

Stock attuale di carbonio organico nei suoli di montagna del Veneto

Adriano GARLATO^{1*}, Silvia OBBER¹, Ialina VINCI¹, Giacomo SARTORI² & Giulia MANNI¹

¹ARPA Veneto, Unità Operativa Suolo, Via Baciocchi 9, 31033 Castelfranco V.to (TV), Italia

²Museo Tridentino di Scienze Naturali, Via Calepina 14, 38122 Trento, Italia

*E-mail dell'Autore per la corrispondenza: agarlato@arpa.veneto.it

RIASSUNTO - *Stock attuale di carbonio organico nei suoli di montagna del Veneto* - Il carbonio organico nel suolo (SOC) è stato identificato come la principale riserva terrestre di carbonio organico. I dati provenienti da 543 profili di suolo, rappresentativi di tutti i diversi pedoambienti dell'area montana e prealpina del Veneto, studiati nel periodo 1996-2006, sono stati utilizzati per determinare lo stock di carbonio. Il carbonio stoccato nell'humus, determinato su 317 profili che avevano la descrizione degli orizzonti organici, è risultato pari a 31,7 t ha⁻¹ (mediana), mentre nei primi 30 cm di suolo minerale pari a 57,5 t ha⁻¹, che diventano 69,4 t ha⁻¹ includendo gli orizzonti organici. Nel primo metro i quantitativi aumentano fino a 88,5 e 102,6 t ha⁻¹ rispettivamente. Il contributo del C contenuto nell'humus varia tra 17%, nel caso del SOC dei primi 30 cm, a 14% nel caso del SOC calcolato sul primo metro. Dall'esame delle relazioni tra SOC e diversi parametri quali quota, forme di humus, uso del suolo e tipologie di suolo, sono emerse alcune differenze statisticamente significative. Sono stati infine valutati possibili scenari futuri nell'ottica dei cambiamenti climatici che potranno investire le zone montane nel prossimo futuro.

SUMMARY - *The actual stock of organic carbon in the mountain soil profiles of Veneto Region* - Soil organic carbon (SOC) has been identified as the main global-terrestrial carbon reservoir. To assess organic carbon stocks within soil mineral and organic (humus) horizons, data collected in the period 1996-2006 from 543 mountain soil profiles (representative of Veneto mountain and prealpine area in terms of climate, geology, topography and forest type distribution) were used. Organic carbon stocked within organic horizons, determined by means of 317 soil profiles where organic horizons had been fully described, resulted equal to 31.7 t ha⁻¹ (median), whereas within 0-30 cm of mineral soil equal to 57.5 t ha⁻¹, that becomes 69.4 t ha⁻¹ including organic horizons; within 0-100 cm soil stocks increase up to 88.5 and 102.6 t ha⁻¹ respectively. Organic horizon contribution to total SOC goes from 17%, for 0-30 cm of soil, to 14% for 0-100 cm. Examining relationships between SOC and different parameters, like altitude, humus form, land use, soil type, some statistically significant differences emerged. Eventually some scenarios have been evaluated from the viewpoint of global climatic change that will involve mountain areas in the near future.

Parole chiave: suoli montani, Regione Veneto, carbonio organico, stock di carbonio, forme di humus

Key words: mountain soils, Veneto Region, organic carbon, carbon stock, humus forms

1. INTRODUZIONE

Il suolo costituisce un'importante riserva di carbonio organico e gioca un ruolo fondamentale nel ciclo globale del carbonio stesso. Secondo Batjes (1996), a livello planetario i suoli minerali e organici stoccano circa 1505 Pg C, superando il pool complessivo di carbonio della vegetazione (610 Pg C) e dell'atmosfera (750 Pg C).

Poiché l'emissione annuale di CO₂ che si libera nell'atmosfera dalla decomposizione della sostanza organica prodotta dagli ecosistemi terrestri ammonta a circa 50-60 Pg C (McGuire *et al.* 1995), quantità che corrisponde a circa un ordine di grandezza in più rispetto alle emissioni antropiche, è evidente che cambiamenti anche piccoli che li riguardano possono influenzare fortemente il ciclo globale del carbonio.

È noto che i suoli di montagna sono molto ricchi in sostanza organica (almeno in termini di contenuto percentuale di C), ma i quantitativi in essi presenti dipendono da

diversi fattori sia esterni al suolo (clima, topografia, uso del suolo) che interni (drenaggio, tessitura, contenuto in carbonati, ecc.). La stima si rivela quindi particolarmente difficile, proprio perché negli ambienti montani questi fattori variano spazialmente in modo molto rapido (Prichards *et al.* 2000).

La disponibilità di dati misurati relativi ai contenuti in carbonio organico dei diversi orizzonti del suolo e alla densità apparente degli stessi consente di formulare delle stime affidabili e l'affidabilità aumenta notevolmente quando sono disponibili dati anche sugli orizzonti organici di superficie (humus).

L'obiettivo di questo lavoro è quello di quantificare il contenuto in carbonio organico dei suoli della montagna veneta sia negli orizzonti minerali che nell'humus. Particolare attenzione verrà posta all'andamento del carbonio in rapporto alla profondità e, per poter prevedere eventuali dinamiche, alle variazioni che esso subisce in base al mutare delle caratteristiche ambientali.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Area di studio

In Veneto l'area montana occupa una superficie di 6830 km², poco meno del 40% della superficie totale regionale (ARPAV 2005). La quota varia dai circa 100 metri dei fondovalle prealpini agli oltre 3000 metri delle principali cime dolomitiche. Gran parte del territorio è ricoperta da vegetazione naturale, boschi e secondariamente pascoli, mentre le aree coltivate sono meno del 5% (EEA 2000).

Dal punto di vista geologico, il settore alpino del Veneto presenta una notevole variabilità, passando dalle rocce metamorfiche del basamento cristallino alla *Dolomia Principale* dei gruppi montuosi più importanti della regione, attraverso le litologie della successione stratigrafica calcarea e terrigena dolomitica. Alle diverse litologie corrispondono forme molto differenziate: aspre e ad alta energia nei rilievi dove prevale la dolomia, arrotondate e meno pendenti in corrispondenza di rocce vulcaniche e terrigene.

Nell'area prealpina i litotipi più diffusi sono calcarei, distinguibili in una porzione più o meno pura e in una che presenta una certa percentuale di componente terrigena (calcari marnosi). Nella Lessinia orientale sono presenti basalti del vulcanesimo terziario, mentre nella zona di Recoaro e delle Piccole Dolomiti, a causa di particolari condizioni tettoniche, emerge una successione stratigrafica più antica, permo-triassica, la cui evoluzione è analoga a quella dei rilievi alpini dolomitici (ARPAV 2005).

Dal punto di vista climatico, la montagna veneta presenta temperature che aumentano procedendo da nord verso sud, dalle Alpi verso le Prealpi. Le temperature medie annue variano dagli 0 °C delle quote più alte ai 7 °C della zona prealpina: occorre comunque tenere conto che oltre all'altitudine anche l'esposizione ha una notevole influenza su questo parametro. Le precipitazioni sono più intense in corrispondenza dei rilievi prealpini e diminuiscono nella fascia alpina che ha un clima più continentale. Le zone più piovose raggiungono i 2000 mm anno⁻¹ nel recoarese, mentre nell'ampezzano tale quantitativo si dimezza.

Nell'area prealpina prevalgono le latifoglie, con orno-strieti a bassa quota e faggete e abieteti a quote superiori. In area alpina prevalgono le conifere (peccete), anche se il faggio è ancora presente almeno nella fascia montana; in alta quota esse vengono sostituite da lariceti e laricicembreti, e quindi dalle praterie e dai pascoli.

2.2. Banca dati sui suoli

Tutte le osservazioni pedologiche relative al Veneto sono state inserite in una banca dati regionale dalla struttura alquanto complessa, contenente informazioni sia sulla stazione (quota, vegetazione, ecc.) sia sui singoli orizzonti descritti (spessori, tessitura, ecc.). Per questo lavoro, dalla banca dati è stato estratto un sottoinsieme di 543 profili descritti in zona montana e prealpina aventi il requisito minimo di possedere dati analitici relativi al carbonio organico almeno fino a 30 cm di profondità.

La quota media dei profili presi in considerazione è di poco inferiore ai 1100 metri s.l.m., con valori minimi a 165 metri nei fondovalle prealpini e massimi a 2370 metri nell'Alta Val Comelico. La maggior parte dei suoli ricade nella fascia fitoclimatica montana e submontana, mentre

meno del 10% dei suoli indagati si trova nelle fasce subalpina e alpina.

Le tessiture superficiali prevalenti sono franco-limose e franche, anche se non mancano termini più fini, franco-argillosi e franco-limoso-argillosi, e più grossolani, prevalentemente franco-sabbiosi. In profondità le tessiture sono mediamente più grossolane, con prevalenza delle classi franche e franco-sabbiose. Il contenuto in scheletro è abbastanza elevato (mediamente circa il 25% nei primi 50 cm) e aumenta ulteriormente con la profondità (oltre il 40%, mediamente, tra 50 e 100 cm).

L'uso prevalente del suolo è quello a bosco, con una dominanza delle conifere e dei cedui; seguono i prati-pascoli e i pascoli, mentre in aree coltivate sono meno del 10% dei profili, gran parte dei quali in Valbelluna o lungo i fondovalle alpini.

Le tipologie di suolo più diffuse (ARPAV 2005), secondo la classificazione ecologica di Duchaufour (2001), sono i rendzina (*Leptosols* e *Phaeozems* secondo la versione del 2006 del *World Reference Base*; FAO 2006) e i suoli bruni calcarei (*Cambisols* calcarei) sui substrati carbonatici duri, i suoli bruni lisciviati (*Luvissols*) a quote inferiori e prevalentemente sui substrati marnosi, mentre sui substrati silicatici prevalgono i suoli bruni ocrici (*Cambisols* districi); i veri e propri podzols umo-ferrici sono quasi completamente assenti, anche per la mancanza di substrati fortemente acidi.

Per l'ambiente di montagna, oltre alla stima del carbonio organico stoccato nei suoli, è fondamentale considerare anche l'apporto del carbonio inglobato negli orizzonti organici di superficie (humus) che, secondo recenti studi (Galbraith *et al.* 2003; Schulp *et al.* 2008), può costituire tra il 10 e il 30% del carbonio totale.

La disponibilità di dati, per 317 profili, sulla tipologia degli orizzonti ologranici e sul loro spessore, ha permesso di stimare i contenuti di carbonio organico anche per gli humus, mentre è stato escluso dal calcolo il carbonio stoccato dalla lettiera. Le tipologie di humus più diffuse (Sartori *et al.* 2009) sono rappresentate dagli *Amphimull* e dai *Dysmull*, secondo il *Référentiel Pédologique* (AFES 1995), i quali sono presenti prevalentemente sui suoli a reazione neutra o alcalina; sui suoli acidi, meno diffusi, sono invece comuni i moder (il 10% degli humus indagati). Forme di humus più attive, *Eumull*, *Mesomull* e *Oligomull* sono relativamente meno diffuse, e si presentano in circa il 20% del data-set.

L'arco temporale del rilevamento distribuito in circa una decina d'anni (1996-2006) crea un problema di disomogeneità nella banca dati. Dalla bibliografia emerge però che variazioni cospicue nel contenuto di sostanza organica nel suolo si realizzano in intervalli di tempo dell'ordine di dieci anni solo quando contemporaneamente vengono modificati profondamente gli input. Perruchoud *et al.* (1999) a questo proposito affermano che un incremento del 10% nel SOC nel topsoil richiede almeno dieci anni di tempo se contemporaneamente gli input della lettiera vengono aumentati di un terzo. Variazioni di tale entità possono essere comunque escluse in Veneto, vista la relativa stabilità nella gestione degli ambiti forestali.

2.3. Analisi chimiche

Sono stati utilizzati due metodi per determinare il carbonio organico degli orizzonti analizzati (1406 minera-

li e 55 organici di superficie): il metodo dell'analizzatore elementare e il metodo Walkley-Black. Il secondo metodo è stato quello più utilizzato, ma a causa della nota tendenza a sottostimare il valore di carbonio organico, soprattutto se in elevate concentrazioni, per campioni con alti contenuti di sostanza organica e in assenza di carbonati si è preferito il primo metodo.

L'esistenza di numerosi campioni analizzati con entrambe le metodiche ha permesso di creare delle rette di regressione, impiegate per convertire i valori ottenuti con l'analizzatore elementare nel metodo Walkley-Black, che hanno consentito un confronto dei dati.

2.4. Calcolo dello stock di carbonio

Lo stock di carbonio (SOC) di ogni singolo suolo analizzato si ottiene dal prodotto, effettuato per ogni orizzonte, tra il quantitativo ponderale di carbonio e la densità apparente dell'orizzonte, sottraendo il volume occupato dai frammenti grossolani:

$$\text{SOC}_{\text{tot}} = \sum_{\text{horizon}=n}^{1} ([\text{SOC}] * \text{BulkDensity} * \text{depth} * (1 - \text{frag}) * 10) \text{horizon}$$

dove: SOC_{tot} = stock di carbonio organico nel suolo (C.O. t/ha); SOC = concentrazione di carbonio organico del singolo orizzonte (C.O. g kg⁻¹ di suolo); Bulk Density = densità apparente dell'orizzonte (t di suolo m⁻³); Depth = profondità dell'orizzonte (m); Frag = percentuale in volume dei frammenti grossolani nell'orizzonte.

2.5. Determinazione della densità apparente

2.5.1. Orizzonti organici (humus)

In bibliografia non sono molti i lavori dove è stato calcolato lo stock di carbonio per gli orizzonti organici partendo da valori di densità misurati in campagna e non attraverso pedofunzioni (Vejre *et al.* 2003; Hedde *et al.* 2007; Schulp *et al.* 2008). In Veneto erano disponibili solo 18 orizzonti organici con dati misurati sia di carbonio che di densità. Per questo motivo, a differenza di quanto è stato fatto per gli orizzonti minerali, dove la mole di dati di densità ha permesso la taratura di pedofunzioni *ad hoc*, per gli humus si è preferito utilizzare la pedofunzione di Hollis definita per gli orizzonti organici (Hollis & Woods 1989; $\text{BD} = -0,00745 * \text{C}\% + 0,593$). Il confronto tra dati misurati e valori stimati (Tab. 1) evidenzia una probabile sovrastima da parte di questi ultimi. Vale però la pena ricordare che le

misure di densità apparente in campagna sono soggette a una notevole incertezza a causa del metodo di misura che, già suscettibile di errori negli orizzonti minerali, diventa ancor meno affidabile negli olorganici. Nel caso del Veneto, la densità degli orizzonti olorganici è stata misurata attraverso il metodo dello scavo. Una conferma dell'elevato errore di questa misura è data dal fatto che i valori medi di densità negli orizzonti OH risultano più bassi rispetto ai valori misurati negli orizzonti OF.

La probabile sovrastima dei dati impiegati (stimati) rispetto ai dati misurati si ripercuote tal quale sulla determinazione dello stock di carbonio.

2.5.2. Orizzonti minerali

Per gli orizzonti minerali la disponibilità di dati misurati (144 orizzonti) ha permesso di creare delle pedofunzioni *ad hoc* per la stima della densità a partire dai dati tessuturali e dal contenuto in sostanza organica. In particolare sono state derivate due pedofunzioni (Ungaro 2009), una valida per gli orizzonti organo-minerali di superficie (A, AE, AB, ecc.) ed una per gli orizzonti profondi (B, C, BC, ecc.). Il confronto tra queste pedofunzioni e quelle disponibili in bibliografia ha sempre, in termini di accuratezza e precisione, favorito le prime (Ungaro 2009).

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1. Stock di carbonio nell'humus

In bibliografia viene stimato che il carbonio stoccato nell'humus può variare tra un minimo di 8 e un massimo del 30% del totale stoccato nel suolo (Schulp *et al.* 2008, Galbraith *et al.* 2003; Vejre *et al.* 2003; Prichard *et al.* 2000; Huntington *et al.* 1988).

Per gli orizzonti organici per cui si disponeva solo del dato di carbonio organico, senza la misura della densità apparente in campagna (N= 55), è stata stimata la densità e si sono ottenuti dei valori medi di carbonio (t ha⁻¹) per centimetro di spessore (Tab. 2). Dalla lettura della tabella è evidente che le differenze in stock di carbonio tra gli orizzonti OF, OH e gli orizzonti designati genericamente come O (quindi OF e/o OH) sono molto ridotte: mediamente lo stock si aggira su valori di 9 t ha⁻¹ per centimetro di spessore. Ad un maggior contenuto di carbonio degli orizzonti OF, corrisponde infatti una densità leggermente più bassa rispetto a quella stimata per gli orizzonti OH.

A questo punto a tutti gli orizzonti organici per i quali non si disponeva di dati misurati (N= 365) ma solo della

Tab. 1 - Statistiche descrittive della densità apparente (BD= bulk density) misurata e stimata per gli orizzonti organici.
Tab. 1 - Descriptive statistics of measured and estimated bulk density (BD) of organic horizons.

	BD misurata			BD stimata			N
	Mediana	Media	CV (%)	Mediana	Media	CV (%)	
Orizzonti OF	0,13	0,18	56	0,28	0,30	13	8
Orizzonti OH	0,13	0,12	42	0,29	0,33	24	3
Orizzonti O (generici)	0,20	0,20	45	0,38	0,27	22	8

Tab. 2 - Statistiche descrittive dello stock di carbonio organico (t/ha) per centimetro di spessore ottenuto da tutti gli orizzonti organici per i quali erano disponibili dati analitici sul carbonio organico.

Tab. 2 - Descriptive statistics of organic carbon stock (t/ha) for cm depth, obtained by means of available analysis of organic horizons.

	Mediana	Media	CV (%)	N
Orizzonti OF	9,0	8,7	3	27
Orizzonti OH	8,8	8,4	21	12
Orizzonti O (generici)	9,0	7,7	9	16

descrizione morfologica di campagna, sono stati attribuiti valori medi di carbonio in base alla tipologia di orizzonte organico e al suo spessore.

Occorre qui ribadire che la scelta di utilizzare per l'intero dataset i valori di densità apparente stimata determina dei contenuti mediamente più alti di quanto si otterrebbe usando dati misurati, e questa possibile sovrastima deve essere tenuta in considerazione leggendo tutte le valutazioni che seguiranno. È comunque importante notare che, sia utilizzando il dato stimato che quello misurato, pochi centimetri di humus sono sufficienti ad aumentare il contenuto di carbonio del suolo di 10-20 t ha⁻¹. Ciò deve far riflettere, visto che in letteratura nella maggior parte degli studi sulle stime dello stock di carbonio organico del suolo l'humus non viene tenuto in considerazione.

Il valore medio del carbonio stoccato negli orizzonti organici dei 317 profili che avevano la descrizione degli orizzonti organici è pari a 41,7 t ha⁻¹ (mediana 31,2) con valori minimi pari a 0, dove è presente solo l'orizzonte OL e mancano gli orizzonti OF e OH, e valore massimo di oltre 200 t ha⁻¹, per un suolo con orizzonti organici di oltre 20 cm di spessore (Tab. 3).

L'analisi della varianza per tipologie di humus suddivise in base alla proposta di Jabiol *et al.* (2004) ha permesso di determinare la significatività per ciascuna forma di humus rispetto allo stock di carbonio utilizzando un test di significatività delle medie ($p < 0,05$) corretto per la diversa consistenza numerica dei gruppi (Tukey-Kramer unequal N HSD test).

I *Mull* hanno un contenuto medio negli orizzonti organici di 15,4 t ha⁻¹, gli *Amphi* 52,3 t ha⁻¹ e i *Moder* 68,0, con differenze statisticamente significative tra *Mull* e *Amphi*, e tra *Mull* e *Moder*; la stessa gerarchia, seppure con differenze minori, e non significative, si mantiene anche per il rispettivo suolo minerale di ciascuna tipologia di humus, sia nei primi 10 cm che nei 30 cm (Fig. 1). Andando a vedere la distribuzione del carbonio nel suolo minerale, si trova che nei suoli con humus di tipo *Mull* gran parte del carbonio del profilo è stoccato negli orizzonti minerali, con valori del 78% del carbonio nel suolo minerale, rispetto al

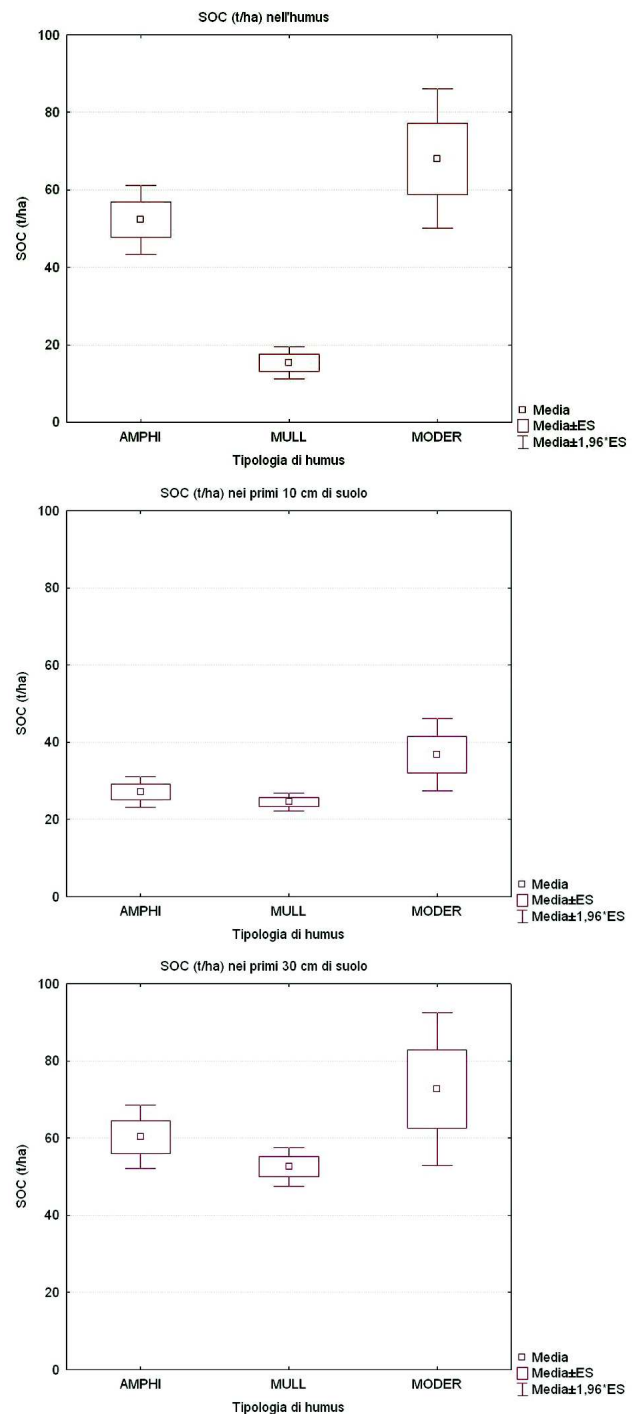


Fig. 1 - Box & whisker plots dello stock di carbonio (t ha⁻¹) nell'humus, nei primi 10 cm e nei primi 30 cm di suolo minerale, per le diverse tipologie di humus (Jabiol *et al.* 2004).

Fig. 1 - Box & whisker plots of carbon stock t ha⁻¹ in the organic horizons, in 0-10 cm layer and 0-30 cm layer of mineral soil for different humus forms (Jabiol *et al.* 2004).

Tab. 3 - Statistiche descrittive del contenuto di carbonio (%) e dello stock di carbonio (t ha⁻¹) per gli humus del Veneto.

Tab. 3 - Descriptive statistics of organic carbon content (%) and stock (t ha⁻¹) for organic horizons in the Veneto region.

	Mediana	Media	CV (%)	Minimo	Massimo	N
Corg humus (%)	26,1	25,4	13	12,5	33,4	284
C stock humus (t/ha)	31,2	41,7	93	0	208	317

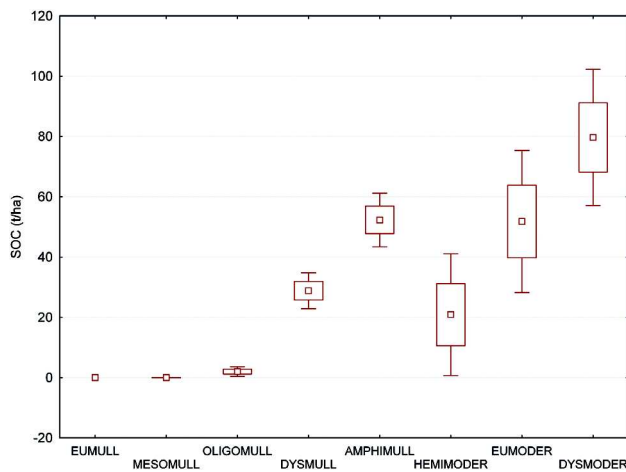


Fig. 2 - Stock di carbonio ($t\ ha^{-1}$) negli orizzonti organici delle diverse classi tassonomiche di humus (AFES 1995).
 Fig. 2 - Organic carbon stock ($t\ ha^{-1}$) in organic horizons for different humus taxonomy classes (AFES 1995).

49% degli *Amphi* e al 52% dei *Moder*; le quantità totali di carbonio organico nel suolo (orizzonti minerali + humus) restano comunque inferiori a quelle dei suoli con humus *Moder* o *Amphi* e di conseguenza i corrispettivi suoli risultano relativamente “poveri” in carbonio.

Differenze nello stock di carbonio dell’humus esistono anche tra le diverse classi tassonomiche del *Référentiel Pédologique* (AFES 1995). Ai valori molto bassi delle forme più attive (*Eumull*, *Mésomull*, *Oligomull*) corrispondono valori maggiori per i *Dysmull* e gli *Amphimull* (Fig. 2) e anche nei moder si osserva un trend crescente dalle forme più attive (*Hémimoder* e *Eumoder*) a quelle meno attive (*Dysmoder*). Esistono differenze statisticamente significative ($p < 0,05$) tra diverse coppie (*Oligomull-Dysmull*, *Oligomull-Amphimull*, *Oligomull-Dysmoder*, *Oligomull-Eumoder*, *Mesomull-Dysmoder*, *Dysmull-Amphimull*, *Dysmull-Dysmoder*).

3.2. Stock di carbonio nei suoli

Di seguito vengono presentate le elaborazioni statistiche sui contenuti in carbonio organico nei primi 30 cm di suolo, nei primi 100 cm, con e senza humus, espressi in % (Tab. 4, Fig. 3) e in $t\ ha^{-1}$ (Tab. 5, Fig. 3). Da tutte le elaborazioni statistiche sono stati esclusi i suoli organici (*Histosols* secondo il WRB) tipici delle aree di torbiera che, oltre ad essere poco numerosi (in relazione alla scarsa diffusione) nella popolazione studiata, hanno dei valori medi molto elevati. La media infatti dei 5 profili analizzati, includendo gli orizzonti organici è di $247\ t\ ha^{-1}$ con un contenuto medio di carbonio del 18%, nei primi 30 cm di suolo, che diventano $625\ t\ ha^{-1}$ prendendo in considerazione il primo metro (carbonio organico medio: 11,6%).

Tab. 4 - Statistiche descrittive del contenuto in carbonio organico (%) nei primi 30 e 100 cm di profondità per il suolo minerale e, per le stesse profondità, includendo anche gli orizzonti organici.

Tab. 4 - Descriptive statistics of organic carbon content (%), in 0-30 cm mineral soil and 0-100 cm mineral soil, with and without organic horizons contribution.

	Mediana	Media	CV (%)	Minimo	Massimo	N
Suolo minerale (0-30 cm)	2,9	3,6	63	0,7	15,6	471
Suolo compreso humus (0-30 cm)	3,7	4,9	71	0,6	22,2	471
Suolo minerale (0-100 cm)	1,3	1,6	62	0,2	7,9	468
Suolo compreso humus (0-100 cm)	1,5	2,0	66	0,2	7,7	468

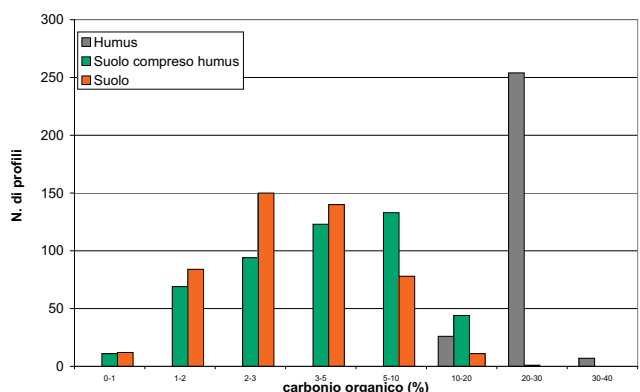
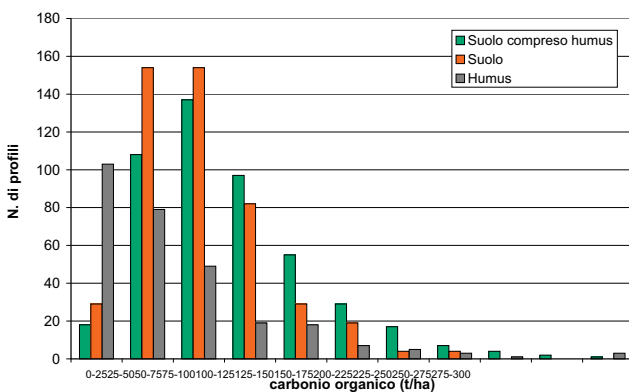


Fig. 3 - Istogramma di frequenza del contenuto medio in carbonio organico (%) e dello stock ($t\ ha^{-1}$) nell’humus, nei primi 30 cm di profondità di suolo minerale (min) e in entrambi (humus + min).
 Fig. 3 - Frequency histogram showing average organic carbon content (%) and stock ($t\ ha^{-1}$) in the organic horizons, in 0-30 cm layer of mineral soil and in both organic and 0-30 cm mineral soil.

Tab. 5- Statistiche descrittive dello stock di carbonio organico ($t\ ha^{-1}$) nei primi 30 e 100 cm di profondità per il suolo minerale e includendo anche gli orizzonti organici, e rapporto tra lo stock di carbonio nei primi 30 cm e quello nello strato sottostante (30-100 cm).

Tab. 5 - Descriptive statistics of organic carbon stock ($t\ ha^{-1}$), in 0-30 cm soil and 0-100 cm soil, with and without organic horizons contribution, and ratio between SOC of 0-30 cm soil and SOC of 30-100 cm, with and without organic horizons contribution.

	Mediana	Media	CV (%)	Minimo	Massimo	N
Suolo minerale (0-30 cm)	57,5	63,4	50	8,8	194,3	471
Suolo compreso humus (0-30 cm)	69,4	77,6	53	9,6	267,1	471
Suolo minerale (0-100 cm)	88,5	96,9	51	10,2	399,1	468
Suolo compreso humus (0-100 cm)	102,6	109,6	49	10,2	399,1	468
Rapporto 0-30/30-100 cm	1,9	3,6	ND	0,4	69,1	422
Rapporto 0-30/30-100 cm (con humus)	2,5	4,4	ND	0,4	88,7	424

La mediana del carbonio stoccato nei suoli della montagna veneta (Tab. 5) è pari a $57,5\ t\ ha^{-1}$ nei primi 30 cm (media: $63,4\ t\ ha^{-1}$), che diventano $69,4\ t\ ha^{-1}$ includendo gli orizzonti organici; nel primo metro i quantitativi aumentano fino a $88,5$ e $102,6\ t\ ha^{-1}$ rispettivamente. L'entità della sottostima in ambito forestale nel momento in cui il contributo dell'humus non venga conteggiato, va dal 17%, nel caso del SOC dei primi 30 cm, al 14% nel caso del SOC calcolato sul primo metro.

I valori del Veneto sembrano essere notevolmente inferiori rispetto a quelli medi riportati da Solaro e Brenna (2005) per i suoli della montagna lombarda, dove sono stati calcolati valori medi di $87,1\ t\ ha^{-1}$ (0-30 cm) e di $154,7$ (0-100 cm), che si abbassano a $80,1$ e $127,3\ t\ ha^{-1}$ in ambiente prealpino. Valori simili si osservano anche per la regione Piemonte (Petrella & Piazzini 2005), dove, in area montana, è stato calcolato uno stock di $91\ t\ ha^{-1}$, con contenuti medi di carbonio organico di 3,10% (da confrontare con i valori percentuali del Veneto riportati nella Tab. 4) per i primi 30 cm di suolo, che scendono a $79,3\ t\ ha^{-1}$ per i soli suoli forestali.

Il confronto con il dato medio di carbonio dei suoli piemontesi ci permette di affermare che le differenze riscontrate nello stock di carbonio ($91\ t\ ha^{-1}$ del Piemonte contro $63,4\ t\ ha^{-1}$ (media) del Veneto nei primi 30 cm) sono dovute solo marginalmente a percentuali più basse del carbonio nel suolo (3,1% in Piemonte contro 2,9% del Veneto), e sono quindi molto probabilmente da imputarsi ai valori più elevati di densità apparente impiegati nella stima. Questo ribadisce la criticità rappresentata dalla misura o stima della densità apparente, come già accennato in precedenza, parametro raramente determinato in campagna e più spesso definito attraverso l'utilizzo di pedo-funzioni, nel migliore dei casi tarate su un data-set locale, altrimenti da dati bibliografici riferiti ad ambienti diversi da quello preso in considerazione.

Per le foreste trentine Tonolli & Salvagni (2007) stimano il carbonio nei primi 30 cm di suolo pari a $92,4\ t\ ha^{-1}$, valore che escludendo l'humus si abbassa a $76\ t\ ha^{-1}$.

Per i suoli forestali della Svizzera (Perruchoud *et al.* 2000) è stato stimato un SOC di $62\ t\ ha^{-1}$ nei primi 20 cm di suolo, dato superiore a quello calcolato per la stessa sezione sui suoli del Veneto che è pari a $43\ t\ ha^{-1}$. Più difficile il confronto con il dato stimato per tutto il suolo minerale che ammonta a $98\ t\ ha^{-1}$ per uno spessore medio di 61 cm per la Svizzera, valore che non è stato valutato per il Veneto, ma che non dovrebbe discostarsi molto dal dato del primo

metro ($88,5\ t\ ha^{-1}$), in quanto sono poco diffusi i suoli con profondità superiori ai 60 cm (e comunque il contenuto di carbonio a tali profondità è molto basso). I valori mediamente più alti trovati in Svizzera possono essere imputati almeno in parte a una sovrastima dovuta al fatto di non aver considerato la presenza dello scheletro; sovrastima a nostro avviso non trascurabile poiché, almeno per i suoli del Veneto, il volume occupato dallo scheletro ammonta in media a circa il 25% del volume totale per i primi 50 cm di profondità.

Il valore medio stimato per i suoli montani del Veneto appare generalmente inferiore a quello trovato in altre aree dell'arco alpino. Se in alcuni casi questa differenza sembra dovuta a differenze nel metodo di conteggio (es. Piemonte e Svizzera), più in generale essa potrebbe essere imputabile alle peculiari caratteristiche delle coperture pedologiche della montagna veneta, caratterizzate (si veda il paragrafo relativo alle tipologie di suolo) da una grande diffusione dei suoli neutri o subacidi con una attiva dinamica della sostanza organica, dalla relativa scarsità di suoli acidi e molto acidi (legata a una scarsa diffusione dei substrati silicatici acidi), e dalla relativa modesta presenza dei suoli di alta quota, in relazione alle tipiche morfologie dolomitiche.

Interessante è anche il rapporto tra SOC nei primi 30 cm e SOC presente tra 30 e 100 cm, parametro spesso usato in contesti agricoli per valutare eccessivi impoverimenti in carbonio, evidenziati da rapporti inferiori all'unità. I valori riscontrati sono nettamente superiori all'unità (mediana 1,9 e 2,5, rispettivamente escludendo e comprendendo l'humus), come ci si aspettava in ambiente forestale. Un rapporto pari a circa 2 significa quindi che i primi 30 cm di suolo stoccano circa il doppio di quanto sia contenuto nei successivi 70 cm.

Un altro aspetto interessante, evidente nella figura 4, è la diminuzione dello stock all'aumentare della profondità: se nei primi 10 cm sono presenti mediamente 25 e $34\ t\ ha^{-1}$, rispettivamente nel suolo minerale e includendo l'humus, lo stock scende a 18 e $19\ t\ ha^{-1}$ nei successivi 10 cm e quindi a $12\ t\ ha^{-1}$ tra 20 e 30 cm.

3.2.1. Relazione con la quota

La correlazione tra contenuto di carbonio e quota è legata alla diminuzione delle temperature all'aumentare della quota, che in Veneto corrisponde a circa $0,6\ ^\circ C$ ogni 100 metri di quota. Temperature inferiori riducono sia l'attività

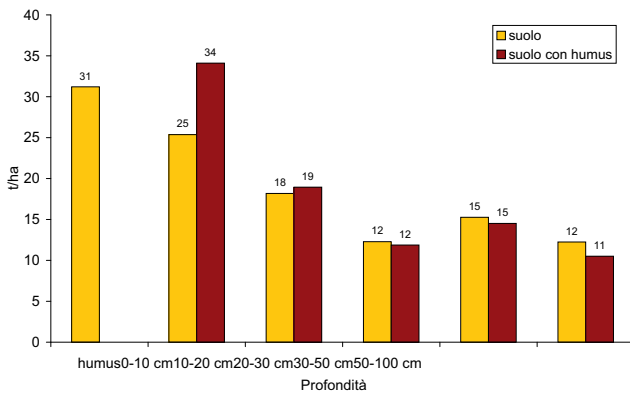


Fig. 4 - Andamento con la profondità dello stock di carbonio (mediane), includendo o meno gli orizzonti organici.
 Fig. 4 - Organic carbon trend with depth (median), with and without organic horizons contribution.

biologica del suolo che la velocità delle reazioni chimiche, portando ad un rallentamento del processo di mineralizzazione del carbonio (Duchaufour 2001; Rodeghiero & Cescatti 2005) con conseguente maggior accumulo nel suolo e negli strati organici di superficie.

Gli incrementi in base alla quota (Fig. 5), sebbene i coefficienti di correlazione siano alquanto bassi (R^2 da 0,03 a 0,20), variano tra 0,16 e 0,29% ogni 100 metri di incremento in altitudine per la percentuale di C organico (con valori di R^2 relativamente più alti), e da 1,1 a 2,8 t ha⁻¹ per la SOC, in linea con quanto trovato da Leifeld *et al.* (2005) per le praterie svizzere, dove si osserva un incremento medio di 0,21% del contenuto in carbonio organico ogni 100 metri di quota.

Per quanto riguarda gli humus, non si osserva una relazione tra quota e carbonio espresso in contenuto percentuale. Esiste però una correlazione tra quota e stock di carbonio (t ha⁻¹). Negli humus, infatti, non è tanto il contenuto di carbonio ad aumentare con la quota ma gli spessori medi dei vari orizzonti di materiali organici sovrapposti al suolo minerale.

3.2.2. Relazione con l'uso del suolo

Lal (2005) riportando dati di bibliografia afferma che nelle foreste temperate a livello globale il carbonio stoccato dalla vegetazione è pari a 59 t ha⁻¹, mentre il suolo (intero profilo) ne raccoglie 100 t ha⁻¹. Nel suolo si trova quindi oltre il 60% del carbonio totale, dato che conferma l'importanza del SOC anche in ambiente forestale.

In Veneto, per quanto riguarda l'humus, dal confronto tra il contenuto di carbonio organico in diverse formazioni

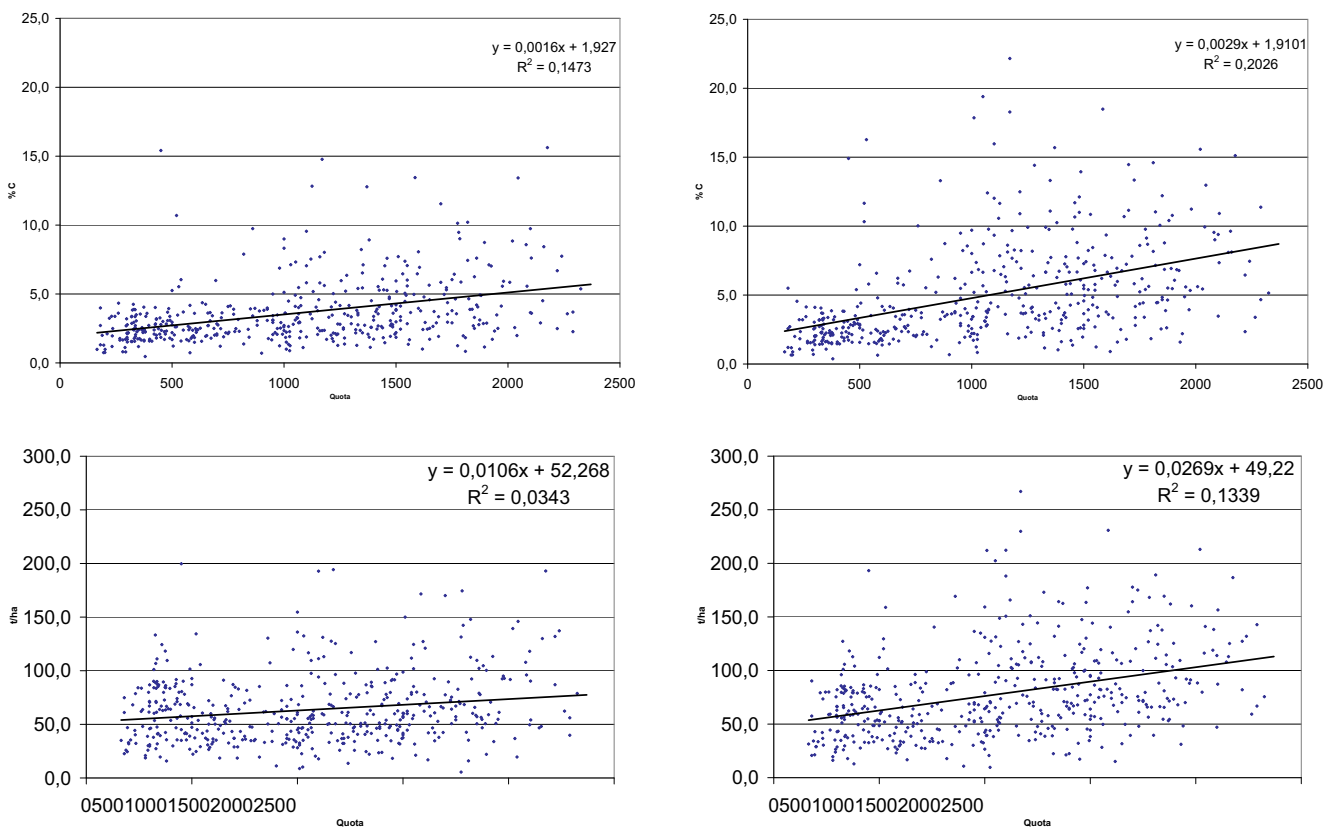


Fig. 5 - Relazione tra quota e carbonio organico (%) nei primi 30 cm di suolo (in alto a sinistra) e includendo gli orizzonti organici (in alto a destra), e relazione tra quota e SOC (t/ha) nei primi 30 cm di suolo minerale (in basso a sinistra) e includendo gli orizzonti organici (in basso a destra).

Fig. 5 - Relationship between altitude and organic carbon content (%) in 0-30 cm mineral soil (top left) and in the same layer including organic horizons (top right), and relationship between altitude and SOC (t/ha) in 0-30 cm layer of mineral soil (bottom left) and including organic horizons (bottom right).

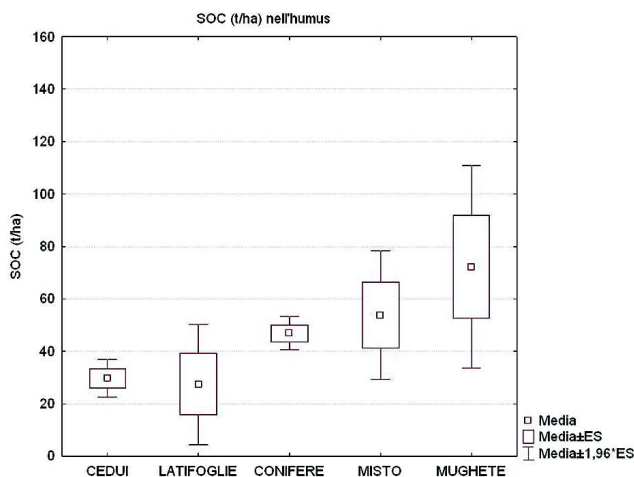


Fig. 6 - Stock di carbonio organico ($t\ ha^{-1}$) nell'humus nelle diverse formazioni forestali del Veneto.

Fig. 6 - Organic carbon stock ($t\ ha^{-1}$) in organic horizons for different forest types of the Veneto region.

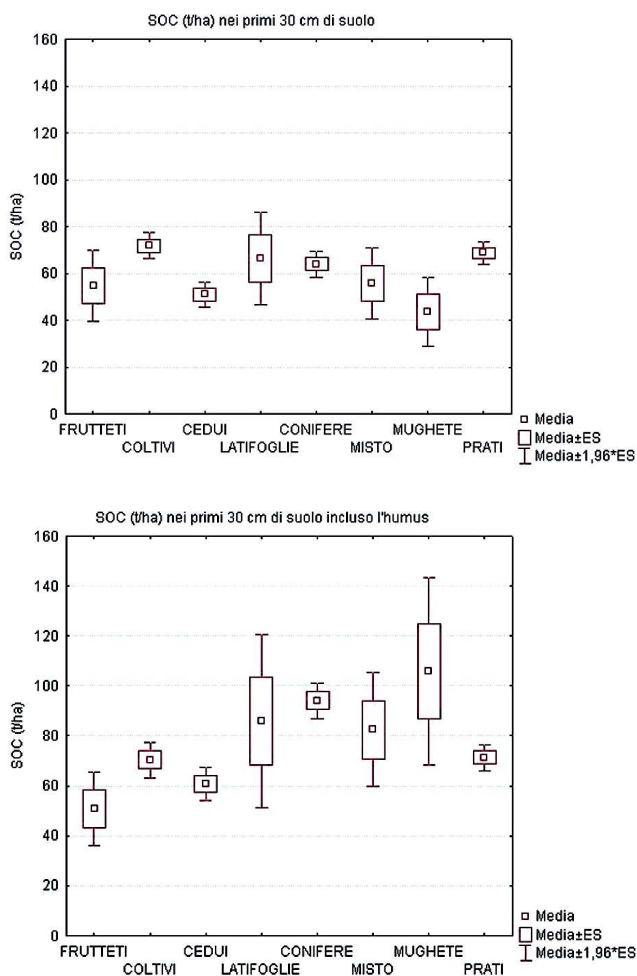


Fig. 7 - Stock di carbonio organico ($t\ ha^{-1}$) nei primi 30 cm di suolo minerale (in alto) o includendo gli orizzonti organici (in basso) in base al diverso uso del suolo.

Fig. 7 - Soil organic carbon stock ($t\ ha^{-1}$) in 0-30 cm layer of mineral soil with (bottom) and without organic horizons (top) for different land uses.

forestali suddivise in base alla prevalenza di conifere e latifoglie (Fig. 6) si osserva che i contenuti medi di carbonio sono leggermente inferiori a $30\ t\ ha^{-1}$ nelle latifoglie (sia fustaie che cedui) rispetto che nei boschi di conifere e misti (oltre $40\ t\ ha^{-1}$), fino ad arrivare ad oltre $70\ t\ ha^{-1}$ nelle mughete (generalmente ad alta quota su suoli sottili). Tra cedui e conifere, e tra cedui e mughete le differenze sono statisticamente significative in base al test di Tuckey.

Se si confrontano i contenuti in carbonio nel suolo minerale dei diversi usi del suolo (Fig. 7), si osservano i valori più alti sui suoli coltivati ($71,8\ t\ ha^{-1}$), seguiti dai prati-pascoli con $68,7\ t\ ha^{-1}$, e i valori più bassi nelle mughete ($43,5\ t\ ha^{-1}$) e nei cedui ($50,9\ t\ ha^{-1}$). Prendendo in considerazione anche l'humus, questa gerarchia viene però notevolmente modificata, e si può osservare come diversi suoli forestali presentino contenuti maggiori rispetto ai coltivati (mughete, conifere, boschi misti e latifoglie), poiché gran parte del carbonio è stoccato negli orizzonti organici. Solo i cedui presentano valori inferiori, mentre i prati-pascoli hanno contenuti simili a quelli dei coltivati.

L'alto contenuto di carbonio nei suoli coltivati molto probabilmente è da attribuirsi ai sistemi culturali adottati nelle aree montane venete, mai di tipo intensivo (come confermato dal rapporto tra SOC nei primi 30 cm e SOC presente tra 30 e 100 cm pari a 2), e agli elevati apporti di ammendanti organici (soprattutto letame), in relazione all'esigua disponibilità di superfici idonee al loro utilizzo in tali aree.

Da notare i bassi contenuti nei cedui, legati verosimilmente all'intenso sfruttamento (presente, ma soprattutto passato). Dal punto di vista del C, potrebbero essere quasi considerati dei suoli coltivati adibiti ad arboricoltura. Il notevole sfruttamento è confermato anche dal rapporto tra SOC nei primi 30 cm e SOC presente tra 30 e 100 cm, il quale è inferiore a 4 (unico caso tra i diversi usi forestali). Questo dato contrasta nettamente con quanto trovato per il Trentino (Tonolli & Salvagni 2007), dove il contenuto di carbonio nei primi 30 cm di suolo (inclusa la lettiera) risulta superiore nei cedui rispetto alle fustaie, con valori doppi ($118,3\ t\ ha^{-1}$) se confrontati a quelli del Veneto ($60,8\ t\ ha^{-1}$).

Per il Veneto è possibile fare un confronto tra il carbonio stoccato nel suolo e quello epigeo nelle diverse formazioni forestali (Tab. 6, Fig. 8), grazie al lavoro di Anfodillo *et al.* (2006). Il valore medio del carbonio epigeo nelle fustaie asestate è di $57,7\ t\ ha^{-1}$, con valori massimi negli abieteti ($78,3\ t\ ha^{-1}$) e minimi nelle mughete ($7\ t\ ha^{-1}$). Tali valori sono però probabilmente sottostimati per l'esclusione di tutti gli alberi con diametro inferiore a $17,5\ cm$ (errore particolarmente evidente nelle mughete). Nei cedui dove lo stock è riferibile all'intera biomassa, i valori sono mediamente più alti passando dalle $57,7\ t\ ha^{-1}$ degli orno-ostrieti alle $81,5\ t\ ha^{-1}$ dei cedui a faggio, con valori medi di $66,1\ t\ ha^{-1}$.

Dal confronto con il carbonio stoccato nei primi 30 cm del suolo, che è quello più suscettibile di cambiamenti a causa di modifiche di input e/o ambientali, emerge che nelle fustaie, con la sola eccezione degli abieteti, la maggior parte del carbonio è presente nel suolo. Le differenze sono ancora maggiori se si prende in considerazione anche l'humus. Nei cedui invece il carbonio epigeo equivale grossomodo a quello contenuto nei primi cm di suolo.

In termini percentuali nelle fustaie il carbonio stoccato nel suolo va dal 38% del carbonio totale per gli abieteti

Tab. 6 - Stock di carbonio organico $t\ ha^{-1}$ nella porzione epigea, nei primi 30 e 100 cm di suolo minerale e includendo gli orizzonti organici (valori medi) nelle diverse tipologie forestali del Veneto (per lo stock di carbonio epigeo, fonte: Anfodillo *et al.* 2006).

Tab. 6 - Forest stand organic carbon stock $t\ ha^{-1}$, 0-30 cm mineral soil and 0-100 mineral layer SOC stocks (mean values, $t\ ha^{-1}$), with and without organic layers, for different forest types of the Veneto region (forest stand organic carbon from Anfodillo *et al.* 2006).

	Abieteti	Faggete	Lariceti	Mughete	Peccete	Piceo-Fg	Cedui	Cedui Or-ost	Cedui Carp	Cedui Faggio	Totale
Stock di carbonio epigeo	78,3	49,3	31,0	7,0	67,5	50,7	66,1	57,7	59,2	81,5	57,7
Suolo (30 cm)	48,4	66,5	68,3	43,5	64,5	77,8	45,6	49,9	49,2	62,7	63,4
Suolo (100 cm)	72,2	91,4	94,6	53,7	98,6	106,7	77,3	79,3	75,9	96,6	96,9
Suolo compreso humus (30 cm)	78,2	86,0	105,5	105,9	94,0	107,6	54,1	61,2	53,0	81,0	77,6
Suolo compreso humus (100 cm)	102,9	113,0	132,1	132,1	128,4	138,2	81,7	89,6	77,1	114,6	109,6

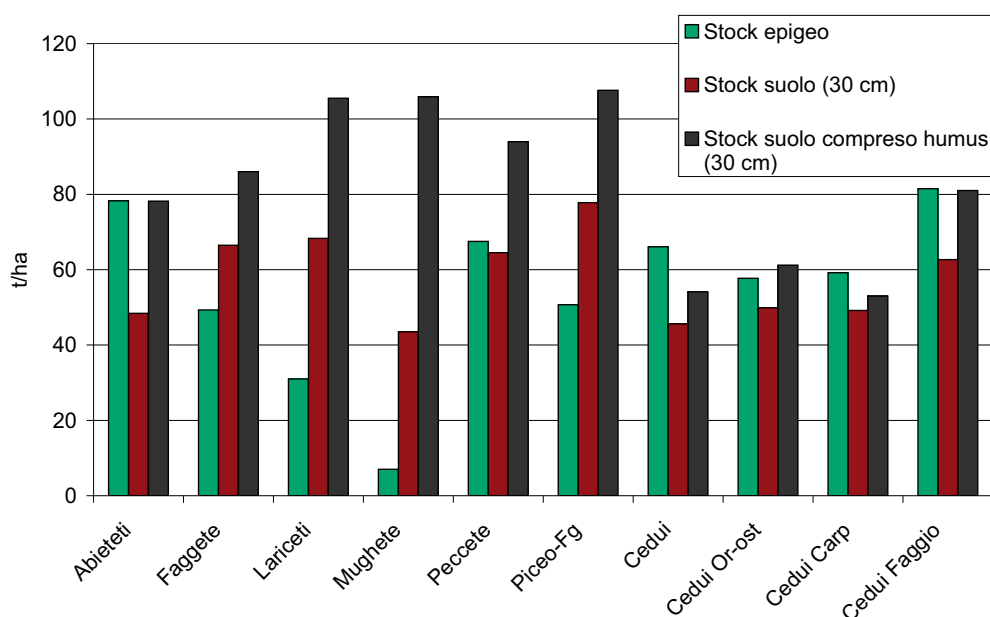


Fig. 8 - Stock di carbonio organico ($t\ ha^{-1}$) nella porzione epigea, nei primi 30 cm di suolo minerale e nei primi 30 cm includendo gli orizzonti organici ($t\ ha^{-1}$) nelle diverse tipologie forestali del Veneto (stock di carbonio epigeo da Anfodillo *et al.* 2006).

Fig. 8 - Forest stand organic carbon stock ($t\ ha^{-1}$) and 0-30 cm mineral layer SOC stocks ($t\ ha^{-1}$), with and without organic horizons, for different forest types of the Veneto region (forest stand organic carbon from Anfodillo *et al.* 2006).

all'80% delle mughete, frazioni che diventano 50% e 94% rispettivamente se si considera anche l'humus. Per i cedui si passa da circa il 45% stoccato nel suolo al 50% considerando anche l'humus.

Dati non molto diversi, seppure leggermente più bassi, sono stati trovati per le foreste svizzere (Perruchoud *et al.* 2000), dove il 44% del C (con l'esclusione della vegetazione erbacea, lettiera e orizzonti organici) è stoccato nel suolo minerale, seppure senza differenze statisticamente significative tra le diverse tipologie forestali.

Dati simili esistono anche per la Regione Piemonte (Petrella & Piazzini 2005), con valori di carbonio per la porzione epigea di $54,8\ t\ ha^{-1}$, rispetto alle 79,3 tonnellate presenti nel suolo (59% del carbonio stoccato nel suolo). Per le foreste lombarde esiste solo un valore medio nei primi 200 cm di suolo, pari a $146\ t\ ha^{-1}$ di C, a fronte di solo $36\ t\ ha^{-1}$ nel soprasuolo; tale differenza porta a contributi percentuali del carbonio nel suolo ancora più alti rispetto a quanto trovato in Piemonte.

In Provincia di Trento è stato valutato (Tonolli & Salvagni 2007) che il carbonio accumulato nel suolo (orizzonti organici inclusi) rappresenta mediamente il 44% di quello complessivamente presente nell'ecosistema (conteggiando anche la lettiera, la vegetazione erbacea e gli arbusti), mentre mediamente in Veneto questo rapporto, che tiene però in considerazione solo la vegetazione arborea, sale al 57%.

3.2.3. Relazione con il tipo di suolo

Un altro aspetto preso in considerazione è la relazione tra diverse tipologie di suolo e stock di carbonio. Nella montagna veneta sono state descritte oltre cento diverse tipologie di suolo, un numero troppo elevato per avere a disposizione dei dati sufficienti per impostare un'analisi statistica. Per questo motivo le diverse unità tipologiche sono state suddivise in sei gruppi di tipologie contraddistinte da un simile arrangiamento degli orizzonti e da simili caratteristiche chimico-fisiche, secondo un approccio già speri-

mentato nell'elaborazione dei dati sul contenuto in metalli dei suoli della montagna veneta (Garlato *et al.*, 2009):

- R: suoli poco evoluti, calcarei, con sequenza di orizzonti A-C o A-R, su materiali parentali carbonatici (*Leptosols* o *Phaeozems*, secondo il WRB (FAO 2006));
- BC: suoli con orizzonte cambico, calcarei, con sequenza di orizzonti A-Bw-C, su materiali parentali carbonatici (*Cambisols* calcarei);
- BCc: suoli coltivati con orizzonte cambico, calcarei, con sequenza di orizzonti Ap-Bw-C, su materiali parentali carbonatici (*Cambisols* calcarei);
- B: suoli con orizzonte cambico, privi di carbonati, neutri o subacidi, con sequenza di orizzonti A-Bw-C, su materiali parentali silicatici (*Cambisols*);
- L: suoli privi di carbonati con orizzonte argico e sequenza di orizzonti A-Bt-C (*Luvissols*);
- AP: suoli podzolici o con incipienti processi di podzolizzazione, con sequenza degli orizzonti A-E-Bhs-Bs-C (*Podzols*) o AE-Bs-C (*Cambisols* con caratteri spodici) o A-Bw-C con pH in superficie inferiore a 5 (*Cambisols* acidi).

Dalla figura 9 è evidente che diverse tipologie di suolo presentano contenuti diversi in carbonio sia nell'humus che nel suolo. Rispetto a quanto Perruchoud *et al.* (2000) trovano per i suoli forestali svizzeri, dove sono presenti differenze tra i diversi gruppi pedologici di riferimento della FAO, ma non statisticamente significative, in Veneto si osservano differenze statisticamente significative ($p < 0,05$) tra AP e L per l'humus, tra BCc e, rispettivamente, BC, L e B per il suolo minerale, mentre prendendo in considerazione i primi 30 cm, humus incluso, si osservano differenze significative tra AP e, rispettivamente, BCc, BC, L e B e tra R e sia BC che L.

Nei primi 30 cm di suolo, humus incluso, i valori più alti si osservano nei suoli dei gruppi R ($90,6 \text{ t ha}^{-1}$) e AP ($100,0 \text{ t ha}^{-1}$), in quest'ultimo caso con valori elevati sia nel suolo minerale che nell'humus ($49,1$ e $51,5 \text{ t ha}^{-1}$ rispettivamente). I valori più bassi si osservano nei suoli dei gruppi L ($59,1 \text{ t ha}^{-1}$) e B ($57,8 \text{ t ha}^{-1}$), con valori molto bassi anche nell'humus ($24,6$ e $13,6 \text{ t ha}^{-1}$ rispettivamente). Valori intermedi si riscontrano nei suoli del gruppo BC, che stoccano $70,7 \text{ t ha}^{-1}$ nel suolo e $38,2 \text{ t ha}^{-1}$ nell'humus.

Le tipologie di suolo prive di calcari, ma non acide (da neutre a subacide), e con tessiture medie (L e B), hanno tempi di mineralizzazione più rapidi, con un trasferimento più veloce del carbonio ad altri comparti (vegetazione, aria), e di conseguenza risultano più "povere" di carbonio. Le tipologie di suolo acide o molto acide (AP) e quelle calcaree (BCc, BC e R) invece sono caratterizzate da condizioni meno favorevoli ai processi di mineralizzazione e di conseguenza accumulano una quantità maggiore di carbonio. Nel caso dei suoli acidi, la meno efficiente degradazione della materia organica è legata in parte all'assenza di lombrichi anecici e alla relativa scarsità di fauna del suolo (Ponge 2003), che svolge un'importante influenza anche sull'attività della microflora (Huhta 2006). La presenza di carbonati nel suolo si conferma un fattore che rallenta la mineralizzazione (Duchaufour, 2001), probabilmente in relazione alla protezione fisica della sostanza organica (nei confronti della mineralizzazione) nei suoli con una buona aggregazione (Denef *et al.* 2001; Pulleman & Marinissen 2004); i suoli calcarei (rendziniformi o bruni) sono infatti

caratterizzati, in relazione a una notevole attività di lombrichi, da una buona biomacroe e biomicrostrutturazione.

Considerando il primo metro di suolo minerale, è interessante osservare che i valori più alti si riscontrano nei

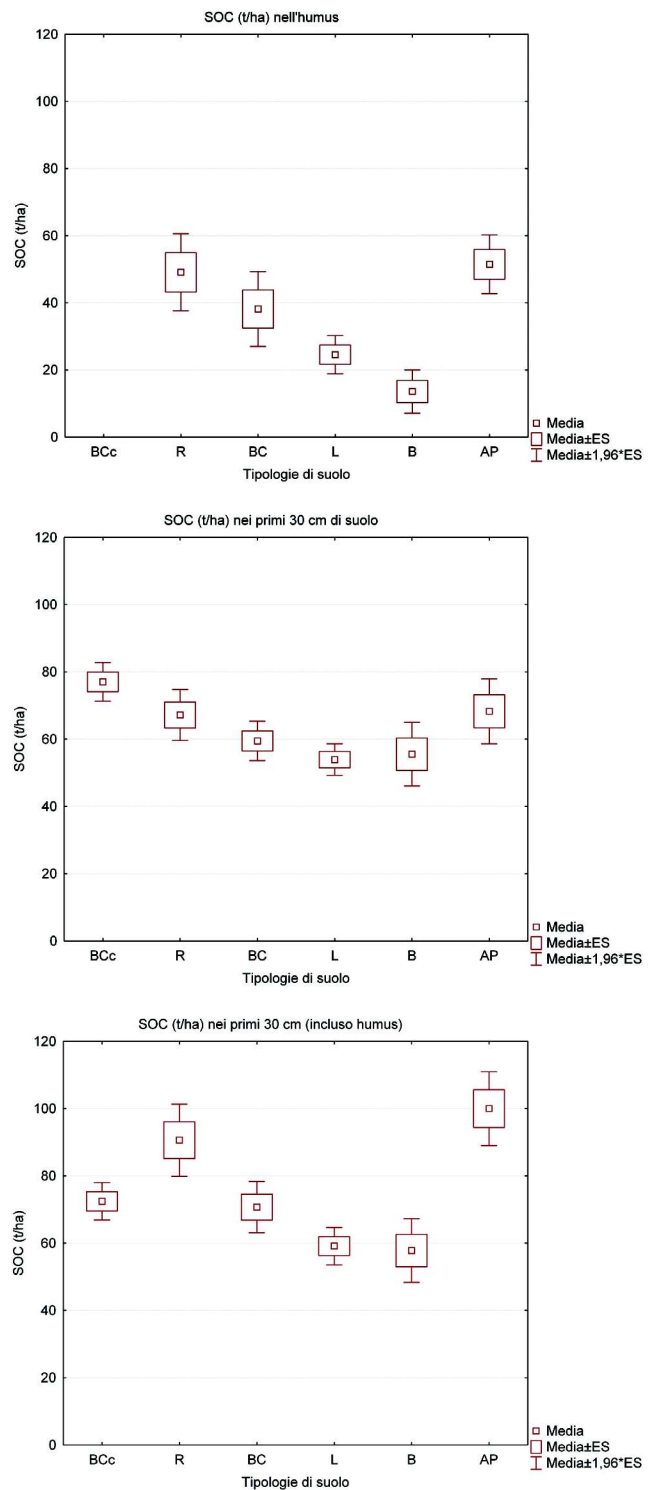


Fig. 9 - Stock di carbonio organico (t ha^{-1}) nell'humus, nei primi 30 cm di suolo e nei primi 30 cm di suolo includendo l'humus, per i diversi tipi di suolo montani del Veneto.

Fig. 9 - Organic carbon stocks (t ha^{-1}) in the organic horizons, 0-30 cm mineral soil and both 0-30 cm soil including organic horizons, for different soil types of the Veneto mountain area.

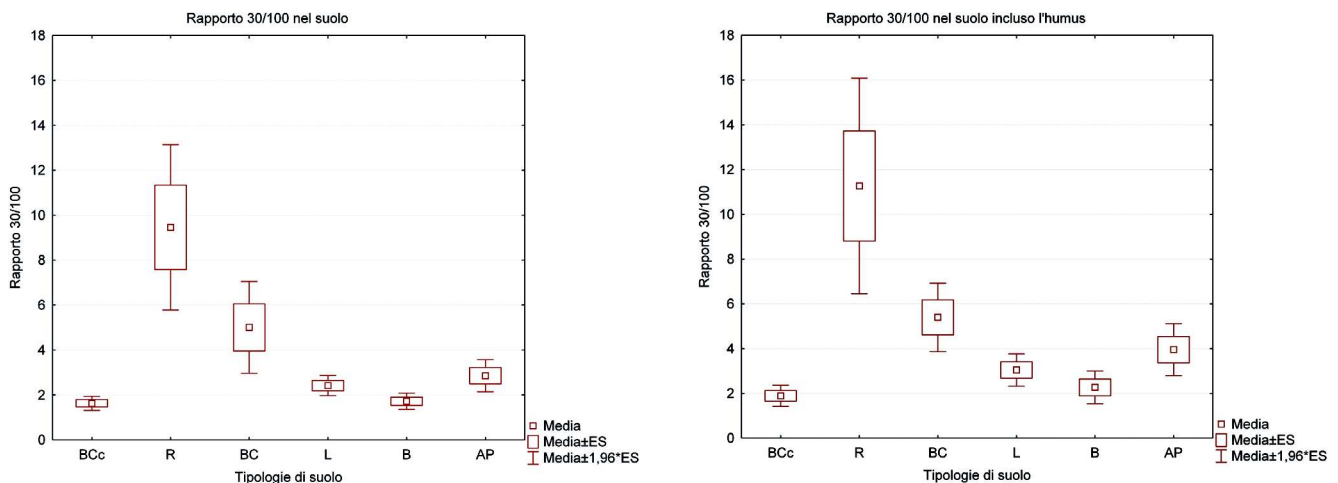


Fig. 10 - Rapporto tra lo stock di carbonio organico nei primi 30 cm e quello presente tra 30 e 100 cm, nel suolo minerale (sinistra) e includendo l'humus (destra) per i diversi tipi di suolo montani del Veneto.

Fig. 10 - Ratio between SOC of 0-30 cm mineral soil and SOC of 30-100 cm, with (right) and without (left) organic horizons, for different soil types of the Veneto mountain area.

suoli coltivati BCc (124,8 t ha⁻¹), seguiti dalle tipologie AP (104,5 t ha⁻¹) e B (99,4 t ha⁻¹). I valori più bassi si osservano nel gruppo R (79,1 t ha⁻¹), costituito da suoli poco profondi nei quali tutto il carbonio si concentra in superficie. Se si tiene in considerazione l'humus la situazione non cambia ovviamente per i suoli coltivati, che ne sono privi, mentre il gruppo AP risulta essere quello maggiormente dotato (137,1 t ha⁻¹), seguito dai rendzina (R: 103,0 t ha⁻¹), in relazione alla buona dotazione di carbonio stoccata nell'humus. I valori alti dei suoli coltivati, che contraddicono in parte le idee preconcepite riguardo alla povertà di C delle zone agrarie, sono legati al fatto che i suoli agrari dell'area montana veneta, oltre che abbondantemente concimati con concimi organici, come già ribadito sopra, sono in genere più profondi rispetto ai suoli con vegetazione naturale e sono caratterizzati da contenuti di scheletro relativamente bassi. Le percentuali relativamente basse di C organico sono in altre parole più che compensate dalla profondità del suolo e dalla scarsità di elementi grossolani.

Le differenze tra lo stock nei primi 30 cm e quelle nel primo metro sono ben espresse dal rapporto tra SOC nei primi 30 cm e SOC presente tra 30 e 100 cm (Fig. 10): il gruppo R si differenzia notevolmente, anche statisticamente, da tutti gli altri tipi di suolo con un rapporto intorno a 10, seguono i BC con valori superiori a 4, mentre gli altri suoli hanno valori compresi tra 2 e 4. Solo i suoli coltivati presentano valori inferiori a 2.

3.3. Potenziali cambiamenti futuri dello stock di carbonio dei suoli

I cambiamenti dello stock di carbonio del suolo a seguito di un eventuale aumento delle temperature è di difficile valutazione, sebbene la relazione tra stock e quota, e quindi indirettamente con la temperatura, già messa in evidenza da altri autori (Leifeld 2005), sia confermata dal presente studio. In generale si può ipotizzare che all'aumentare delle temperature corrisponda, soprattutto alle quote più alte e sui versanti esposti a nord (Egli *et al.* 2009), una più

veloce decomposizione legata a una maggiore attività biologica, e quindi in definitiva una diminuzione degli stock. Indubbiamente il notevole peso che hanno gli orizzonti organici del suolo sullo stock totale obbliga a indagare come i processi che regolano la funzionalità delle diverse forme di humus si adegueranno alle mutate condizioni climatiche. In generale si dovrebbe osservare, come risultato dell'accresciuta attività biologica, il passaggio da forme meno attive verso forme più attive, con una conseguente diminuzione degli stock. Allo stesso tempo però all'aumento della temperatura potrebbero accompagnarsi più marcati fenomeni di siccità estiva che, soprattutto alle basse quote e sui materiali calcarei, potrebbero favorire il passaggio da forme di humus *Mull* verso forme *Amphi* (Sartori *et al.*, 2009), le quali stoccano notevoli quantità di carbonio. Altri fattori suscettibili di variazione che potrebbero influenzare le dinamiche future degli humus e i cicli biochimici del suolo sono il tempo di permanenza e la distribuzione della neve al suolo, la distribuzione delle precipitazioni e le interrelazioni che si realizzano con la vegetazione.

Un effetto del cambiamento climatico potrebbe essere plausibilmente l'innalzamento del limite del bosco e delle formazioni arbustive di alta quota (Ozenda & Borel 1991). I prati-pascoli sembrano stoccare maggiori quantità di carbonio nel suolo minerale, ma i quantitativi totali, tenendo in considerazione anche l'humus, sono maggiori nei boschi di conifere e nelle formazioni arbustive, tipi vegetazionali che andrebbero molto probabilmente a sostituire il pascolo. Tale differenza confermerebbe l'aumento della quantità totale di C nel suolo in seguito alla forestazione, osservato da vari autori (Paul *et al.* 2002; Vesterdal *et al.* 2002), come conseguenza del prevalere degli apporti sulle perdite per mineralizzazione. Va però notato che nell'ambiente dolomitico veneto il limite del bosco è determinato non solo da fattori climatici, ma anche topografici.

Tutte queste considerazioni mettono in evidenza la difficoltà di simulare l'andamento futuro del carbonio nel suolo nell'ottica dei cambiamenti globali in ambienti particolarmente complessi come quelli montani.

4. CONCLUSIONI

La quantificazione delle riserve di carbonio nei suoli montani rimane un importante tassello nella decifrazione del ciclo globale del carbonio. Le interazioni tra i vari fattori ambientali che determinano il divenire del C nel suolo sono particolarmente complesse: i diversi fattori presi singolarmente (quota, uso del suolo, tipologia di suolo, ecc.) mostrano delle influenze significative, ma è solo la comprensione delle loro interazioni e degli effetti complessivi sulla microflora e sulla fauna del suolo che permetterà di spiegare le differenze nel contenuto in carbonio e le probabili evoluzioni al cambiare delle condizioni.

L'humus, rappresentando la zona di transizione tra il suolo e la vegetazione, è un sistema alquanto complesso e poco studiato, sia da chi si occupa di suoli sia da chi studia la vegetazione. Volendo però determinare lo stock di carbonio negli ecosistemi terrestri, non è assolutamente possibile trascurare il contributo degli orizzonti organici, che rappresenta nel caso della montagna veneta mediamente il 17% del carbonio presente nei primi 30 cm di suolo.

La quantità di C contenuta complessivamente nel suolo (humus + suolo minerale) nella montagna veneta rappresenta ben oltre il 50% del carbonio presente negli ecosistemi forestali. Ne consegue che le informazioni sui suoli e sui diversi meccanismi di degradazione della sostanza organica tipici dei vari pedoambienti, attualmente molto scarse, sono di primaria importanza per definire correttamente il ciclo globale del C.

Indubbiamente le variazioni del C nel suolo si realizzano in intervalli temporali più lunghi rispetto ad altri comparti, come ad esempio la vegetazione, e proprio per questo motivo sono necessari maggiori informazioni e modelli affidabili per ipotizzare realistici scenari futuri nell'ottica dei cambiamenti climatici globali.

BIBLIOGRAFIA

- AFES, 1995 - *Référentiel Pédologique*. INRA, Paris.
- ARPAV - Osservatorio Regionale Suolo, 2005 - *Carta dei suoli del Veneto in scala 1:250.000*. Grafiche Vianello, Treviso.
- Batjes N.H., 1996 - Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Europ. J. Soil Sci.*, 47: 151-163.
- Bolin B. & Sukumar R., 2000 - Global perspective. In: Watson R.T., Noble I.R., Bolin B., Ravindranath N.H., Verardo D.J. & Dokken D.J., (eds), *Land-use, Land-use Change, and Forestry. A Special Report of the IPCC*. Cambridge University Press: 23-51.
- Denef K., Six J., Paustian K. & Merckx R., 2001 - Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilisation: short-term effects of physical disturbance induced by dry and wet cycles. *Soil Biol. Biochem.*, 33: 2145-2153.
- Duchaufour P., 2001 - *Introduction à la science du sol*. Dunod, Paris.
- EEA - European Environmental Agency, 2000 - *Corine land cover 2000 (CLC2000) 100 m - version 9/2007*. <http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/metadetails.asp?id=1007>.
- Egli M., Sartori G., Mirabella A., Favilli F., Giaccai D. & Delbos E., 2009 - Effect of north and south exposure on organic matter in high Alpine soils. *Geoderma*, 149: 124-136.
- FAO, 2006 - World Reference Base For Soil Resources. *World Soil Resources Reports*, 103.
- Galbraith J.M., Kleinman J.A. & Bryant R.B., 2003 - Sources of uncertainty affecting soil organic carbon estimates in northern New York. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67: 1206-1212.
- Garlato A., Sartori G., Ungano F., Vinci I. & Giandon P., (2009) - Contenuto di metalli pesanti nei suoli montani e collinari del Veneto. *Boll. Soc. It. Sci. Suolo*, (in stampa).
- Hedde M., Aubert M., Decaens T. & Bureau F., 2007 - Dynamic of soil carbon in a beechwood chronosequence forest. *For. Ecol. Manag.*, 255: 193-202.
- Hollis J.M. & Woods S.M., 1989 - *The measurement and estimation of saturated soil hydraulic conductivity*. SSLRC Research Report, Silsoe, Beds.
- Huhta H., 2006 - The role of soil fauna in ecosystems: a historical review. *Pedobiologia*, 50: 489-495.
- Jabiol B., Zanella A., Englisch M., Hager H., Katzensteiner K. & De Waals R.W., 2004 - *Towards a european classification of terrestrial humus forms*. Eurosoil - Freiburg. September 4-12.
- Lal R., 2005 - Forest soil and carbon sequestration. *For. Ecol. Manag.*, 220: 242-258.
- Leifeld J., Bassin S. & Fuhrer J., 2005 - Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105 (1-2): 255-266.
- McGuire A.D., Melillo J.M., Kicklighter D.W. & Joyce L.A., 1995 - Equilibrium responses of soil carbon to climate change: Empirical and process-based estimates. *J. Biogeog.*, 22: 785-796.
- Ozenda P. & Borel J.L., 1991 - Les conséquences écologiques possibles des changements climatiques dans l'Arc alpin. ICALPE, Le Bourget-du-Lac, France. *Rapport Futuralp*, 1
- Paul K.I., Polglase P.J., Nyakuengama J.G. & Khanna P.K., 2002 - Change in soil carbon following afforestation. *For. Ecol. Manag.*, 168: 241-257.
- Perruchoud D.O., Joos F., Fischlin A., Hajdas I. & Bonani G., 1999 - Evaluating time scales of carbon turnover in temperate forest soils with soil radiocarbon data. *Global Biogeochem. Cycles*, 13: 555-573.
- Perruchoud D., Walthert L., Zimmermann S. & Luscher P., 2000 - Contemporary carbon stocks of mineral forest soils in the Swiss Alps. *Biogeochemistry*, 50: 111-136.
- Petrella F. & Piazzini M., 2005 - *Il carbonio organico negli ecosistemi agrari e forestali del Piemonte: misure ed elaborazioni*. Atti della giornata di studio: Protocollo di Kyoto: il ruolo del suolo nella cattura della CO₂ atmosferica. *Boll. Ass. It. Pedologi*, 1-3: 33-34.
- Ponge J.F., 2003 - Humus forms in terrestrial ecosystems: a framework to biodiversity. *Soil Biol. Biochem.*, 35: 935-945.
- Prichard J.S., Peterson D.L. & Hammer R.D., 2000 - *Carbon distribution in subalpine forests and meadows of the Olympic Mountains*. Washington. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1834-1845.
- Pulleman M.M. & Marinissen J.C.Y., 2004 - Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil. *Geoderma*, 120: 273-282.
- Rodeghiero M. & Cescatti A., 2005 - Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in Italian Alps. *Gl. Ch. Biol.*, 11: 1024-1041.
- Sartori G., Garlato A., Obber S., Ungaro F. & Vinci I., (2009) - Forme di humus forestali in Veneto. *Boll. Soc. It. Sci. Suolo*, (in stampa).
- Schulp C.J.E., Nabuurs G.J., Verburg P.H. & de Waal R.W., 2008 - Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. *For. Ecol. Manag.*, 256: 482-490.

Solaro S. & Brenna S., 2005 - Il carbonio organico nei suoli e nelle foreste della Lombardia. Atti della giornata di studio "Protocollo di Kyoto: il ruolo del suolo nella cattura della CO₂ atmosferica". *Boll. Ass. It. Pedologi*, 1-3: 24-28.

Tonolli S. & Salvagni F. (a cura di), 2007 - *InFoCarb. Inventario Forestale del Carbonio della Provincia di Trento*. Ministero dell' Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e Centro

di Ecologia Alpina, Trento.

Ungaro F., 2009 - *Considerazioni sullo sviluppo delle PTF per la stima della densità apparente in Veneto, Emilia Romagna e Toscana*. Documento interno.

Vesterdal L., Ritter E. & Gundersen P., 2002 - Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *For. Ecol. Manag.*, 169: 137-147.