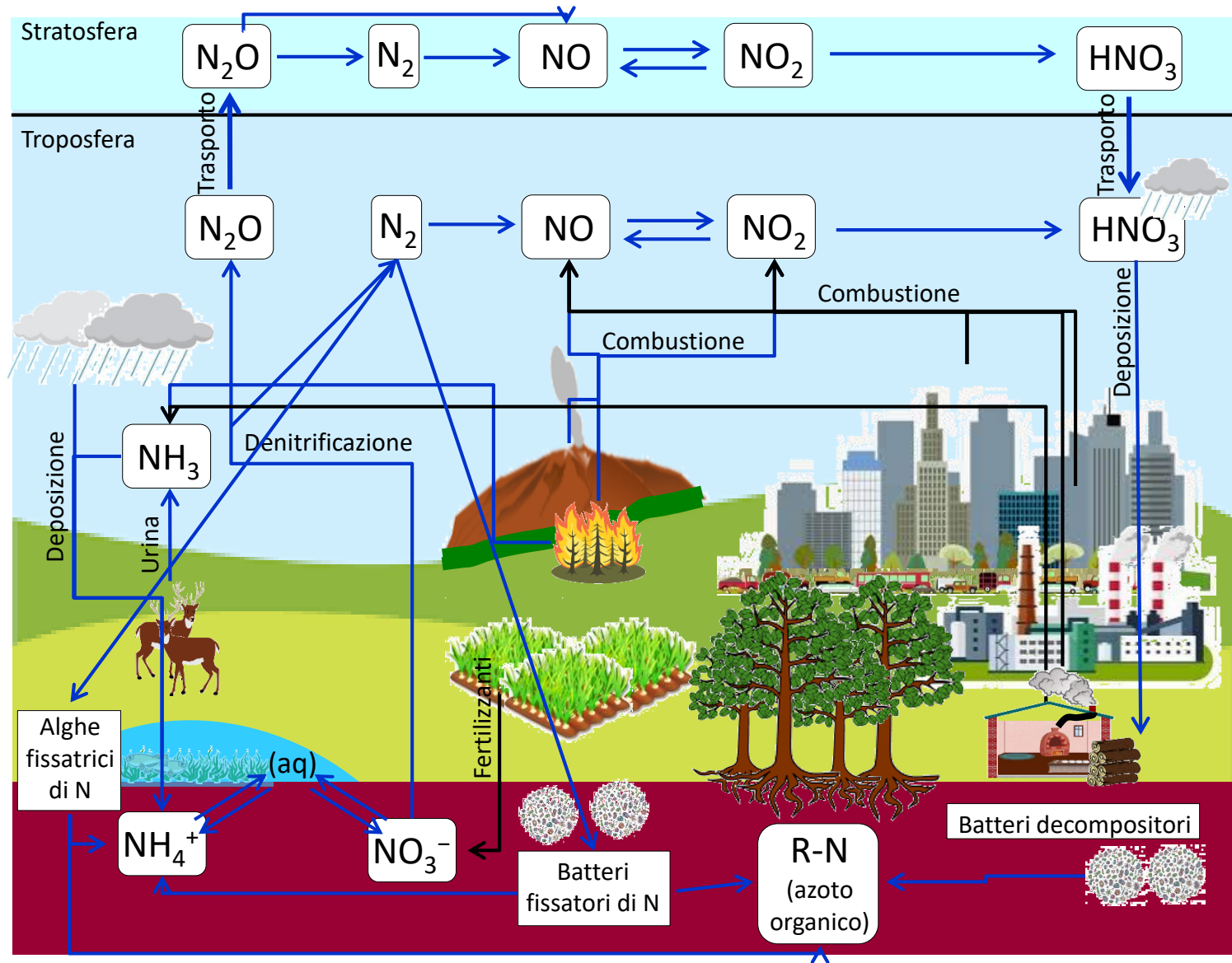
Ciclo biogeochimico dell'azoto

In PRESENZA di contributo antropico:



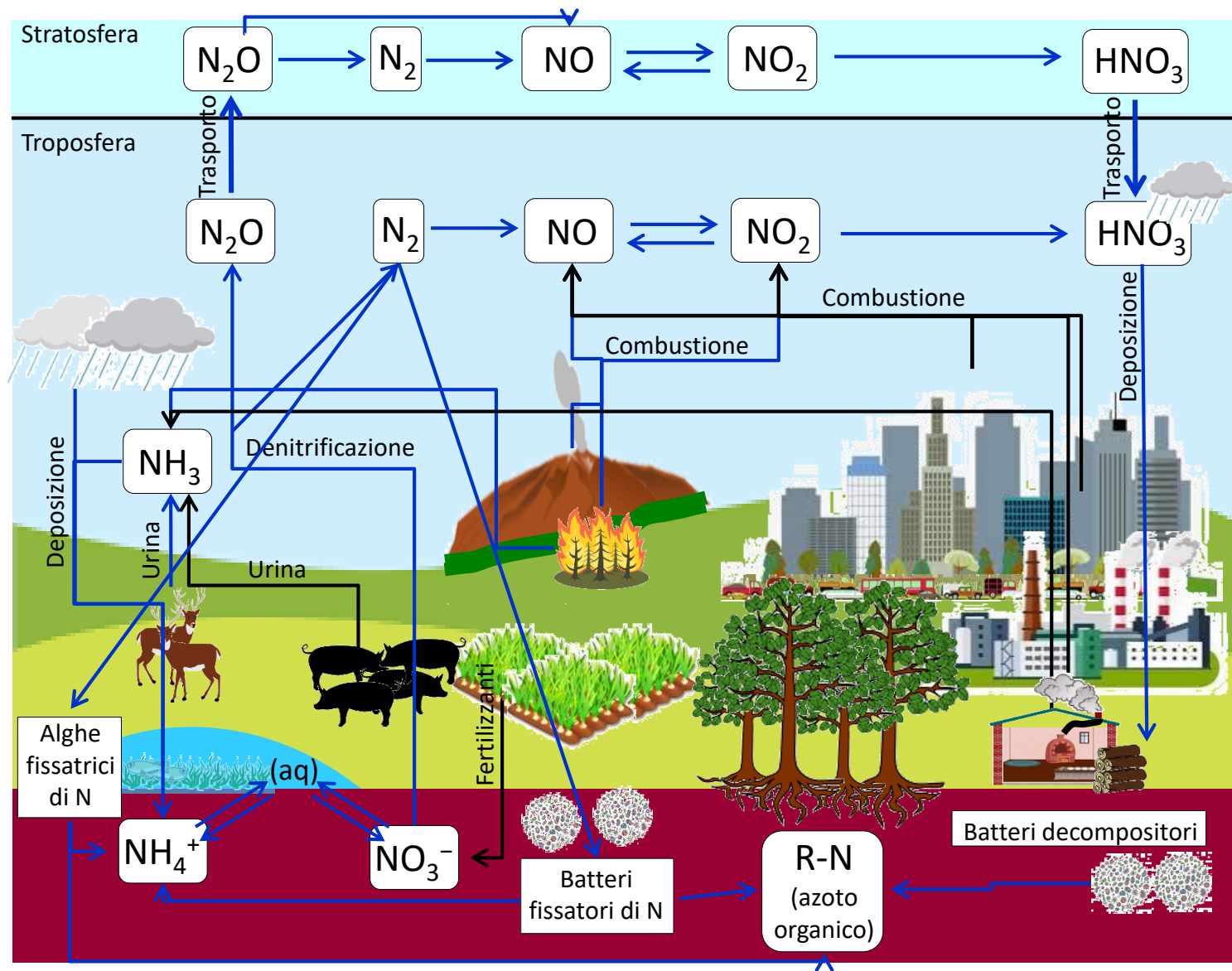
Ciclo biogeochimico dell'azoto

In PRESENZA di contributo antropico:

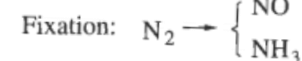
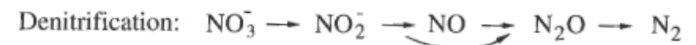
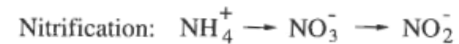
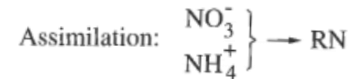
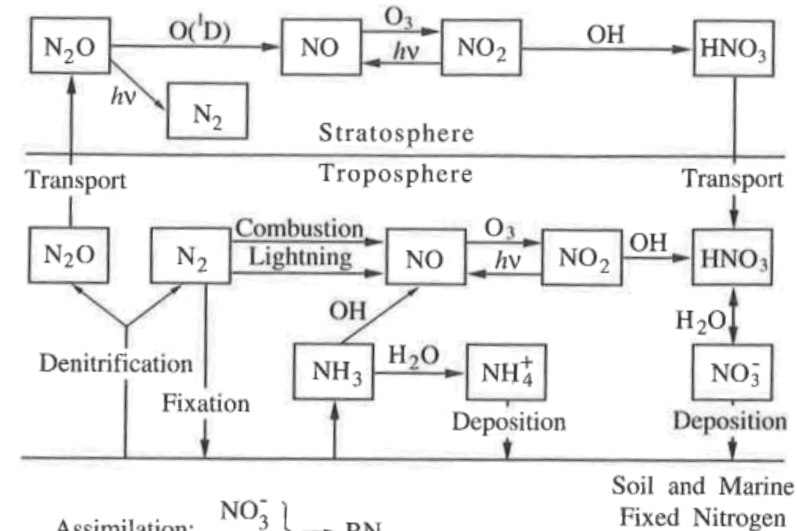
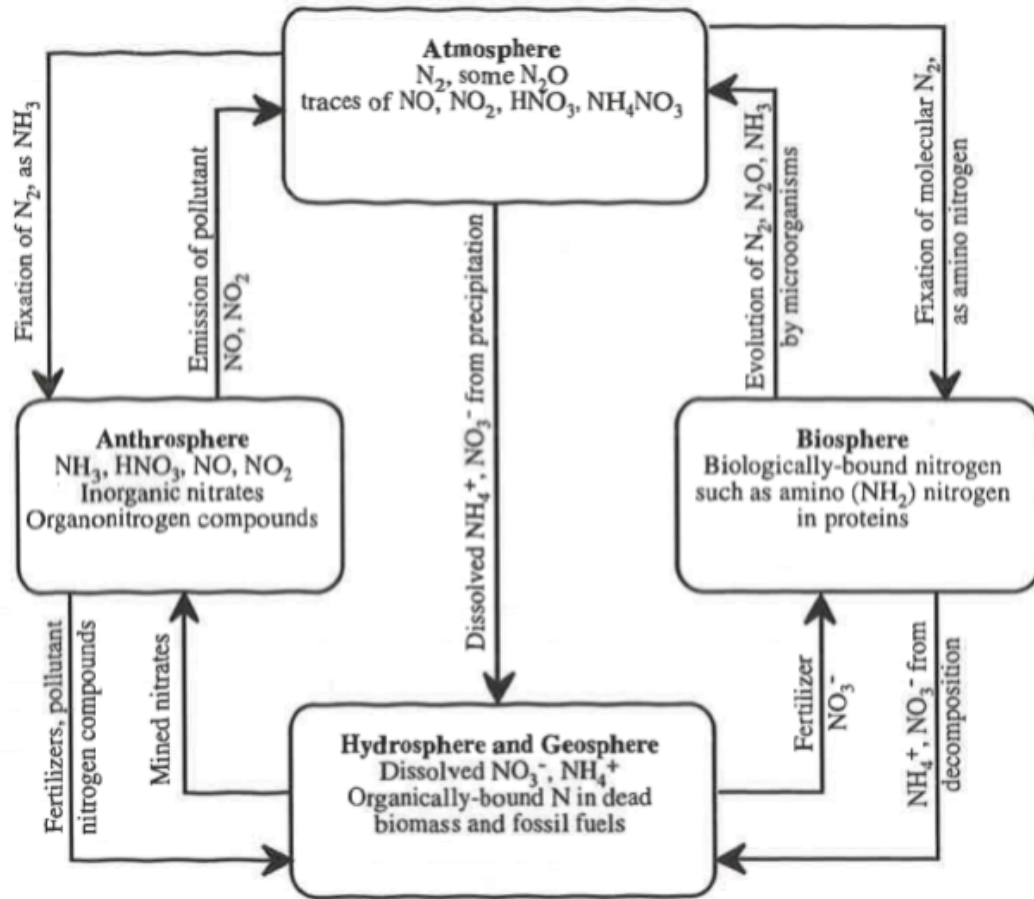


Ciclo biogeochimico dell'azoto

In PRESENZA di contributo antropico:



Ciclo biogeochimico dell'azoto (2)



Smog fotochimico

Lo smog fotochimico (o ossidante) è quel fenomeno atmosferico che viene prodotto dall'azione della radiazione solare (in particolare, la componente UV) sugli ossidi di azoto e sugli idrocarburi emessi durante i processi di combustione, come quelli che avvengono in molti impianti industriali e negli autoveicoli.

Tale fenomeno è particolarmente evidente durante periodi di scarso rimescolamento atmosferico.



Smog fotochimico, Los Angeles, novembre 2016

Smog fotochimico

Lo smog fotochimico (o ossidante) è quel fenomeno atmosferico che viene prodotto dall'azione della radiazione solare (in particolare, la componente UV) sugli ossidi di azoto e sugli idrocarburi emessi durante i processi di combustione, come quelli che avvengono in molti impianti industriali e negli autoveicoli.

Tale fenomeno è particolarmente evidente durante periodi di scarso rimescolamento atmosferico.



Smog fotochimico

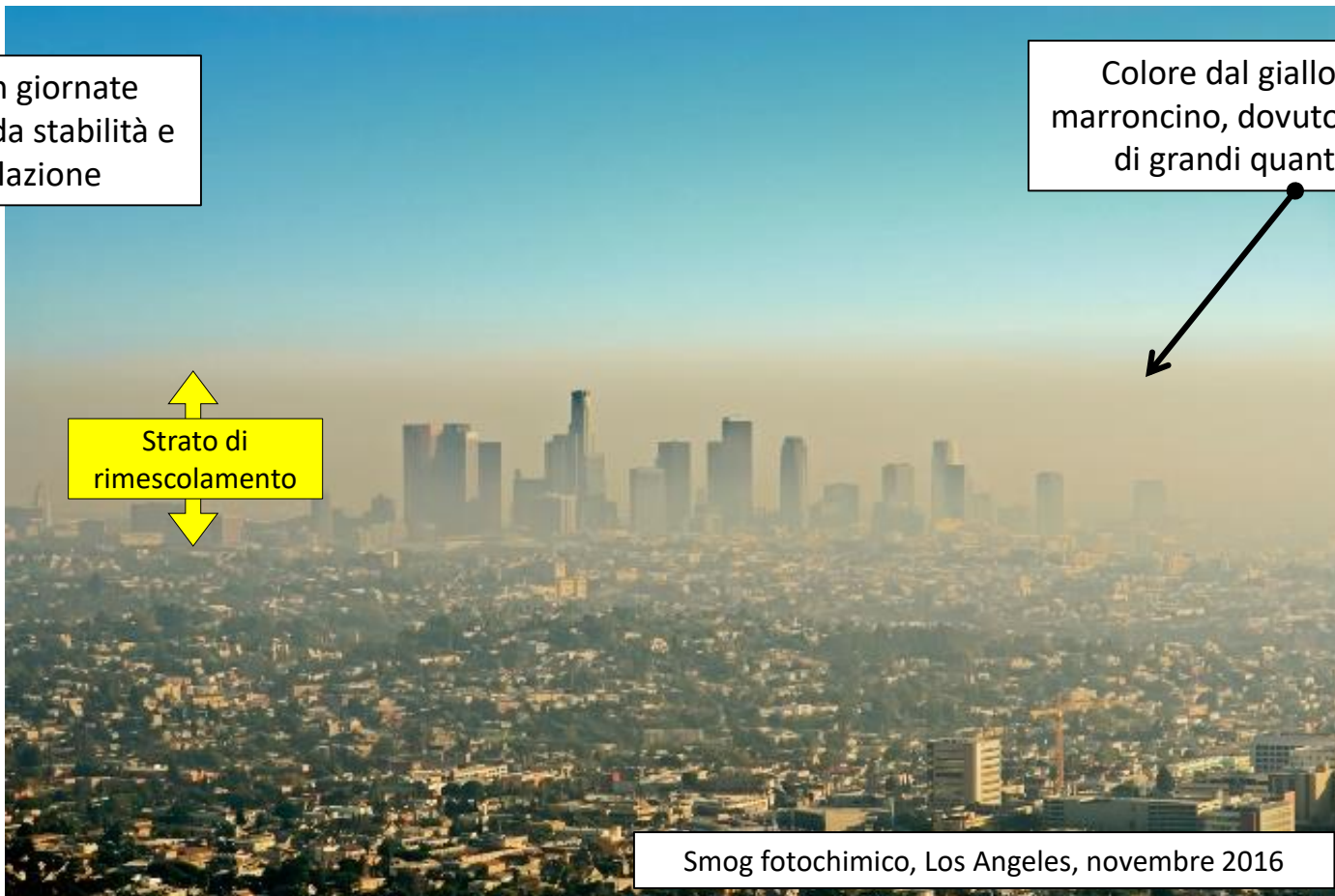
Lo smog fotochimico (o ossidante) è quel fenomeno atmosferico che viene prodotto dall'azione della radiazione solare (in particolare, la componente UV) sugli ossidi di azoto e sugli idrocarburi emessi durante i processi di combustione, come quelli che avvengono in molti impianti industriali e negli autoveicoli.

Tale fenomeno è particolarmente evidente durante periodi di scarso rimescolamento atmosferico.

Si produce in giornate caratterizzate da stabilità e forte insolazione

Colore dal giallo-arancio al marroncino, dovuto alla presenza di grandi quantità di NO_2

Strato di rimescolamento



Smog fotochimico, Los Angeles, novembre 2016

Smog fotochimico - genesi ed effetti

Condizioni ambientali che portano all'instaurarsi dei processi che portano allo smog fotochimico:

- ✓ la presenza della **luce solare** (che funge da catalizzatore);
- ✓ una temperatura di **almeno 18°C**, necessaria perché molte delle reazioni del processo di formazione dello smog fotochimico richiedono specifiche energie di attivazione (garantite dalla temperatura relativamente alta);
- ✓ la presenza di **VOC** (es. benzene, etanolo, tricloroetano, miscele come la benzina e la trementina). La loro presenza nell'aria è dovuta principalmente alla combustione incompleta dei combustibili fossili, all'evaporazione di solventi e di carburanti ed alla combustione del materiale vegetale. I VOC possono anche essere di origine biogenica come i terpeni (gli *eucaliptus*, ad esempio, ne rilasciano una quantità significativa);
- ✓ la presenza di **ossidi di azoto (NO_x)**.

Smog fotochimico - genesi ed effetti

Condizioni ambientali che portano all'instaurarsi dei processi che portano allo smog fotochimico:

- ✓ la presenza della **luce solare** (che funge da catalizzatore);
- ✓ una temperatura di **almeno 18°C**, necessaria perché molte delle reazioni del processo di formazione dello smog fotochimico richiedono specifiche energie di attivazione (garantite dalla temperatura relativamente alta);
- ✓ la presenza di **VOC** (es. benzene, etanolo, tricloroetano, miscele come la benzina e la trementina). La loro presenza nell'aria è dovuta principalmente alla combustione incompleta dei combustibili fossili, all'evaporazione di solventi e di carburanti ed alla combustione del materiale vegetale. I VOC possono anche essere di origine biogenica come i terpeni (gli *eucaliptus*, ad esempio, ne rilasciano una quantità significativa);
- ✓ la presenza di **ossidi di azoto (NO_x)**.

Gli **NO_x** e i **VOC** vanno incontro ad un complesso sistema di reazioni fotochimiche indotte dalla luce **UV**, il tutto porta alla formazione di **O₃**, **PAN** (perossiacilnitrati), **aldeidi** e centinaia di **altre** sostanze.

"Smog fotochimico"

Smog fotochimico - genesi ed effetti

Condizioni ambientali che portano all'instaurarsi dei processi che portano allo smog fotochimico:

- ✓ la presenza della **luce solare** (che funge da catalizzatore);
- ✓ una temperatura di **almeno 18°C**, necessaria perché molte delle reazioni del processo di formazione dello smog fotochimico richiedono specifiche energie di attivazione (garantite dalla temperatura relativamente alta);
- ✓ la presenza di **VOC** (es. benzene, etanolo, tricloroetano, miscele come la benzina e la trementina). La loro presenza nell'aria è dovuta principalmente alla combustione incompleta dei combustibili fossili, all'evaporazione di solventi e di carburanti ed alla combustione del materiale vegetale. I VOC possono anche essere di origine biogenica come i terpeni (gli *eucaliptus*, ad esempio, ne rilasciano una quantità significativa);
- ✓ la presenza di **ossidi di azoto (NO_x)**.

Gli **NO_x** e i **VOC** vanno incontro ad un complesso sistema di reazioni fotochimiche indotte dalla luce **UV**, il tutto porta alla formazione di **O₃**, **PAN** (perossiacilnitrati), **aldeidi** e centinaia di **altre** sostanze.

"Smog fotochimico"



I composti che costituiscono lo smog fotochimico sono sostanze tossiche per gli esseri umani, per gli animali ed anche per i vegetali, inoltre sono in grado di degradare molti materiali diversi per il loro forte potere ossidante.

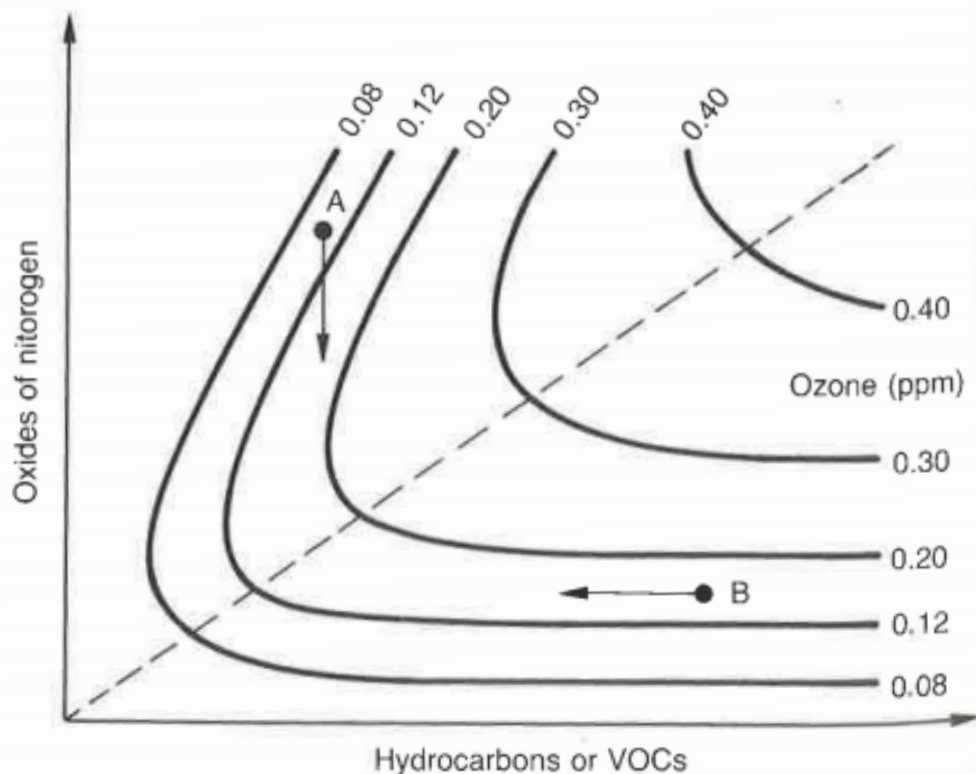


Smog fotochimico - possibile riduzione

Per ottenere una effettiva riduzione dell'ozono troposferico è necessario sia ridurre le emissioni di NO_x che di VOC.

Figure 8.15 Peak ozone levels are a function of photochemical reactions involving oxides of nitrogen and hydrocarbons (or VOCs). Reducing emissions of oxides of nitrogen alone may increase ozone levels in some cities (e.g. point A on graph), whilst in other cities the reduction of hydrocarbon emissions alone may cause little or no reduction in ozone levels (B). Effective strategies of ozone reduction involving emission reductions of both hydrocarbons and oxides of nitrogen in urban areas need to give careful consideration to the relative position of each city on this chart

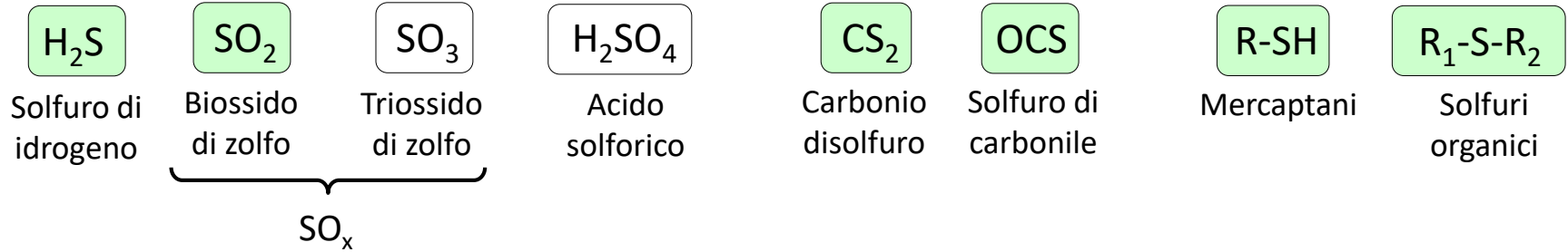
Source: modified from Seinfeld (1989)



Specie solforate presenti nella troposfera

H_2S	SO_2	SO_3	H_2SO_4	CS_2	OCS	R-SH	$\text{R}_1\text{-S-R}_2$
Solfuro di idrogeno	Biossido di zolfo	Triossido di zolfo	Acido solforico	Carbonio disolfuro	Solfuro di carbonile	Mercaptani	Solfuri organici
	SO_x						

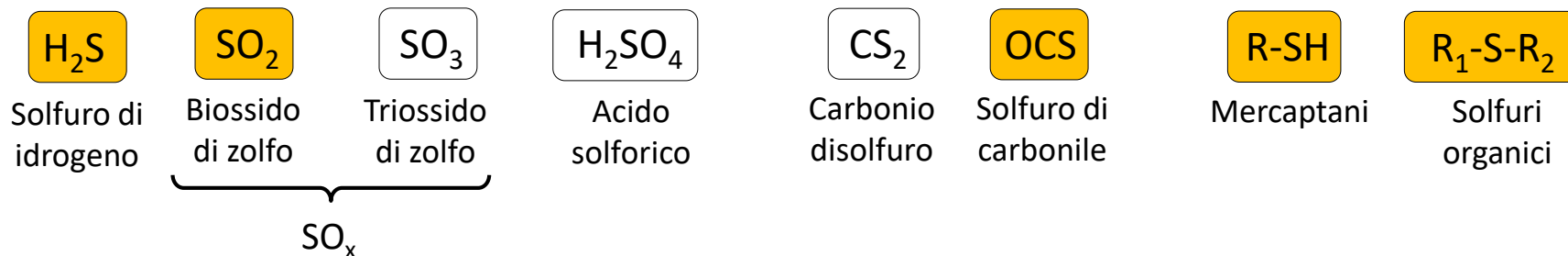
Specie solforate presenti nella troposfera



Le principali emissioni naturali sono dovute a:

- eruzioni dei vulcani (H_2S , SO_2 , OCS);
- incendi di foreste (SO_2 , OCS);
- emissioni di organismi presenti in oceani e paludi (H_2S , CS_2 , composti solforati organici, principalmente DMS);
- decomposizione di resti organici nel suolo (H_2S , CS_2 , composti solforati organici).

Specie solforate presenti nella troposfera



Le principali emissioni naturali sono dovute a:

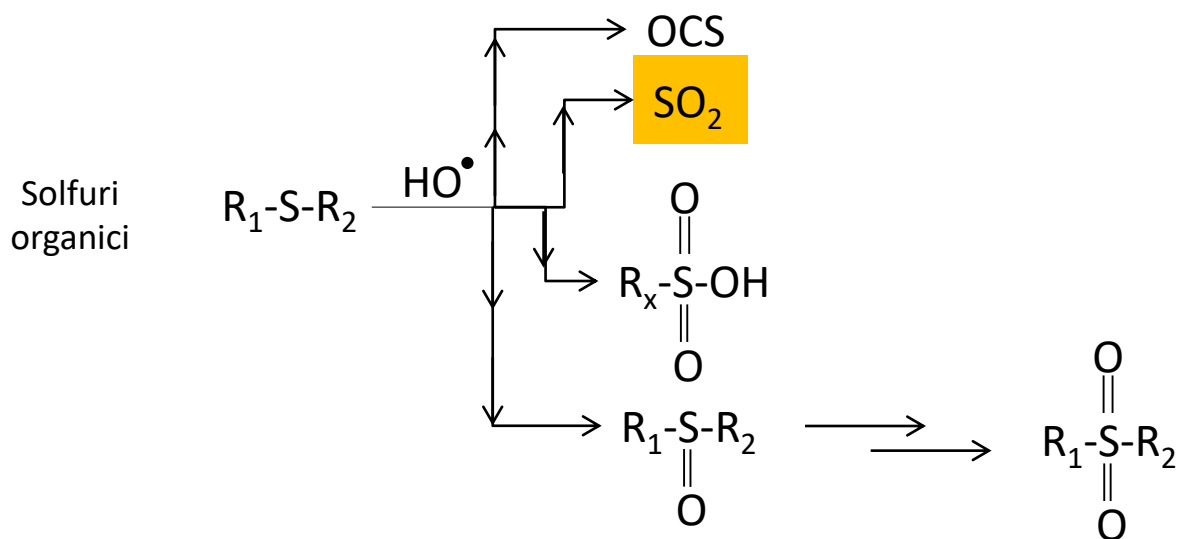
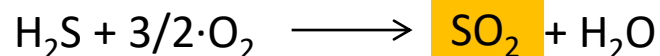
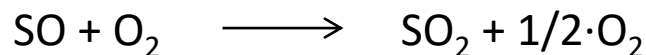
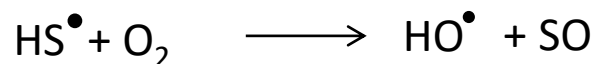
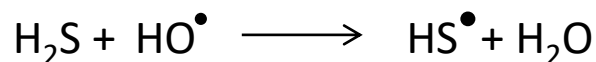
- eruzioni dei vulcani (H_2S , SO_2 , OCS);
- incendi di foreste (SO_2 , OCS);
- emissioni di organismi presenti in oceani e paludi (H_2S , CS_2 , composti solforati organici, principalmente DMS);
- decomposizione di resti organici nel suolo (H_2S , CS_2 , composti solforati organici).

Le principali fonti antropogeniche sono:

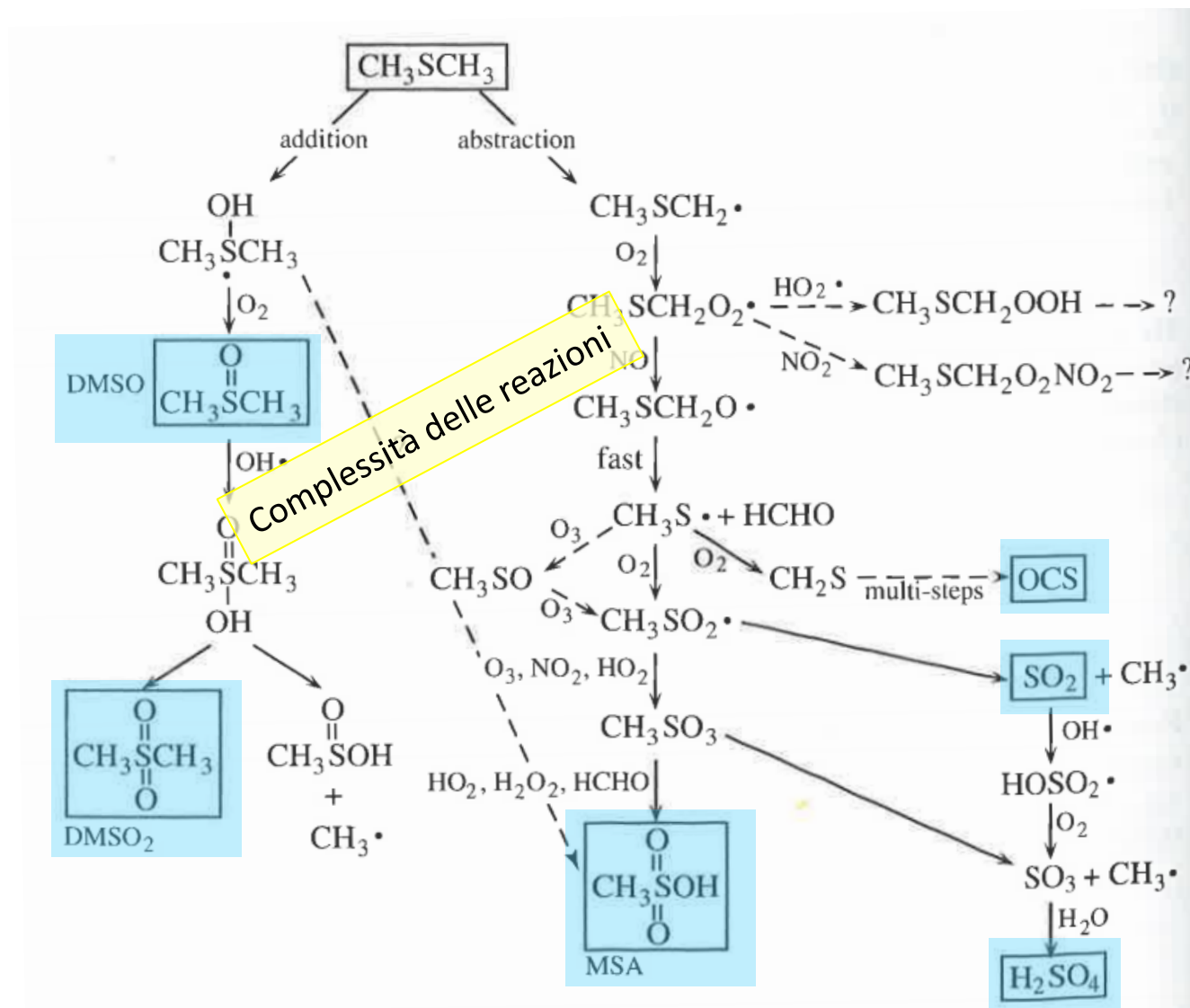
- combustione di combustibili fossili (SO_2);
- industria metallurgica (SO_2);
- combustione di biomasse (SO_2 , OCS);
- trattamento di liquami fognari (H_2S , composti solforati organici).

Formazione di SO₂

L' SO₂, oltre ad essere direttamente immessa nell'atmosfera, si può formare per ossidazione di H₂S ad opera del radicale ossidrile e anche per ossidazione di composti organici solforati contenenti zolfo in forma ridotta (es. solfuri organici).

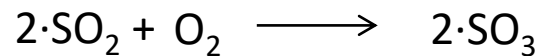


Reazioni di reazione di ossidazione del dimetilolfuro



Formazione di H_2SO_4 in fase gassosa

La seguente reazione è favorita termodinamicamente ma la velocità di reazione in assenza di catalizzatori è molto bassa in fase gassosa quindi non è considerata fonte diretta di SO_3 :

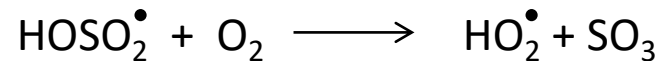
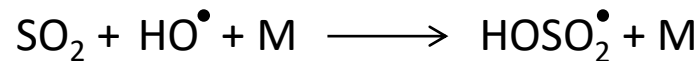


Formazione di H_2SO_4 in fase gassosa

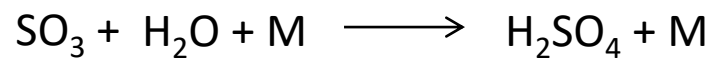
La seguente reazione è favorita termodinamicamente ma la velocità di reazione in assenza di catalizzatori è molto bassa in fase gassosa quindi non è considerata fonte diretta di SO_3 :



Invece in fase gassosa è predominante la reazione con il radicale ossidrile:

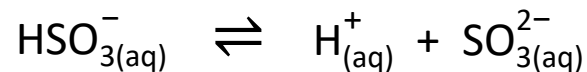
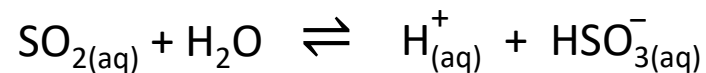
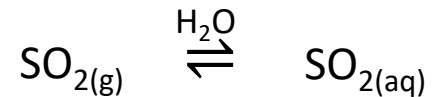


In presenza di vapor d'acqua
si forma acido solforico



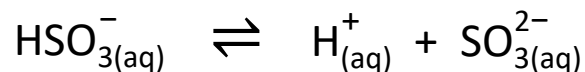
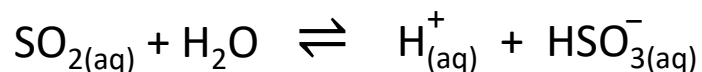
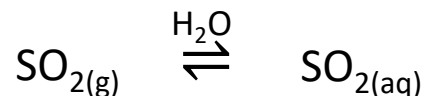
Formazione di H_2SO_4 in fase acquosa

In fase acquosa (nelle goccioline di acqua aerodisperse) si instaura il seguente equilibrio:

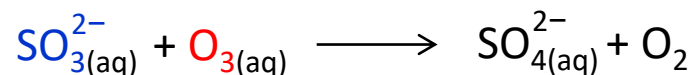
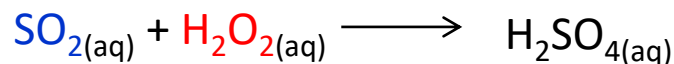
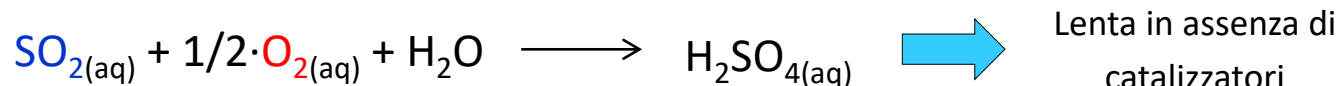
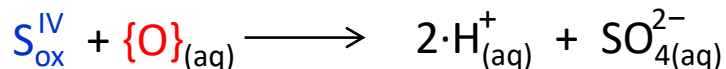


Formazione di H_2SO_4 in fase acquosa

In fase acquosa (nelle goccioline di acqua aerodisperse) si instaura il seguente equilibrio:

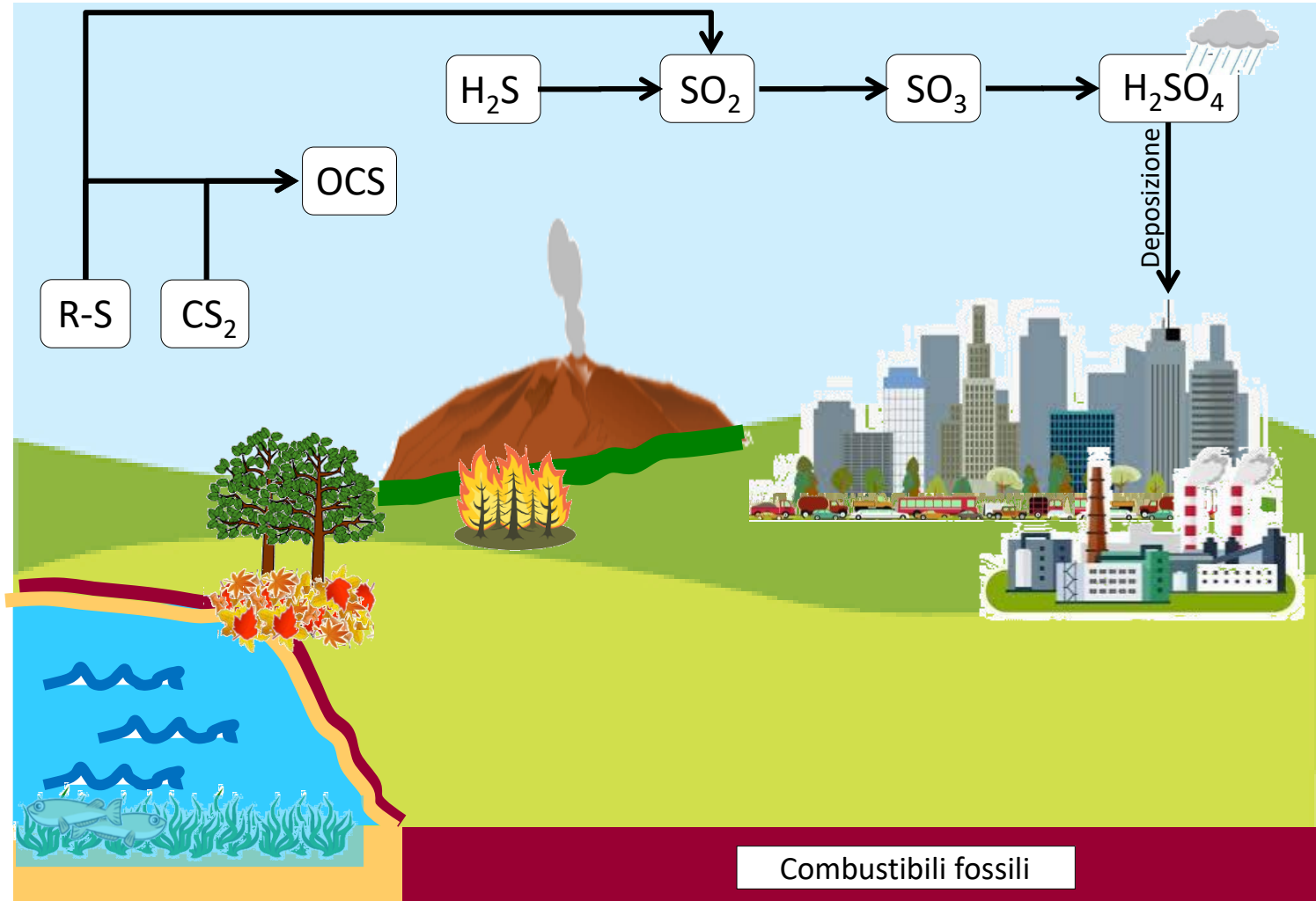


Seguono diverse possibili reazioni di ossidazione a dare acido solforico:



Ciclo biogeochimico dello zolfo

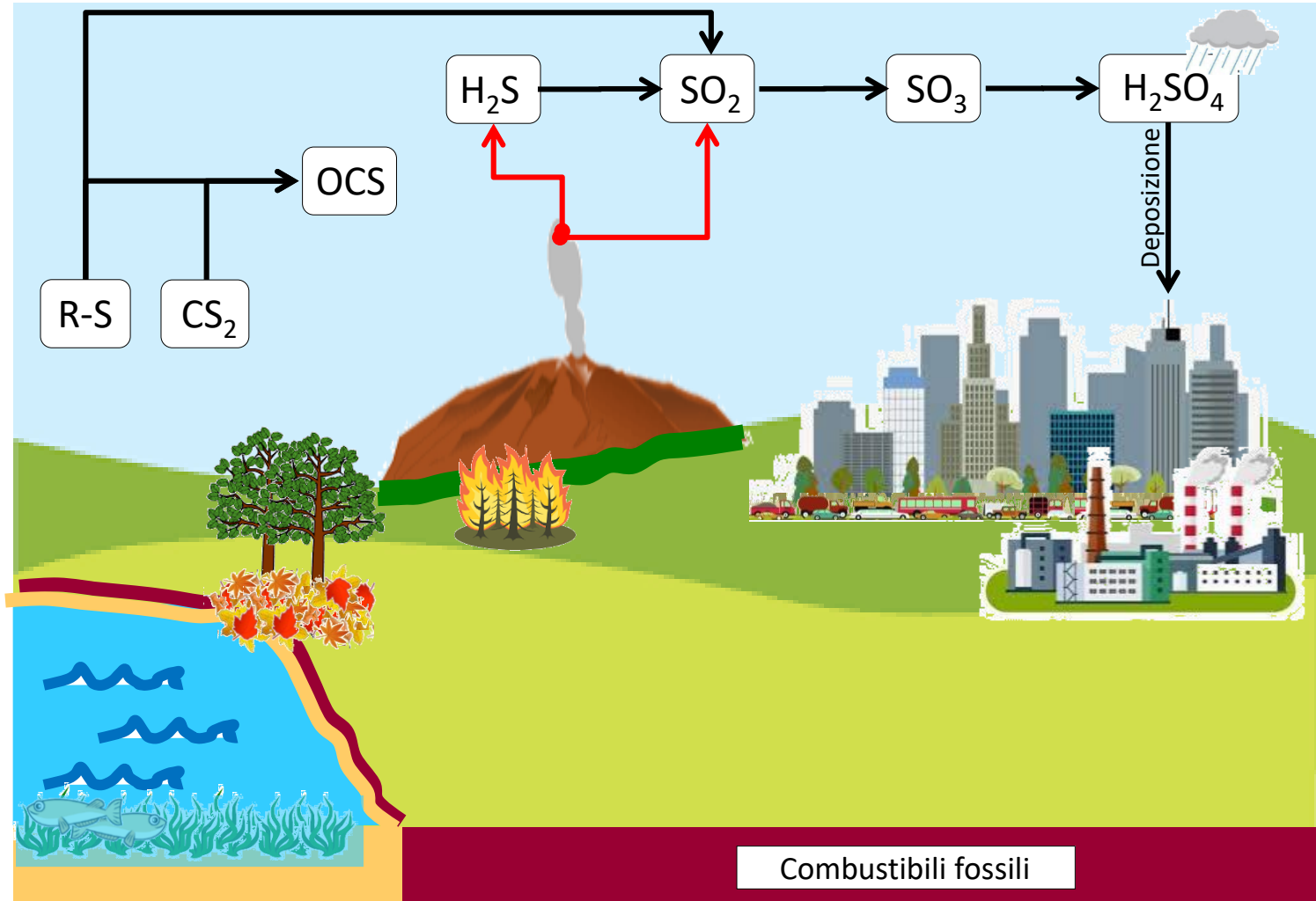
In assenza di contributo antropico:



- Combustione
- Metabolismo biota

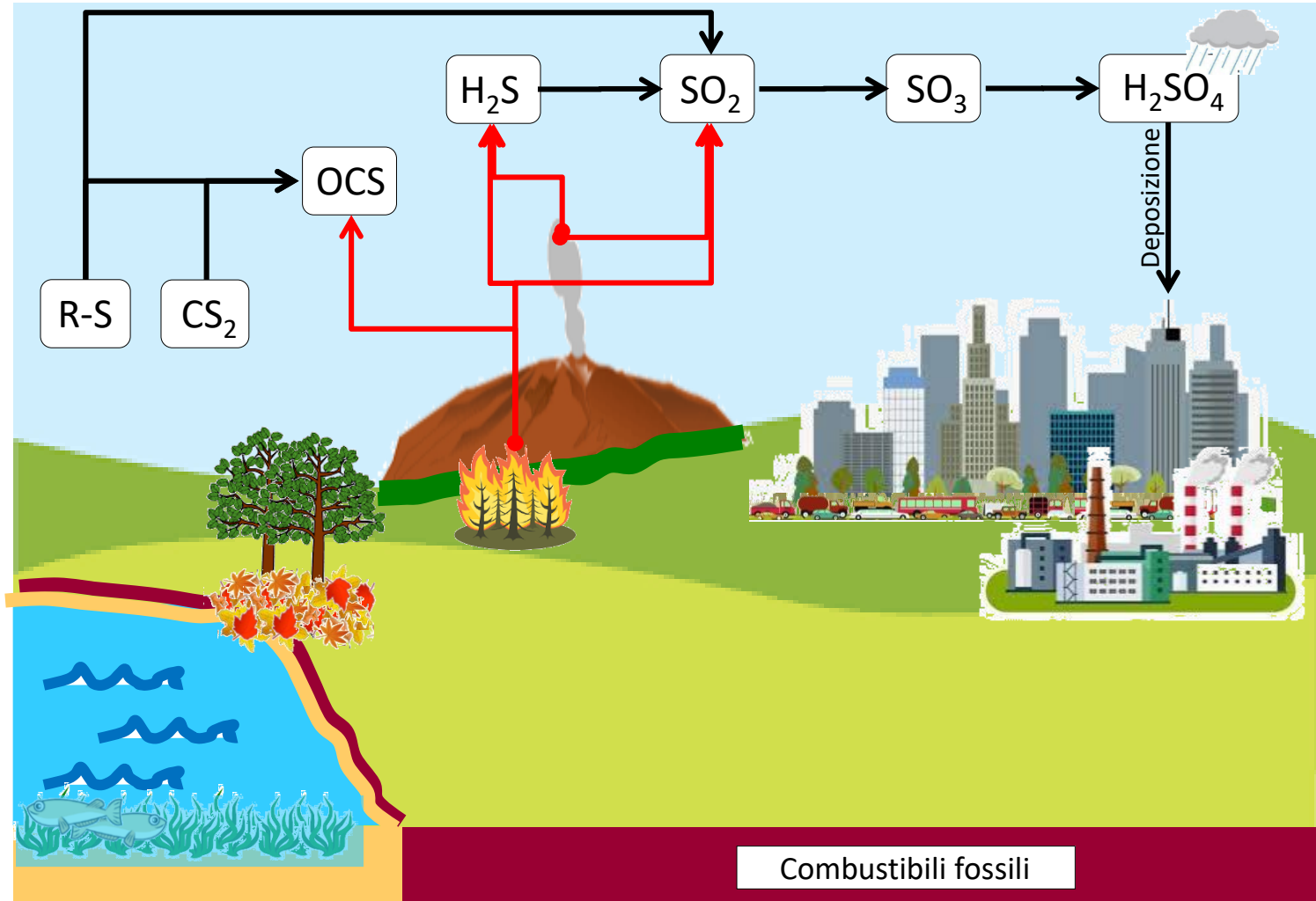
Ciclo biogeochimico dello zolfo

In assenza di contributo antropico:



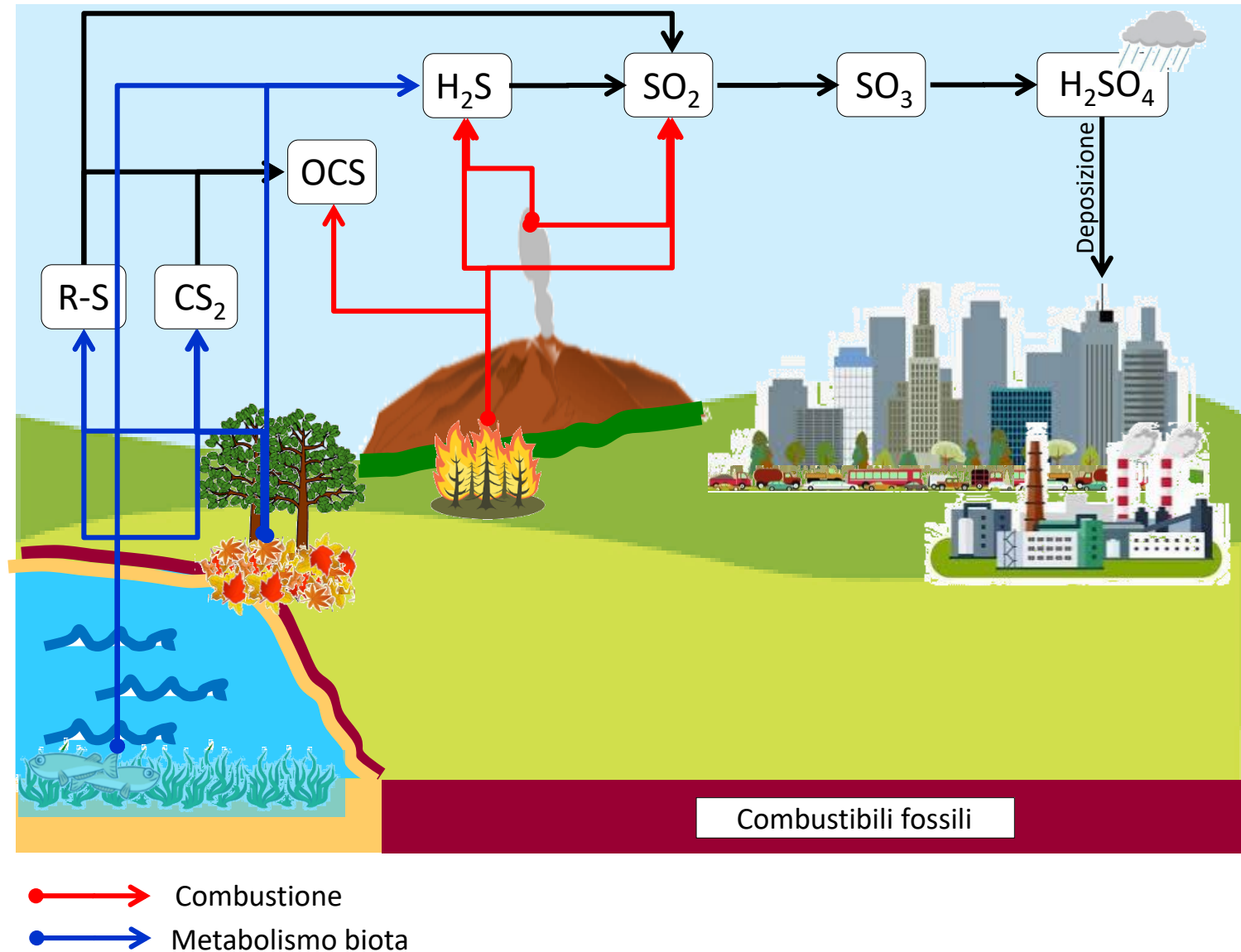
Ciclo biogeochimico dello zolfo

In assenza di contributo antropico:



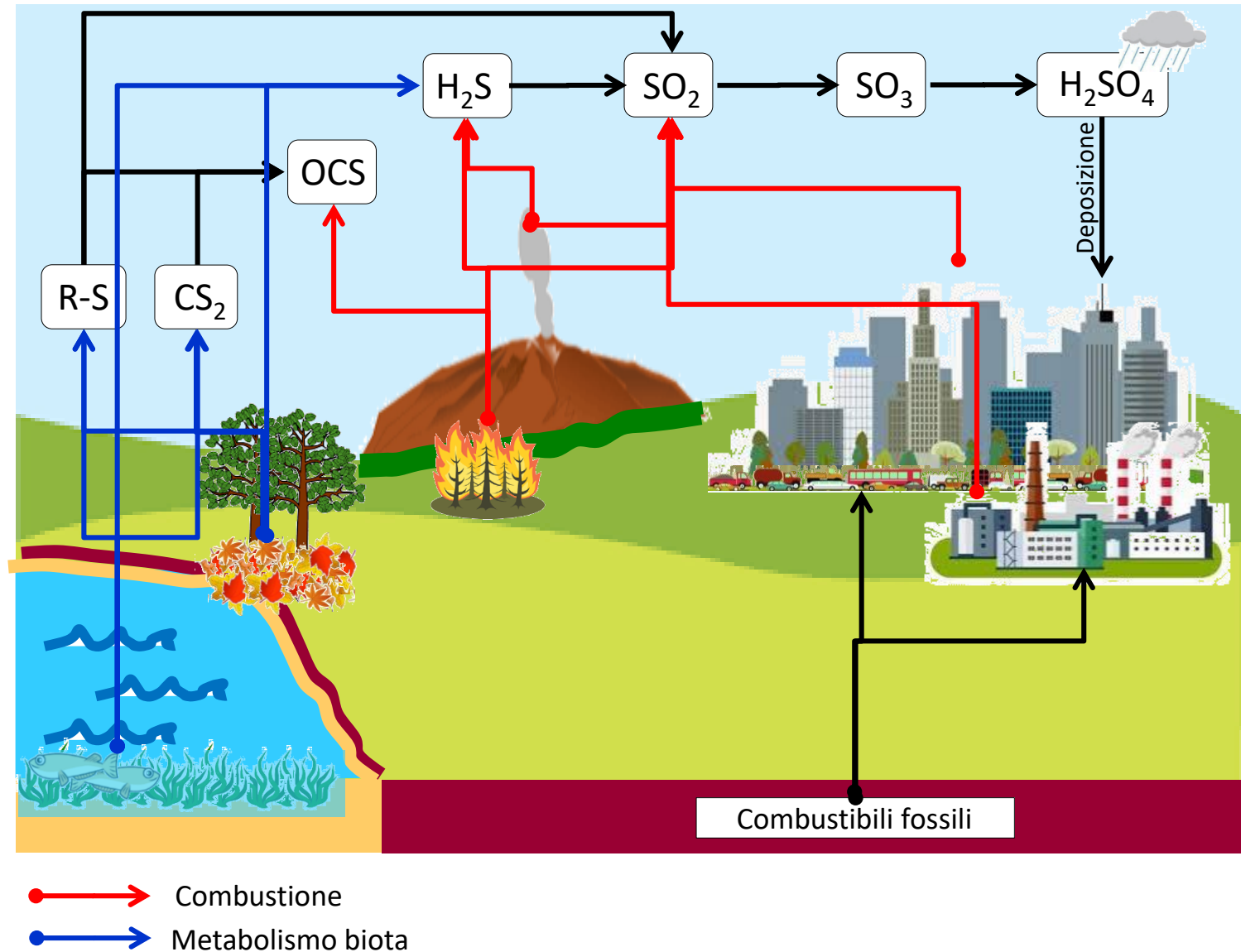
Ciclo biogeochimico dello zolfo

In assenza di contributo antropico:



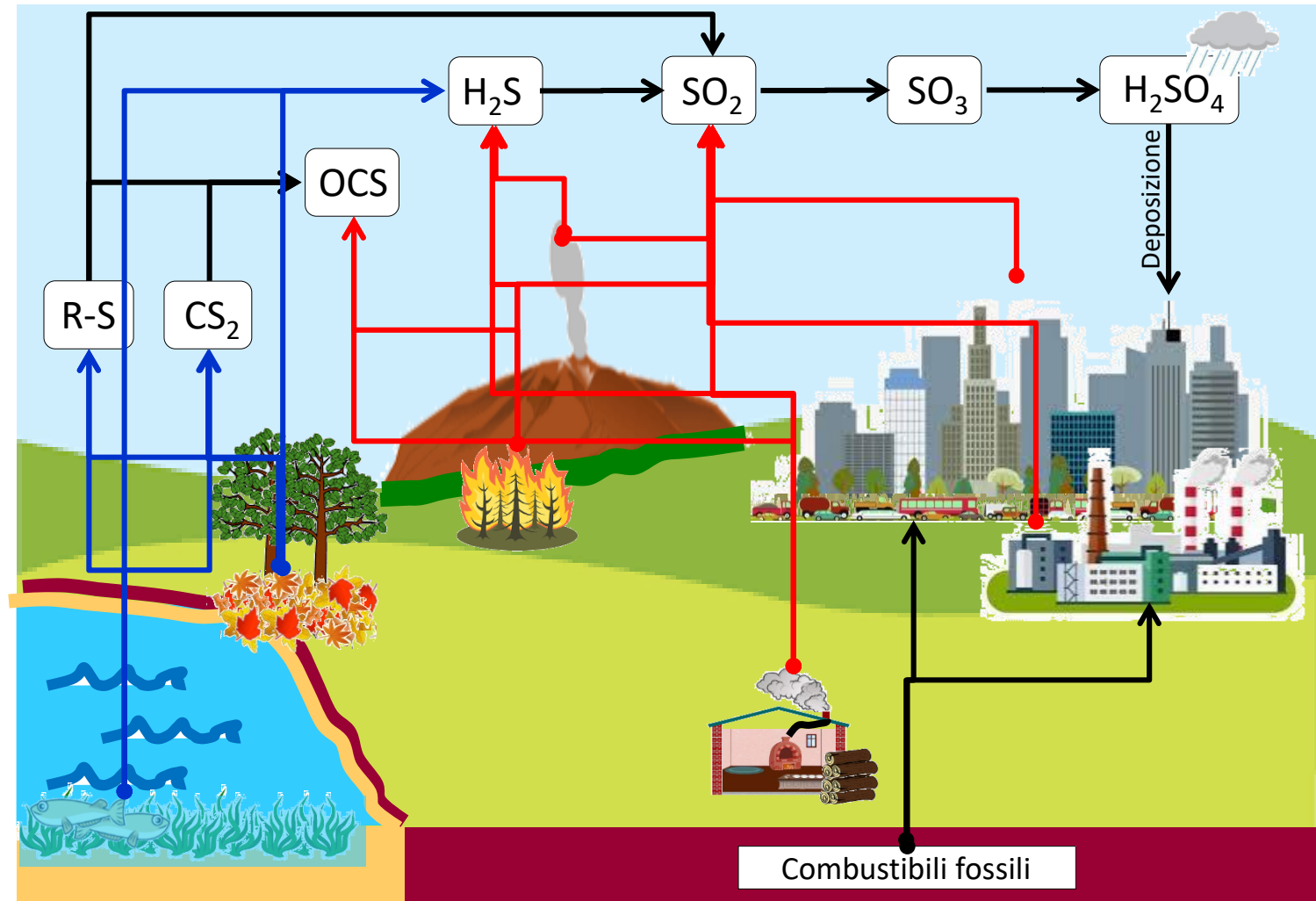
Ciclo biogeochimico dello zolfo

In PRESENZA di contributo antropico:



Ciclo biogeochimico dello zolfo

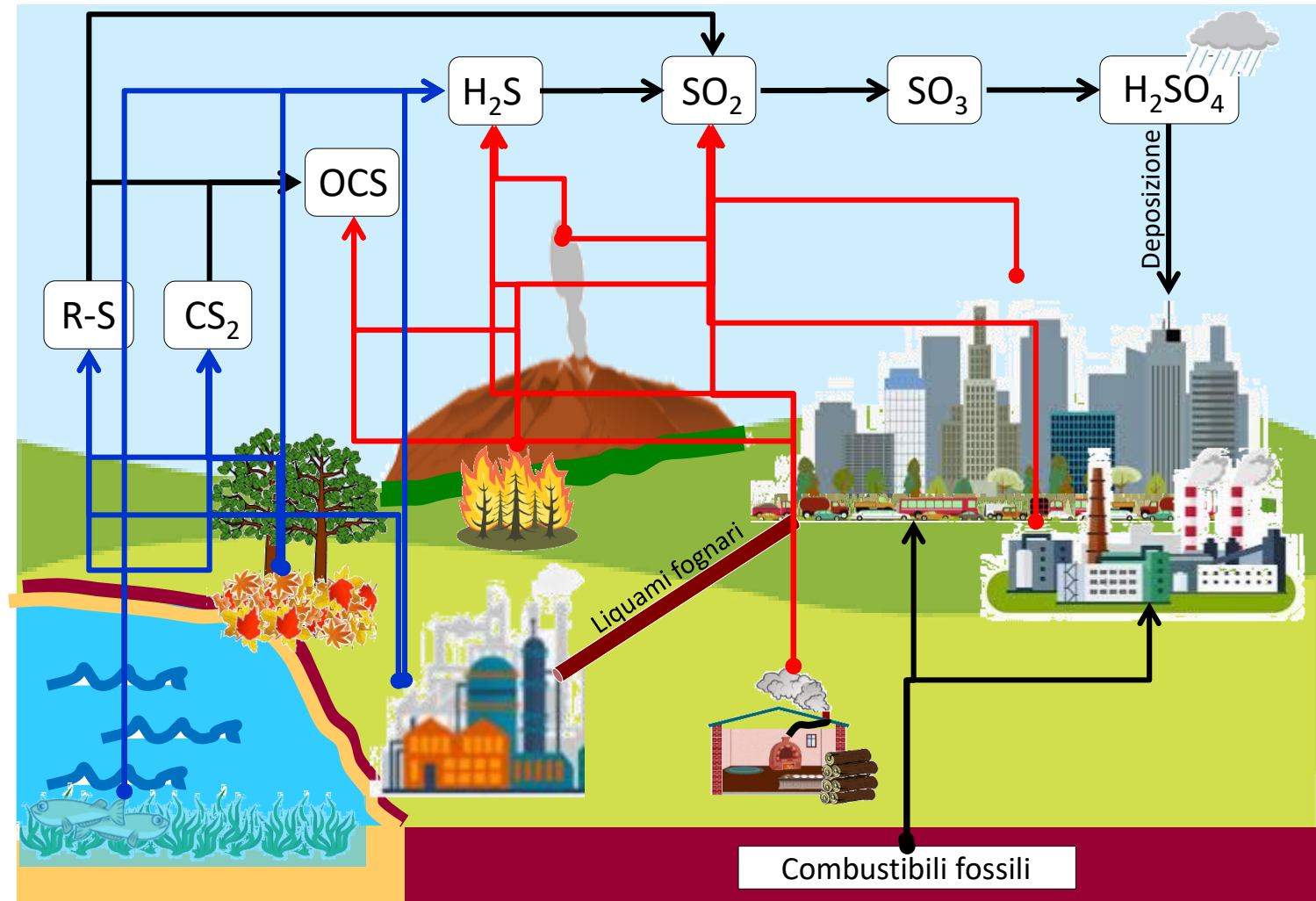
In PRESENZA di contributo antropico:



- Combustione
- Metabolismo biota

Ciclo biogeochimico dello zolfo

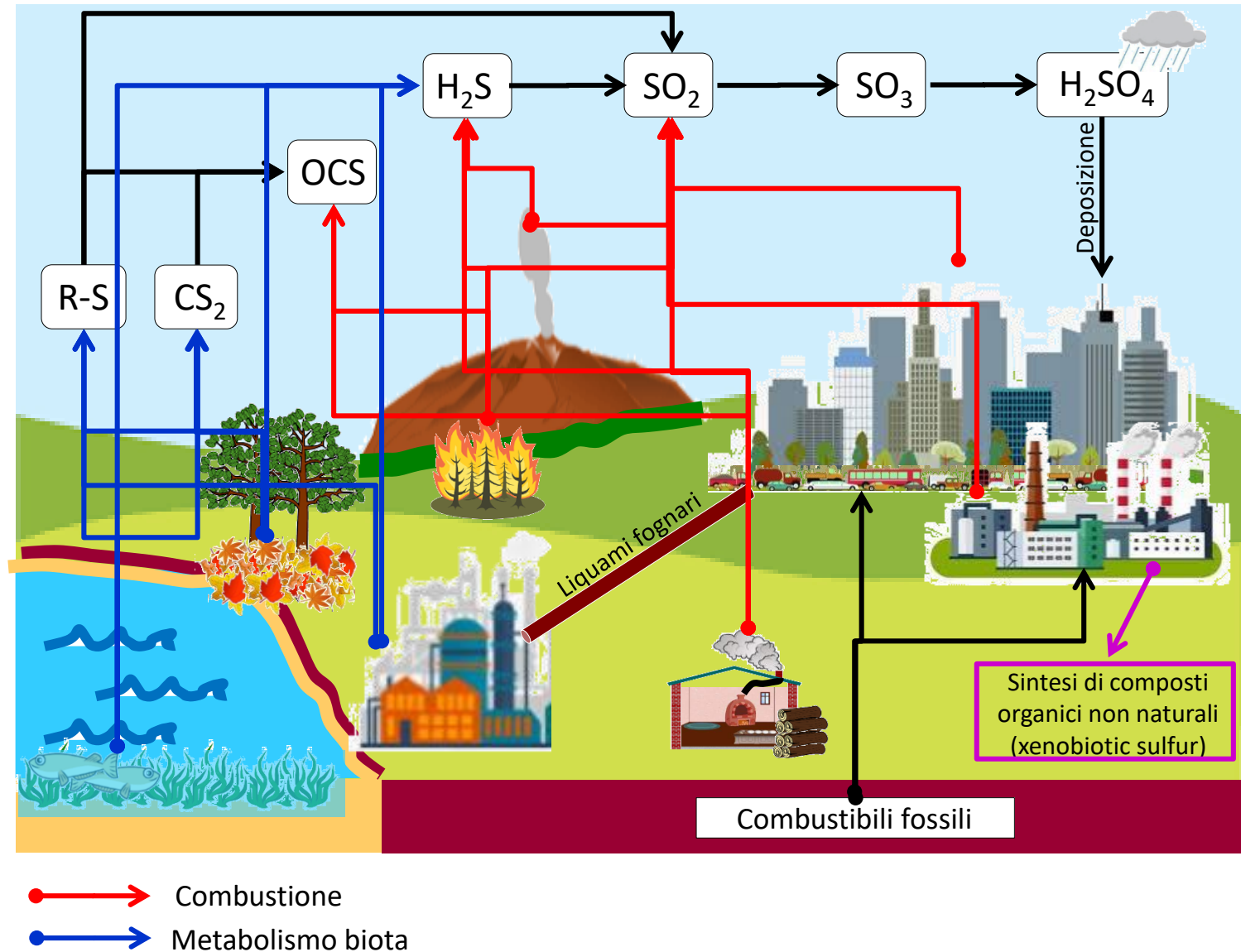
In PRESENZA di contributo antropico:



- Combustione
- Metabolismo biota

Ciclo biogeochimico dello zolfo

In PRESENZA di contributo antropico:



Ciclo biogeochimico dello zolfo (2)

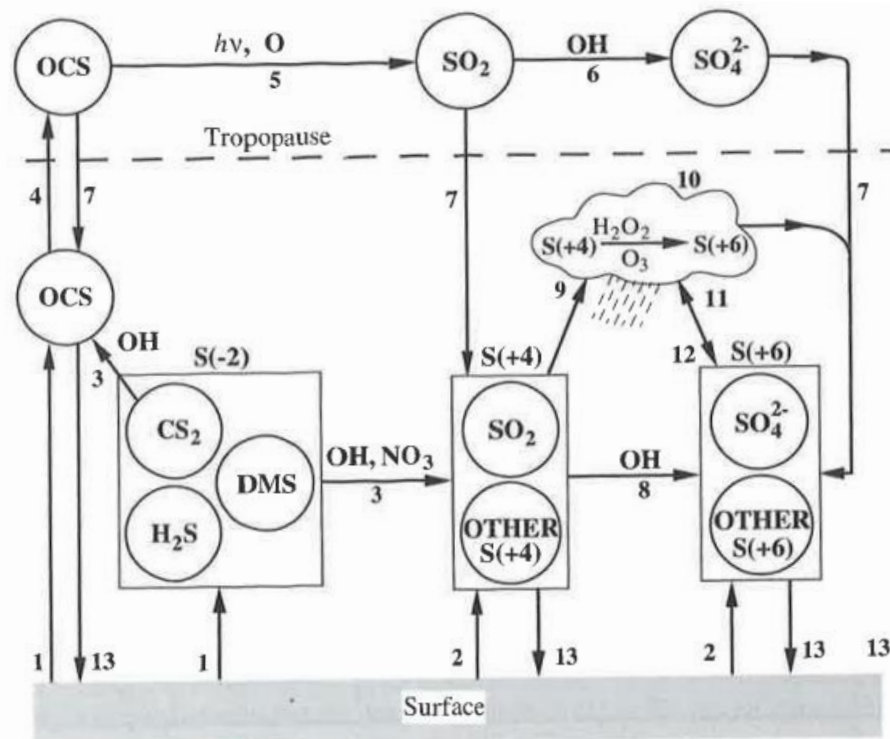
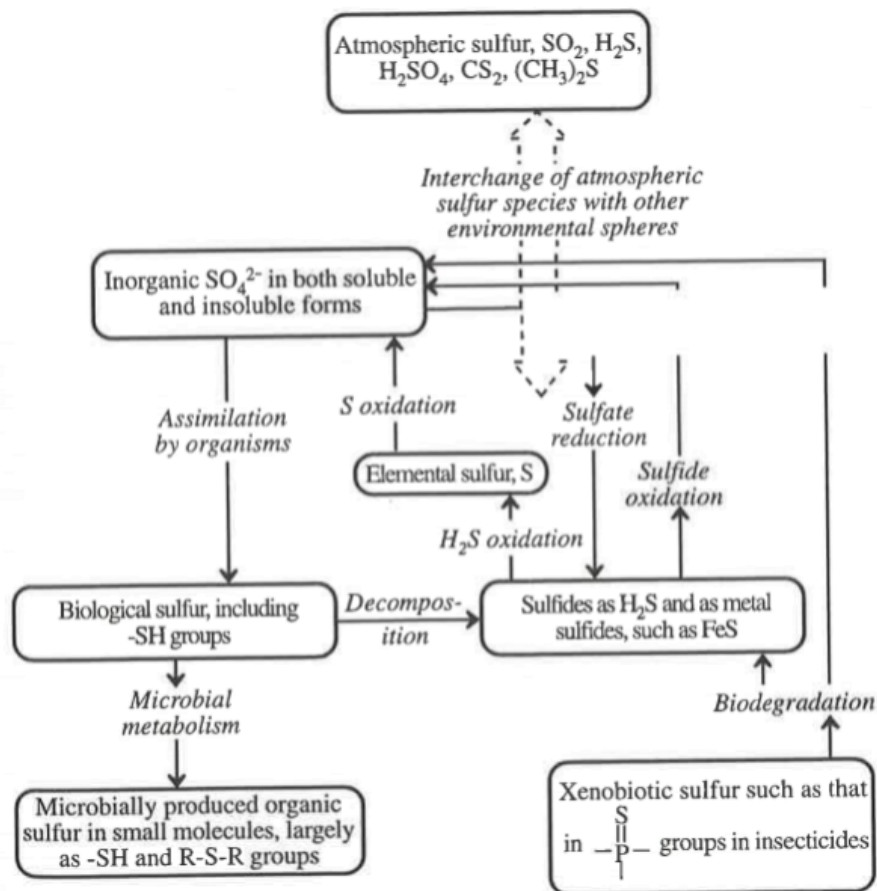


FIGURE 2.3 Major pathways of sulfur compounds in the atmosphere (Berresheim et al., 1995). The paths are labeled according to the processes: (1) emission of DMS , H_2S , CS_2 , and OCS ; (2) emission of $\text{S}(+4)$ and $\text{S}(+6)$; (3) oxidation of DMS , H_2S , and CS_2 by OH , and DMS by NO_3 in the troposphere; (4) transport of OCS into the stratosphere; (5) photolysis of OCS or reaction with O atoms to form SO_2 in the stratosphere; (6) oxidation of SO_2 in the stratosphere; (7) transport of stratospheric OCS , SO_2 , and sulfate back into the troposphere; (8) oxidation of SO_2 and other $\text{S}(+4)$ products by OH in the troposphere; (9) absorption of $\text{S}(+4)$, mainly SO_2 , into hydrosols (cloud/fog/rain droplets, moist aerosol particles); (10) liquid phase oxidation of $\text{S}(+4)$ by $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$ in hydrosols (and by O_2 in the presence of elevated levels of catalytic metal ions); (11) absorption/growth of $\text{S}(+6)$ aerosol—mainly sulfate—into hydrosols; (12) evaporation of cloud-water leaving residual $\text{S}(+6)$ aerosol; (13) deposition of OCS , $\text{S}(+4)$, and $\text{S}(+6)$.

Smog classico (fumo di Londra)

Lo smog così detto "fumo di Londra" è costituito da una miscela di fumo e nebbia (*smoke* + *fog*) **impregnata di SO_2** . Il termine è stato probabilmente coniato intorno al **1905** per descrivere le condizioni atmosferiche delle maggiori città inglesi.

E' associato all'uso dei combustibili fossili, in particolare al **carbone** che contiene consistenti quantità di zolfo. In presenza di umidità le particelle carboniose possono fungere da nuclei di condensazione di goccioline d'acqua formando una nebbia irritante.

Già nell'autunno del **1909** più di **1000 morti** avvenute nelle città di Glasgow ed Edimburgo furono attribuite allo smog. Nel **1952** a Londra vi furono **4000 morti** a causa dello smog persistente.



Piogge acide

- È la precipitazione la cui **acidità supera quella normalmente determinata dalla presenza di gas di origine naturale (in particolare, CO_2)**. Solitamente si prende come valore di riferimento $\text{pH} = 5.6$;
- Il termine indica genericamente anche gli altri tipi di precipitazione umida, quali nebbia, rugiada, neve e grandine;
- Più in generale, deposizione acida si riferisce alla deposizione di acidi acquosi, sommata alla deposizione secca di gas acidi (come SO_2) e sali acidi (NH_4HSO_4).

Piogge acide

- È la precipitazione la cui **acidità supera quella normalmente determinata dalla presenza di gas di origine naturale (in particolare, CO_2)**. Solitamente si prende come valore di riferimento $\text{pH} = 5.6$;
- Il termine indica genericamente anche gli altri tipi di precipitazione umida, quali nebbia, rugiada, neve e grandine;
- Più in generale, deposizione acida si riferisce alla deposizione di acidi acquosi, sommata alla deposizione secca di gas acidi (come SO_2) e sali acidi (NH_4HSO_4).

Rispetto alla CO_2 , la SO_2 contribuisce maggiormente all'acidità per:

- ❖ maggiore solubilità in acqua (costante di Henry $\text{SO}_2 = 1.2 \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{atm})$ rispetto a $3.38 \cdot 10^{-2} \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{atm})$ della CO_2);
- ❖ costante di dissociazione acida $K_{a1} = 1.7 \cdot 10^{-2}$ (contro $4.45 \cdot 10^{-7}$ della CO_2).

Piogge acide

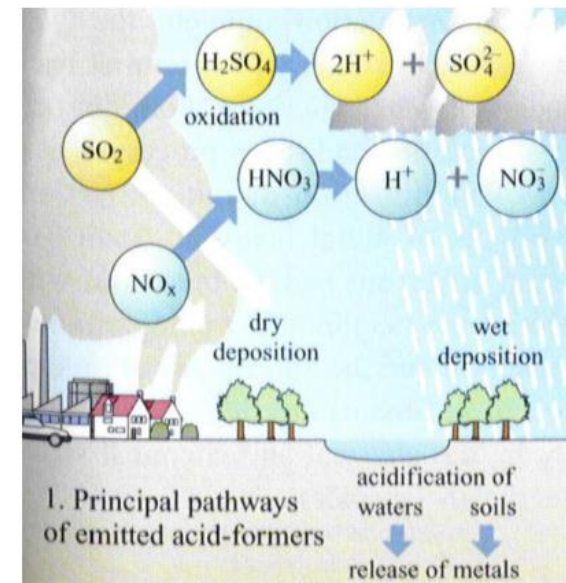
- È la precipitazione la cui **acidità supera quella normalmente determinata dalla presenza di gas di origine naturale (in particolare, CO_2)**. Solitamente si prende come valore di riferimento $\text{pH} = 5.6$;
- Il termine indica genericamente anche gli altri tipi di precipitazione umida, quali nebbia, rugiada, neve e grandine;
- Più in generale, deposizione acida si riferisce alla deposizione di acidi acquosi, sommata alla deposizione secca di gas acidi (come SO_2) e sali acidi (NH_4HSO_4).

Rispetto alla CO_2 , la SO_2 contribuisce maggiormente all'acidità per:

- ❖ maggiore solubilità in acqua (costante di Henry $\text{SO}_2 = 1.2 \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{atm})$ rispetto a $3.38 \cdot 10^{-2} \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{atm})$ della CO_2);
- ❖ costante di dissociazione acida $K_{a1} = 1.7 \cdot 10^{-2}$ (contro $4.45 \cdot 10^{-7}$ della CO_2).

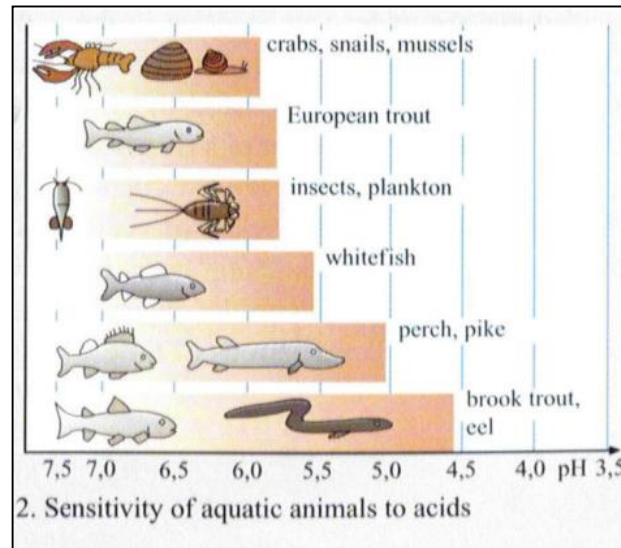
La pioggia acida può formarsi per diretta emissione di acidi forti (HCl o H_2SO_4), ma la maggior parte è un prodotto di **inquinanti secondari** ottenuti per trasformazione chimica di inquinanti primari (NO_x e SO_2).

Gli spostamenti delle masse d'aria portano i gas responsabili delle **precipitazioni acide anche a distanza di migliaia di km dal punto di emissione**, depositandoli parecchi giorni dopo la loro formazione.



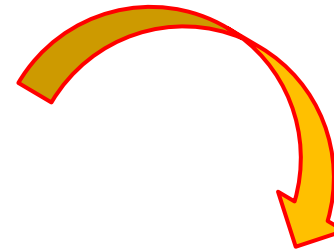
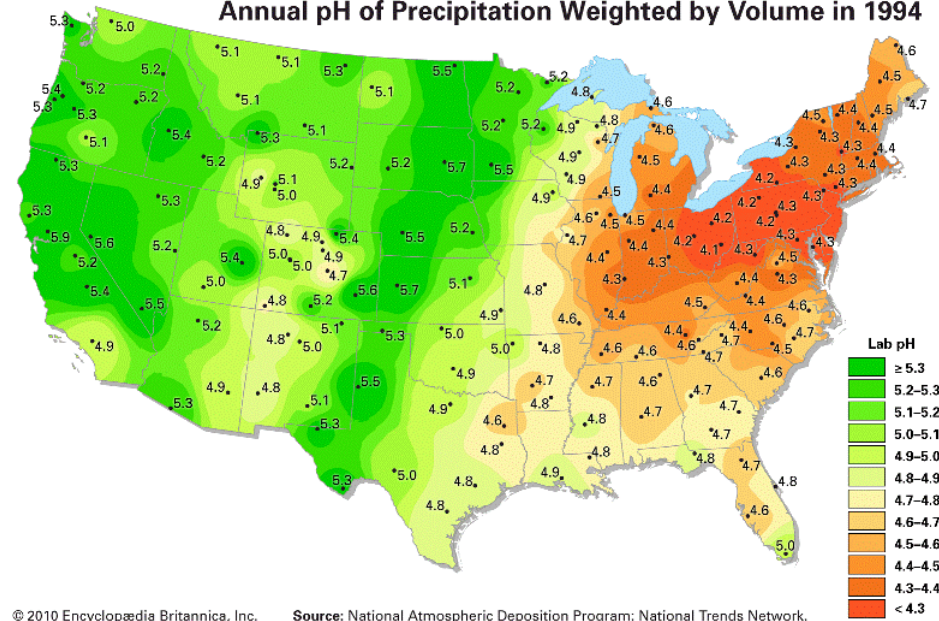
Effetti delle piogge acide

- ✓ Fitotossicità diretta sulle piante per l'eccessiva concentrazione degli acidi;
- ✓ Fitotossicità dovuta ai gas che provocano l'acidità, in particolare SO_2 e NO_2 , che accompagnano la pioggia acida;
- ✓ Fitotossicità indiretta, come quella dovuta all' Al^{3+} liberato dal suolo;
- ✓ Distruzione di foreste sensibili;
- ✓ Effetti sulla respirazione dell'uomo e degli animali;
- ✓ Acidificazione dell'acqua dei laghi con effetti tossici sulla flora e sulla fauna;
- ✓ Corrosione di strutture esposte, materiali elettrici e monumenti. In particolare il calcare è estremamente suscettibile di degrado da parte di acidi.

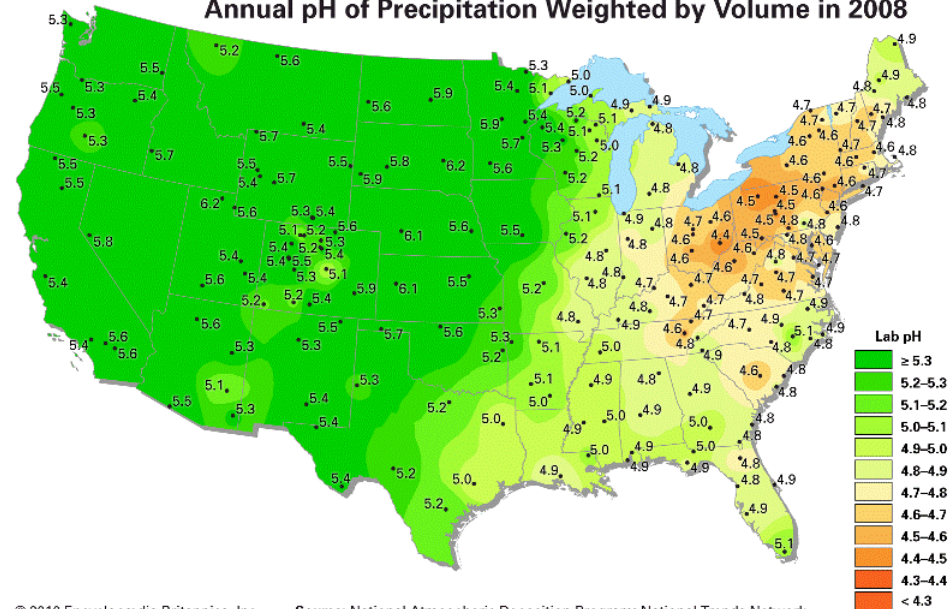


Diminuzione delle piogge acide con il contenimento delle emissioni

Annual pH of Precipitation Weighted by Volume in 1994



Annual pH of Precipitation Weighted by Volume in 2008



© 2010 Encyclopædia Britannica, Inc. Source: National Atmospheric Deposition Program: National Trends Network.

Effetto serra dei gas in atmosfera

