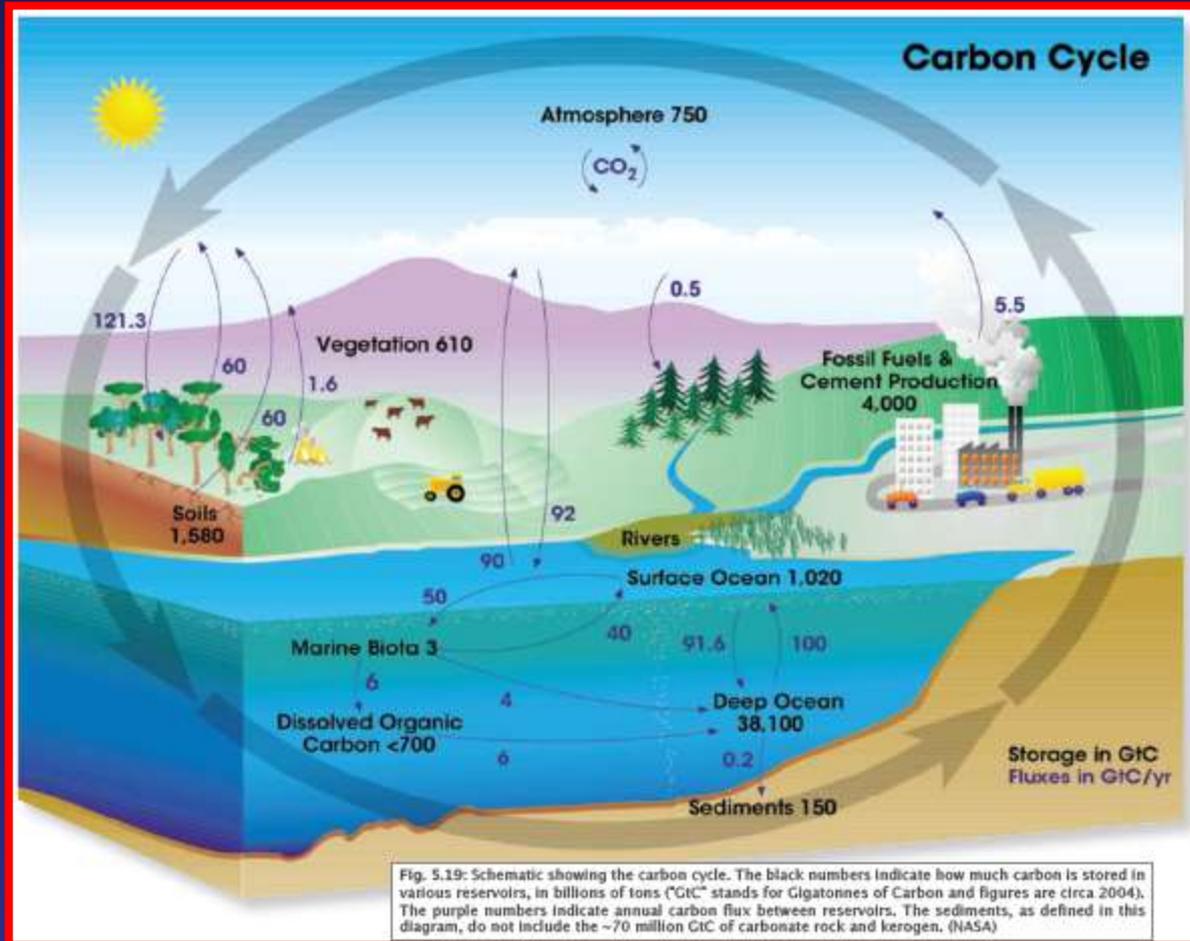


# Il ciclo globale del carbonio

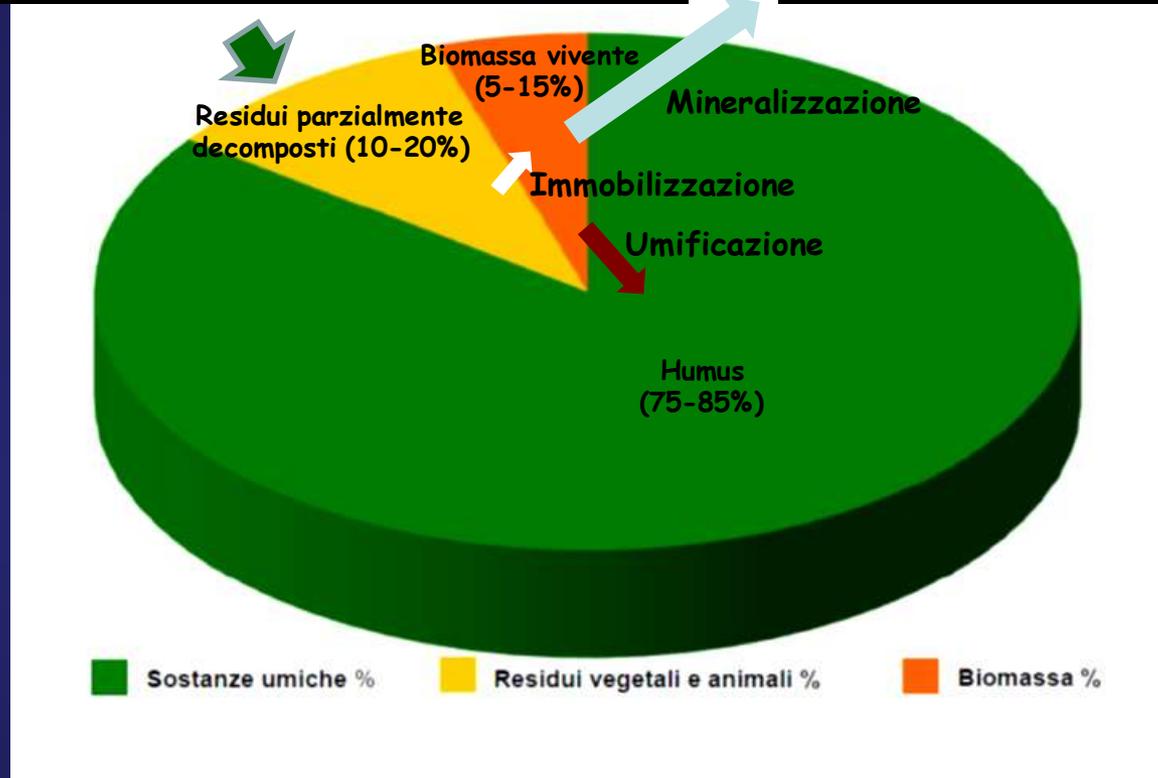


Il C ha un ciclo biogeochimico sedimentario-gassoso che costituisce lo schema energetico fondamentale dell'ecosistema terrestre

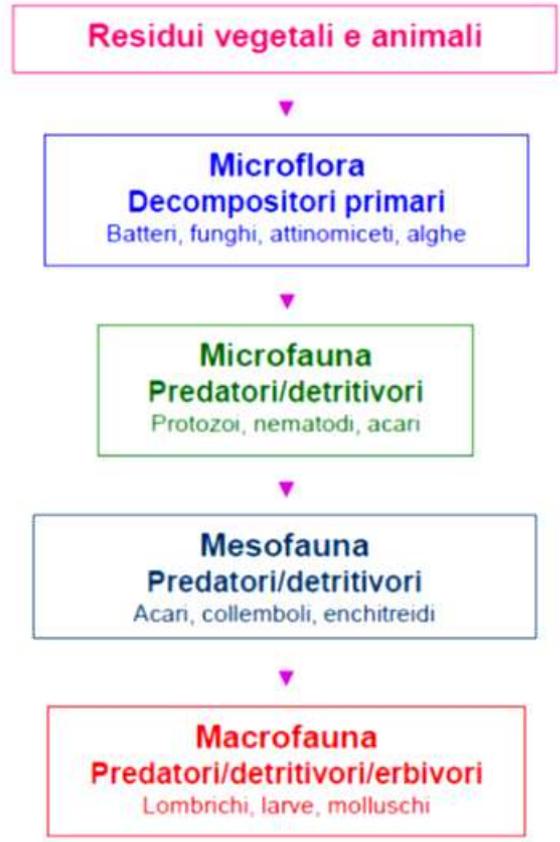
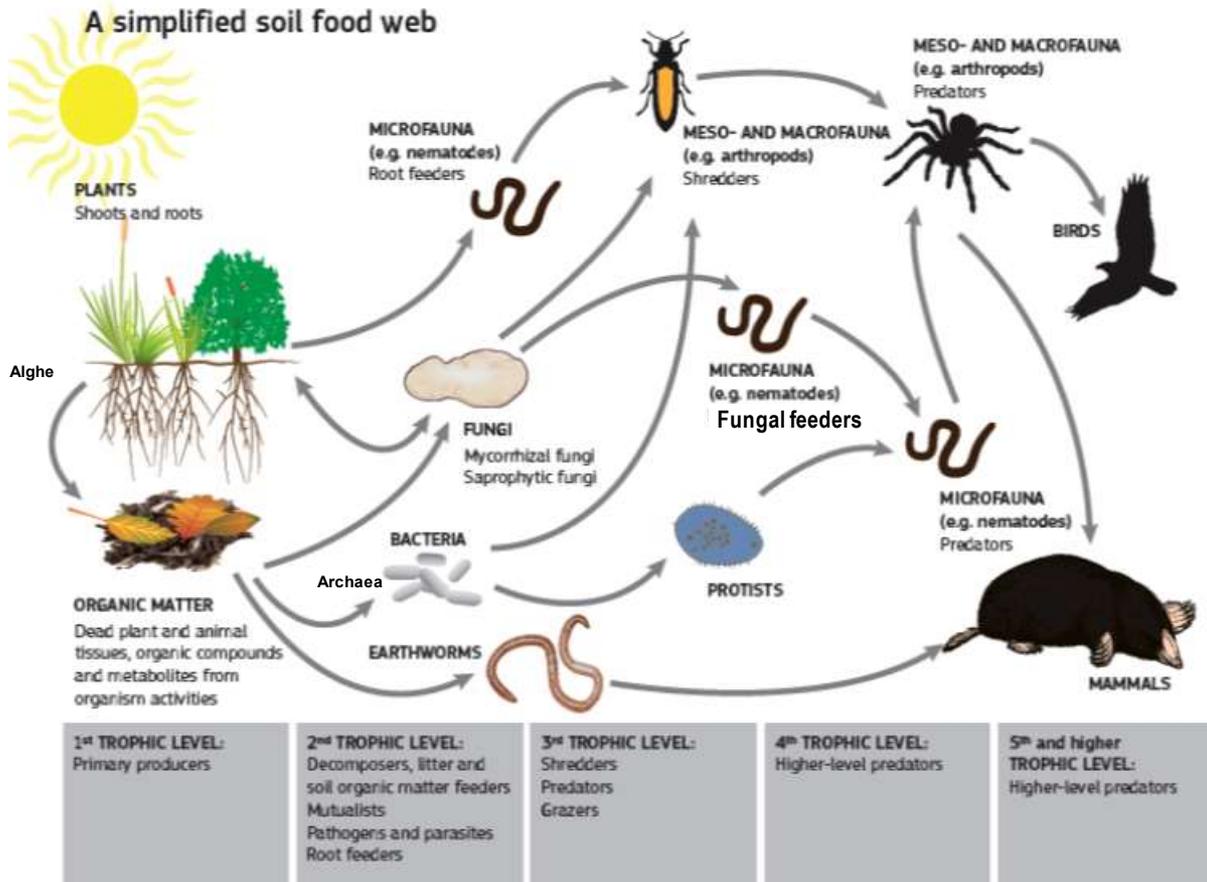
# Processi del C organico nel suolo

C (ed energia) catturato dalle piante come  $CO_2$  ed apportato al suolo come biomolecole (*input primario*)

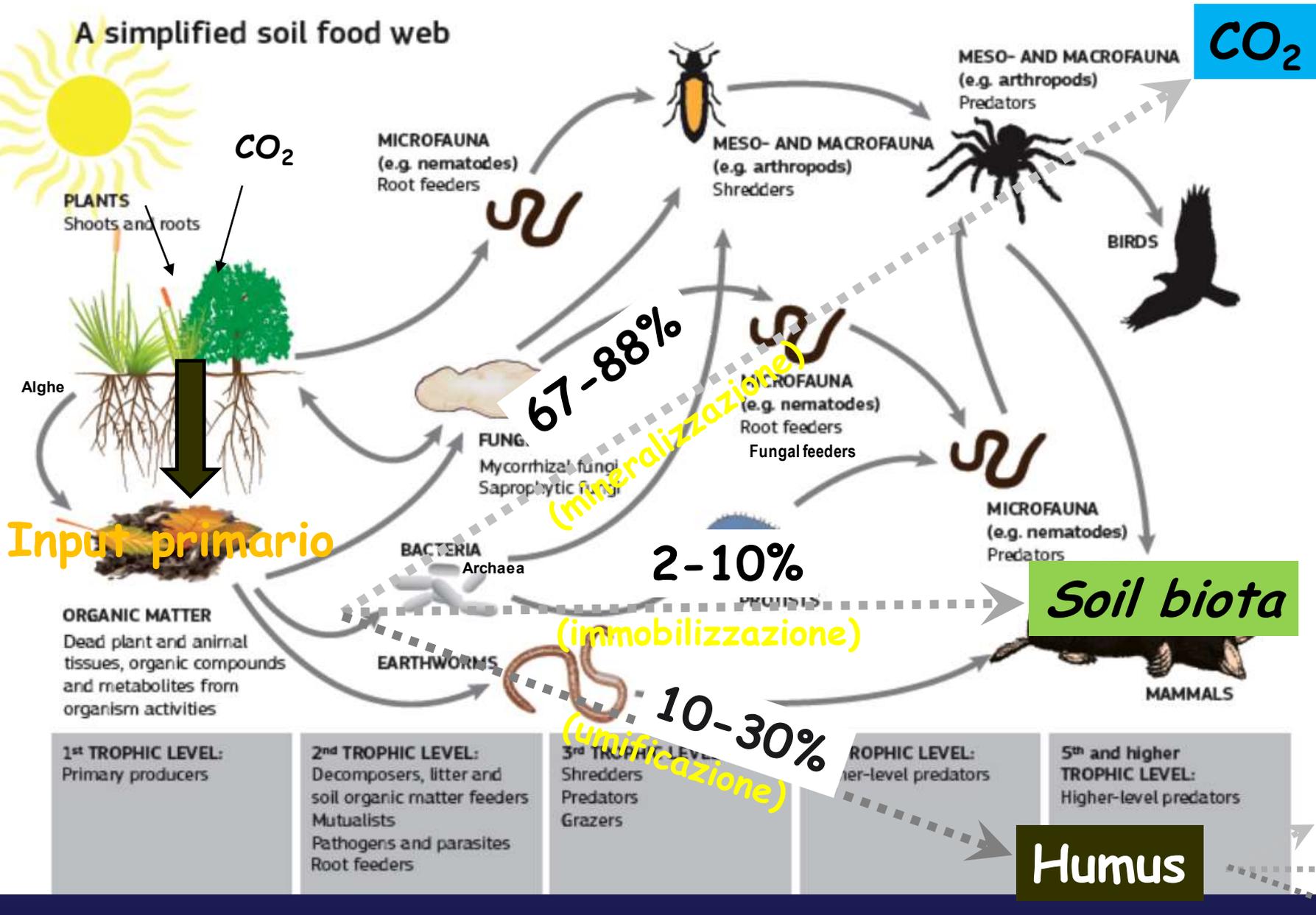
C rilasciato come  $CO_2$  per ossidazione delle biomolecole



Modello concettuale che mostra le relazioni trofiche che collegano ecologicamente gli organismi viventi della comunità edafica mediante trasferimento di substrati organici ed energia metabolica.



# A simplified soil food web



**1<sup>st</sup> TROPHIC LEVEL:**  
Primary producers

**2<sup>nd</sup> TROPHIC LEVEL:**  
Decomposers, litter and soil organic matter feeders  
Mutualists  
Pathogens and parasites  
Root feeders

**3<sup>rd</sup> TROPHIC LEVEL:**  
Shredders  
Predators  
Grazers

**4<sup>th</sup> TROPHIC LEVEL:**  
Higher-level predators

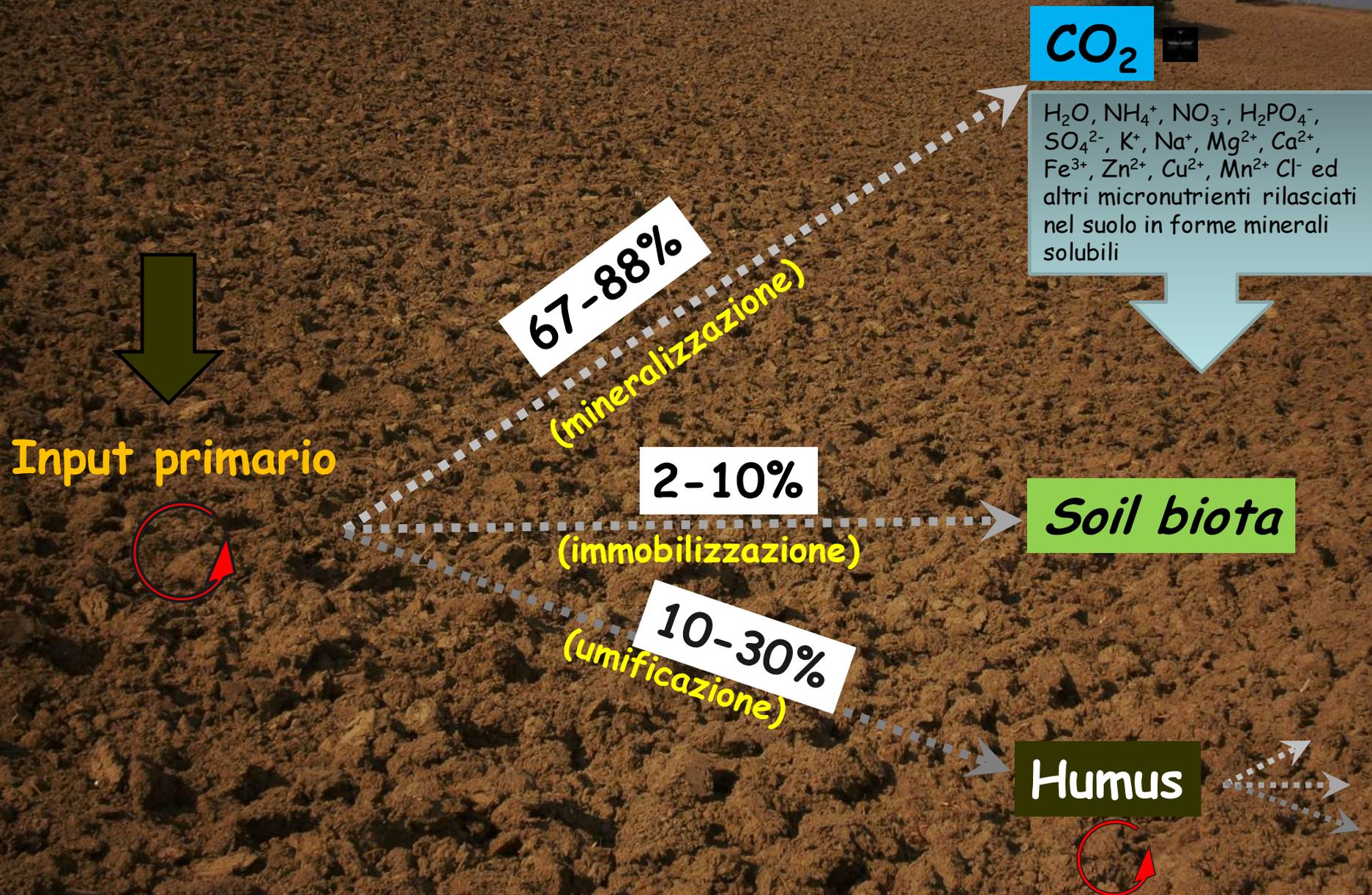
**5<sup>th</sup> and higher TROPHIC LEVEL:**  
Higher-level predators

**Humus**

**CO<sub>2</sub>**

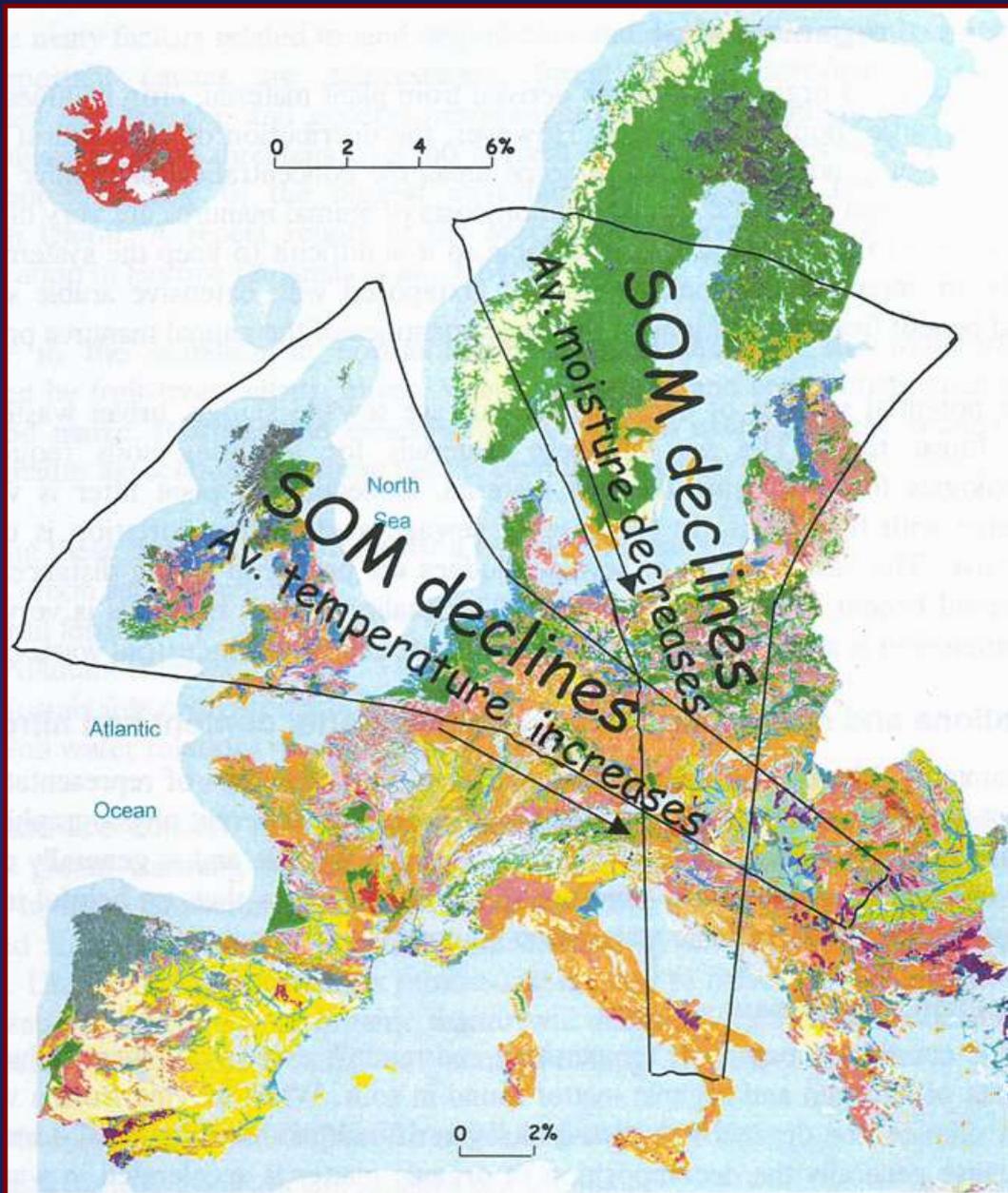
**Soil biota**

# Processi del C organico nel suolo



# I fattori che controllano i processi biologici di trasformazione della SOM sono:

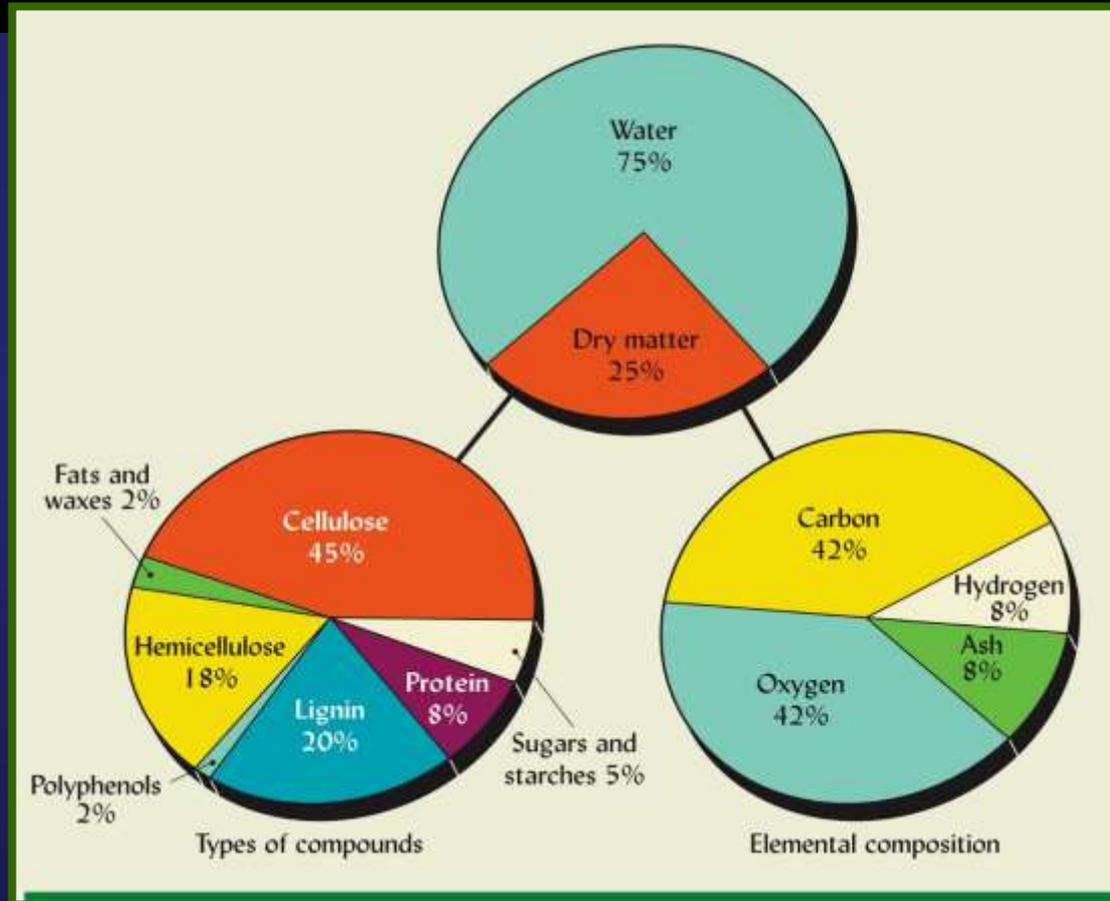
- ✓ la temperatura del suolo (*mesofilia*)
- ✓ l'umidità del terreno (*capacità di campo*)
- ✓ la disponibilità di  $O_2$  (*40% porosità*)
- ✓ le caratteristiche geomorfologiche (*esposizione, giacitura*)
- ✓ il contenuto ed il tipo di argilla (*suoli franchi; argille 2:1*)
- ✓ il contenuto in carbonati totali (*1-10%*)
- ✓ il pH (*6.3 - 7.8*)
- ✓ *soil biota* (*composizione e attività*)
- ✓ le attività antropiche e la gestione (*conservation tillage*)
- ✓ la qualità dell'input organico (*lignina, polifenoli, rapporto C/N*)



Contenuto in sostanza organica nei suoli europei in relazione ai gradienti di temperatura ed umidità (da Buckman e Brady, 1960)

# Caratteristiche del residuo organico (*input primario*) che ne controllano il processo biotico di degradazione nel suolo

La lettiera vegetale contiene, mediamente, dal 60 al 90% (p/p) di acqua. La sostanza secca (determinata per riscaldamento a 60 °C, 3 giorni) è costituita da biomolecole contenenti principalmente **C** (42%), **O** (42%), **H** (8%), oltre ad altri elementi essenziali (N, S, P, Ca, K, Mg, etc.) presenti come sali nelle ceneri (*ash*).



(da Weil & Brady, 2017)

## Caratteristiche del residuo organico (*input primario*) che ne controllano il processo biotico di degradazione nel suolo

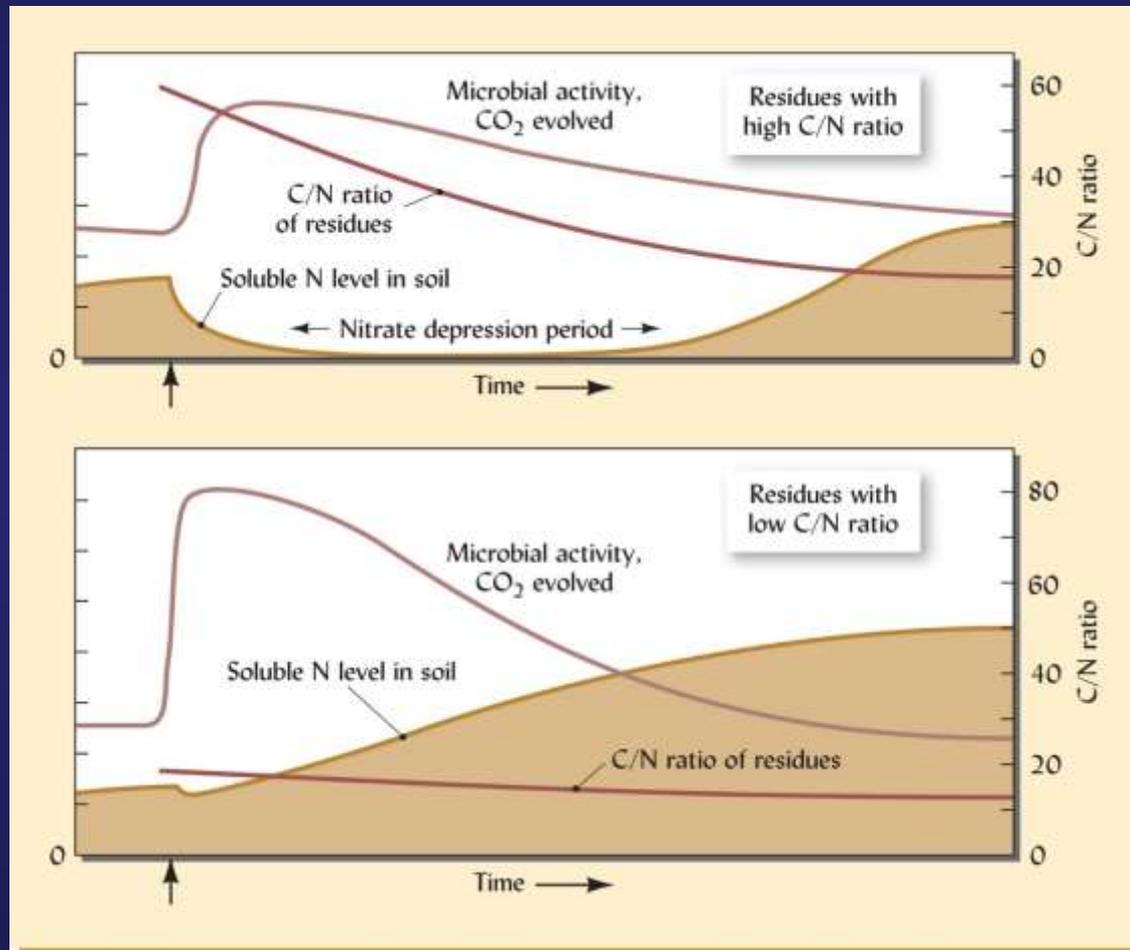
- **Lignina**: biopolimero vegetale resistente alla degradazione microbica, richiede tempi lunghi di decomposizione, poco adatto a soddisfare le immediate richieste energetiche e nutrizionali del *soil biota*, coinvolge l'azione di enzimi extracellulari e di microrganismi decompositori a più lento sviluppo. Contenuto variabile dall'1 al 25% in relazione alla specie vegetale e al suo sviluppo. **Valore soglia: 20%**
- **Polifenoli**: componenti della biomassa vegetale, soprattutto forestale, agiscono come inibitori della attività microbica (azione allelopatica) e possono formare complessi insolubili con le sostanze proteiche. **Valore soglia: 3%**
- **Rapporto C/N**: esprime il rapporto tra il contenuto elementare di C e di N della biomassa vegetale. Indica la disponibilità di N per il *soil biota* che ha un C/N ~8:1. **Valore soglia: 25-30**

## Il rapporto C/N del residuo organico e degradabilità

La microflora microbica dei decompositori primari che presiede alla degradazione dei residui organici confronta metabolicamente il rapporto C/N delle proprie cellule (~8:1) con quello della matrice organica. Considerando l'efficienza microbica di conversione (~0.33), avremo:

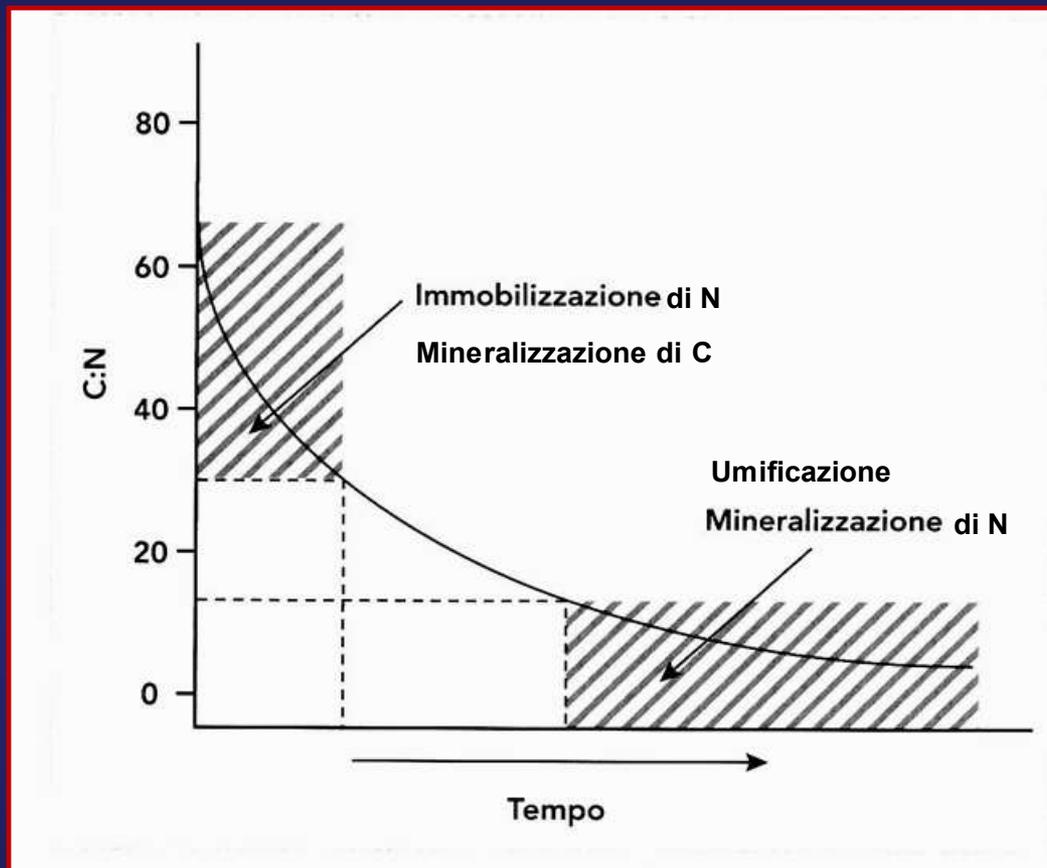
- ❖ L'attività microbica di degradazione è esaltata dalla disponibilità di N nella matrice organica. **Residui con rapporto C/N < 25-30** sono agevolmente trasformate nel suolo e vengono liberati nutrienti solubili.
- ❖ Se la matrice organica ha **C/N > 30**, l'attività microbica è rallentata e procede:
  - in carenza di N solubile nel suolo alla prevalente mineralizzazione di C
  - in presenza di N solubile alla sua immobilizzazione con conseguenti temporanee carenze del nutriente nel suolo

Cambiamenti nei livelli di attività microbica, N solubile e nel rapporto C/N del residuo dopo aggiunta di materiale organico con  $C/N > 25$  (a) e  $C/N < 25$  (b). Si noti la fase di carenza di N solubile in (a).



(da Weil & Brady, 2017)

# Il rapporto C/N del residuo organico e i processi di mineralizzazione/immobilizzazione di C e N nel suolo



Quando  $C/N > 30$  prevale l'immobilizzazione microbica di N e la perdita di C per mineralizzazione

Quando  $C/N < 20$  prevale la mineralizzazione di N e l'umificazione

# Il rapporto C/N del residuo organico e degradabilità

Specie	C (%)	N (%)	P (%)	S (%)	K (%)	C/N
Mais ( <i>Zea mais</i> )	44	1,4	0,2	0,17	0,9	31.4
Cavolo ( <i>Brassica oleracea</i> )	42	4,3	0,45	1,6	2,5	9.8
Avena ( <i>Avena sativa</i> )	40	0,5	0,22	0,12	2,4	80.0
Erba medica ( <i>Medicago sativa</i> )	45	3,3	0,28	0,44	0,9	13.6
Legno di pino ( <i>Pina excelsa</i> )	46	0,13	0,006	0,005	0,03	353.8
Batteri ( <i>Escherichia coli</i> )	50	15	3,2	1,1	-	3.3
Attinomiceti ( <i>Streptomyces cerevisiae</i> )	50	11	1,5	0,4	1,8	4.5
Lieviti ( <i>Saccharomyces cerevisiae</i> )	47	6,2	0,7	0,3	2,0	7.6
Funghi ( <i>Penicillium chrysogenum</i> )	44	3,4	0,6	0,4	0,6	12.9
Lombrichi ( <i>Lumbricus terrestris</i> )	46	10	0,9	0,8	1,1	4.6
Letame bovino	37	2,8	0,54	0,7	5,1	13.2

Composizione chimica elementare (% della sostanza secca)  
di alcune piante, di altre entità biotiche e del letame

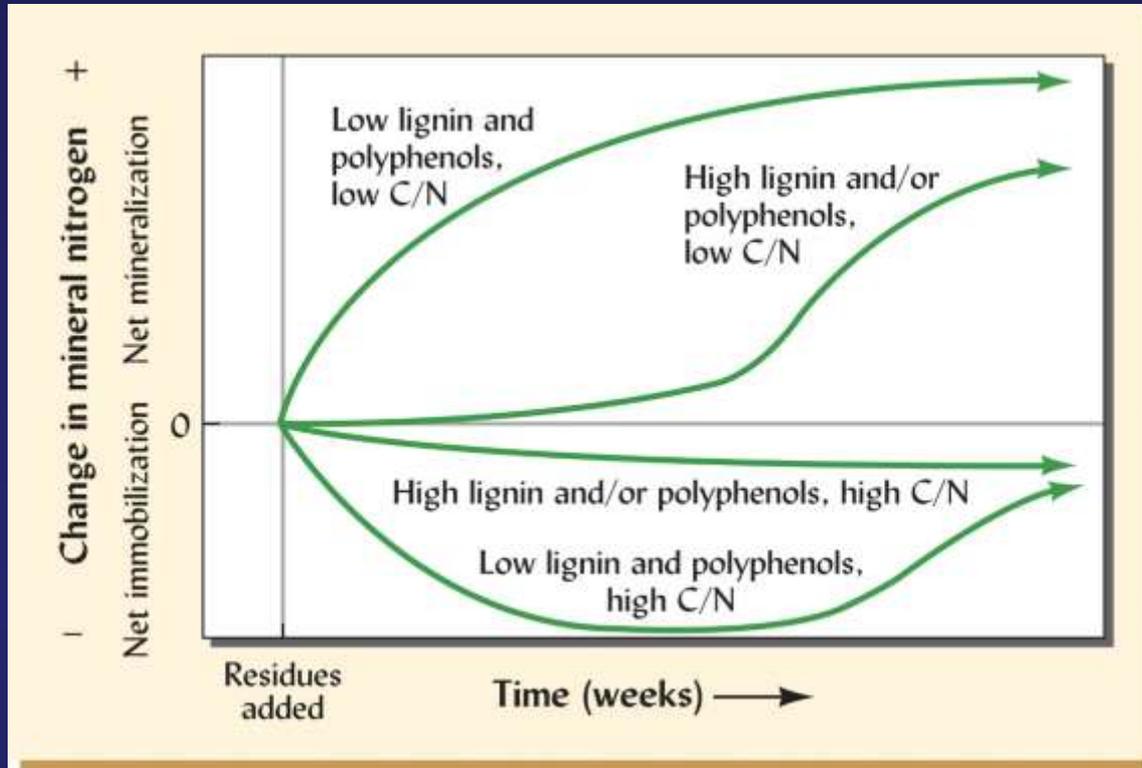
Il rapporto C:N della sostanza organica del suolo è mediamente pari a 12:1

# Il rapporto C/N del residuo e degradabilità

Materiale organico	Rapporto C/N	Degradabilità	Permanenza nel suolo (anni)
Sostanze umiche	8-13	Molto lenta	<5-10 <sup>3</sup>
Letame	15-30	Elevata	<5
Fieno, erba, strame	20-70	Elevata	<5
Lettiera di latifoglie	20-60	Elevata	<5
Lettiera di conifere	30-40	Moderata	1-10
Paglia	60-120	Moderata	<1-10
Aghi di pino	80-130	Moderata	<1-10
Corteccia di alberi	100-1500	Lenta	10-102
Legno	200-1500	Lenta	10-102

Valore del rapporto C/N, degradabilità e tempo di permanenza nel suolo di materiali organici diversi (modificata da Nieder et al., 2003)

# Qualità del residuo organico



Alta/media  
qualità

Bassa  
qualità

(da Weil & Brady, 2017)

Effetto del contenuto in lignina, polifenoli e rapporto C/N del residuo organico sul rilascio di N solubile nel suolo.

Valori soglia: lignina, 20%; polifenoli, 3%; C/N, 25-30.

# Qualità del residuo organico

Tab. IV.2 - Influenza del contenuto di lignina e di polifenoli, e del valore del rapporto C:N sulla qualità di residui vegetali di piante coltivate in ambiente tropicale umido e temperato subumido (modificata da Brady e Weil, 2008).

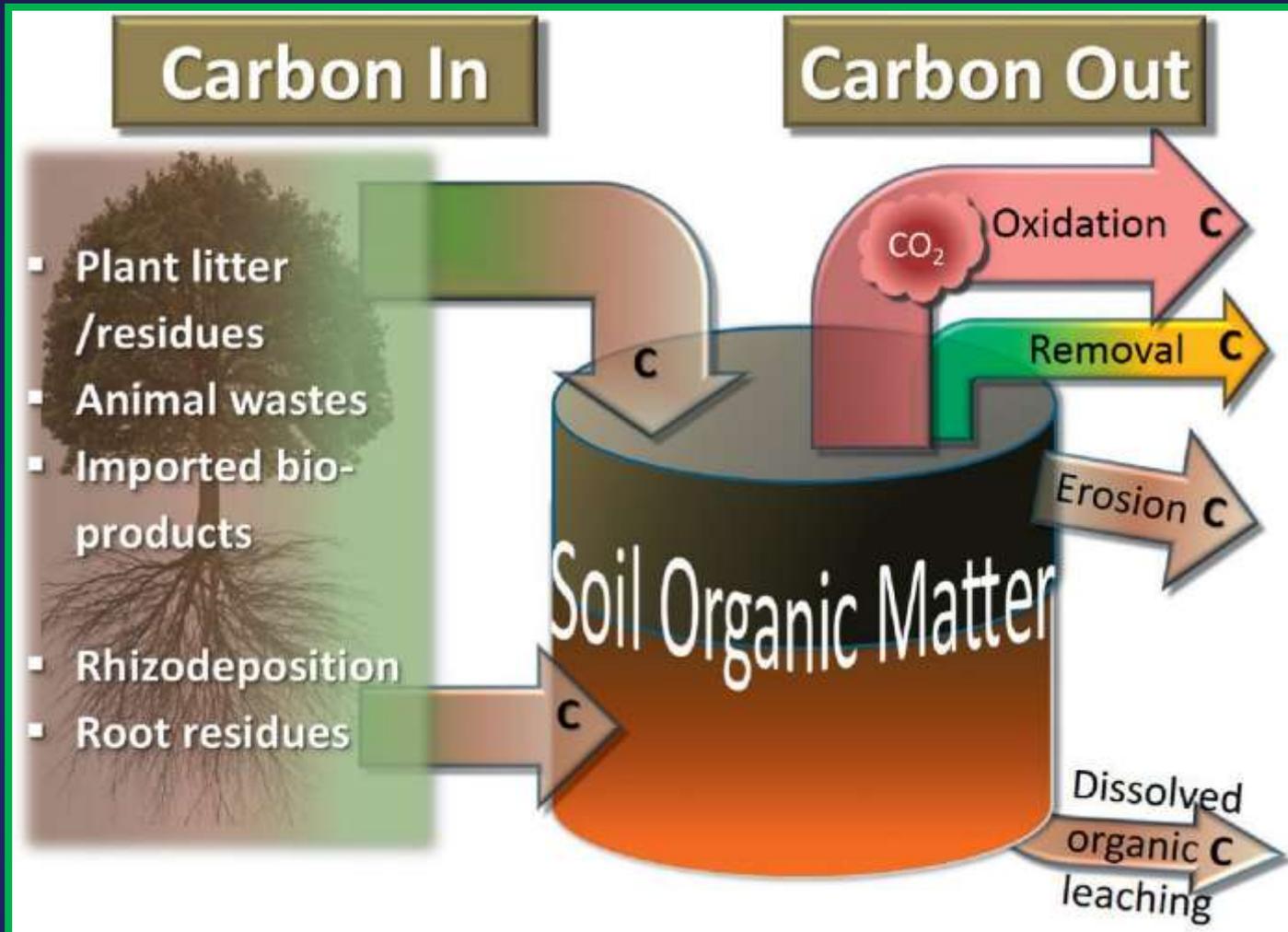
Specie vegetali	Materiale organico vegetale	Lignina %	Polifenoli %	Azoto totale %	C:N	Qualità del residuo
<i>Gliricidia sepium</i> (Giricidia)*	Residui della potatura	12	1,6	3,5	13	Alta
<i>Leucaena leucocephala</i> * (Acacia pallida)	Residui della potatura	13	5,0	3,5	13	Medio-alta
<i>Oryza sativa</i> (Riso)*	Residui colturali	5	0,6	1,0	42	Media
<i>Zea mays</i> (Mais)*	Residui colturali	7	0,6	1,1	43	Media
<i>Dactyladenia barteri</i> *	Fieno	47	4,1	1,6	28	Bassa
<i>Poa trivialis</i> (Fienarola dei prati)**	Residui colturali	8	0,2	2,2	19	Medio-alta
<i>Glycine max</i> (Soia)**	Residui colturali	9	0,2	2,2	20	Medio-alta
<i>Zea mays</i> (Mais)**	Residui colturali	7	0,3	1,5	28	Media
<i>Acer saccharinum</i> (Acero argenteo)**	Foglie	11	4,8	1,4	34	Media
<i>Carya illinoensis</i> (Pecan)**	Foglie	25	2,1	1,1	42	Medio-bassa

\* Piante coltivate in ambiente tropicale umido (Nigeria)  
 \*\* Piante coltivate in ambiente temperato subumido (Missouri, USA)

Valori soglia: lignina, 20%; polifenoli, 3%; C/N, 25-30

Va osservato che per il materiale di qualità alta e medio-alta, le perdite per mineralizzazione hanno un valore più basso nell'intervallo 67-88%

# Il bilancio del C umico nel suolo



## Apporti

Necromasse vegetali  
Residui colturali  
Deiezioni animali  
Rizodeposizioni  
Concimazione organica

## Perdite

Mineralizzazione ( $CO_2$ )  
Asportazioni colturali  
Erosione  
Lisciviazione della DOM

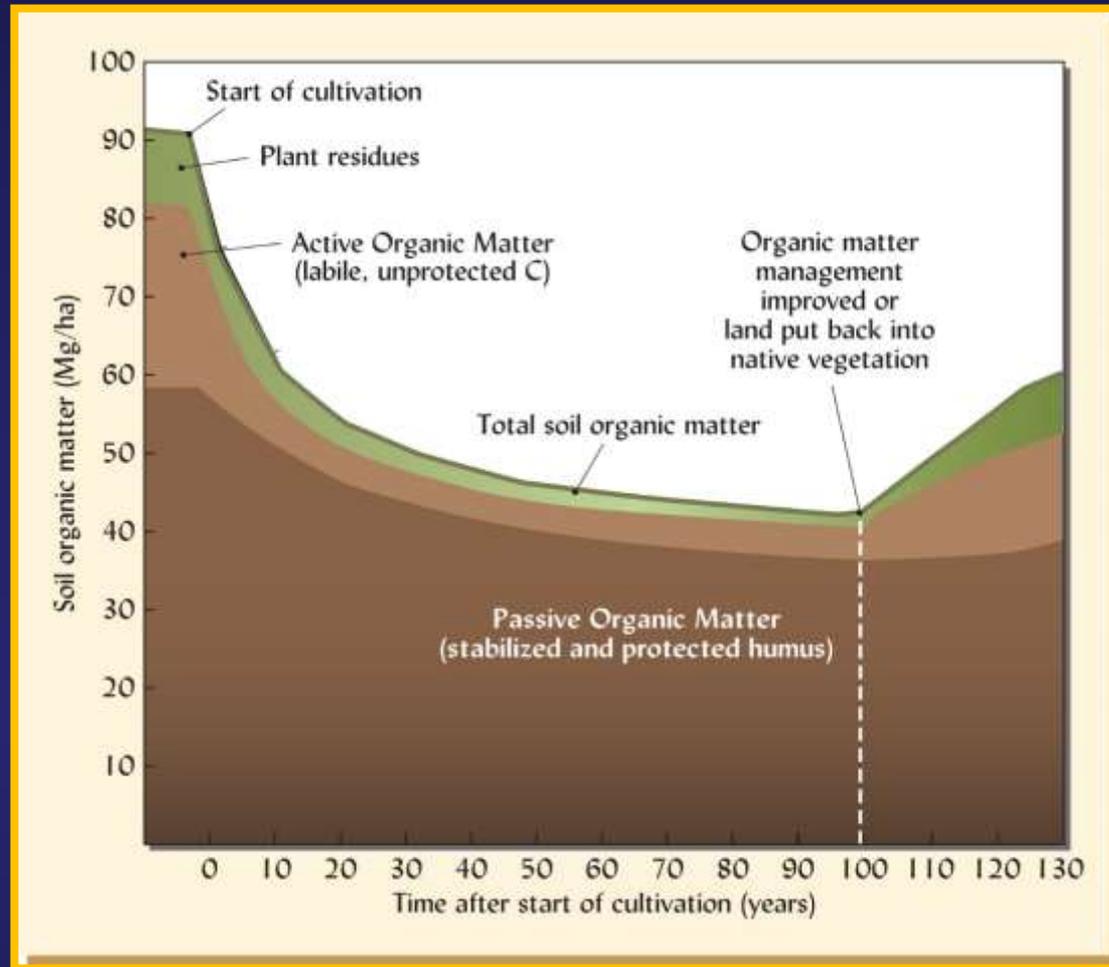
(da Weil & Brady, 2017)

Il contenuto di sostanza organica del suolo è determinato dalle **aggiunte** e dalle **perdite** di matrici organiche e rappresenta un importante indicatore di sostenibilità dei sistemi colturali o naturali.

Probably the two greatest disturbance events that affect SOM concentrations are tillage and erosion

Losses of OM when a native ecosystem is converted into arable agriculture can be very high (60-70%), but generally range between 20 and 50% during the first 40-50 years of cultivation.

# Cambiamenti nelle frazioni della SOM in risposta alla coltivazione



(da Weil & Brady, 2017)

La conversione del suolo da indisturbato a coltivato causa, nei primi 40-50 anni, una perdita di SOM pari al 20-50%, dovuta a:

- asportazione di C fotosintetico,
- sostituzione delle specie native con altre a diverso shoot/root ratio
- alterazione nelle condizioni termo-igroscopiche e strutturali del suolo,
- rimozione di SOM labile tramite erosione delle particelle più fini

# Gestione del patrimonio organico del suolo

Per mantenere un suolo agrario funzionalmente attivo e conservarne (o ripristinarne) il patrimonio organico si utilizzano gli **ammendanti**.

Un ammendante è un prodotto fertilizzante con la funzione di mantenere, migliorare o proteggere le proprietà **fisiche** e **chimiche**, la struttura e **l'attività biologica** del suolo a cui è aggiunto. Non è una immediata fonte di nutrienti.

Ammendanti sono matrici organiche stabilizzate (letame, torba, lignite, ammendanti compostati, vermicompost da letame, biochar, digestato).

Il valore agronomico di un ammendante è fornito dal suo **coefficiente isoumico**.

Il coefficiente isoumico ( $k_1$ ) esprime la **resa in humus di una matrice organica**, ovvero rappresenta la quantità di humus formato dall'unità in peso di quella matrice organica, ipotizzando condizioni edafiche, climatiche e di gestione mediamente rappresentative. Dipende dal contenuto di composti umo-simili.

Matrici vegetali o residui agro-industriali non stabilizzati, con un alto contenuto di biomolecole facilmente degradabili, hanno un basso  $k_1$ .

# Gestione del patrimonio organico del suolo

Valori indicativi del coefficiente isoumico di alcune matrici organiche utilizzate come ammendante nei suoli agrari

**TABELLA 2.11** Coefficiente isoumico di diverse matrici organiche

<b>Matrice organica</b>	<b>Coefficiente isoumico (g humus/g matrice organica)*</b>
Letame compostato	0,50
Letame fresco	0,25
Paglia di cereali	0,18
Residui di girasole	0,20
Residui di barbabietola da zucchero	0,12
Residui di patata	0,15
Residui di olivo	0,20

\* dopo 3 anni

# Il bilancio del C umico nel suolo agrario

**Apporti = Perdite**

**Perdite annue per mineralizzazione = SOC  $\times$   $k_2$**

1. Calcolo SOC

2. Stima  $k_2$  (coefficiente di mineralizzazione annua)

CO<sub>2</sub>

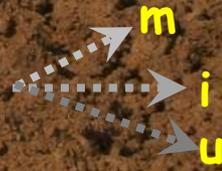
Perdite

Humus

m

i

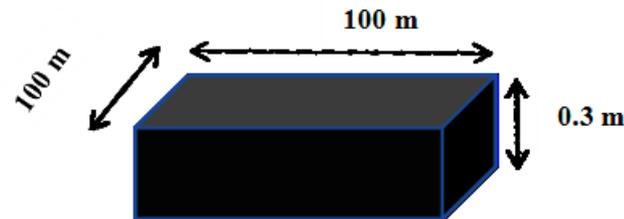
u



# Il bilancio del C umico nel suolo agrario

## 1. Calcolo SOC

Stima del contenuto di C umico totale (SOC) in 1 ha di suolo per uno strato di 30 cm (suolo 1).



*Calcolo volume unitario di suolo*

$$S = 10000 \text{ m}^2$$

$$P = 0.3 \text{ m}$$

$$\text{Volume di suolo} = S \times P = 10000 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \times 0.3 \text{ m} = 3000 \text{ m}^3 \text{ di suolo ha}^{-1}$$

*Calcolo massa unitaria di suolo*

Massa di suolo/ha = Volume di suolo/ha  $\times$  (massa volumica apparente)

$$M_{\text{suolo}} = 3000 \text{ m}^3 \text{ di suolo ha}^{-1} \times 1.58 \text{ t}_{\text{suolo}} \text{ m}^{-3} = 4740 \text{ t}_{\text{suolo}} \text{ ha}^{-1} \text{ (strato 0-30 cm)}$$

*Calcolo SOC*

$$C_{\text{org}} = 0.39\% = 3.9 \text{ g}_{\text{C}} \text{ kg}_{\text{suolo}}^{-1} (\text{kg}_{\text{C}} \text{ t}^{-1}) = 0.0039 \text{ t}_{\text{C}} \text{ t}^{-1}$$

Quantità di SOC per ha = massa di suolo/ha  $\times$   $C_{\text{org}}$  (%)

$$Q_{\text{SOC}} \text{ ha}^{-1} = 4740 \text{ t}_{\text{suolo}} \text{ ha}^{-1} \times 0.0039 \text{ t}_{\text{C}} \text{ t}^{-1} = 18.486 \text{ t}_{\text{C}} \text{ ha}^{-1} \text{ di C organico totale}$$

# Il bilancio del C umico nel suolo agrario

## 2. Stima $k_2$ (coefficiente di mineralizzazione annua)

Tassi di mineralizzazione annua ( $k_2$ ) della SOM/SOC in climi temperati in relazione al contenuto di argilla e di carbonati totali

	Carbonati totali (g/kg)						
	0	100	200	300	400	500	600
0	3,00	2,00	1,50	1,20	1,00	0,86	0,75
50	2,40	1,60	1,20	0,96	0,80	0,69	0,60
100	2,00	1,33	1,00	0,80	0,67	0,57	0,50
150	1,71	1,14	0,86	0,69	0,57	0,49	0,43
200	1,50	1,00	0,75	0,60	0,50	0,43	0,38
250	1,33	0,89	0,67	0,53	0,44	0,38	0,33
300	1,20	0,80	0,60	0,48	0,40	0,34	0,30
350	1,09	0,73	0,55	0,44	0,36	0,31	0,27
400	1,00	0,67	0,50	0,40	0,33	0,29	0,25
450	0,92	0,62	0,46	0,37	0,31	0,26	0,23
500	0,86	0,57	0,43	0,34	0,29	0,24	0,21
550	0,80	0,53	0,40	0,32	0,27	0,23	0,20
600	0,75	0,50	0,38	0,30	0,25	0,21	0,19

Conoscendo i dati del suolo si applica la relazione empirica di Rémy e Marin-Laflèche

$$k_2 = \frac{120000}{(A + 200) \times (CaCO_3 + 200)}$$

# Il bilancio del C umico nel suolo agrario

## 2. Stima $k_2$ (coefficiente di mineralizzazione annua)

Conoscendo i dati del suolo si applica la relazione empirica di Rémy e Marin-Laflèche

$$k_2 = \frac{120000}{(A + 200) \times (CaCO_3 + 200)}$$

*Stima  $k_2$*

argilla = **14.28%** = 142.8 g kg<sup>-1</sup>

calcare totale = **17%** = 170 g kg<sup>-1</sup>

$k_2 = 120000 / [(142.8 + 200) \times (170 + 200)] = \mathbf{0.946\% \text{ anno}^{-1}}$

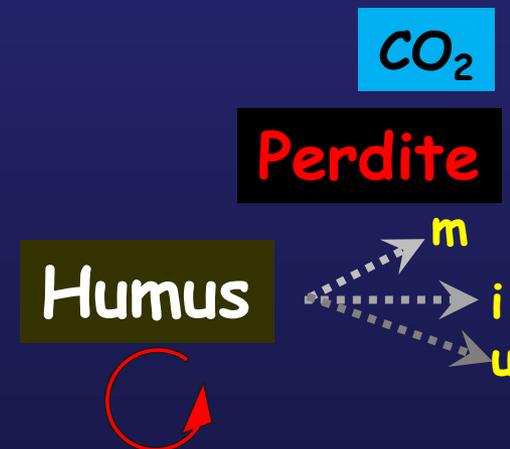
# Il bilancio del C umico nel suolo agrario

**Perdite annue per mineralizzazione = SOC  $\times$   $k_2$**

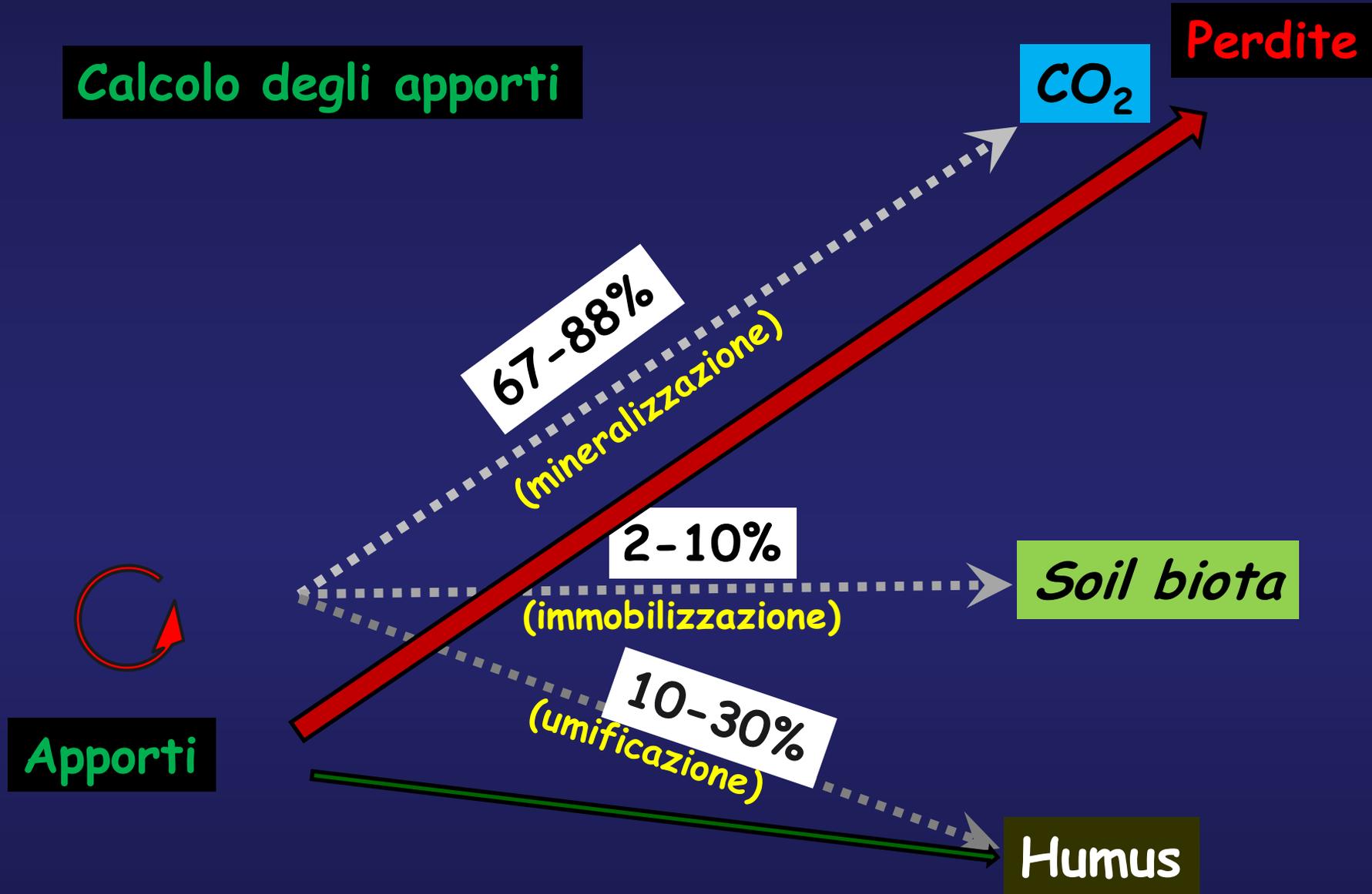
*Calcolo della quota di C mineralizzato per ha per anno ( $Q_{CH\ min}$ )*

$$Q_{CH\ min} = Q_{SOC}\ ha^{-1} \times k_2$$

$$Q_{CH\ min} = \mathbf{18.486}\ t_c\ ha^{-1} \times \mathbf{0.00946}\ anno^{-1} = \mathbf{0.1749}\ t_c\ ha^{-1}\ anno^{-1} = 174.9\ kg_c\ ha^{-1}\ anno^{-1}$$



# Il bilancio del C umico nel suolo agrario



# Il bilancio del C umico nel suolo agrario

## Calcolo degli apporti



*Calcolo della quantità di C umico apportato da un ammendante ( $Q_{CH_{umico}}$ )*

$$Q_{CH_{umico}} = \text{Quantità di ammendante umido} \times (\% \text{ s.s.}) \times (\% C_{umico}) \times (k_1)$$

$$\% \text{ s.s.} = (100 - \text{umidità ammendante}) / 100$$

$k_1$  = coefficiente isoumico ammendante

$$Q_{CH_{umico}} = Q_{ammendante} \times (\% \text{ s.s.}) \times (\% C_{umico}) \times (k_1)$$

$$Q_{CH_{umico}} = Q_{ammendante} \times (0.90) \times (0.32) \times (0.33)$$

# Il bilancio del C umico nel suolo agrario

Per il pareggio del bilancio umico del terreno avremo che

**Perdite = Aggiunte**

$$Q_{CH_{min}} = Q_{CH_{amm}}$$

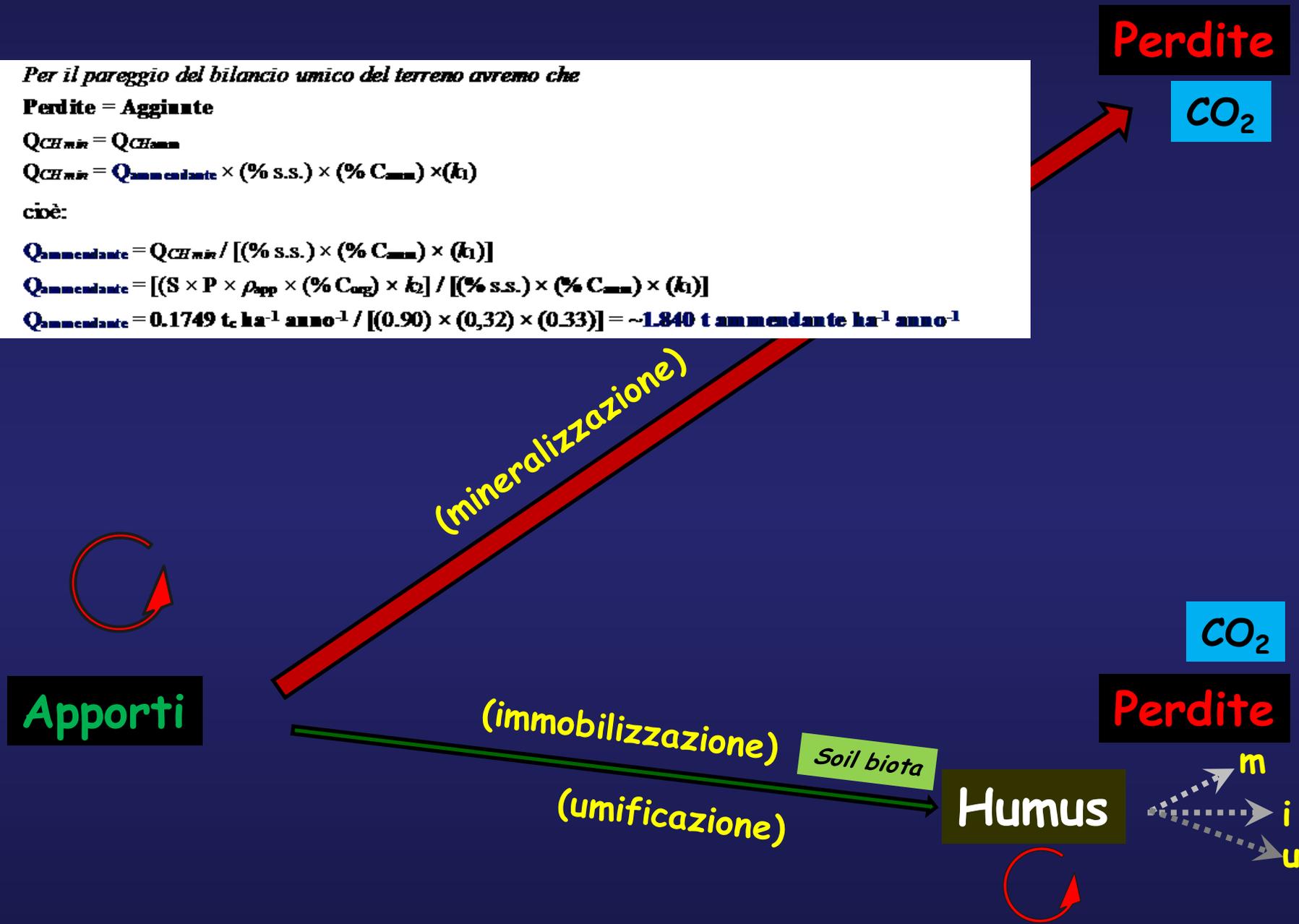
$$Q_{CH_{min}} = Q_{ammendante} \times (\% \text{ S.S.}) \times (\% C_{amm}) \times (k_1)$$

cioè:

$$Q_{ammendante} = Q_{CH_{min}} / [(\% \text{ S.S.}) \times (\% C_{amm}) \times (k_1)]$$

$$Q_{ammendante} = [(S \times P \times \rho_{app} \times (\% C_{org}) \times k_2) / [(\% \text{ S.S.}) \times (\% C_{amm}) \times (k_1)]]$$

$$Q_{ammendante} = 0.1749 \text{ t}_c \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1} / [(0.90) \times (0.32) \times (0.33)] = \sim 1.840 \text{ t ammendante ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$$



## ...non solo carbonio



La frazione organica del suolo è fonte primaria di atomi di C, N, P e S presenti secondo quantitativi e rapporti stechiometrici che si mantengono generalmente costanti.

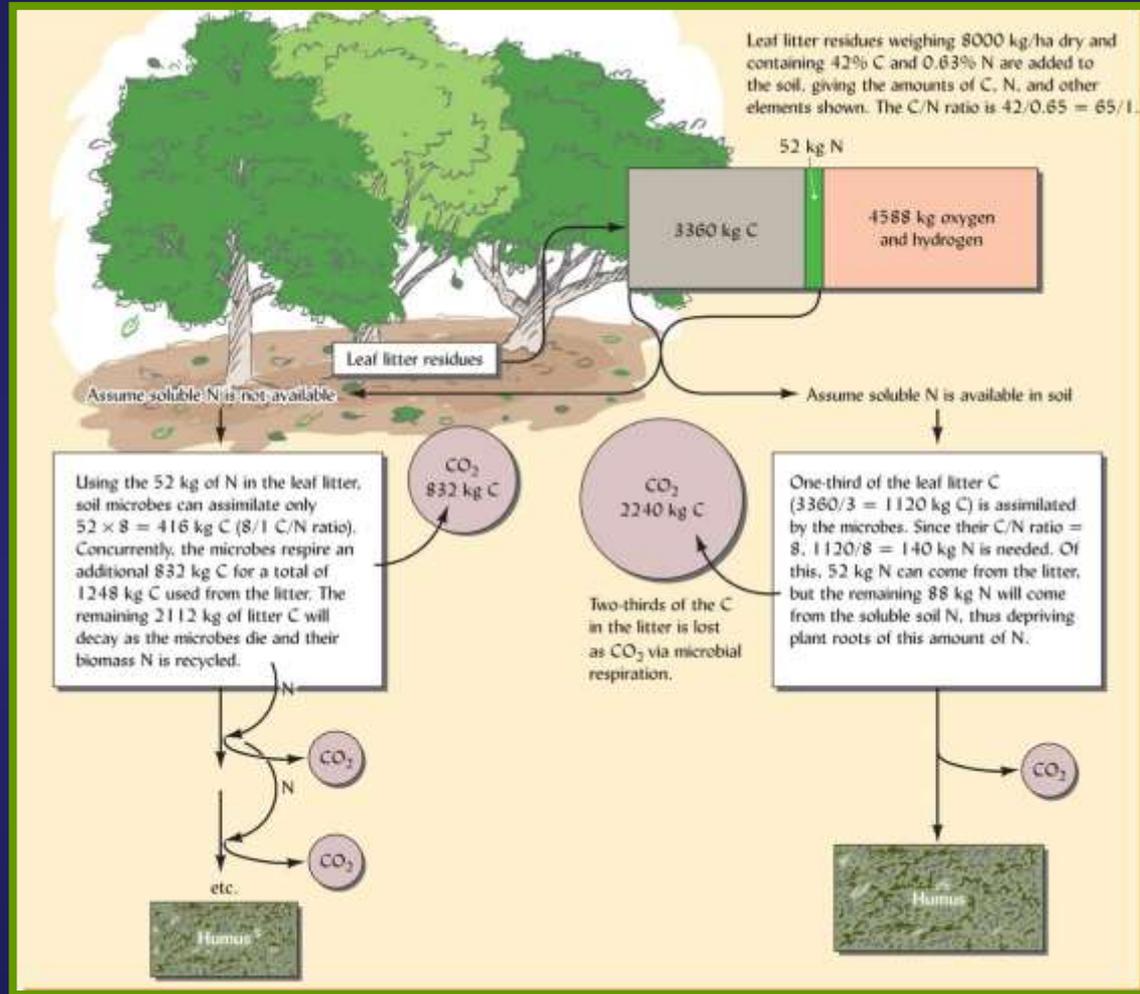
	g kg <sup>-1</sup> suolo secco		% org	C <sub>org</sub> :N <sub>tot</sub> :P <sub>org</sub> :S <sub>tot</sub>
<b>Carbonio</b>	<b>4.5 - 38</b>	<b>14</b>	<b>100</b>	<b>130</b>
<b>Azoto</b>	<b>0.2 - 5.0</b>	<b>1.5</b>	<b>95-99</b>	<b>10</b>
<b>Fosforo</b>	<b>0.035 - 5.300</b>	<b>0.6</b>	<b>15-80</b>	<b>1.3</b>
<b>Zolfo</b>	<b>0.030 - 1.600</b>	<b>0.5</b>	<b>95-99</b>	<b>1.3</b>

Tali rapporti cambiano in relazione al tipo di suolo:

- Suolo indisturbato di prateria 200:10:1:1
- Suolo organico 160:10:1.2:1.2

# Bioconversione dell'input primario in relazione al suo rapporto C/N e al contenuto di N solubile presente nel suolo.

(Efficienza di conversione microbica = 0.33)



2944 kg C (88%)

2240 kg C (67%)

(da Weil & Brady, 2017)

C lost as CO<sub>2</sub>

C sequestered as humus

# L'interessante caso della paglia di cereali

Elemento	Contenuto medio (%)
----------	---------------------

Carbonio	42,0
----------	------

Azoto	0,60
-------	------

Fosforo	0,08
---------	------

Potassio	0,87
----------	------

Calcio	0,18
--------	------

Magnesio	0,11
----------	------

Zolfo	0,16
-------	------

Rame	0,0003
------	--------

Manganese	0,0047
-----------	--------

Zinco	0,0015
-------	--------

} C/N = 70

(da Violante, 2013)

N da fornire: 0,8 - 1,0 kg N per 100 kg paglia interrata

# The 2015 Paris conference on climate change: COP21

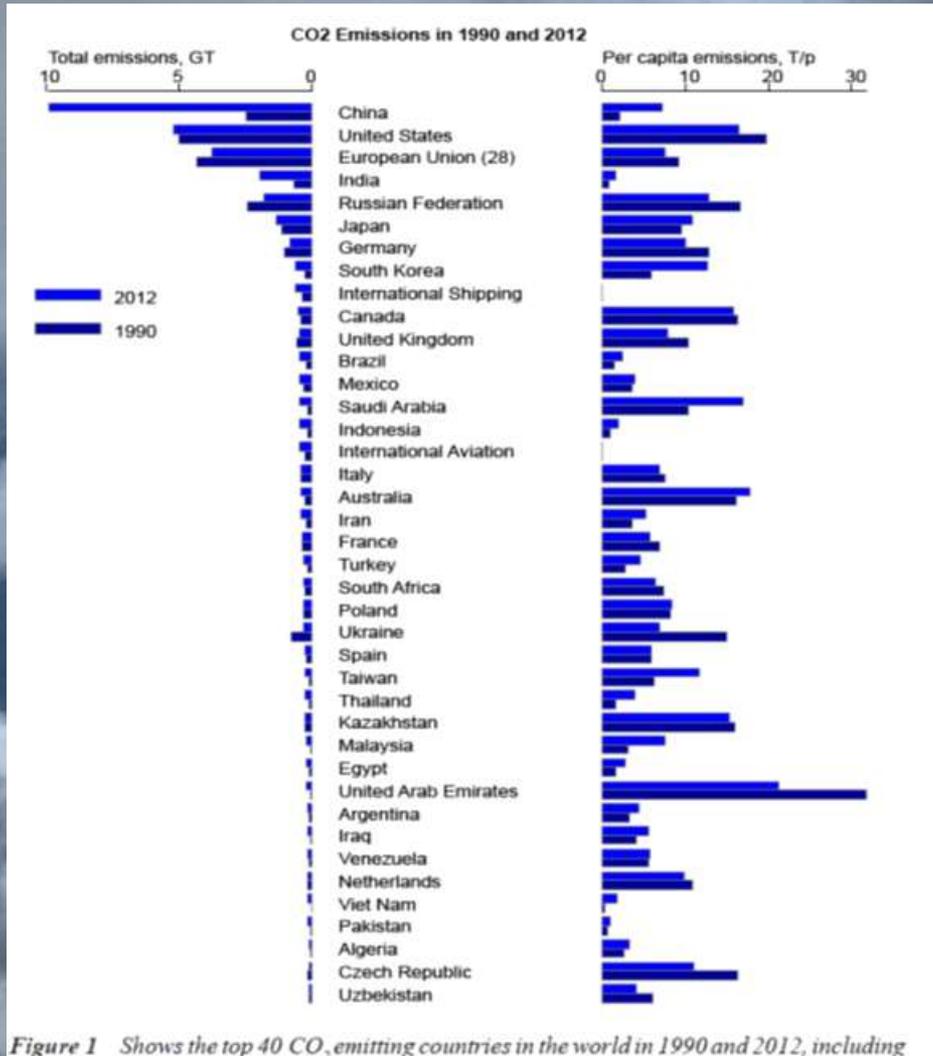


Figure 1 Shows the top 40 CO<sub>2</sub> emitting countries in the world in 1990 and 2012, including per capita figures. The data are taken from the "EU Edgar database", and includes figures for international shipping and airlines, which are not included in countries' submissions. (This does not include domestic air traffic.) <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/Co2-1990-2012.svg> Credit: Chris55.

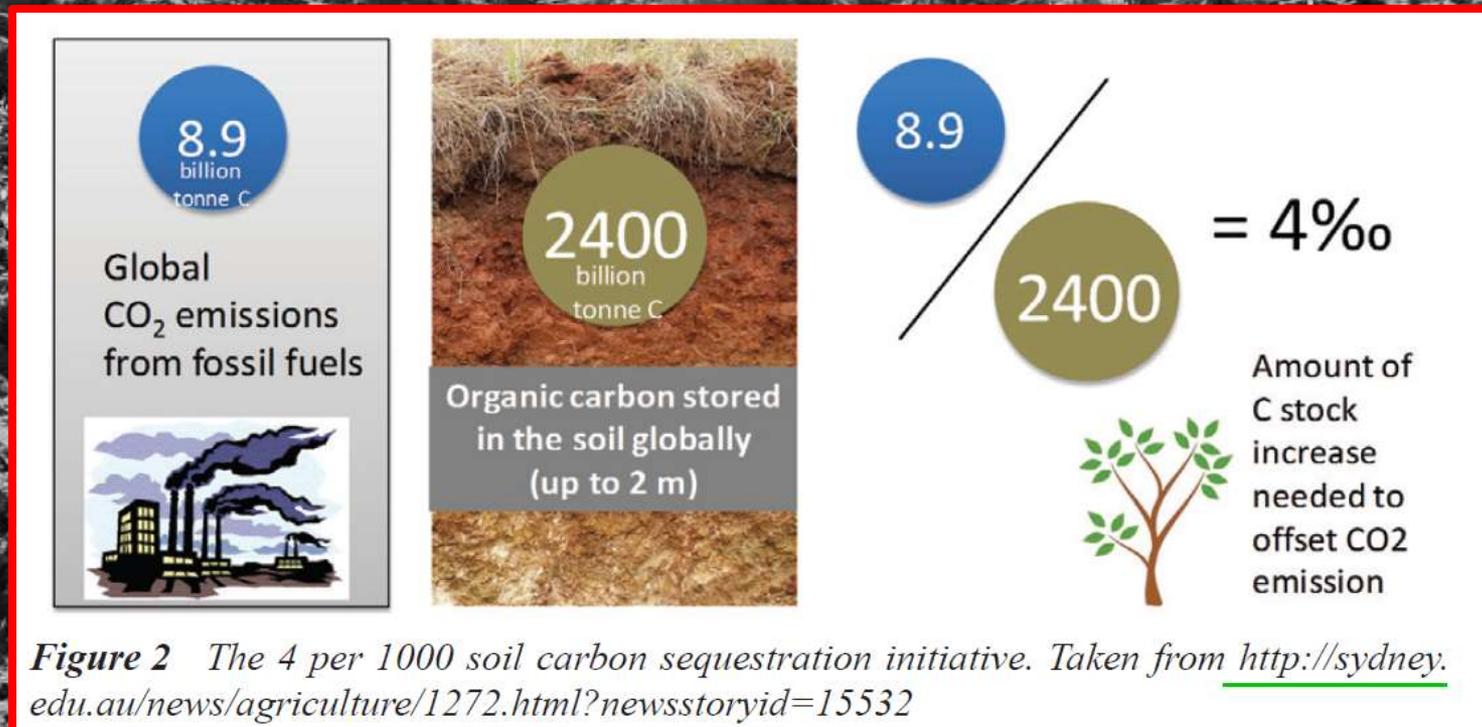
T increase: ~2.7 °C by 2100

55 countries

# The 2015 Paris conference on climate change: COP21

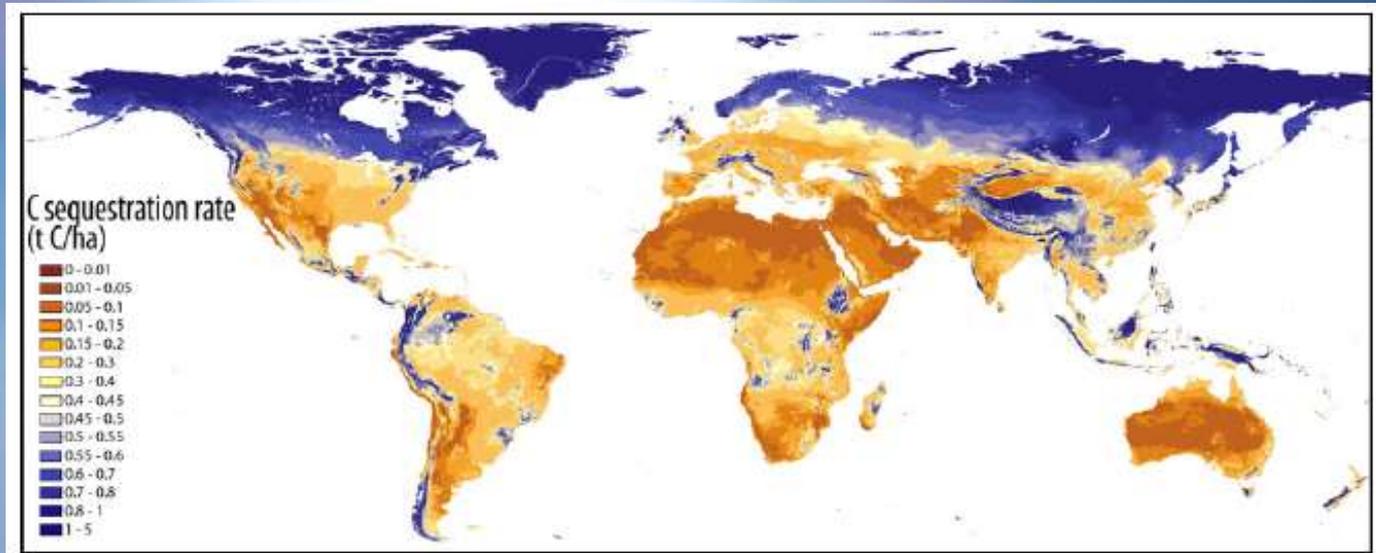
## Aims

- ✓ To limit T increase to well below 1.5 or 2°C above pre-industrial level by 2050
- ✓ Integrate agriculture as part of the climate change solution



*Figure 2* The 4 per 1000 soil carbon sequestration initiative. Taken from <http://sydney.edu.au/news/agriculture/1272.html?newsstoryid=15532>

# The 2015 Paris conference on climate change: COP21



*Figure 3 Global soil C required sequestration rate (tonne C per ha per year) to achieve the 4 per 1000 initiative. Taken from <http://sydney.edu.au/news/agriculture/1272.html?newsstoryid=15532>*

**A global mean storage rate of 0.5 tonnes C ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> is possible after adoption of best management practices such as reduced tillage in combination with legume cover crops.**

# The 2015 Paris conference on climate change: COP21

The essential methods<sup>31</sup> for 4/1000:

- Avoid leaving the soil bare in order to limit carbon losses;
- Restore degraded crops, grasslands and forests;
- Plant trees and legumes which fix atmospheric nitrogen in the soil;
- Feed the soil with manure and composts;
- Conserve and collect water at the feet of plants to favour plant growth.

If good practices are introduced and sustained, it is expected that the carbon capture will continue for 20 to 30 years.

# Principles of conservation agriculture

A wide-angle photograph of a green field with many round hay bales scattered across it. The bales are arranged in a somewhat grid-like pattern, though not perfectly aligned. The field is lush green, and there are some trees and utility lines in the background. The sky is not clearly visible, but the overall scene is bright and sunny.

Conservation agriculture makes use of soil biological activity and cropping systems to reduce the excessive disturbance of the soil and to maintain the crop residues on the soil surface in order to minimize damage to the environment and provide organic matter and nutrients.