

ANNA GRAZIANI, LIVIA VITTORI ANTISARI

Studio di una cronosequenza di suoli in rimboschimenti di *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco nella Riserva di Vallombrosa (FI).



L'importanza dei suoli forestali nell'immobilizzazione del carbonio

Le foreste sono sistemi molto efficienti nel trasformare e trattenere la CO₂, tali da poter essere pensati come un serbatoio. Durante il loro sviluppo, infatti, gli alberi fissano il carbonio presente in atmosfera e buona parte di questo è trasferita al suolo con la lettiera, gli essudati radicali e il *turnover* delle radici (PELTONIEMI *et al.*, 2004). Non a caso il suolo rientra tra i cinque *carbon pools* definiti nelle linee guida dell'IPCC (2003), redatte per la contabilizzazione del bilancio tra il carbonio immesso nell'atmosfera e quello assorbito dagli ecosistemi terrestri nell'ambito degli accordi sul clima (UNFCCC, Protocollo di Kyoto), ed è stato valutato per la stima del *carbon stock* nel corso dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di carbonio (INFC, 2005).

Si ritiene che negli ecosistemi forestali circa i 2/3 di tutto il carbonio sia immagazzinato nel suolo, dove, senza azioni di disturbo, può rimanere con tempi di permanenza estremamente lunghi sottoforma di sostanza organica (DIXON *et al.*, 1994; LAGOMARSINO *et al.*, 2010). Secondo Sanesi (2005), le maggiori quantità di sostanza organica si trovano nei suoli di boschi che sono trattati a turni lunghi, governati a fustaia o a ceduo in via di conversione. Nella Riserva di Vallombrosa (FI), dove da secoli dominano maestosi boschi a fustaia, il tempo medio di residenza della sostanza organica nel suolo

oscilla tra 10 e 90 anni negli orizzonti A, tra 700 e 1400 anni negli orizzonti B e tra 1200 e 5000 anni negli orizzonti BC (CERTINI *et al.* 2004).

Il ruolo della sostanza organica nel ciclo del carbonio

Il suolo può essere considerato come un vero e proprio sistema respiratorio che produce CO₂, così mentre il processo di umificazione aumenta il tempo di permanenza del carbonio nel terreno, l'attività di biodegradazione svolta dai microrganismi contribuisce al consumo della sostanza organica del suolo e al rilascio di anidride carbonica in atmosfera. Inoltre, si è visto che, mentre il carbonio del suolo è in gran parte vecchio, quello contenuto nella CO₂ respirata è sempre molto giovane e la sua età media si misura tra meno di un anno e 10 anni (CERTINI *et al.*, 2003). Il tempo di giacenza del carbonio organico tende ad aumentare con la profondità del suolo, in antitesi alla distribuzione dell'attività biotica; molto spesso la maggiore quantità di carbonio si ritrova nella lettiera, negli orizzonti organici e nei primi 20 cm del suolo minerale (SANESI, 2005), dove è maggiormente concentrata la presenza di microrganismi. Ciò significa che i microrganismi utilizzano principalmente materia organica fresca che nelle sue parti più facilmente metabolizzabili è rapidamente decomposta, mentre le molecole più resistenti arricchiscono il *pool* recalci-

trante che è stoccato in profondità nel suolo.

La sostanza organica del suolo è quindi classificata in due *pools* in base al tasso di decomposizione da parte dei microrganismi: un *pool* attivo o labile, facilmente mineralizzabile, costituito da sostanze non umiche, e un *pool* passivo, recalcitrante alla degradazione e corrispondente alle sostanze umiche. Il tipo di vegetazione e il tipo di gestione forestale interpretano un ruolo importante nell'influenzare questo processo, sia regolando l'*input* della sostanza organica sia influenzando la pedogenesi. Infatti, la lettiera, le spoglie vegetali e le radici delle piante rappresentano la risorsa primaria di materiale organico che giunge al suolo, e le modalità di decomposizione a cui vanno incontro condizionano la formazione e l'evoluzione dei suoli (PORCU, 2010).

Studiare i meccanismi d'immobilizzazione e le dinamiche del carbonio organico nei suoli forestali e i fattori da cui dipendono è importante, non solo per aumentare il sequestro del carbonio in un'ottica di consumo di combustibili fossili e di cambiamento climatico, ma anche perché alla sostanza organica sono connessi importanti aspetti di funzionalità e di miglioramento dell'ecosistema: un suolo povero di sostanza organica è sempre un suolo degradato (LAL, 2005; LAGOMARSINO *et al.*, 2010).

La cronosequenza come metodo di studio

La cronosequenza è un metodo indiretto per lo studio di processi ecologici ed ampiamente utilizzato per i suoli forestali, poiché dà l'opportunità di valutare lo sviluppo di un fenomeno che si protrae per tempi troppo lunghi perché siano monitorati con l'osservazione diretta, quale, ad esempio, il processo di pedogenesi di un suolo (WALKER *et al.*, 2010). L'approccio *space-for-time* su cui si basa il metodo della cronosequenza consiste nella sostituzione di repliche temporali con repliche spaziali, ovvero, invece di avere un unico sito monitorato nel tempo, ci sono più siti, simili tra loro ma di età diverse, che sono assunti come punti nel tempo di un'ipotetica linea evolutiva del pro-

cesso (LAL, 2005). Tuttavia questo è un approccio non sempre applicabile e non privo di errori, perciò, nella scelta del set di siti di una cronosequenza, bisognerebbe minimizzare le fonti di variazione diverse dal fattore tempo, scegliendo quei siti che siano simili per tutti gli altri aspetti. Nel caso dei suoli, ad esempio, è importante che siano costituiti dallo stesso materiale (YANAI, 2003).

Obiettivo dello studio

Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco è una delle specie esotiche introdotte in Europa dapprima per scopi ornamentali e poi ampiamente coltivata per il suo rapido accrescimento unito alla produzione di legno di buona qualità (KUPKA *et al.* 2013). È diffusa in molti paesi europei e in Italia è concentrata nelle regioni centrali, soprattutto in Toscana, nelle province di Arezzo, Firenze e Prato (CORONA *et al.*, 1998). Anche a Vallobrosa (FI) la douglasia è stata la specie più rappresentata nelle parcelle sperimentali e quella che ha dato i migliori risultati in termini di accrescimento (FERRETTI, 1998; NOCENTINI, 2010). Studi circa gli impatti della specie sulla chimica del suolo non hanno mostrato risultati univoci, tuttavia gli effetti sono sempre risultati analoghi a quelli derivanti dalla coltivazione di specie indigene (SCHMID *et al.*, 2014).

Con questo lavoro si sono studiati i suoli sviluppati sotto rimboschimenti di douglasia, anche con l'obiettivo di calcolare gli *stock* relativi alla sostanza organica in funzione dei differenti stadi di crescita del soprassuolo forestale. È stato, infatti, dimostrato che la potenzialità nel sequestro del carbonio varia con l'età del popolamento (PELTONIEMI, 2004) e che anche le foreste vetuste conservano un bilancio attivo del carbonio (MOTTA, 2008). Nonostante il perfetto adattamento della douglasia ai nostri ambienti, il suo comportamento riguardo allo stoccaggio del carbonio nel suolo al progredire dell'età delle piante è stato preso poco in considerazione (WELKE, HOPE, 2005), mentre l'elevata produttività della douglasia potrebbe anche portare ad effetti

relativamente favorevoli sul suolo forestale (VITTORI ANTISARI *et al.*, 2015).

Materiali e metodi

Area di studio e siti di campionamento

Lo studio ha interessato la Riserva Biogenetica di Vallombrosa, situata in provincia di Firenze, sul massiccio del Pratoma-gno, appendice dell'Appennino centro-settentrionale. Le caratteristiche climatiche della zona presentano temperature medie annue comprese tra -1°C e 24°C e precipitazioni con valori medi annui di 1337 m. Secondo la classificazione fitoclimatica di Pavari (PAVARI, 1959) la Riserva rientra quasi completamente tra la fascia del *Castanetum* (entro i 1000 m) e quella del *Fagetum* (sopra i 1000 m) (CIANCIO, 2009). Il substrato roccioso più rappresentato sono arenarie alternate a sottili strati di siltiti e più raramente di marne, appartenenti al tipo litologico del Macigno del Chianti (SANESI, CERTINI, 2004).

All'interno della Riserva sono presenti alcune parcelle sperimentali appartenenti alla Rete nazionale "Pavari" istituita per l'introduzione di specie esotiche in Italia (FERRETTI, 1998). In sei di queste, gestite dal Consiglio di Ricerca per l'Agricoltura e l'Economia Agraria – Centro per la Selvicoltura di Arezzo, sono stati aperti sette profili sotto popolamenti di douglasia. Di tali piante si conosceva l'esatto anno d'impianto, così le parcelle sono state scelte in modo tale da definire una cronosequenza con ampiezza di circa sessanta anni, tra quelle della giusta classe di età e che presentavano le maggiori analogie negli aspetti stagionali. Il popolamento più vecchio contava una parcella di circa 120 anni, a decrescere sono state esaminate douglasie di 100, 80 e 60 anni circa, con due parcelle per ciascun caso. Nel caso del popolamento di 60 anni, in realtà, i due profili sono stati aperti nella stessa parcella perché le piante si differenziavano in modo netto nell'accrescimento, tanto da poter rappresentare due situazioni distinte.

Campionamento per la bulk density degli orizzonti minerali

Una volta rimossa la lettiera e gli orizzonti organici, con un cilindro d'acciaio di volume noto, sono stati prelevati campioni di suolo minerale indisturbato di altezza prefissata (5 cm) fino ad una profondità di 20 cm, creando una sequenza di intervalli di profondità 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm. Il suolo è stato poi essiccato in stufa a 105°C fino al raggiungimento di un peso costante. La *dry bulk density*, espressa in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ è stata calcolata come massa volumica apparente secca, data dal rapporto tra la massa allo stato secco e il volume del cilindro e infine è stata corretta per il valore dello scheletro (BLAKE, HARTGE, 1986).

Campionamento per le analisi chimico-fisiche e biochimiche del suolo

Per ciascun profilo aperto sono stati raccolti campioni degli orizzonti pedogenetici, che sono stati lasciati essiccare all'aria e poi macinati e vagliati a 2 mm, così da poter essere utilizzati per le analisi di laboratorio.

Analisi chimico-fisiche del suolo

La caratterizzazione chimico-fisica dei campioni ha seguito i metodi ufficiali di analisi chimica, fisica e biochimica del suolo pubblicati dal Ministero delle Politiche Agricole e Forestali.

Con il metodo della pipetta, per sospensione con una soluzione di esametafosfato, (GEE, BAUDER, 1986) è stata determinata la tessitura, mentre il grado reazione del suolo è stato misurato con un potenziometro in una sospensione 1:2,5 (peso/volume) di suolo e acqua deionizzata. I contenuti di Fe, Al, Ca, P totale e S totale sono stati ottenuti mediante mineralizzazione acida con acqua regia (miscela di HCl e HNO₃ in rapporto di 3:1) (MIPAF, 2000) e misurati con spettrometria al plasma a rivelatore ottico (ICP-OES, Ametek, Arcos Spectro).

Attraverso la dissoluzione in serie con

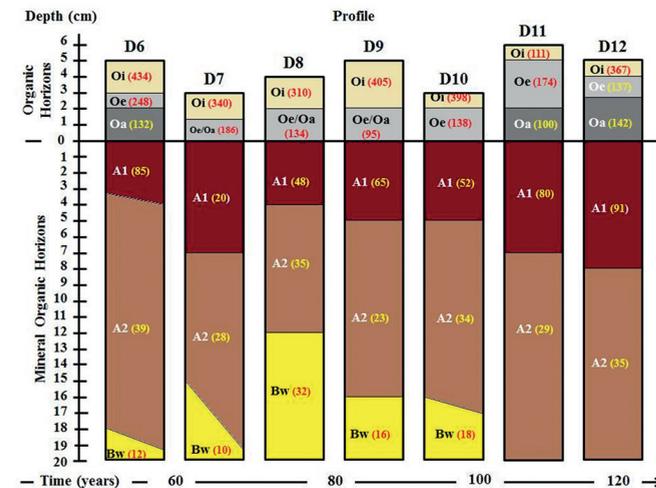


Figura 1 Descrizione pedologica dei sette profili aperti sotto douglasia.

fulvici (FA) sono stati divisi dalla sostanza organica non umificata (NH) seguendo il metodo di Ciavatta (CIAVATTA *et al.*, 1990) con cromatografia di adsorbimento in fase solida con polivinilpirrolidone resina insolubile (PVP). Il carbonio organico degli estratti di TEC, HA e FA è stato determinato per ossidazione con $K_2Cr_2O_7$ 0,33 M a $160^\circ C$ secondo il metodo proposto da Springer e Klee (SPRINGER, KLEE, 1954).

Misurazione della biomassa microbica del suolo

sodio ditionito citrato (*d*), ammonio ossalato acido (*o*) e sodio pirofosfato (*p*) sono stati estratti gli ossidi di ferro e alluminio, le cui quantità sono state valutate in spettrometria al plasma interfacciato con rilevatore ottico (ICP-OES, Ametek, Spectro). La capacità di scambio cationico (CSC) è stata calcolata sommando la concentrazione dei cationi scambiabili e dell'acidità di scambio determinata in KCl (VAN REEUWIJK, 2002). Il grado di saturazione in basi (GSB%) è stato determinato analiticamente dal rapporto percentuale fra la sommatoria delle concentrazioni delle singole basi di scambio adsorbite e la CSC, entrambe espresse in $Cmol_{(+)} / kg$ di suolo.

Analisi del carbonio e dell'azoto

Il carbonio organico totale (TOC) e l'azoto totale (TN) sono stati determinati con analizzatore elementare (EA-1110, Thermo Scientific Lab) secondo il metodo della *dry combustion* di Dumas. Il carbonio organico estraibile (TEC) è stato ottenuto con una soluzione 0,1 M di sodio pirofosfato e sodio idrossido, mantenendo i campioni a $65^\circ C$ per 24 ore. La frazione degli acidi umici (HA) è stata separata dall'estratto acidificando a $pH < 2$ con una soluzione di acido solforico al 50%, in seguito gli acidi

Su campioni preincubati al 60% della loro capacità di ritenzione idrica (*water holding capacity*, WHC), alla temperatura di $20^\circ C$, è stato misurato il carbonio organico e l'azoto della biomassa microbica utilizzando l'analizzatore TOC-TN (Shimadzu, TOC-V/CPN): il valore è stato ottenuto come differenza tra gli estratti con una soluzione 0,5 M di K_2SO_4 da suolo fumigato con $CHCl_3$ e gli estratti da suolo non fumigato, in accordo al metodo della fumigazione-estrazione (VANCE *et al.*, 1987).

Risultati e discussione

Caratterizzazione morfologica e chimico-fisica dei pedon studiati

Tutti e sette i profili indagati hanno rivelato una sequenza di orizzonti del tipo O-A1-A2-Bw-C. (Figura 1).

Confrontandoli, si è notato un approfondimento della sostanza organica del suolo al crescere dell'età delle piante. Nella sequenza tra DOUG 8 e DOUG 12, infatti, si osserva un aumento dello spessore degli orizzonti organo-minerali A1 e A2, sia singolarmente sia come coppia, portando sempre più in profondità la sostanza organica, che fa da innesco al processo di alterazione, con il quale diminuisce la percentuale di sabbia a favore delle classi tessiturali più

| pedon | orizzonte | Profondità cm | Color Munsell (umido) | | | TOC g kg ⁻¹ | TN g kg ⁻¹ | pH H ₂ O | GSB % | Sand g kg ⁻¹ | Clay g kg ⁻¹ |
|---------|-----------|------------------|-----------------------------|-------|--------|---------------------------|--------------------------|---------------------|----------|----------------------------|----------------------------|
| | | | Hue | Value | Chroma | | | | | | |
| DOUG 6 | A1 | 4 | 10YR | 2 | 2 | 84.5 | 5.3 | 4.2 | 47.3 | 406 | 302 |
| | A2 | 15±1.0 | 10YR | 3 | 3 | 38.9 | 3.1 | 4.7 | 33.2 | 465 | 262 |
| DOUG 7 | A1 | 7 | 10YR | 3 | 3 | 19.5 | 1.7 | 5 | 30.6 | 571 | 181 |
| | A2 | 10.5±2.5 | 10YR | 4 | 3 | 28.4 | 2.1 | 4.7 | 29.9 | 508 | 197 |
| DOUG 8 | A1 | 4 | 7,5YR | 3 | 3 | 47.7 | 3.3 | 4.4 | 22.7 | 364 | 277 |
| | A2 | 8 | 7,5YR | 3 | 3 | 32.1 | 2.4 | 4.2 | 16.8 | 407 | 257 |
| DOUG 9 | A1 | 5 | 5YR | 3 | 3 | 65.0 | 4.0 | 4.4 | 21.2 | 317 | 233 |
| | A2 | 11 | 5YR | 3 | 3 | 23.3 | 1.0 | 4.6 | 5.2 | 340 | 217 |
| DOUG 10 | A1 | 5 | 7,5YR | 2.5 | 3 | 53.4 | 3.5 | 5 | 47.6 | 369 | 211 |
| | A2 | 11.5±0.5 | 7,5YR | 3 | 3 | 33.9 | 2.7 | 5.1 | 46.6 | 361 | 223 |
| DOUG 11 | A1 | 7 | 10YR | 3 | 3 | 60.2 | 3.6 | 5.1 | 48.7 | 468 | 166 |
| | A2 | 15 | 5YR | 3 | 3 | 29.3 | 2.1 | 4.9 | 20.9 | 495 | 150 |
| DOUG 12 | A1 | 8 | 5YR | 3 | 2 | 91.2 | 4.4 | 5.2 | 43.8 | 239 | 141 |
| | A2 | 17 | 5YR | 3 | 3 | 34.7 | 2.2 | 5.4 | 42.4 | 209 | 152 |

Tabella 1 Tabella riassuntiva dei caratteri degli orizzonti organo-minerali per la classificazione pedologica.

fini di limo e argilla.

Nei *pedon* DOUG 6 e DOUG 7, sotto douglasie di 60 anni, sono stati riscontrati aspetti non in linea con le altre parcelle: in entrambi i casi gli orizzonti A1 e A2 si sono sviluppati molto in profondità, accumulando fortemente la sostanza organica e sembrando accelerare il processo di pedogenesi, aspetto tipico di soprassuoli più maturi. Inoltre nei due suoli, seppure appartenenti alla stessa unità colturale (nella quale però, come già anticipato, le piante non mostravano un accrescimento uniforme), è stata riscontrata una tessitura diversa, con l'orizzonte C di DOUG 7 avente un'elevata percentuale di limo, tanto da ipotizzare in quel punto la presenza di una vena limosa.

Il pH di tutti i suoli è acido e ha un *trend* in aumento lungo la cronosequenza, seppure la GSB rimanga sempre inferiore al

50%. La douglasia ha un potere acidificante minore di conifere indigene, quali l'abete bianco (KUPKA *et al.*, 2013).

I valori del *value* e *chroma* del colore Munsell ad umido sono stati osservati sempre intorno a 3, sinonimo di colori scuri. Il *value* Munsell esprime la brillantezza o la scurezza del colore ed è compreso tra 1 (scuro) e 8 (chiaro). Più il numero è basso, più la frazione organica prevale su quella minerale (FALSONE *et al.*, 2015).

Classificazione pedologica dei suoli

I suoli indagati si sono formati in climi con abbondanti precipitazioni ben distribuite tutto l'anno, tali da garantire l'umidità del terreno per almeno 90 giorni consecutivi; allo stesso tempo, però, il drenaggio naturale ha evitato la saturazione del sistema e ripartito in equilibrio tra loro le tre fasi solida, liquida e gassosa, eccetto che per limitati periodi di tempo.

Pertanto il regime di umidità del suolo può essere definito udico.

Questi suoli si sono evoluti su rocce sedimentarie a reazione acida, che sono state riscontrate come substrato pedogenetico entro i 50 cm di profondità. In tutti i profili era presente un orizzonte cambico Bw, caratterizzato da processi di alterazione, che ha fatto classificare i suoli entro l'ordine degli Inceptisuoli (USDA Soil Taxonomy, 2010).

Nell'*epipedon*, invece, si è trovata una maggiore variabilità dovuta dalla presenza o meno di un orizzonte umbrico.

Nella *Soil Taxonomy* (2010), questo orizzonte diagnostico è stato descritto come un singolo orizzonte (o eventualmente un insieme di orizzonti) presente alla superficie del suolo e caratterizzato da un accumulo di sostanza organica umificata piuttosto

spesso, tale da manifestare un colore bruno. Inoltre, in base alla classificazione Munsell del colore, deve avere *value* uguale o inferiore a 3 (se il suolo è umido) e uguale o inferiore a 5 (se il suolo è secco), e valore del *chroma* pari a o inferiore a 3 in entrambi regimi di umidità. In più, l'orizzonte C sottostante l'ipotetico orizzonte umbrico, deve avere un punto in meno nel *value* o due punti in meno nel *chroma*. Riguardo al grado di saturazione in basi misurato in ammonio acetato, un orizzonte umbrico dovrebbe presentare valori inferiori al 50% in alcune o in tutte le parti dell'*epipedon*, mentre per la tessitura dovrebbe rientrare nella classe del franco-sabbioso o eventualmente presentare particelle granulometriche più fini.

In base ai parametri riassunti in Tabella 1, una possibile classificazione dei suoli studiati secondo la *Soil Taxonomy* (2010) potrebbe essere la seguente:

- DOUG 6 - Humic Dystrudept
- DOUG 7 - Lithic Dystrudept
- DOUG 8 - Lithic (Humic) Dystrudept
- DOUG 9 - Humic Lithic Dystrudept
- DOUG 10 - Lithic Humudept
- DOUG 11 - Lithic/Typic Humudept
- DOUG 12 - Typic Humudept

Una discriminante tra Dystrudept e Humudept è che nei primi il pH è inferiore a 4,5, mentre negli altri è maggiore di 5. Inoltre DOUG 11 e DOUG 12 sono stati inseriti negli Humudept per la presenza dell'orizzonte OH ben espresso (caratteristica che condividono anche con DOUG 6), per la somma degli spessori degli orizzonti A1 e A2 che risulta maggiore di 20 e per il contenuto di TOC superiore a 90 g/kg. Pertanto DOUG 11 e DOUG 12 rappresentano uno stadio di evoluzione pedogenetica più avanzato, che si esprime attraverso una selezione degli orizzonti organici (Oi, Oe, Oa), l'incremento di C organico e N negli *epipedon* e l'approfondimento degli orizzonti organo-minerali.

Forme di Fe e Al lungo i profili

La determinazione quantitativa del ferro e dell'alluminio estraibili presenti nei suoli, sia come ossidi liberi, sia come composti organico-minerali, può essere eseguita per via chimica attraverso l'impiego di soluzioni estraenti diverse. Schwertmann (SCHWERTMANN, 1964) trovò che il sodio-ditionito-citrato era capace di rimuovere tutte le forme di ossidi liberi di ferro, cioè le forme non legate ai silicati, mentre l'ammonio ossalato solubilizzava prevalentemente le forme amorfe. Queste estrazioni furono più tardi estese anche all'alluminio, alla silice e al manganese. Il pirofosfato a pH 10 è usato comunemente per estrarre la sostanza organica del suolo e permette quindi di liberare il ferro e l'alluminio legati ai composti organici, mentre dalle forme cristalline rimuove solo quantità trascurabili di questi elementi. Le diverse forme di ferro che sono state prese in considerazione sono: *Fep*, ferro complessato dalla sostanza organica (complessi immobili); *Feo-Fep*, ossidi di ferro mal cristallizzati e forme amorfe; *Fed-Feo*, ossidi di ferro cristallini. Il rapporto *Feo/Fed*, chiamato "indice di ferro attivo", può essere utilizzato come misura della cristallinità degli ossidi di ferro libero e in certi casi può aiutare nella stima dell'antichità del suolo. Esso tende a diminuire con l'aumentare dell'alterazione del suolo.

Inoltre le quantità di Al e Fe degli ossidi amorfi hanno permesso di calcolare l'indice di spodicità (*spodicity index*, SI; IUSS GRUPPO DI LAVORO WRB, 2007) dato da $Al_0 + 1/2Fe_0$: tale parametro è stato considerato al fine di valutare se, negli anni, l'orizzonte Bw si sta arricchendo di complessi organo-metallici dovuti ai processi di eluviazione/illuviazione.

Gi indici presi in esame non hanno evidenziato movimenti di forme di ferro amorfo all'aumentare della permanenza delle douglasie, perciò si è ritenuto che i suoli non abbiano in corso spinti processi di evoluzione e per questo siano stabili Inceptisuoli. Solamente negli orizzonti A2 e Bw di DOUG 8 sono stati riscontrati valori di SI più elevati che coincidono con il *pedon* meno evoluto.

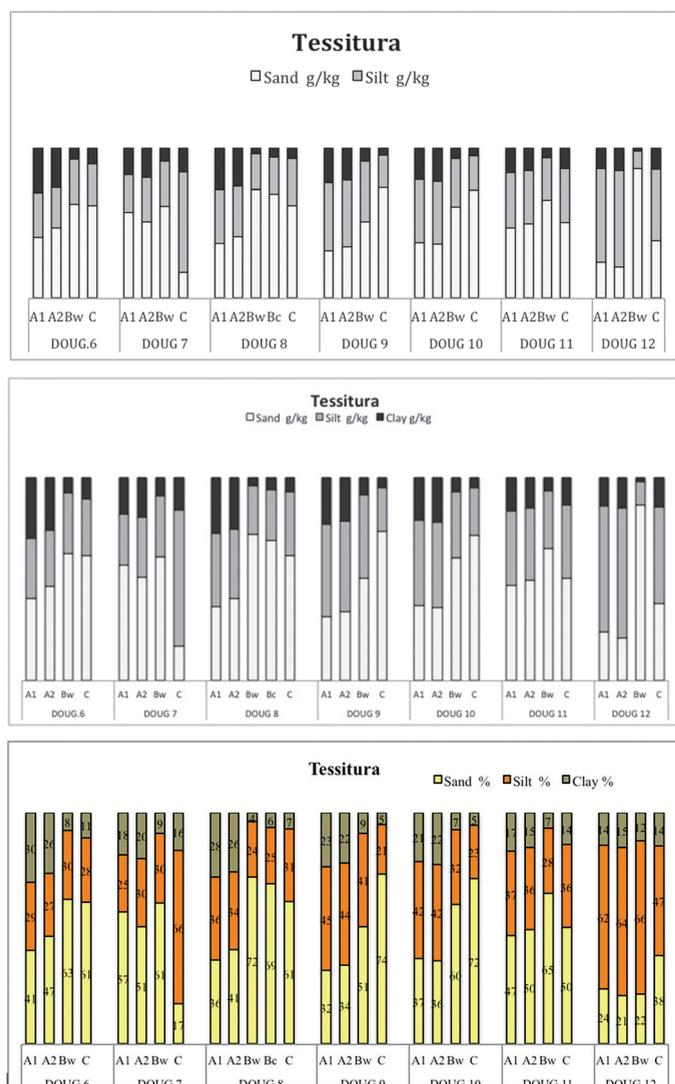


Figura 2 Analisi della tessitura

Stock di carbonio e azoto totali e dei carbon pools nella cronosequenza

Il suolo rappresenta la più grande riserva di C organico degli ecosistemi terrestri e, a partire dal Protocollo di Kyoto, sul suo studio si è posta maggiore attenzione. Se da un lato questa enorme massa di C incluso è indice delle potenzialità che il suolo ha come *sink* di C, dall'altro, se si pratica una gestione non sostenibile delle foreste oppure nell'ottica di previsione di cambiamento climatico, essa rappresenta anche un poten-

ziale rischio di emissioni rilevanti di CO₂ (LAGOMARSINO *et al.* 2010, BARBATI *et al.*, 2014).

Dunque, l'analisi dei diversi *pools* di carbonio ha voluto soffermare l'attenzione sulle sue dinamiche in soprassuoli di douglasia, per valutare in che percentuale questa specie porti a stoccare il C nella sostanza organica del suolo o a rilasciarlo atmosfera.

La frazione attiva o labile è rappresentata dal carbonio estraibile in K₂SO₄, del quale la parte più consistente è costituita dal carbonio della biomassa microbica. Il *pool* passivo invece è formato dal carbonio umico stabilizzato dai processi di umificazione: questo comprende la parte che può essere estratta dal suolo, costituita da acidi umici e acidi fulvici, e la frazione dell'umina, fortemente complessata e interagente con le superfici minerali, che non può essere separata dalla componente minerale del suolo e per questo non può essere misurata direttamente (VITTORI ANTISARI *et al.*, 2015).

L'elaborazione dei dati ha previsto il calcolo relativo ai primi 20 cm del suolo minerale dello *stock* di C e N totali e di quelli dei diversi *pools* legati alla sostanza organica (sostanze umiche e sostanze non umiche, C della biomassa microbica).

In accordo con Boone (BOONE *et al.*, 1999), gli *stock* sono stati calcolati partendo dalle concentrazioni dell'elemento da valutare, dalla *bulk density* e dallo spessore di suolo interessato e considerando un fattore di correzione per la percentuale di scheletro. Per la concentrazione e la *bulk density* sono stati presi i valori medi ponderati per lo spessore di ogni orizzonte e di questi è stata fatta la media tra i dati dei profili delle parcelle della stessa classe di età, tranne che

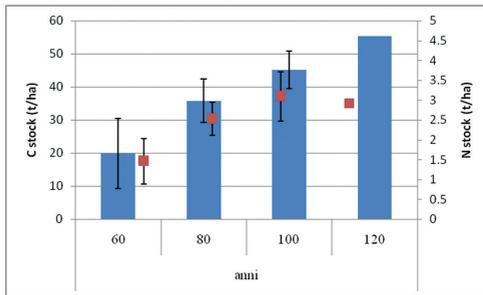


Figura 3 Stock di C e N nei suoli della cronosequenza di douglasia.

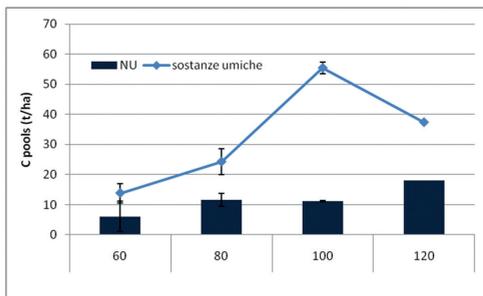


Figura 4 Trend dello stock di C nella cronosequenza, differenziato tra sostanze umiche e non umiche.

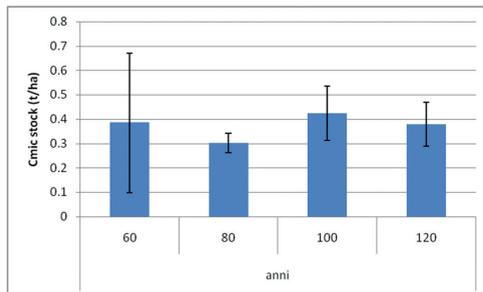


Figura 5 C mic medio stoccato nei suoli della cronosequenza di douglasia

per DOUG 12, unica replica sotto douglasie di 120 anni.

In Figura 3 sono rappresentati i risultati del calcolo dello *stock* di carbonio (istogramma) e di quello di azoto (quadrato) della cronosequenza di suoli. Si può notare come ci sia stato un incremento della quantità di carbonio sequestrato nel suolo all'aumentare dell'età delle piante, fatto che può essere messo in relazione anche con l'approfondimento degli orizzonti organo-minerali (A1+A2) e la formazione degli orizzonti umbrici nelle classi di età maggio-

ri. Osservando l'andamento dello *stock* di azoto, invece, occorre una diminuzione nel suolo delle piante di douglasia di 120 anni, dove diventa un fattore limitante. Il rapporto C/N è un parametro importante della sensibilità della sostanza organica al cambiamento ambientale e della sua stabilità a permanere nell'ecosistema come riserva di carbonio e azoto (DI BIASE *et al.*, 2015)

Analizzando lo sviluppo dello *stock* di C del suolo nella cronosequenza (Figura 4.), suddiviso tra frazioni umificate e non umificate: nel "tempo" tra le piante di 60 anni e quella di 120 anni la frazione umificata ha un andamento dapprima crescente, poi mostra un arresto in corrispondenza del soprassuolo più vecchio, con, al contrario, l'aumento della frazione non umificata. Considerando che lo stock di TOC cresce anche a 120 anni, probabilmente variano i processi metabolici legati al ciclo del carbonio perché non emergono variazioni significative lungo la cronosequenza (Figura 5).

Vari studi condotti nell'Appennino settentrionale (VITTORI ANTISARI *et al.*, 2011, FALSONE *et al.*, 2015; VITTORI ANTISARI *et al.*, 2015;) hanno riscontrato un *turnover* della sostanza organica sotto douglasia più lento che sotto faggio e castagno, mentre hanno rilevato maggiori processi di *weathering* lungo il profilo. Le conifere tendono ad acidificare i suoli, riducendo l'attività microbica, anche per via della composizione della lettiera che contiene sostanze meno appetite dai microrganismi e più difficili da degradare. Nel caso della douglasia l'azione acidificante scende meno in profondità e contribuisce all'origine di sostanza umificata di migliore qualità; inoltre la sua abbondante lettiera è più facilmente decomposta e per questo motivo tale specie è suggerita per rivitalizzare il terreno dopo un lungo impianto con abete bianco (KUPKA *et al.*, 2013).

Conclusioni

I profili DOUG 6 e DOUG 7, corrispondenti al soprassuolo più giovane (60 anni), hanno mostrato un'ampia variabilità in tutti

i caratteri indagati. Probabilmente essi risentono ancora dell'uso del suolo pregresso, che dall'ultimo Piano di gestione della Riserva (CIANCIO, 2009) risulta essere un bosco di faggio, inoltre è ipotizzabile una discontinuità litologica tra i due profili.

I parametri legati alla mobilità del ferro, in particolare l'indice di ferro attivo e l'indice di spodicità, hanno evidenziato una situazione di stabilità pedogenetica e non hanno mostrato una diretta relazione con l'età del soprassuolo. Una risposta più chiara si è avuta invece dalla sostanza organica del suolo: è ben visibile, infatti, un approfondimento dei suoli ed un loro arricchimento di C organico in funzione dell'età delle douglasie. Tale processo è stato sottolineato anche dai risultati del calcolo dello stock di C e N totali e di quello delle diverse frazioni organiche suddivise in umificate e non umificate. In relazione all'età delle piante, è stato messo in evidenza che, mentre negli anni incrementa il C sequestrato, l'azoto diventa un fattore limitante. Di conseguenza, lungo la cronosequenza di suoli tende ad aumentare il rapporto C/N, che a valori prossimi a 20 può interferire negativamente con i processi di umificazione, diminuendo la quantità di molecole che possono essere stabilizzate.

È noto che il processo di immobilizzazione del carbonio organico nel suolo non ha un andamento lineare, bensì subisce variazioni collegate a vari fattori, naturali (clima, materiale parentale e posizione di versante) e antropici (uso del suolo e intensità di gestione) (GRÜNEBERG *et al.*, 2010). Tuttavia, poiché in Italia la douglasia è vista come specie esotica che costituisce boschi lontani dalla naturalità, ma allo stesso tempo che riveste un ruolo predominante nelle piantagioni (CORONA *et al.*, 1998), ponendo l'attenzione ai cambiamenti climatici in corso viene da chiedersi se nella previsione di scelta ed utilizzazione, accanto ad una valutazione economica, possa essere ricercata anche la massimizzazione dello stock di carbonio che questa pianta può trattenere al suolo.

BIBLIOGRAFIA

BARBATI A., FERRARI B., ALIVERNINI A., QUATRINI A., MERLINI P., PULETTI N., CORONA P., 2014 - *Sistemi forestali e sequestro del carbonio in Italia*. L'Italia Forestale e Montana, 69 (4): 205-212.

BLAKE, G.R., HARTGE, K.H., 1986 - *Bulk density*, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, second ed, Part 1,9, pp. 363-375 Agron Monogr.

BOONE R.D., GRIGAL D.F., SOLLINS P., AHRENS R.J., ARMSTRONG D.E., 1999 - *Soil Sampling, Preparation, Archiving, and Quality Control*. in G.P. Robertson, D.C. Coleman. C.S Bledsoe, Sollins P., eds. *Standard Soil Methods for Long-term Ecological Research*. Oxford University Press, New York.

CERTINI G., CORTI G., AGNELLI A., SANESI G., 2003 - *Carbon dioxide efflux and concentrations in two soils under temperate forests*. Biol Fertil Soils 37, 39-46.

CERTINI G., AGNELLI A., CORTI G., CAPPERUCCI A., 2004 - *Composition and mean residence time of molecular weight fractions of organic matter extracted from two soils under different forest species*. Biogeochemistry, 70: 450-468.

CIANCIO O., 2009 - *Riserva Naturale Statale Biogenetica di Vallombrosa. Piano di Gestione e Silvomuseo*. UFFICIO TERRITORIALE PER LA BIODIVERSITÀ DI VALLOMBROSA DEL CORPO FORESTALE DELLO STATO, VALLOMBROSA (REGGELLO, FI)

CIAVATTA, C., GOVI, M., VITTORI ANTISARI, L., SEQUI, P., 1990 - *Characterization of humified compounds by extraction and fractionation on solid polyvinylpyrrolidone*. J. Chromatogr. 509, 141-146.

CORONA, P., SCOTTI, R., TARCHIANI, N., 1998 - *Relationship between environmental factors and site index in Douglas-fir plantations in central Italy*. For. Ecol. Manage. 110, 195-207.

DI BIASE G., FALSONE G., GRAZIANI A., VIANELLO G., VITTORI ANTISARI L., 2015 - *Carbon sequestration in soils affected by Douglas-fir reforestation in Apennines (Northern Italy)*. EQA 17, 1-11.

DIXON, R.K., BROWN, S., HOUGHTON, R.A., SOLOMON, A.M., TREXLER, M.C., WISNIEWSKI, J., 1994 - *Carbon pools and fluxes of global forest ecosystems*. Science 263, 185-190.

FALSONE G., MARINARI S., VITTORI ANTISARI L., VIANELLO G., 2015 - *Soil processes related to organic matter modifications following Douglas-fir mature reforestation*. Biol. Fertil. Soils 51, 277-287.

FERRETTI F., 1998 - *Le prove di introduzione delle specie forestali esotiche:*

l'esperienza condotta a Vallombrosa. Primo contributo - Annali ISSA 29, 93-114.

GEE, G.W., BAUDER, J.W., 1986 - *Particle-size analysis*, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 1*. second ed. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 383-411 Agron. Monogr. No. 9.

- GRÜNEBERG E., SCHÖNING I., KALKO E.K.V., WEISSER W.W., 2010 - *Regional organic carbon stock variability: A comparison between depth increments and soil horizons*. *Geoderma* 155, 426–433.
- INFC, 2005 - *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio*. Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali, Ispettorato Generale - Corpo Forestale dello Stato, CRA - Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione forestale.
- IUSS WORKING GROUP WRB 2007 - *World reference base for soil resources 2006, first update 2007*. World Soil Resources Reports, 103. FAO, Rome.
- KUPKA I., PODRÁSZKY V., KUBECEK J., 2013 - *Soil forming effect of Douglas fir at lower altitudes – a case study*. *Journal of Forest Science*, 59, (9): 345–351
- LAGOMARSINO A., COSTANTINI E., PAGLIAI M., 2010 - *Degradazione del suolo e gestione sostenibile*. *Rivista Silvae* n. 14 - Luglio/Dicembre, 103-118
- LAL 2005 - *Forest soils and soil sequestration*. *Forest Ecology and management* 220,242-258
- MiPAF, MINISTERO DELLE POLITICHE AGRICOLE E FORESTALI, 2000 - *Metodi di analisi Chimica dei Suoli*. In: Violante, P., Sequi, P. (Eds.), *Collana di Metodi Analitici per l'Agricoltura*. Franco Angeli, Milano, pp. 1–474.
- MOTTA R., 2008 - *Il ciclo del carbonio nelle foreste vetuste*. *Forest@* 5: 302-305.
- NOCENTINI S., 2010 - *Le specie forestali esotiche: la sperimentazione di Aldo Pavari e le prospettive attuali*. *L'Italia Forestale e Montana / Italian Journal of Forest and Mountain Environments* 65 (4): 449-457, 2010.
- PAVARI A., 1959 - *Le classificazioni fitoclimatiche ed i caratteri della stazione*. *Scritti di ecologia selvicoltura e botanica forestale*, pp. 45-116.
- PELTONIEMI M., MÄKIPÄÄ R., LISKI J., TAMMINEN P., 2004 - *Changes in soil carbon with stand age – an evaluation of a modelling method with empirical data*. *Global Change Biology* (2004) 10, 2078–2091
- PORCU G., A.A. 2009-2010 - *Dinamica del carbon sink in una cronosequenza agro - forestale mediterranea: caratterizzazione delle frazioni di sostanza organica*. Tesi di Dottorato, Facoltà di Agraria, Università degli studi di Sassari.
- SANESI G., 2005 - *I suoli di Vallombrosa. Loro importanza ambientale in relazione all'accumulo del carbonio*. *Italian Journal of Forest and Mountain Environments* 60 (2):159-162.
- SANESI G., CERTINI G., 2004 - *Morphological, chemical and biological characteristics of the Umbric epipedon in the forests of northern Apennines, Italy*. Volume 168, Issue 3. pp. 291–407
- SCHMID M., PAUTASSO M., HOLDENRIEDER O., 2014, *Ecological consequences of Douglas Fir (Pseudotsuga menziesii) cultivation in Europe – Review*. *European Journal of Forest Research*, 133:13–29
- SCHWERTMANN U., 1964 - *Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-lösung*. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde* 105:194–201
- SOIL SURVEY STAFF, 2000 - *Keys to Soil Taxonomy*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Eleventh Edition
- SPRINGER, U., KLEE, J., 1954 - *Prüfung der Leistungsfähigkeit von einigen wichtigeren Verfahren zur Bestimmung des Kohlenstoffs mittels Chromschwefelsäure sowie Vorschlag einer neuen Schnellmethode*. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde* 64, 1–26.
- VANCE, E.D., BROOKES, P.C., JENKINSON, D.S., 1987 - *An extraction method for measuring soil microbial biomass C*. *Soil Biol. Biochem.* 19, 703–707.
- VAN REEUWIJK L.P., 2002 - *Procedures for soil analysis*. Technical Paper n. 9. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, 11–1
- VITTORI ANTISARI L., MARINARI S., DELL'ABATE, M.T. BAFFI C., VIANELLO G., 2011 - *Plant cover and epipedon SOM stability as a factors affecting brown soil profile development and microbial activity*. *Geoderma* 161, 212-224.
- VITTORI ANTISARI L.V., FALSONE G., CARBONE S., MARINARI S., VIANELLO G., 2015 - *Douglas-fir reforestation in North Apennine (Italy): Performance on soil carbon sequestration, nutrients stock and microbial activity*. *Applied Soil Ecology* 86, 82-90.
- YANAI, R.D., CURRIE, W.S., GOODALE, C.L., 2003 - *Soil carbon dynamics after forest harvest: an ecosystem paradigm reconsidered*. *Ecosystems* 6, 197–212.
- WALKER R. L. WARDLE D.A., BARDGETT D.R., CLARKSON B.D., 2010 - *The use of chronosequence in studies of ecological succession and soil development*. *Journal of Ecology* 98, 725-736.
- WELKE S.E., HOPE G.D., 2005 - *Influences of stand composition and age on forest floor processes and chemistry in pure and mixed stands of Douglas-fir and paper birch in interior British Columbia*. *Forest Ecology and Management* 219, 29–42

Anna Graziani

Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Economia Agraria, Centro di Ricerca per l'Agrobiologia e la Pedologia (CREA-ABP)
Piazza M. D'Azeglio, 30 - 50121 Firenze
E-mail: anna.neddu@gmail.com

Livia Vittori Antisari

Dipartimento di Scienze Agrarie, Alma Mater Studiorum di Bologna Viale Fanin, 40 - 40127 Bologna
E-mail: livia.vittori@unibo.it

PAROLE CHIAVE: *douglasia, soil carbon stock, Vallombrosa.*

RIASSUNTO

La ricerca ha riguardato lo studio del suolo in funzione dell'età del rimboschimento in popolamenti di Douglasia di alcune parcelle sperimentali nella Riserva di Vallombrosa (FI). Lo studio è stato realizzato nell'ambito di una collaborazione tra DipSA-Università di Bologna e CREA-SEL di Arezzo volta a monitorare gli stock di carbonio e azoto di soprassuoli forestali. Per questa indagine sono stati aperti sette profili sotto piantagioni di douglasia di 60, 80, 100 e 120 anni e su di essi sono stati effettuati i campionamenti degli orizzonti diagnostici e per il calcolo della bulk density. Lo studio del profilo e le analisi fisiche, chimiche e biochimiche di laboratorio hanno condotto alla classificazione dei suoli secondo la Soil Taxonomy e i parametri di mobilità del ferro ne hanno definito la situazione evolutiva. In relazione all'età delle piante si sono osservati il processo pedogenetico e l'accumulo di sostanza organica lungo la cronosequenza e si sono calcolati gli stock di carbonio totale, delle frazioni del C umificato e non umificato e di azoto totale.

KEYWORDS: *douglasia, soil carbon stock, Vallombrosa.*

ABSTRACT

The aim of this study was to analyze the pedological, chemical and biochemical properties of soil in order to assess the Douglas-fir cover effect in accordance to the age of the stands. The work was conducted inside a partnership about forest carbon and nitrogen stock monitoring, between the Agriculture Science Department of the University of Bologna (Dipsa) and the Centre for Agriculture Research and Economical analysis- Department of Selviculture (CREA- SEL) of Arezzo. The study area consisted of some experimental plots of Douglas-fir belonging to Pavari's set for the introduction of exotic species in Italy and is located near Florence, in the State Nature Reserve of Vallombrosa. Seven soil profiles were dug under Douglas-fir reforestations of 60, 80, 100 and 120 years old. Soil samplings for the diagnostic horizons and for the bulk density have been collected, the soils have been classified according to the USDA-Soil Taxonomy and the Fe-parameters have been investigated the pedogenetic process along the chronosequence. The stocks of total organic C, of total N and of humified and not humified carbon fractions have been calculated and have been referred to the stand ages.