

NOVITÀ SULLE FORME DI HUMUS

Augusto Zanella¹

¹Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali dell'Università di Padova, Legnaro; augusto.zanella@unipd.it

Ci eravamo quasi dimenticati dell'esistenza delle forme di humus, anche se tutti abbiamo in mente parole come Mull, Moder, Mor. Poi venne fuori che il riscaldamento climatico dipendesse molto da quanto e da come il carbonio fosse immagazzinato nel suolo e che tale carbonio si trovasse nelle forme di humus. L'articolo fa il punto sulla classificazione delle forme di humus forestali con uno sguardo sulla situazione in Italia. Dopo la definizione di nuove parole di vocabolario (sistema di interazione e forma di humus, orizzonte diagnostico...), è presentato il funzionamento generale del suolo a livello di pianeta e che consiste nell'opera di riciclaggio della sostanza organica condizionata dal clima. La struttura del suolo è collegata a tre gruppi di attori coinvolti nella biodegradazione della lettiera, e permette di distinguere i sistemi Mull, da quelli Amphi e Moder che sono rispettivamente caratterizzati da macro, meso e micro struttura. Leggendo i dati pubblicati recentemente da diversi gruppi di ricerca sulle forme di humus delle foreste italiane, si può constatare che esse contengono una media di 80 t di carbonio organico ad ettaro (primi 30 cm, circa). I più alti valori sono stati misurati nei Moder delle foreste di conifere altimontane delle Alpi centro-orientali, oppure nelle foreste di latifoglie termofile con sistemi a Amphi nelle Alpi orientali e a Mull. In conclusione si rende omaggio a Frank J. Stevenson e a Charles Darwin. Più di 30 anni fa Stevenson pubblicò un libro (*Humus chemistry*, 1982, 1994) nel quale spiega anche a studenti non specialisti che cosa sono le sostanze umiche e come funzionano nel suolo. Più di 130 anni fa Darwin scrisse un libro (*The formation of vegetable mould through the action of worms with some observations on their habits*) la cui importanza scientifica è stata capita solo in tempi molto recenti.

Parole chiave: forma di humus, carbonio organico del suolo, sostanza organica del suolo.

Keywords: humus, humus form, soil organic carbon, soil organic matter.

<http://dx.doi.org/10.4129/2cis-az-nov>

1. Funzionamento generale del suolo e preparazione della copertura pedologica terrestre

Il suolo riceve tutta la sostanza organica prodotta dagli organismi autotrofi di un ecosistema. Anche gli stessi organismi eterotrofi, una volta concluso il loro ciclo vitale, subiscono imperativamente una decomposizione nel suolo. Pensandoci bene, l'opera di decomposizione è la principale funzione del suolo. Essa restituisce all'ambiente l'energia, gli elementi naturali e le molecole che erano contenute nelle strutture prima vive e poi «morte» (non più attive o funzionali) di tutti i viventi. Ciò rappresenta un processo essenziale per la vita del nostro pianeta che è iniziato circa 4 miliardi fa e che ha permesso all'evoluzione biologica di esprimere le potenzialità genetiche che ci circondano (Fig. 1). Quasi tutti gli organismi eterotrofi (batteri e funghi esclusi) ingeriscono la sostanza organica e la biodegradano in appositi volumi predisposti all'interno dei corpi (apparati digerenti). Un processo per molti aspetti simile avviene invece nella parte superficiale del suolo in tutti gli ecosistemi terrestri. Un mondo senza suolo non ha senso e non esiste non tanto perché il suolo supporta la vita vegetale, ma perché permette l'indispensabile operazione di riciclo di tutto ciò che invecchia e muore e necessita di essere smontato. Per lo spirito umano è difficile accettare questa dipendenza dal suolo ma, o

impariamo a conoscere meglio il suolo, o finiremo con l'alterare irreversibilmente tale processo che nutre indirettamente la biodiversità e l'evoluzione, e quindi noi stessi prodotto ultimo di tale complessità.

Ci viene spontaneo di chiederci come mai gli organismi viventi superiori abbiano scelto di ingerire gli alimenti per inglobare e proteggere la loro biodegradazione. La ragione principale è sicuramente dovuta ai vantaggi di una decomposizione confinata, dove è possibile controllare la temperatura della "camera di decomposizione" e tutte le possibili aggiunte di "biodegradanti chimici". È noto infatti che la temperatura è legata in modo esponenziale alla velocità delle reazioni chimiche.

Per di più, la biodegradazione confinata può essere aiutata dall'aggiunta di acqua, reagenti, enzimi e altri composti che possano favorire l'attacco delle sostanze ingerite. Crediamo che il suolo corrisponda alla "pancia" degli ecosistemi. Sembra infantile come pensiero, ma ci è difficile trovare una più valida definizione semplificata del suolo.

Quando si ha mal di pancia, si sta male. Anche gli ecosistemi che hanno mal di suolo, stanno male. Il suolo è come un ventre e si comporta in modo diverso secondo le condizioni in cui lavora.

Vedremo nelle pagine seguenti che i suoli di ambienti acidi e freddi sono molto diversi da quelli di ambienti caldi e calcarei, oppure da quelli temperati, umidi e

neutri. La lettiera forestale dopo la caduta sul suolo subisce un processo di degradazione la cui durata dipende da molti fattori e dove le condizioni climatiche svolgono il ruolo dominante.

Nelle foreste equatoriali calde e umide la lettiera può anche non arrivare mai al suolo e essere digerita in poche ore. La decomposizione interessa invece più anni nelle foreste dei climi nordici e freddi che caratterizzano la taiga così come quelli di alta quota. In queste condizioni estreme sono molto più importanti i funghi rispetto ai batteri, perché i primi sono meno sensibili al freddo e molto più abili nel demolire la lettiera di conifere più ricca di lignine.

Il nostro pianeta si è coperto di foreste (con i loro rispettivi suoli) progressivamente negli ultimi 400 milioni di anni, prima di felci, poi di conifere e infine di latifoglie seguendo cicli di formazione, scomparsa e rigenerazione, imposti dai movimenti di unificazione e disaggregazione delle placche tettoniche delle terre emerse. Seguirono gli effetti di diversi cicli di gelo e disgelo, l'ultimo dei quali iniziato 20 mila anni fa e conclusosi ai giorni nostri (viviamo un periodo interglaciale). Durante l'ultima scissione della Pangea, per esempio, iniziata circa 200 milioni di anni fa, i lombrichi la cui presenza primaria è associata alla placca nord-americana, si estinsero con l'arrivo delle glaciazioni e lasciarono il nord America privo di questi animali fino a tempi molto recenti (Bouché, 2014). Sempre secondo Bouché, dopo l'ultima glaciazione, le migrazioni umane percorsero vie in concomitanza con quelle dei lombrichi anecici che realizzarono un'espansione recente e rapida in tutti i suoli delle terre emerse non ghiacciate e abitate dall'uomo.

2. Nuovo vocabolario: sistemi di humus e struttura del suolo

Fin dal primo incontro del Gruppo Humus a Trento nel luglio del 2003, fu chiaro che una classificazione delle forme di humus utile per la gestione degli ecosistemi non poteva prescindere dalla struttura dell'orizzonte organo-minerale del suolo (Jabiol *et al.*, 2004; Galvan *et al.*, 2008).

Per capire il senso pratico di questa frase è necessario conoscere il significato di alcuni termini inseriti in uno specifico vocabolario e possedere alcune basi concettuali che presentiamo di seguito.

Il vocabolario delle forme di humus (in via di pubblicazione nel 2015) comporta *oggetti reali* (che si osservano in campo) (Fig. 2) e *concetti* (scatole teoriche in cui si inseriscono le immagini di *oggetti reali* simili).

2.1 Oggetti reali

Comprendono:

Orizzonte di forma di humus (orizzonte di humus) = strato superficiale organico o organo-minerale di suolo; nel suolo superficiale si possono riconoscere diversi di questi diversi strati.

Tali orizzonti giacciono sovrapposti come le pagine di un libro e nel loro insieme vengono nominati "profilo della

forma di humus"; ogni orizzonte può essere assegnato a una categoria astratta chiamata "orizzonte diagnostico".

Profilo di forma di humus (profilo di humus) = Faccia di una buca cubica praticata nel suolo che mette in luce gli orizzonti superficiali organici e organo-minerali del suolo; questa "parete" composta di diversi orizzonti sovrapposti può essere assegnata a una categoria astratta chiamata "forma di humus".

2.2 Concetti

Comprendono:

Orizzonte diagnostico = riferimento teorico per orizzonti organici o organo-minerali definite da caratteristiche e qualità che si mantengono entro limiti prestabiliti; codici utilizzati per i moderni orizzonti diagnostici delle forme di humus: OLn, OLv, OFzo, OFnoz, OH, maA, meA, miA, Anoz; Hf, Hm, Hszo; Hsnoz, Hsl, Aa.

Forma di humus = (abbreviazione internazionale: HF) = riferimento teorico per un gruppo di profili di forma di humus che mostrano la stessa serie di orizzonti diagnostici (esempi di nomi: Mesomull, Dysmoder, Hemimor).

Sistema di humus = riferimento teorico per un gruppo di profili di forma di humus che mostrano caratteristiche principali dovute agli stessi determinanti ecologici (biotici, misti or abiotici) che si mantengono entro limiti noti (esempi di nomi: Mull, Moder, Anmoor).

Il *sistema di humus* appartiene al concetto teorico di "Interaction System" pubblicato recentemente da Spijkerboer *et al.* (2014). Si tratta di un concetto legato a meccanismi dell'evoluzione appartenenti a un terzo livello di organizzazione delle strutture naturali. Tale concetto è adatto per rappresentare teoricamente dei "gruppi di operatori dell'evoluzione che interagiscono gli uni con gli altri" e che individuano bene quello che succede nella parte superficiale del suolo. Per esempio, tutte le forme di humus Mull funzionano allo stesso modo perché generate tutte dall'azione di lombrichi anecici e endogei. Essi conferiscono una struttura particolare all'orizzonte A tipica di un unico sistema. Infatti i suoli dotati di questa struttura interagiscono in modo peculiare con le piante e gli animali del sistema che li ha generati (Ponge, 2005, 2009). Tale struttura del suolo permette scambi chimico-fisici diversi da quelli che succedono in altri sistemi di interazione. Come vedremo nelle pagine seguenti, il gruppo dei Moder, per esempio, possiede una struttura dell'orizzonte organo-minerale diversa, che interagirà in un'altra maniera con piante che hanno strategie adattative diverse da quelle dei Mull.

2.3 La struttura dell'orizzonte organo-minerale A

La lettiera è biodegradata dalla pedofauna e dalla pedoflora in tempi differenziati. Il processo è complesso, cambia secondo gli ambienti in cui avviene e vede coinvolti diversi gruppi di animali, funghi, batteri, attinomiceti, alghe, radici e rizomi. Uno dei risultati del processo tra i più facili da osservare nei climi temperati è la formazione di un orizzonte organo-minerale. Tale orizzonte si distingue per il colore bruno dal sovrastante orizzonte organico tendente al bruno-nero e per la struttura dal sottostante orizzonte minerale.

All'orizzonte organo-minerale i pedologi hanno attribuito il codice A corrispondente alla prima lettera dell'alfabeto. La struttura zoogenica di tale orizzonte cambia in modo inconfondibile anche se osservata a occhio nudo (Brêthes *et al.*, 1995; Chauvat *et al.*, 2007; Zanella *et al.*, 2011a, 2011b; Ponge *et al.*, 2011; Waez-Mousavi *et al.*, 2012):

a) quando la lettiera scompare nel corso dell'anno, la struttura dell'orizzonte A è formata in maggioranza di grumi di diametro > 4 mm; il pH dell'orizzonte varia tra 7 e 5; la struttura è indicata *biomacrostruttura*;

b) quando la lettiera permane invece più di un anno e si accumula indecomposta sotto le piante, la struttura può essere dominata da:

- grumi di diametro compreso tra 1 e 4 mm in ambiente calcareo (pH > 7); in questo caso viene detta *biomesostruttura*;

- grumi di diametro inferiori a 1 mm in ambiente acido (pH < 5); la struttura è indicata *biomicrostruttura*.

Tali strutture sono determinate da diversi gruppi di animali del suolo che nel caso di macrostruttura sono soprattutto grossi lombrichi anecici ed endogei. La mesostruttura è invece formata da macro- e meso-artropodi o da lombrichi di dimensione inferiore ai precedenti ancora mal conosciuti, probabilmente endogei. La microstruttura è dovuta a vermi enchitreidi o a microartropodi (acari e collemboli).

Ad ogni struttura corrisponde un sistema di humus, Mull per la macro, Amphi per la meso e Moder per la microstruttura. Nelle altre forme di humus che si generano in sistemi terrestri più estremi in termini di clima e di reazione del substrato, troviamo i Mor (substrato acido e clima freddo) e i Tangel (substrato calcareo, clima montano contrastato, esposizioni sud a quote alte) e l'orizzonte A è quasi sempre assente o, quando presente, è caratterizzato da uno spessore insignificante e una struttura diversa da quelle descritte più sopra (Green *et al.*, 1993; Brêthes *et al.*, 1995; Robert e Chenu, 1992). Le figure 3, 4 e 5 illustrano le caratteristiche delle tipologie degli humus in accordo con le più recenti classificazioni proposte dal gruppo humus (Zanella *et al.* 2001, 2011a, 2011b; Jabiol *et al.*, 2004, 2013).

3. Sistemi di humus e stoccaggio di carbonio organico

I sistemi di humus che coprono attualmente la parte emersa del nostro pianeta sono cinque: Mor, Moder, Mull, Amphi e Tangel. A Nord, latitudini comprese tra 50° e 60°, domina il sistema Mor, in foreste di conifere tipiche di questi climi freddi; in climi miti, temperati e piovosi, che caratterizzano le aree situate tra i 40° e i 50°, troviamo invece a volte i Mull (preferibilmente su substrati mesofili), altre volte gli Amphi (prevalentemente su substrati calcarei), oppure i Moder (preferibilmente su substrati acidi); in zone del pianeta montane relativamente fredde, ma calcaree e con periodi stagionali relativamente caldi (esposizioni sud) troviamo i Tangel (Muller, 1889; Kubiena, 1953; Ponge *et al.*, 2010; Zanella *et al.*, 2011a, 2011b; Jabiol *et al.*, 2013). A livello dell'equatore umido il sistema dominante è il

Mull (Ponge, 200; Bouché, 2014). I sistemi dominanti nelle foreste italiane sono in ordine crescente di copertura i Mull, gli Amphi, i Moder, i Mor e i Tangel; i primi tre coprono più del 90% delle superfici (Hartmann, 1970; Garlato *et al.*, 2009a, 2009b; Andreetta *et al.*, 2011; Bonifacio *et al.*, 2011; Ascher *et al.*, 2012; Guermaldi *et al.*, 2013; De Nicola *et al.*, 2013, 2014). Sul suolo di una foresta media europea cadono annualmente circa 5-6 t ha⁻¹ di Carbonio presente nella lettiera (Ponge *et al.*, 1999; Zanella *et al.*, 2001; Gobat *et al.*, 2010; Incerti *et al.*, 2011; Osman, 2013).

È interessante confrontare questo dato con quello di produzione primaria annuale netta dello stesso sistema che realizza un flusso simile di 6 t di C ha⁻¹ anno⁻¹ (Robert e Saugier, 2003).

Questo porta a un conseguente equilibrio tra massa prodotta e persa. Potremmo anche considerare la produzione di lettiera prodotta all'interno del suolo, composta di radici fini e di essudati radicali, la cui entità stimata eguaglia quella della lettiera di superficie (Aber *et al.*, 1985; Gobat *et al.*, 2010; Melillo *et al.*, 2002, 2011). Più in generale nel suolo vi è una produzione primaria netta di radici che probabilmente si avvicina a quella di rami e fusti (parte epigea) delle piante. Per diversi tipi forestali del Trentino (Rodeghiero *et al.*, 2010) la biomassa arborea epigea (fusto, rami, foglie, organi fiorali, semi) è stimata da 50-60 t di CO ha⁻¹ in faggete, latifoglie termofile e peccete secondarie, al doppio di 100-130 t di CO in peccete montane e subalpine, abieteti e lariceti. Per tutte queste formazioni la lettiera epigea prodotta varia tra le 4 e 6 t di CO ha⁻¹ anno⁻¹ mentre nei primi 30 cm di profondità dei loro suoli sono allocati da 80 a 110 t di CO ha⁻¹ rispettivamente per i boschi di latifoglie e di conifere. Misure di accrescimenti legnosi hanno consentito di stimare che queste foreste sono caratterizzate da incrementi di 1,6 t di CO ha⁻¹ anno⁻¹, e che possono raggiungere valori di 2,3 o 2,9, rispettivamente in boschi cedui di faggio ed in quelli di latifoglie termofile. L'incremento legnoso arriva quindi a metà di ciò che può essere misurato in termini di lettiera, o anche in termini di massa di foglie verdi (2,8 t di CO ha⁻¹, con massimi di 3,1 per le fustaie di conifere e minimi di 2 nei cedui di latifoglie). La biomassa ipogea, valutata attraverso lo scavo di buche (primi 30 cm) e misure dirette sulle radici ammonta a circa 20 t di CO ha⁻¹ con minimi di 10 t di CO ha⁻¹ per pinete e latifoglie meso-termofile, e massimi di 30 t di CO ha⁻¹ per lariceti, peccete e anche leccete secondarie.

In uno studio precedente (Rodeghiero, 2003) si erano considerate anche le forme di humus di queste formazioni, trovando sistemi Amphi nelle leccete e faggete termofile, Mull in Orno-Ostietti e faggete mesofile, e Moder in abieteti misti e peccete pure.

In questi ultimi 10 anni, sono stati pubblicati numerosi dati sulle forme di humus forestali italiane. Lo scopo principale di tali ricerche era quello di stimare la quantità di carbonio stoccata nei suoli forestali a livello regionale e nazionale. Le indagini hanno interessato suoli forestali delle Alpi centro-orientali (Sartori *et al.*, 2004; Garlato *et al.*, 2009a, 2009b), occidentali (Bonifacio *et al.*, 2011) e centrali (Ascher *et al.*, 2012), parte degli

Appennini (Andreotta *et al.*, 2011; De Nicola *et al.*, 2014).

I sistemi Mull, Amphi e Moder sono molto comuni, mentre quelli a Tangel e Mor sono presenti solo sulle Alpi e rari (Sartori *et al.*, 2004). Il sistema Amphi contiene più Carbonio Organico (CO) degli altri nelle Alpi occidentali (80 t ha⁻¹ contro le 30 nel Mull e le 40 nel Moder), mentre il Moder primeggia nelle Alpi centrali o orientali (100 t ha⁻¹ contro le 50 di Mull e Amphi). Il sistema Mull risulta il più povero in CO su tutta la catena alpina, anche se negli orizzonti minerali sottostanti si riscontrano valori alti quasi come quelli misurati negli stessi orizzonti minerali degli Amphi e più alti di quelli degli orizzonti organici e organo-minerali (Bonifacio *et al.*, 2011).

Sugli Appennini e in ambiente mediterraneo, al contrario, è il sistema a Mull a contenere più CO (Fig. 6), anche se sono molto vicini come valori a quelli misurati negli Amphi (70-80 t ha⁻¹ contro le 40 del Moder). Se confrontiamo i valori citati, si può notare che nei primi 30 cm di suolo si trova una quantità di carbonio organico pari alla metà di quella che si misura nella massa viva del soprassuolo arboreo. Il limite inferiore degli orizzonti delle forme di humus, ovvero il passaggio tra gli orizzonti A e B, non è facilmente individuabile con precisione nei Sistemi Mull e Amphi per cui non è raro, nella loro descrizione e studio procedere a prelievi standardizzati di 10 cm di suolo, dopo avere tolto gli orizzonti organici superficiali o la lettiera.

Le forme Mull sono presenti in climi temperati. In esse la lettiera scompare in pochi mesi (Galvan *et al.*, 2005). Il carbonio che esse contengono è concentrato in aggregati organo-minerali e di difficile accesso (Robert e Chenu, 1992). Si tratta di minuscole particelle organiche intimamente legate all'argilla, ben visibili in superficie, realizzate dall'attività dei lombrichi i quali ingeriscono foglie e terreno per miscelarli nel loro intestino, consumando solo in parte la sostanza organica assunta. In questo modo i lombrichi arricchiscono il suolo dell'energia in forma organica che possono riutilizzare in momenti successivi quando la lettiera scarseggia (Bouché, 1977, 2014).

Anche i batteri hanno difficoltà nel nutrirsi di questa sostanza organica nascosta in strutture minerali poste all'esterno, perché poco accessibile.

Lo possono fare meglio nell'intestino dei lombrichi, dove il suolo ingerito è imbevuto di enzimi, muco e acqua, slacciando in questo modo i legami che fissano insieme le parti organiche e minerali. Nelle forme Moder la sostanza organica è soprattutto collocata fuori dal suolo minerale, in strati organici di superficie (Ponge *et al.*, 1997). Si tratta di resti organici più o meno degradati dall'azione di funghi, artropodi o piccoli vermi che resistono all'acidità del substrato. Questi residui possono subire una rapida degradazione in risposta a cambiamenti della radiazione solare. È quello che succede quando si pratica un'apertura nel soprassuolo in un bosco generalmente chiuso. Nella chiara si alzano la temperatura e la falda freatica e la lettiera si decompone in pochi mesi per riattivazione di fauna locale o per arrivo di nuovi lombrichi (Bernier e

Ponge, 1994). Il processo può essere impedito da specie vegetali (esempio: tappeto di ericacee) che producono molecole allopatiche (para-hydroxyacetophenone, acido caffeico,...), che bloccano la rinnovazione naturale della foresta (André, 1994).

Gli orizzonti organo-minerali A delle forme Moder sono generalmente sottili (spesso inferiori ai 7 cm) e in essi la sostanza organica si trova in feci che rimangono libere nel tessuto sabbioso dell'orizzonte.

Questo carbonio può essere liberato facilmente in caso di cambiamenti micro-climatici localizzati (Bernier e Ponge, 1994) perché relativamente accessibile ad animali che si nutrono di resti vegetali. La forma Amphi può essere considerata un sistema doppio: Moder in superficie e Mull in profondità. Tale forma potrebbe essere interpretata come un adattamento del sistema Mull agli ambienti con siccità periodica, come quelli submediterranei presenti in alcune aree delle prealpi (Zanella *et al.*, 2011; Andreotta *et al.*, 2011).

In tali situazioni i vermi anecici possono rifugiarsi nelle profondità del suolo per sfuggire alla siccità estiva, pronti poi a risalire in superficie in caso di miglioramento delle condizioni climatiche (piogge autunnali e primaverili) per cibarsi della lettiera. Quest'ultima, però, non scompare mai come nei Mull perché nei periodi di siccità o di freddo si accumula originando gli strati organici che si riconoscono nei Moder.

I valori di pH negli orizzonti organici superficiali possono risultare acidi, mentre i sottostanti orizzonti organo-minerali o minerali presentano valori tipici dei suoli su rocce calcaree. In risposta al riscaldamento climatico questa forma potrebbe aumentare la sua diffusione, prendendo il posto delle forme Mull quando le condizioni climatiche si caratterizzassero di nuova siccità periodica.

4. Conclusioni

Frank Stevenson presentando la seconda edizione nel 1994 del suo trattato dal titolo *Humus chemistry* agli studenti delle scuole superiori o dell'Università, scrive che le sostanze umiche si possono interpretare come "mani" (insieme di singole carte chiamate "dimeri") di un mazzo di carte da gioco (pagina 296): ... *synthesis of humic substances can be thought of in terms of card playing, where each structural unit (e.g. a polyphenol or quinone) represents a separate card in the deck and a given "hand" represents the combinations in which the structural units combine to form a humic molecule.*

Il mazzo di carte singole si trova nel suolo e si forma trasformando le lettiere epigea e ipogea tipiche di ogni ambiente.

Attraverso i processi biotici e abiotici, le sostanze umiche si costruiscono nei diversi ambienti combinando in modo appropriato queste carte singole. Servono a mettere in comunicazione nel suolo la base minerale, le piante, gli animali e i microrganismi.

Lo scopo del "dialogo" è quello di utilizzare al meglio l'ambiente e restituire al quasi vuoto universale (i 3 °K che si misurano negli spazi intergalattici) le meno energetiche possibili onde elettromagnetiche (= le più lunghe possibili, le più spostate verso il rosso possibile),

per utilizzare nel sistema terrestre la maggior parte dell'energia irradiata dal sole sotto forma di onde di breve lunghezza d'onda. Tali onde brevi sono catturate dal processo di fotosintesi per spaccare le molecole d'acqua, recuperare l'energia dei loro elettroni e produrre molecole energetiche (ATP, NADPH) da utilizzare per costruire la biodiversità del pianeta che conosciamo. Oggi sappiamo abbastanza bene come sia fatto l'humus, ma vorremmo riuscire a capire bene il suolo. È un po' quello che è successo con il DNA. Siamo riusciti a capire che i nucleotidi con le serie di basi costituiscono i geni, ma sappiamo che uno stesso DNA origina proteine diverse quando cambia l'ambiente cellulare. L'ambiente in cui si trovano le cellule influenza l'attività genica del DNA. Anche nel contesto di un dato suolo, si generano precise forme di humus che lavorano con determinati acidi umici composti, per un gioco di interazione (linguaggio) tra piante, animali e ambiente: un ambiente, una forma di humus, un mazzo di carte (gruppo di dimeri potenziali), un linguaggio composto di "mani" (sostanze umiche) con le quali si mettono in comunicazione i viventi che "giocano" nel suolo di quell'ambiente.

Charles Darwin, nel 1881, pubblicò il libro sulla "terra per vegetali" prodotta naturalmente dai lombrichi dal titolo,

The formation of vegetable mould through the action of worms with some observations on their habits. Egli capì per primo l'importanza cruciale che questi animali hanno per sostentamento delle piante (i sistemi Mull sono i più diffusi negli ambienti temperati del pianeta). Stimò il loro numero nel prato davanti a casa sua, studiò la loro alimentazione e vide che le radici delle piante erano attratte dagli escrementi di questi animali. Sospettì l'esistenza di un linguaggio che permettesse alle piante di comunicare con il suolo.

Per Darwin, suolo, fauna, microrganismi e piante mostravano decisivi (nel senso di molto importanti per capire il sistema suolo) segni di coevoluzione (concetto presente anche nel libro dal titolo *The power of movement in plants* pubblicato nel 1880).

La moderna scienza del suolo sta studiando proprio questi aspetti. Si citano alcuni tra i tanti lavori sul funzionamento del suolo e sulle forme di humus, per coloro che avessero voglia di approfondire: Dell'Agola e Nardi, 1987; Piccolo, 1996, 2001; Piccolo *et al.*, 2004; Nicolai, 1988; Wolters, 2000; Six *et al.*, 2002; Godefroid *et al.*, 2005; Lutzow *et al.*, 2006; Graefe, 2007; Andreetta *et al.*, 2013; Ponge *et al.*, 2011, 2014; Berg e McClaugherty, 2014; Berg, 2014).

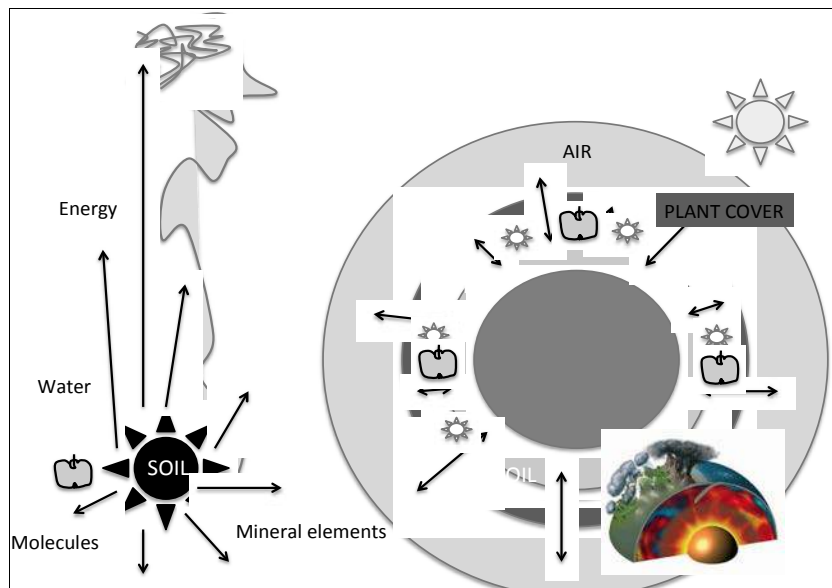


Figura 1. Il suolo è la pancia del mondo. Quando noi mangiamo una mela, essa è prima masticata in bocca, poi trasformata nello stomaco in una pasta inviata nell'intestino dove un po' alla volta è decomposta in molecole e atomi elementari, che possono essere assorbiti e trasportati nel sangue verso i diversi organi del corpo; una parte della mela rimane indecomposta e viene espulsa per essere biodegradata in altri organismi (molti semi resistono alla biodegradazione umana e vengono espulsi ancora «vivi» insieme a sostanza organica, in modo da favorire la loro germinazione).

Un processo simile avviene a livello del suolo quando della sostanza organica morta si deposita su di esso (lettieria) per essere qui decomposta nei suoi elementi strutturanti.

Figure 1. The soil is the planet belly. Eating an apple, we first chew it in our mouth, send it to the stomach where it is transformed in a dough, which passes in the intestine and here it decomposes in molecules and atoms, before running into the blood for deserving all the other organs of the body (the non decomposed part of the apple – seeds often resist to this process and are expelled still “alive” with some organic matter - is defecated and is degraded by other organisms). A similar process occurs in each terrestrial ecosystem at the level of the soil, where litter arrives and decomposes in its structural elements.

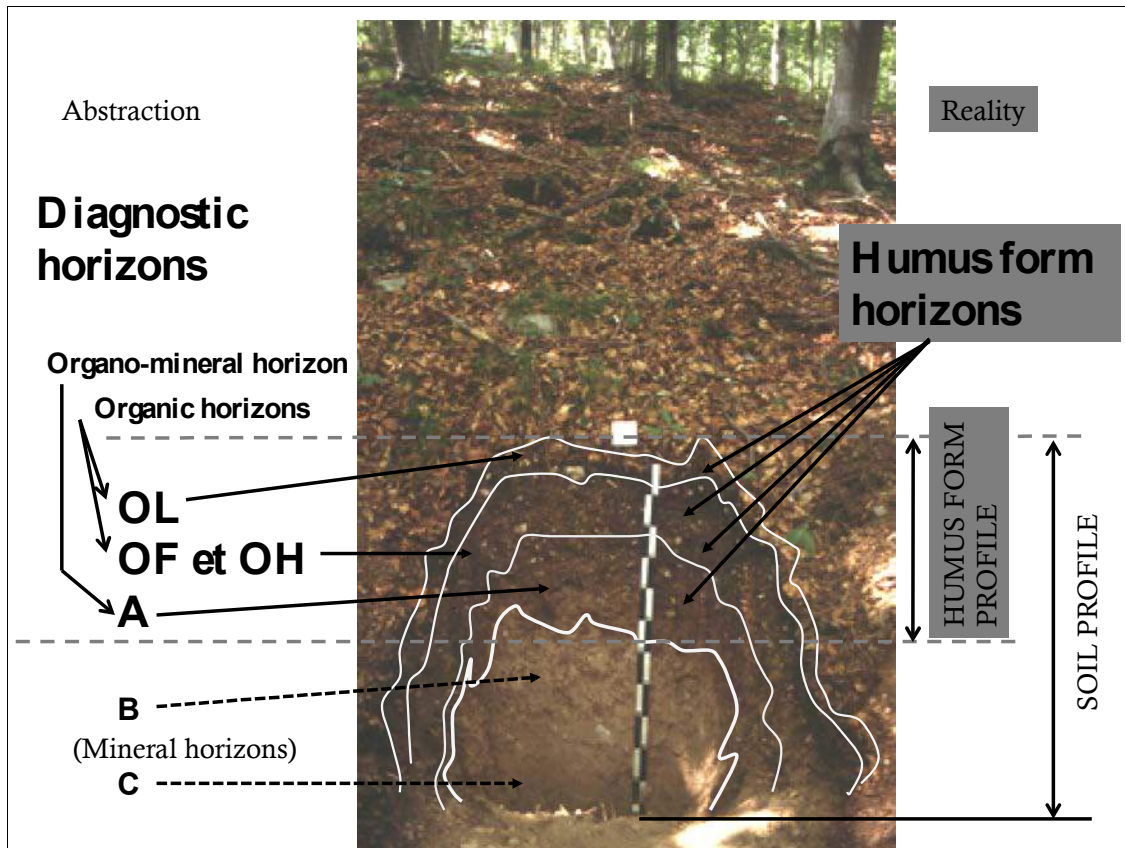


Figura 2. Un profilo di forma di humus in una faggeta trentina.
 Figure 2. A humus form profile in a beech forest in Trentino region (Central Alps).

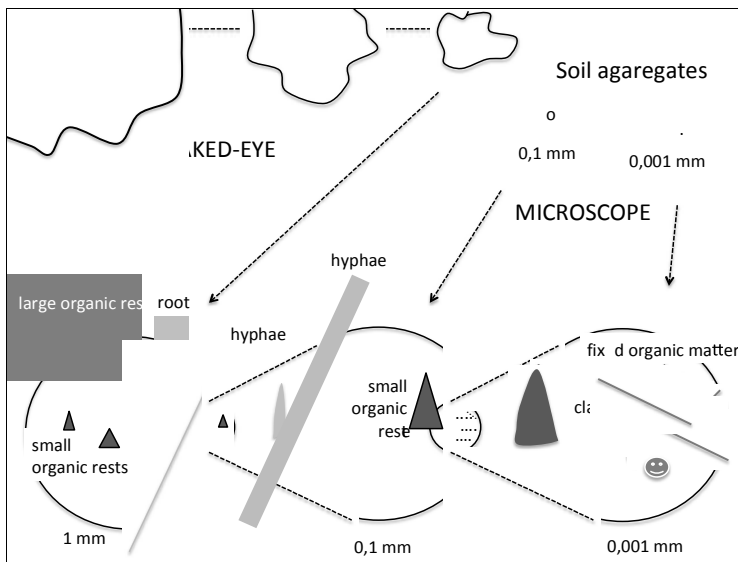


Figura 3. Aggregati strutturali del suolo. Sulla figura in alto, da sinistra a destra, schematicamente, macro, meso e micro-aggregati come si vedono a occhio nudo in campo. Aggregati di tali dimensioni sono dominanti rispettivamente negli orizzonti A dei sistemi Mull, Amphi e Moder. Le indagini microscopiche portano generalmente su aggregati di dimensioni inferiori al millimetro (in basso sulla figura, da Robert e Chenu, 1992), ottenuti sbriciolando aggregati di dimensioni superiori e rivelando così nuove sotto-strutture.

Nella categoria più piccola (0,001mm =1 μ), si riconoscono le cellule batteriche individualmente, i foglietti delle argille e anche le macchie nere della sostanza organica legata fortemente all'argilla (complesso argillo-umico). Forse sarebbe meglio considerare anche la parte batterica e definire tali complessi come bio-argillo-umici. Essi si formano nell'intestino dei lombrichi (Bouché, 2014). Da loro dipende la fertilità del suolo e la vita dell'ecosistema.

Figure 3. Soil aggregates. At the top of the picture, schematically, are shown the macro, meso and micro-soil aggregates as they appear in the field by naked-eye. These aggregates dominate in volume respectively in the A horizon of Mull, Amphi and Moder systems. At the bottom of the picture are represented the structures appearing in small aggregates (fragments < 1 mm of larger aggregates) while looking at them with a microscope (re-drawn from Robert and Chenu, 1992). In the smallest category (< 0,001 mm =1 μ) is possible to recognize bacterium cells, clay sheets and black particles of organic matter strongly fixed to the clay and forming clay-organic matter complexes. Considering the biological part of them, it would probably be better to name them bio-clay-organic matter complexes. They generate in the earthworms' intestine (Bouché, 2014). The soil fertility strongly depends from them.

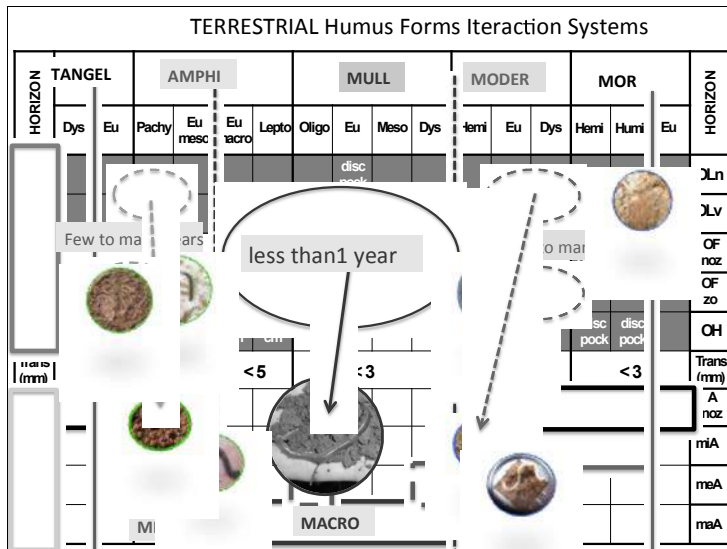


Figura 4. Chiave di riconoscimento dei cinque Sistemi di humus di riferimento per gli ambienti terrestri (= aerate, non in acqua). Tali sistemi sono, da sinistra a destra: Tangel, Amphi, Mull, Moder e Mor. Orizzonti diagnostici in linea; Forme di humus in colonna. Esempio di lettura della tabella: il Sistema Tangel è composto di due Forme di humus, il Dystangel e l'Eutangel; la prima presenta questi orizzonti diagnostici: OLn, OLv, OFzo, OH, Anoz; la transizione tra orizzonti organici (OH) e organo-minerali (Anoz) ha luogo in una fascia di spessore inferiore a 5 mm.

Figure 4. Key of classification of the five Humus systems used as references in terrestrial environments (aerated, not submerged). From left to right, these systems are: Tangel, Amphi, Mull, Moder and Mor. Diagnostic horizons in line; humus forms in column. Example of lecture of the table: Tangel system is composed of two humus forms, the Dystangel and Eutangel; the first shows the following diagnostic horizons: OLn, OLv, OFzo, OH, Anoz; the transition between organic (OH) and organo-mineral (Anoz) takes place in a belt of less than 5 mm of thickness.

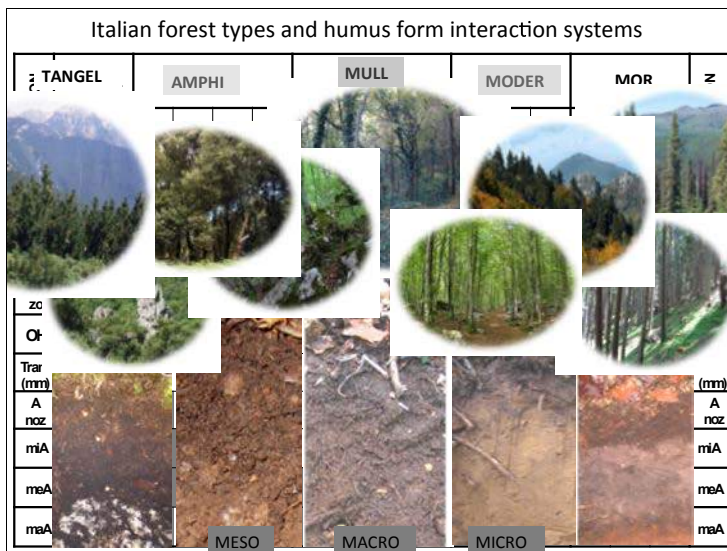


Figura 5. Forme di humus e vegetazione forestale alpina. Da sinistra a destra: 1) Tangel sotto Pino mugo; 2) Amphi sotto Orno-Ostrietum e Faggeta termofila; 3) Mull sotto Quercus-Carpinetum (o foresta tropicale umida, optimum climatico); 4) Moder sotto Abieteti e Peccete miste del piano montano; Mor sotto Pecceta altimontana.

Figure 5. Humus forms and Alpine forest vegetation. From left to right: 1) Tangel under Pinus mugo; 2) Amphi under Orno-Ostrietum and thermophile Beech forest; 3) Mull under Quercus-Carpinetum (or tropical rein forest, climatic optimum); 4) Moder under Abies alba and Picea excelsa montane mixt formations; Mor under altimontane spruce pure formations.

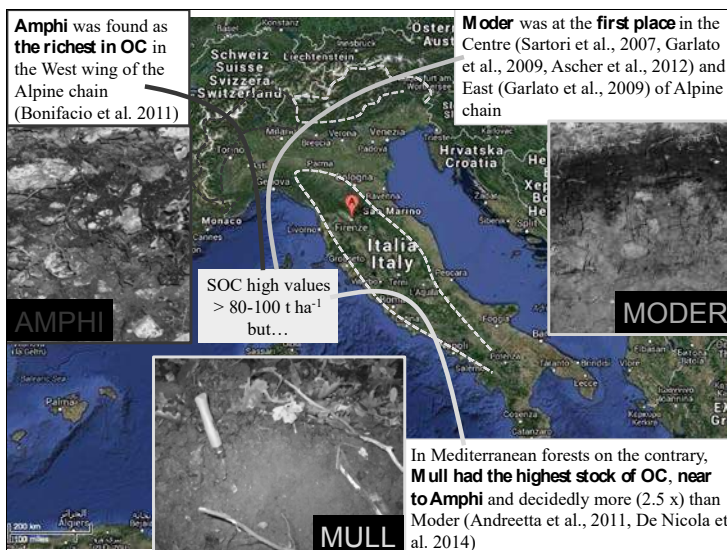


Figura 6. Sistemi di humus nelle forrste italiane. Ad est e centro delle alpi sono i sistemi Moder a contenere più carbonio (100 t ha⁻¹), a occidente sono gli Amphi (80 t ha⁻¹), mentre sugli Appennini sono i Mull 80 t ha⁻¹, anche se vicinissimi agli Amphi).

Figure 6. Humus systems in Italian forests. In East and Centre of the Alpine chain, the system Moder content the highest level of organic carbon (100 t ha⁻¹), in the West part of the Alps the first place is taken by Amphi (80 t ha⁻¹), and in the Apennines by Mull (80 t ha⁻¹).

SUMMARY

News about humus forms

Words like Mull, Moder and Mor are well known. These names given to the humus forms have a signification that we probably forgot. Nevertheless, the warming climate is being very related to the carbon stored in the soil and, a large part of this carbon is sequestered in humus forms. This article makes the point on the classification of the humus forms with particular attention to Italian forests. Defining few new vocabulary references (Humus system, diagnostic horizon...), the paper illustrates the process of recycling that takes place in the soil at a planet level, following climatic determinants. The soil structure is related to three groups of pedofauna and allows to share Mull from Amphib and Moder systems respectively characterized by macro, meso and micro soil structures. In Italy in the last years were published numerous works about humus forms. The humus forms content a mean of 80 t of organic carbon at hectare (first 30 cm, more or less). The highest values have been measured in high-mountain coniferous forests in East-Central Alps, or in broadleaves thermophile forests over Amphib in the West Alps or over Mull in the Apennines. In conclusion, few words of thanks to Frank J. Stevenson and Charles Darwin. More than twenty years ago, Stevenson published a second version of a book (*Humus chemistry*, first version 1982) in which he explained even to undergraduates students what humic substances are and how they work in the soil. More than 130 years ago, Darwin wrote a book (*The formation of vegetable mould through the action of worms with some observations on their habits*) whose scientific importance has been completely understood only in recent time.

BIBLIOGRAFIA CITATA E DI RIFERIMENTO

- Aber J.D., Melillo J.M., Nadelhoffer K.J., McLaugherty C., Pastor J., 1985 – *Fine root turnover in forest ecosystems in relation to quantity and form of nitrogen availability. A comparison of two methods*. *Oecologia*, 66 (3): 317-321.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF00378292>
- André J., 1994 – *Régénération de la pessière à myrtille: allélopathie, humus et mycorhizes*. *Acta Botanica Gallica: Botany Letters*, 141 (4): 551-558.
<http://dx.doi.org/10.1080/12538078.1994.10515198>
- Andreotta A., Ciampalini R., Moretti P., Vingiani S., Poggio G., Matteucci G., Tescari F., Carnicelli S., 2011 – *Forest humus forms as potential indicators of soil carbon storage in Mediterranean environments*. *Biol Fertil Soils*, 47: 31-40.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00374-010-0499-z>
- Andreotta A., Macci C., Giansoldati V., Masciandaro G., Carnicelli S., 2013 – *Microbial activity and organic matter composition in Mediterranean humus forms*. *Geoderma*, 209-210: 198-208.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.010>
- Ascher J., Sartori G., Graefe U., Thornton B., Ceccherini M.T., Pietramellara G., Egli M., 2012 – *Are humus forms, mesofauna and microflora in subalpine forest soils sensitive to thermal conditions?* *Biol Fertil Soils* 48: 709-725.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00374-012-0670-9>
- Berg B., McLaugherty C., 2014 – *Plant Litter. Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-38821-7_1
- Berg B., 2014 – *Decomposition patterns for foliar litter – A theory for influencing factors*. *Soil Biology and Biochemistry*, 78: 222-232.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.005>
- Bernier N., Ponge J.F., 1994 – *Humus form dynamics during the sylvogenetic cycle in a mountain spruce forest*. *Soil Biol Biochem*, 26: 183-220.
[http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90161-9](http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717(94)90161-9)
- Bonifacio E., Falsone G., Petrillo M., 2011 – *Humus forms, organic matter stocks and carbon fractions in forest soils of north-western Italy*. *Biol Fertil Soils*, 47: 555-566. <http://dx.doi.org/10.1007/s00374-011-0568-y>
- Bouché M.B., 1977 – *Stratégies lombriciennes. Soil Organisms as Components of Ecosystems*. *Ecol. Bull. Stockholm*, 25: 122-132.
- Bouché M.B., 2014 – *Des vers de terre et des homes*. *Actes Sud*, 322.
- Brêthes A., Brun J.J., Jabiol B., Ponge J.F., Toutain F., 1995 – *Classification of forest humus forms: a French proposal*. *Ann Sci For*, 52: 535-546.
<http://dx.doi.org/10.1051/forest:19950602>
- Chauvat M., Ponge J.F., Wolters V., 2007 – *Humus structure during a spruce forest rotation: quantitative changes and relationship to soil biota*. *Eur. J. Soil Sci.*, 58: 625-631. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00847.x>
- Darwin C., 1880 – *The power of movement in plants*. John Murray, London.
- Darwin C., 1881 – *The formation of vegetable mould through the action of worms with some observations on their habits*. John Murray, London.
- De Nicola C., Testi A., Crosti R., Zanella A., D'Angeli D., Fanelli G., Pignatti S., 2013 – *Humus e vegetazione come indicatori della qualità dell'ecosistema suburbano nella Tenuta di Castelporziano*. In: *Il Sistema Ambientale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano. Ricerche sulla complessità di un ecosistema forestale costiero mediterraneo*. Accademia delle Scienze, "Scritti e Documenti", XLVI, Terza Serie, I: 27-68.
- De Nicola C., Zanella A., Testi A., Fanelli G., Pignatti S., 2014 – *Humus forms in a Mediterranean area (Castelporziano Reserve, Rome, Italy): classification, functioning and organic carbon storage*. *GEODERMA*, 90-99.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.033>
- Dell'Agnola G., Nardi S., 1987 – *Hormone-like effect and enhanced nitrate uptake induced by deploycondensed humic fractions obtained from *Allolobophora rosea* and *A. caliginosa* faeces*. *Biology and Fertility of Soils*, 4: 115-118. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00256983>
- Galvan P., Ponge J.F., Chersich S., Zanella A., 2008 – *Humus components and soil biogenic structures in Norway spruce ecosystems*. *Soil Science Society of America*, 72 (2): 548-557.

- <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2006.0317>
- Galvan P., Scattolin L., Ponge J.F., Viola F., Zanella A., 2005 – *La forme di humus e la pedofauna. Interpretazione delle interrelazioni e chiavi di riconoscimento*. Sherwood, 112: 33-39.
- Garlato A., Obber S., Vinci I., Mancabelli A., Parisi A., Sartori G., 2009a – *La determinazione dello stock di carbonio nei suoli del Trentino a partire dalla banca dati della carta dei suoli alla scala 1:250.000*. Museo Tridentino di Scienze Naturali, Trento. Studi Trent. Sci. Nat., 85: 157-160.
- Garlato A., Obber S., Vinci I., Sartori G., Manni G., 2009b – *Stock attuale di carbonio organico nei suoli di montagna del Veneto*. Museo Tridentino di Scienze Naturali, Trento. Studi Trent. Sci. Nat., 85: 69-81.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2010 – *Le Sol Vivant. Bases de Pédologie. Biologie des Sols*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne. Nouvelle édition revue et augmentée, pp. 817.
- Godefroid S., Massant W., Koedam N., 2005 – *Variation in the herb species response and the humus quality across a 200-year chronosequence of beech and oak plantations in Belgium*. Ecography, 28: 223-235.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.0906-7590.2005.03877.x>
- Graefe U., 2007 – *Gibt es in Deutschland die Humus form Amphi?* Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 110: pp. 2.
- Green R.N., Trowbridge R.L., Klinka K., 1993 – *Towards a taxonomic classification of humus forms*. Forest Science Monographs, 29: 1-49.
- Guermanti M., Marchi N., Tarocco P., Calzolari C., Ungaro F., Villani I., 2013 – *Siti locali rappresentativi dei suoli della pianura e della collina Emiliano-Romagnola*. Ed. Regione Emilia-Romagna. Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli - IRPI CNR - Provincia di Ferrara. pp. 41.
- Hartmann F., 1970 – *Diagnosi degli Humus Forestali su Basi Biomorfologiche*. CEDAM, Padova (Italy).
http://hal.archivesouvertes.fr/docs/00/56/17/95/PDF/Humus_Forms_ERB_31_01_2011.pdf.
- Incerti G., Bonanomi G., Giannino F., Rutigliano F.A., Piermatteo D., Castaldi S., De Marco A., Fierro A., Fioretto A., Maggi O., Papa S., Persiani A.M., Feoli E., Virzo De Santo A., Mazzoleni S., 2011 – *Litter decomposition in Mediterranean ecosystems: Modelling the controlling role of climatic conditions and litter quality*. Applied Soil Ecology. 49: 148-157.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.06.004>
- Jabiol B., Zanella A., Englisch M., Hager H., Katzensteiner K., de Waals R., 2004 – *Towards a European classification of terrestrial humus forms*. Eurosoil Congress, Freiburg, Germany, September 4-12.
- Jabiol B., Zanella A., Ponge J.F., Sartori G., Englisch M., Delft van B., Waal de R., Le Bayon R.C., 2013 – *A proposal for including humus forms in the World Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO)*. Geoderma, 192: 286-294.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.002>
- Kubična W.L., 1953 – *The Soils of Europe*. Thomas Murby, London.
- Lutzow M.V., Koegel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marachner B., Flessa H., 2006 – *Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review*. European Journal of Soil Science, 57: 426-445.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>
- Melillo J.M., Butler S.M., Johnson J., Mohana J., Steudler P., Lux H., Burrowsa E., Bowles F., Smitha R., Scotta L., Varioa C., Hilla T., Burtoni A., Zhouj Y.M., Tanga J., 2011 – *Soil warming, carbon-nitrogen interactions and forest carbon budgets*. Proc. Natl Acad. Sci. USA 108: 9508-9512.
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1018189108>
- Melillo J.M., Steudler P.A., Aber J.D., Newkirk K., Lux H., Bowles F.P., Catricala C., Magill A., Ahrens T., Morrisseau S., 2002 – *Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system*. Science 298: 2173-2176. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1074153>
- Müller P.E., 1889 – *Recherches sur les formes naturelles de l'humus et leur influence sur la végétation et le sol*. Berger-Levrault, Paris.
- Nicolai V., 1988 – *Phenolic and mineral content of leaves influences decomposition in European forest ecosystems*. Oecologia, 75: 575-579.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF00776422>
- Osman K.T., 2013 – *Forest soil. Properties and Management*. Springer eBook: p.105.
- Piccolo A., Spaccini R., Nieder R., Richter J., 2004 – *Sequestration of a biologically labile organic carbon in soils by humified organic matter*. Climatic Change, 67: 329-343.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10584-004-1822-1>
- Piccolo A., 1996 – *Humus and Soil conservation*. In: Humic Substances in Terrestrial Ecosystems: 225-264.
- Piccolo A., 2001 – *The supramolecular structure of humic substances*. Soil Science, 166: 810-832.
<http://dx.doi.org/10.1097/00010694-200111000-00007>
- Ponge J.F., Zanella A., Sartori G., Jabiol B., 2010 – *Terrestrial Humus Forms: Ecological Relevance and Classification*. In: European Atlas of Soil Biodiversity. Jefferey S., Gardi C., Jones A., Montanarella L., Marmo L., Miko L., Ritz K., Peres G., Rombke J., Van Der Putten W.H. 2995 LUXEMBOURG: Publication Office of the European Union. pp.14-15.
- Ponge J.F., 2003 – *Humus forms in terrestrial ecosystems: a framework to biodiversity*. Soil Biology and Biochemistry, 35, 935-945.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00149-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00149-4)
- Ponge J.F., 2005 – *Emergent properties from organisms to ecosystems: towards a realistic approach*. Biological Reviews, 80 (3): 403-411.
<http://dx.doi.org/10.1017/S146479310500672X>
- Ponge J.F., 2009 – *Effets des amendements sur le fonctionnement biologique des sols forestiers: mieux comprendre le rôle de la méso- et de la macrofaune dans l'évolution des humus* (in French, with English summary). Revue Forestière Française, 61 (3): 217-222.
- Ponge J.F., Arpin P., Sondag F., Delecour F., 1997 – *Soil fauna and site assessment in beech stands of the Belgian Ardennes*. Can. J. For. Res. 27: 2063-2064.
<http://dx.doi.org/10.1139/x97-169>
- Ponge J.F., Jabiol B., Gegout J.C., 2011 – *Geology and climate conditions affect more humus forms than forest*

- canopies at large scale in temperate forests*. Geoderma, 162 (1-2): 187-195.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.003>
- Ponge J.F., Patzel N., Delhaye L., Devign E., Levieux, C., Beros P., Wittebroodt R., 1999 – *Interactions between earthworms, litter and trees in an old-growth beech forest*. Biology and Fertility of Soils, 29: 360-370.
<http://dx.doi.org/10.1007/s003740050566>
- Ponge J.F., Sartori G., Garlato A., Ungaro F., Zanella A., Jabiol B., Obber S., 2014 – *The impact of parent material, climate, soil type and vegetation on Venetian forest humus forms: A direct gradient approach*. Geoderma, 226-227: 290-299.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.02.022>
- Robert M., Chenu C. 1992 – *Interactions between soil minerals and microorganisms*. In: Soil Biochemistry. Ed Dekker, pp. 307-393.
- Robert M., Saugier B., 2003 – *Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. Géophysique externe climat et environnement (Climat)*. Geoscience, 335: 577-595.
- Rodeghiero M., 2003 – *Il carbonio nei suoli forestali*. In: Il ruolo delle foreste nel bilancio del carbonio. Aspetti ecologici ed economici. AA.VV. Report n. 28 Centro di Ecologia Alpina, Trento.
- Rodeghiero M., Tonolli S., Vescovo L., Gianelle D., Cescatti A., Sottocornola M. 2010 – *INFOCARB: a regional scale forest carbon inventory (Provincia Autonoma di Trento, Southern Italian Alps)*. Forest Ecology and Management, 259: 1093-1101.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.12.019>
- Sartori G., Obber S., Garlato A., Vinci I., Pocaterra F., 2004 – *Factors controlling alpine humus forms distribution (Venetian Alps, Italy)*. Eurosoil Congress, Freiburg, Germany, September 4-12.
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K., 2002 – *Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils*. Plant and Soil, 241: 155-176.
<http://dx.doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Spijkerboer H.P., Hans P.K., Gerard J., Akkerhuis J., 2014 – *A rethink of evolution, and the construction of a family of 'patterns of evolution' inside and outside biology*. <https://www.academia.edu/>
- Stevenson F.J., 1994 – *Humus chemistry. Genesis, Composition, Reactions*. Second edition, John Wiley & Sons, inc, USA.
- Tonolli S., Salvagni F., 2007 – *InFoCarb. Inventario forestale del carbonio della Provincia di Trento* Centro di Ecologia Alpina.
- Waez-Mousavi S.M., Habashi H., 2012 – *Evaluating humus forms variation in an unmanaged mixed beech forest using two different classification methods*. iForest – Biogeosciences and Forestry, 5: 272-275.
- Wolters V., 2000 – *Invertebrate control of soil organic matter stability*. Biol Fertil Soils, 31: 1-19.
<http://dx.doi.org/10.1007/s003740050618>
- Zanella A., Jabiol B., Ponge J.F., Sartori G., De Waal R., Van Delft B., Graefe U., Cools N., Katzensteiner K., Hager H., Englisch M., Brethes A., Broll G., Gobat J.M., Brun J.J., Milbert G., Kolb E., Wolf U., Frizzera L., Galvan P., Kollir R., Baritz R., Kemmers R., Vacca A., Serra G., Banas D., Garlato A., Chersich S., Klimo E., Langohr R., 2011a – *European humus forms reference base*.
- Zanella A., Jabiol B., Ponge J.F., Sartori G., De Waal R., Van Delft B., Graefe U., Cools N., Katzensteiner K., Hager H., Englisch M. 2011b – *A European morpho-functional classification of humus forms*. Geoderma, 164: 138-145.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.05.016>
- Zanella A., Tommasi M., De Siena C., Frizzera L., Jabiol B., Nicolini G., Sartori G., Calabrese M.S., Mancabelli A., Nardi S., Pizzeghello D., Odasso M., 2001 – *Humus forestali*. Manuale di ecologia per il riconoscimento e l'interpretazione. TRENTO: Centro di Ecologia Alpina.