



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN:

SCIENZE FORESTALI E AMBIENTALI

LA SOSTANZA ORGANICA NEI SUOLI FORESTALI

ORGANIC MATTER IN FOREST SOILS

TIPO TESI: compilativa

Studente:
Matteo Mancinelli

Relatore:
PROF. CRISTIANO CASUCCI

Matteo Mancinelli

Cristiano Casucci

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

SOMMARIO

ELENCO DELLE FIGURE.....	5
CAPITOLO1 INTRODUZIONE.....	6
1.1 PEDOGENESI DEL SUOLO E HUMUS.....	6
1.2 COMPONENTI INORGANICHE DEL SUOLO.....	7
1.3 COMPONENTI ORGANICHE DEL SUOLO.....	7
1.4 PROPRIETA' FISICO-MECCANICHE DEL TERRENO.....	8
1.5 PROPRIETA' CHIMICHE DEL SUOLO.....	10
CAPITOLO 2 ORIZZONTI DIAGNOSTICI.....	12
2.1 LE PRINCIPALI CLASSIFICAZIONI DEGLI ORIZZONTI NEI SUOLI FORESTALI.....	12
2.1.1 USDA SOIL TAXONOMY.....	12
2.1.2 CLASSIFICAZIONE DEI SUOLI.....	13
2.1.3 O DELLA USDA.....	14
2.1.4 A DELLA USDA.....	14
2.1.5 B DELLA USDA.....	14
2.1.6 ANDISOLS.....	15
2.1.7 UMBRISOLS.....	16
2.1.8 SPODOSOLS.....	17
2.1.9 CAMBISOL.....	18
CAPITOLO 3 FUNZIONE DI SERBATOIO DEL SUOLO E STOCCAGGIO DEL CARBONIO.....	20
CAPITOLO 4 INTRODUZIONE AL LAVORO DI TESI.....	21
CAPITOLO 5 ARTICOLI ACCADEMICI TRATTATI.....	21
CAPITOLO 6.“CHANGES IN SOIL HYDRO-PHYSICAL PROPERTIES AND SOM DUE TO PINE AFFORESTATION AND GRAZING IN ANDEAN ENVIRONMENTS CANNOT BE GENERALIZE”.....	21
6.1 INTRODUZIONE.....	21

6.2. MATERIALI E METODI.....	22
6.2.1 AREA DI STUDIO.....	22
6.2.2. SELEZIONE E IMPLEMENTAZIONE DEI SITI DI STUDIO.....	23
6.2.3 CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETÀ DEL SUOLO.....	23
6.2.4 ANALISI DI LABORATORIO.....	24
6.3. RISULTATI.....	24
6.3.1 DESCRIZIONE GENERALE DEI SITI SPERIMENTALI.....	24
6.3.2. PROPRIETÀ DEL SUOLO IN SITI DI COPERTURA NATURALI ‘INDISTURBATI’.....	25
6.3.3 CAMBIAMENTI NEL CONTENUTO IDRO-FISICO E DI SOM NELL' RIMBOSCHIMENTO DI PINO.....	26
6.3.4 CAMBIAMENTI NEL CONTENUTO IDROFISICO E SOM SOTTO IL PASCOLO.....	28
6.4 CONCLUSIONI.....	29
CAPITOLO 7 CARBON SEQUESTRATION CAPABILITY OF FAGUS SYLVATICA FORESTS DEVELOPING IN THE MAJELLA NATIONAL PARK (CENTRAL APENNINES, ITALY).....	32
7.1 INTRODUZIONE.....	32
7.2 MATERIALI E METODI.....	33
7.2.1. ZONA DI STUDIO E CLIMA.....	33
7.2.2 RILEVAMENTI E MISURE DI F. SYLVATICA.....	33
7.2.3. MISURAZIONI DEL MICROCLIMA.....	34
7.2.4. LO SCAMBIO DI CO ₂	34
7.2.5. SEQUESTRO DI CO ₂	35
7.2.6. ANALISI STATISTICA.....	35
7.3. RISULTATI.....	35
7.3.1. MICROCLIMA.....	35
7.3.2. MISURE DI F. SYLVATICA.....	35
7.3.3. LO SCAMBIO DI GAS.....	36

7.3.4 SEQUESTRO DI CO2 E VALORE MONETARIO.....	36
7.3.5. ANALISI STATISTICA.....	38
7.4 DISCUSSIONE.....	38
CAPITOLO 8 HIDDEN SOILS AND THEIR CARBON STOCKS AT HIGH-ELEVATION IN THE EUROPEAN ALPS (NORTH-WEST ITALY).....	40
8.1. INTRODUZIONE.....	40
8.2. MATERIALI E METODI.....	42
8.2.1 AREA DI STUDIO.....	42
8.2.2. RILIEVO, CAMPIONAMENTO E ANALISI DEL SUOLO.....	42
8.3. RISULTATI.....	45
8.3.1. LE CARATTERISTICHE DEI PROFILI DEL SUOLO	45
8.3.2. PROPRIETÀ FISICHE E CHIMICHE DEI SUOLI.....	46
8.4. DISCUSSIONE.....	47
8.4.1. PROPRIETÀ DEL SUOLO E STOCK DI CARBONIO.....	47
8.5. CONCLUSIONE E PROSPETTIVE.....	47
CAPITOLO 9 SOIL QUALITY AND SOIL ORGANIC CARBON STORAGE IN ABANDONED AGRICULTURAL LANDS: EFFECTS OF REVEGETATION PROCESSES IN A MEDITERRANEAN MID-MOUNTAIN AREA.....	48
9.1. INTRODUZIONE.....	48
9.2 MATERIALI E METODI.....	49
9.2.1 AREA DI STUDIO E USI DEL SUOLO.....	49
9.2.2. DESCRIZIONE DELL'AREA DI STUDIO.....	49
9.2.3 VALUTAZIONI DEGLI USI DEL SUOLO NEI CAMPI ABBANDONATI.....	50
9.3 METODI.....	51
9.3.1. PROGETTAZIONE E CAMPIONAMENTO DEGLI ESPERIMENTI: SUOLO E VEGETAZIONE.....	51
9.3.2. CARATTERIZZAZIONE DEL SUOLO.....	51
9.4. ANALISI STATISTICA.....	52
9.5. RISULTATI.....	53

9.5.1 L'USO DEL SUOLO E DELLA COPERTURA NEI TERRENI AGRICOLI ABBANDONATI.....	53
9.5.2 COMPOSIZIONE VEGETALE.....	53
9.5.3. PROPRIETÀ FISICHE E CHIMICHE DEL SUOLO.....	54
9.5.4 COPERTURA DELLE SPECIE VEGETALI E PROPRIETÀ DEL SUOLO.....	55
9.6. DISCUSSIONE.....	56
9.6.1. QUALITÀ FISICO-CHIMICA DEL SUOLO E SOC IN TERRENO AGRICOLO ABBANDONATO.....	56
9.7 CONCLUSIONI.....	60
CAPITOLO 10 CONCLUSIONI.....	61
CAPITOLO 11 BIBLIOGRAFIA.....	62
CAPITOLO 12 SITOGRAFIA.....	65

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 Triangolo dei suoli.....	8
Figura 2 Classificazione degli orizzonti dei suoli secondo la Référentiel Pédologique.....	12
Figura 3 Grafico Abaco.....	15
Figura 4 Andisol.....	16
Figura 5 Orizzonte Umbric.....	16
Figura 6 Orizzonte Spodic.....	18
Figura 7 Orizzonte Cambic.....	19

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

1.1 PEDOGENESI DEL SUOLO E HUMUS

Con il termine suolo ci si riferisce ad un corpo naturale composto da una componente solida (costituita principalmente da minerali e sostanza organica), una componente liquida e una componente gassosa presenti nello strato di terreno e che occupano uno spazio ben definito. Il suolo è inoltre descritto dalle seguenti proprietà: presenza di orizzonti (o “layers”), distinguibili dal materiale iniziale del terreno, risultante dalle forme di trasformazione e trasferimento dell’energia e della materia, e capacità di fornire sostentamento e supporto alla crescita delle radici delle piante in un ambiente naturale.

Un’ulteriore classificazione definisce il suolo come la porzione superiore della crosta terrestre in cui interagiscono l’idrosfera, l’atmosfera e la biosfera. Il suolo è una componente fondamentale per gli ecosistemi naturali e la sostenibilità ambientale dipende in gran parte da quella del sistema suolo.

Il suolo riveste ruoli chiave sia a livello ambientale, ma anche a livello socio-economico: basti pensare alle pratiche agrosilvocolturali, indispensabili per l’economia di un paese, e, più in generale, sostentamento dei popoli.

Il suolo è in continua “comunicazione” con le varie componenti del nostro pianeta: esso, infatti, tramite azione di immagazzinamento, filtraggio, azione tampone e di trasformazione, permette di scambiare gas con l’atmosfera e svolge una funzione di protezione verso la sfera idrologica.

Si possono formare diversi tipi di suolo, ciascuno strettamente correlato sia con la vegetazione, sia con gli organismi che vivono in esso.

Il suolo non va inteso come una componente statica, ma è in continuo dinamismo: in esso si verificano continue circolazioni di acqua e di aria e continue trasformazioni biochimiche tramite microrganismi che intervengono attivamente, rigenerandolo andando a modificare i residui organici presenti in esso (microrganismi decompositori).

Il processo di formazione del suolo, detto pedogenesi, coinvolge e dipende da diverse variabili, tra cui: escursioni termiche, precipitazioni atmosferiche, erosione eolica ed azione dei microrganismi. La degradazione meteorica delle rocce rappresenta il fattore principale del primo stadio di formazione di un suolo, essa comprende tutti i processi di degradazione fisico-chimici che coinvolgono le rocce e questi fenomeni variano al variare delle condizioni climatiche e dalle proprietà intrinseche della roccia, ovvero dal tipo.

I microrganismi più importanti nei processi di formazione del suolo sono i Licheni: essi sono considerati organismi “pionieri”, poiché permettono il successivo insediamento di altre specie di microrganismi, quali batteri, funghi, alghe e protozoi. Il processo di insediamento avviene nel corso di diversi anni: durante questo processo, quello che si accumula è la sostanza organica stabile, ovvero l’humus, che rappresenta la componente essenziale per poter parlare propriamente di suolo. L’humus costituisce la parte organica del terreno: è costituito da una miscela di sostanze organiche derivata dalla decomposizione di microrganismi, sia vegetali che animali, presenti nel terreno. L’humus svolge una duplice funzione nel suolo:

- 1) Funzione di nutrizione vegetale: contiene elementi come Azoto, Fosforo, Potassio e Calcio.
- 2) Funzione di stabilizzazione: funge da legante per le diverse componenti del terreno, tramite i diversi acidi contenuti in esso.

Quest'ultima proprietà è svolta soltanto da humus attivo, cioè da humus derivante da decomposizione ad opera di batteri aerobici, mentre l'humus inattivo deriva da processi di degradazione svolti da microrganismi, principalmente di tipo fungino.

1.2 COMPONENTI INORGANICHE DEL SUOLO

Il suolo è composto dalle seguenti componenti:

- I. Lo scheletro: è la parte di terreno che non riesce ad essere setacciata durante manipolazione con setaccio con fori di 2mm, per cui è costituita da particelle con diametro $> 2\text{mm}$. Lo scheletro viene suddiviso in ciottoli, ghiaione e ghiaia in funzione del diametro. Non vi sono tracce nel terreno agrario, a causa delle lavorazioni agricole.
- II. La terra fine: è la parte di suolo che viene setacciata, durante esame con setaccio con fori di 2mm. Questa parte è costituita, perciò da particelle con diametro $< 2\text{mm}$. E' suddivisa in sabbia, limo e argilla. La sabbia e il limo svolgono una funzione meccanica nel suolo, infatti costituiscono un supporto poroso sul quale possono fissarsi gli altri componenti chimici e permette la circolazione dell'aria e dell'acqua. L'argilla ha una funzione importante sia dal punto di vista chimico che fisico: infatti può fissare sostanze necessarie per le piante ed inoltre si comporta da aggregante per le particelle contribuendo alla costituzione della struttura del terreno. La composizione della terra fine (sabbia, limo, argilla) definisce la tessitura del terreno.
- III. Acqua e aria: sono contenute in pori all'interno del terreno. L'acqua ha una funzione fondamentale dal punto di vista biotico, sia per le piante che per i microrganismi (nutrimento, trasporto di sostanze e termoregolazione). L'aria è necessaria per la respirazione delle radici delle piante affinché possano avvenire i processi chimici dei microrganismi aerobi, le radici devono essere per tempo sufficiente a contatto con l'aria.

1.3 COMPONENTE ORGANICA DEL SUOLO

La componente organica del suolo è costituita dalla sostanza organica. Per sostanza organica del suolo si intende l'insieme dei residui di origine vegetale e animale in diverso stato di decomposizione. Partecipano alla sua formazione materiali di varia origine, come ad esempio:

- A. Residui vegetali o animali in diverso stato di decomposizione
- B. Biomassa di organismi viventi, macro e microorganismi del terreno
- C. Materiale di neoformazione, sostanze di natura complessa con composizione non del tutto nota, che vanno a formare le sostanze umiche.

I residui organici che arrivano al terreno non partecipano in maniera omogenea alla formazione della sostanza organica. I residui di origine vegetale costituiscono la parte più abbondante di materiale che, decomponendosi, andrà a costituire la sostanza organica nel suolo. Così facendo, è possibile distinguere nei terreni tre tipi di sostanza organica:

- A. La sostanza organica “indecomposta”, costituita da residui organici di origine vegetale e animale, che subirà l’attacco e le successive trasformazioni da parte dei microrganismi del terreno;
- B. La sostanza organica “labile”, formata da prodotti intermedi di decomposizione, destinata a subire un processo di mineralizzazione o a essere utilizzata come substrato per la crescita dei microrganismi del terreno;
- C. La sostanza organica “stabile”, chiamata più genericamente humus, di composizione chimica complessa, derivante da composti intermedi formatisi durante la decomposizione di composti organici.

1.4 PROPRIETA’ FISICO-MECCANICHE DEL TERRENO

Le principali proprietà fisiche sono:

- I. Tessitura: viene definita come percentuale in peso con cui sono presenti, nel terreno, le tre componenti della terra fine (sabbia, limo e argilla). Queste percentuali vengono determinate tramite analisi granulometriche di campioni di terreno, utilizzando setacci di tipo standard, per poi pesare le frazioni che attraversano il setaccio. Il rapporto fra il peso di queste frazioni ed il peso totale del campione moltiplicato per 100 definisce la percentuale di particelle presenti nel terreno di diametro inferiore o uguale a quello dei fori del setaccio. Così è possibile suddividere i terreni in: terreni grossolani, con prevalenza sabbia, terreni leggeri, con sabbia e medio impasto in pari percentuali, terreni di medio impasto (franco), con medio impasto e limo con eventuale presenza dell’uno o dell’altro, terreni di medio impasto-pesanti, con medio impasto, presenza di sabbia, limo, argilla con diverse di prevalenza, terreni pesanti, con prevalenza di argilla ed eventualmente sabbia o limo.

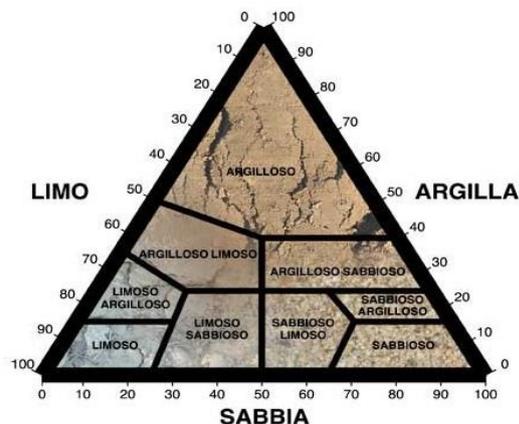


Figura 8 Triangolo dei suoli

- II. Struttura: la struttura del terreno dipende dalle dimensioni delle particelle che lo costituiscono, cioè dalla tessitura e dal modo in cui si dispongono quando entrano in contatto tra loro. Si formano grumi di diverse dimensioni (mm).
- III. La stabilità di questi grumi dipende dal contenuto di sostanza organica presente in essi. Tale stabilità è importante per la struttura stessa (evita il collasso). Dalla struttura dipendono la quantità e le dimensioni dei pori e di conseguenza la capacità di trattenere o liberare acqua e aria. La struttura del terreno è a sua volta influenzata da:
- Interventi antropici: tramite le operazioni colturali (concimazione e sovescio) e tramite operazioni meccaniche,
 - Agenti esistenti in natura attraverso (piante, animali e variazioni climatiche) e da azione chimica (solvente o coagulante degli ioni)

In un terreno di struttura ben definita si stabilisce un sistema di vuoti chiamati pori che, in base alle dimensioni che assumono, si distinguono in macropori (diametro $> 8 \mu\text{m}$) e micropori (diametro $< 8 \mu\text{m}$). I macropori sono di solito occupati dall'aria, tranne che nei periodi di pioggia e irrigazione; i micropori, in condizioni normali di umidità, sono occupati in modo più o meno completo dall'acqua trattenuta per capillarità. Un esempio di terreno ricco di macropori può essere quello sabbioso, in questo caso i macropori ben areati non trattengono l'umidità; i terreni argillosi, invece, sono quelli che sono più ricchi di micropori (poco areati ma con capacità maggiori di trattenere l'umidità).

IV. Porosità e peso specifico:

Considerato un campione di terreno con volume W , sia W_v il volume occupato dai pori mentre W_s il volume occupato dalle particelle solide compatte. Al volume W corrisponde un peso complessivo P_s dato dal peso della sola componente solida (campione secco). Si definisce così la porosità n , come il rapporto tra il volume occupato dai pori W_v e il volume del campione W :

$$n = \frac{W_v}{W} \times 100$$

Poiché W corrisponde alla somma tra W_s e W_v ($W_v + W_s = W$), possiamo scrivere:

$$n = \left[1 - \frac{W_s}{W} \right] \times 100$$

Insieme alla porosità si definisce il rapporto di vuoto $e = n/(100-n)$.

Il peso specifico relativo apparente del terreno γ_{ra} è definito come rapporto tra il peso specifico del campione e quello dell'acqua (che viene considerato per definizione unitario):

$$\gamma_{ra} = \frac{P_s}{W}$$

E il peso specifico relativo reale γ_{rr} come rapporto tra il peso specifico del campione compattato e il peso specifico dell'acqua:

$$\gamma_{rr} = \frac{P_s}{W_s}$$

Sostituendo nell'equazione della porosità, si ottiene che:

$$n = \left[1 - \frac{\gamma_{ra}}{\gamma_{rr}} \right] \times 100$$

Risulta così importante quantificare la frazione dei pori nei quali l'acqua può circolare e la frazione dei pori nei quali l'acqua non circola, per tal motivo viene introdotto il concetto di porosità efficace, che equivale al rapporto fra il volume dei vuoti intercomunicanti nei quali l'acqua circola liberamente e il volume totale del terreno. Un'altra definizione permette di descrivere la porosità efficace n come il rapporto fra il volume d'acqua rilasciato per gravità da un campione di terreno/roccia perfettamente saturo e il volume totale del campione.

Viene definita ritenzione specifica il rapporto tra il volume d'acqua trattenuto da un campione di terreno a saturazione dopo aver operato un drenaggio per gravità e il volume totale del campione. Di conseguenza, la porosità di un terreno/roccia è data dalla somma della porosità efficace e la ritenzione specifica. I valori di porosità e peso specifico dipendono dalla tessitura del terreno e dalla struttura.

1.5 PROPRIETA' CHIMICHE DEL SUOLO

Le principali proprietà chimiche dei suoli sono:

- I. Ph: è una misura della concentrazione degli ioni idrogeno $[H^+]$ in una soluzione acquosa. Questa proprietà influenza tutte le reazioni che avvengono nella biosfera. Il Ph del terreno misura la concentrazione di idrogenioni nella soluzione liquida che si trova negli spazi liberi dalle particelle solide del terreno. Dato che questa soluzione interagisce continuamente con le superfici di scambio (superfici solide del terreno), il Ph del terreno dipende soprattutto dalla natura chimica di queste superfici e dal numero di siti di scambio (cariche superficiali positive/negative) e dal loro grado di saturazione e quindi dal numero e dal tipo di base di scambio presenti nel terreno (K, Mg, Ca, Na). Viene definito potere tamponante la capacità delle superfici di scambio di rilasciare idrogenioni o basi di scambio che possano "tamponare" il Ph della soluzione circolante; esso dipende dalla quantità e dal tipo di argille e sostanza organica presenti nel terreno.
- II. Salinità: i Sali solubili presenti nel terreno sono indispensabili per la crescita delle piante, purchè la loro concentrazione resti in range predefiniti. Infatti, elevate concentrazioni saline possono provocare squilibri nutrizionali ed effetti di tossicità alle piante, ma possono causare danni anche al terreno, come per esempio danni alla struttura e variazioni di Ph. Generalmente, un aumento di salinità determina un incremento della tensione della soluzione circolante che provoca difficoltà di assorbimento di acqua ed elementi minerali per le piante (dipende sia dalla concentrazione di Sali solubili che dalla pressione osmotica). Per poter diagnosticare variazioni di salinità si ricorre alla misurazione della conducibilità elettrica (CE) dell'estratto saturo del terreno. Nel momento in cui si rileva una concentrazione salina eccessiva è fondamentale risalire alle cause per poterla rimuovere.
- III. Sostanza organica: il terreno è costituito da una fase solida, da una fase liquida e da una fase gassosa; la fase solida a sua volta si può distinguere in frazione minerale e frazione organica nei terreni agrari, rappresentata in genere dall'1-3%

in peso, della fase solida, mentre il 12-15% in volume per la liquida e la gassosa; questo si traduce in ruolo fondamentale sia per la nutrizione delle piante che per il mantenimento della struttura del terreno dato che essa costituisce una grossa parte delle superficie attiva del suolo. Nei terreni naturali la quantità di sostanza organica può essere anche sensibilmente più elevata e si attesta spesso tra 5 ed 10% in peso; il terreno è uno dei grandi serbatoi di carbonio del globo terrestre e tutte le tecniche di gestione del suolo che riducono l'ossidazione e mineralizzazione della sostanza organica contribuendo a ridurre l'emissione di anidride carbonica in atmosfera e quindi le conseguenze negative legate all'effetto serra. La frazione organica però non è omogenea ma comprende gruppi di composti fra loro diversi per natura e proprietà chimiche. Si possono individuare quattro componenti principali: i residui vegetali e animali, gli organismi viventi, le sostanze facilmente degradabili e le sostanze labili. Per residui si intendono quelle sostanze che arrivano al terreno come foglie, parti legnose, essudati radicali, deiezioni animali e simili che, pur essendo già in fase di degradazione, mantengono la loro struttura fisica originaria. In ambienti naturali (suoli forestali) costituiscono uno strato superficiale chiamato lettiera che a sua volta influenza la pedogenesi. Gli organismi viventi comprendono forme molto diverse, dalle più grandi come insetti e lombrichi, che svolgono un'azione cementante sulla struttura del terreno, fino ai microrganismi come batteri e funghi. Questa composizione è stata nettamente rivalutata negli ultimi anni da quando aumentata l'attenzione nei confronti della biodiversità, proprio perché nel suolo c'è grande varietà e diversità degli organismi. La sostanza organica degradabile è l'insieme dei prodotti della rapida trasformazione dei residui operata dai microrganismi del suolo; e se ancora soggetta ad ulteriori alterazioni o modificazioni destinata ad evolvere in tempi brevi.

CAPITOLO 2

ORIZZONTI DIAGNOSTICI

2.1 LE PRINCIPALI CLASSIFICAZIONI DEGLI ORIZZONTI NEI SUOLI FORESTALI

La classificazione degli orizzonti diagnostici utilizzata in Europa è la Référentiel Pédologique. Secondo tale classificazione, viene individuato l'orizzonte organico del suolo, indicato con la lettera O.

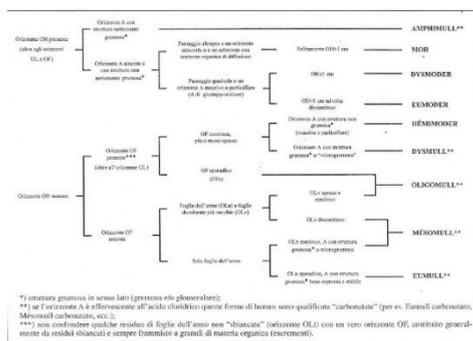


Figura 9 Classificazione degli orizzonti dei suoli secondo la Référentiel Pédologique

Oltre alla Référentiel Pédologique esistono altri due sistemi di classificazione: che fanno riferimento alla FAO (Food and Agriculture Organization) e la USDA (U. S. Department of Agriculture). La prima classifica i suoli da un punto di vista utilitaristico (agricolo o simile) pur sempre rispettando il mantenimento del suolo. La seconda classifica da un punto di vista naturalistico, ovvero indica le proprietà fisiche e chimiche del suolo. Sia la FAO che la USDA usano gli stessi criteri per la classificazione, ma la FAO li suddivide in 32 ordini, la USDA un 12.

2.1.1 USDA SOIL TAXONOMY

Identifica 12 ordini di suolo. La classificazione si basa su 3 criteri: orizzonti diagnostici, clima estremo e proprietà intrinseche.

- Orizzonti diagnostici: la classificazione del suolo secondo gli orizzonti diagnostici prevede la verifica della presenza e/o il tipo di vari orizzonti. Il suolo come già detto in precedenza è composto da un orizzonte organico O, minerale A, B, C e un ultimo strato dove possiamo trovare rocce dure (rocce compatte, l'orizzonte Gneiss) o rocce semicoerenti ©: queste sono originati da strati che si originano dalle torbide che durante i secoli trasportano in mare strati di terra. Gli orizzonti al di sopra dello strato R (roccioso) (O, A, B) si originano da alterazioni di quest'ultim. Gli orizzonti (O, A, B) prendono il nome di solum; ai fini della classificazione viene osservato il solum. Sono presenti 3 tipi di O (orizzonti organici): Oi

fibrice (indecomposto), Oe hemic (riconoscibile al 40%), Oa sapric (completamente decomposto).

2.1.2 CLASSIFICAZIONE DEI SUOLI

La USDA classifica i suoli come segue:

- O** (histosols): se c'è orizzonte O e ha spessore > 60 cm
- A** (mollisols): ricco di sostanza organica, ma < di 12%
- B** (spodosols): se B è spodic (Bhs)
- B** (oxisols): se B è oxic (Bo)
- B** (inceptisols): se B è cambic (Bw)
- B** (ultisols): se B è fragipan (Bx)
- B** (alfisols): se B è argillic + fragipan (Bx + Bt)

Se nessuno di questi criteri (neanche quelli per climi estremi) sono rispettati, il suolo è un entisol (suolo non suolo).

- **Clima estremo:** in base alla presenza di clima estremo, la USDA prevede la seguente classificazione dei suoli:

Gelisols: presenta permafrost entro un metro di profondità, se il permafrost è entro i 2m di profondità deve presentare crioturbazioni, causate dal gelo e disgelo, che sconvolgono la struttura orizzontale degli orizzonti e si trovano orizzonti "circonvoluti" e temperature medie annue intorno a 0°.

Aridisols: l'orizzonte deve essere asciutto tra la zona di superficie fino a 50 cm di profondità per 90 giorni consecutivi o 120 accumulativi (piogge vergini), ovvero il solstizio d'estate. Se risponde a questi criteri deve presentare o un orizzonte Salic (salino) o Natric (Sali a base di sodio).

- **Proprietà intrinseche:** in base alle proprietà intrinseche, la USDA classifica i suoli come:

Andisols: suoli generalmente di origine vulcanica e che criteri ben precisi:

- a) Densità apparente pari a $0,9\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- b) 2% o più di Al e $\frac{1}{2}$ Fe estraibili in acido ossalico (2COOH e ossalato d'ammonio (2COONH_4))
- c) Determinata quantità di vetro in relazione a $\text{Al} + \frac{1}{2}\text{Fe}$

Se questi requisiti sono rispettati, gli strati sono definiti orizzonti con proprietà endiche e si controllano tutti gli orizzonti fino a 6 cm di profondità. Se il 60% o più degli orizzonti esaminati presenta proprietà endiche, allora il suolo è classificato come Andisol.

Vertisols: suoli limosi e argillosi, presentano fratture ricorrenti (durante i periodi caldi). Le fratture si chiudono e si aprono con il passaggio tra periodi caldi e periodi piovosi. La USDA considera fratture gli spacchi che arrivano a 25 cm di profondità. Il 30% del suolo (nei primi 50 cm) deve essere composto da argilla e devono essere presenti aggregati cuneiformi originati dalle pressioni da parte delle fratture che possono avere inclinazioni tra 10 e 60°.

2.1.3 O della USDA

La USDA suddivide l'orizzonte O in: Oi (i sta per indecomposto), la materia organica è riconoscibile e troviamo: cere, resine, cellulosa (a livello chimico); Oa, in cui si trovano i prodotti di trasformazione della sostanza organica (riconoscibile dalla presenza di materiale polverulento che deriva da sminuzzamento operato dalla mesofauna).

Successivamente la sostanza organica va incontro a copolimerizzazione con formazione di sostanze umiche (umina, acidi umici e fulvici). Al contrario del Oa, nell'Oi le foglie sono intere (non triturate) quindi c'è una bassa superficie specifica e bassa trasformazione in sostanza organica. Ancora, l'orizzonte è ulteriormente suddiviso in Oe, che può essere considerato come una classificazione intermedia tra Oi e Oa.

La S.O. "intera" nell'Oi, man mano che viene lavorata raggiunge profondità più elevate (perché diventa sempre più fine).

Nell'Oa e nel Oe c'è umidità costante e protezione dal sole quindi c'è una microfauna più attiva. Solo il 2-3% di S.O. va incontro a umidificazione e il 97-98% torna come CO₂.

Le sostanze fine raggiungono A (orizzonte minerale). Tra O e A c'è un continuo rimescolamento dato da anellidi.

2.1.4 A DELLA USDA

Per essere definiti orizzonti minerali bisogna rispettare diversi criteri:

- 1) C organico deve essere > 0,6%,
- 2) Non devono essere riconoscibili i materiali di partenza,
- 3) Deve avere una colorazione scura, riconosciuta con la tavola di Munsell

Ci sono diversi tipi di A e i principali sono: Mollic, Umbric, Anthropic, Melanic, Plaggen.

Per L'USDA solo A è diagnostico: se c'è Mollic il suolo è Mollisol.

2.1.5 B DELLA USDA

Gli orizzonti che hanno colorazione di tipo giallastro e rossastro, devo rispettare una struttura a blocchi (gli A hanno struttura a grumi). La struttura a blocchi è data dalla presenza di cementi come Fe, Al, Mn e minerali argillosi. Sono presenti anche CaCO₃, CaCO₄·2H₂O (gesso) o SiO₂·2H₂O (silice). Gli orizzonti B possono essere divisi in: induriti, ovvero con densità apparente > 1,84g·cm⁻³ (es Fragioan, duro, ma fragile) e in non induriti, che hanno una struttura prismatica o subangolare, o non vi è struttura e hanno una densità apparente di 1,2-1,3 g·cm⁻³. Possono essere ulteriormente suddivisi anche in orizzonti di ELUVIAZIONE, dove i fenomeni atmosferici tendono a portare i materiali, ad esempio con la lisciviazione (allontanamento dato da solubilizzazione) e dal Bleaching (NaClO, varichina), con questo fenomeno un agente (acido fulvico) complessa Fe e Al dal suolo e li esporta; di ILLUVIAZIONE ovvero, orizzonti dove si fermano le sostanze che sono state liscivate da altri orizzonti. Infine orizzonti di LESSIVAGE dove avviene un trasporto verso il basso di

sostanze solide; avviene in suoli con grosse porosità (sabbiosi) e interessa le argille e la sostanza organica.

Nel mio lavoro di tesi ho analizzato i seguenti suoli:

- Andosols o Andisols,
- Umbric,
- Cambisols,
- Podisols.

2.1.6.ANDOSOLS

Gli Andisols, o Andosols, sono suoli che presentano principalmente colore scuro. Generalmente, i suoli che appartengono a questa classificazione sono di origine vulcanica, e sono suoli tendenzialmente fertili, fatta eccezione per l'elevata ritenzione di fosforo. Per essere un Andisols, un suolo deve rispettare due set di requisiti:

- 1) Aludand: Densità apparente $< 0,9 \text{ gm}^{-3}$ (leggeri) o ritenzione fosfatica $> 85\%$ (suoli per niente fertili); $\text{Al} + 1/2 \text{ Fe}$ estraibili in ossalato di $\text{NH}_4 > 2\%$ (Allofane e Immogulite si sciolgono e rilasciano $\text{Al} + \text{Fe}$). Se il suolo corrisponde a questi requisiti si dice che ha proprietà endiche (intrinseche), altrimenti viene detto Vitrand,
- 2) Vitrand: Ritenzione fosfatica $> 25\%$, oltre il 60% di una finestra di suolo di 60 cm deve avere proprietà endiche.

L'Abaco descrive la composizione del Vitrand: se la % di vetro e $\text{Al} + 1/2 \text{ Fe}$ estraibili in ossalato di NH_4 sono oltre i valori della retta, il suolo ha proprietà endiche. Il suolo che diventerà Andisol sarà un suolo ricoperto dalle ceneri che vengono modificate dall'acqua e dalla CO_2 . Inoltre la CO_2 rilasciata dalle piante che nascono andrà a formare l' H_3CO_3 (acido carbonico), dalle piante deriva la sostanza organica da cui derivano le sostanze umiche (acidi) e tutti i processi di alterazione dati da acqua e acidi alterano il vetro (ceneri). I prodotti dell'alterazione vengono lisciviati finché la porosità del terreno diminuirà, a questo punto l'Al andrà a bloccare la sostanza organica formando acidi umici. Finita la sostanza organica l'Al si legherà al Si (silicio) formando Allofane e Immogulite e i suoli che rispondono ai set, ma non sono di origini vulcanica sono non-andic Andisol.

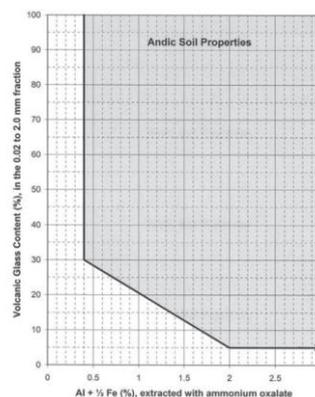


Figura 10 Grafico Abaco

La densità apparente è la densità di un solido considerando i vuoti che esso presenta; avere una bassa DA vuole dire che il suolo ha struttura, ovvero che sono presenti i cementi. La sostanza organica, le Allofane e le Immogulite hanno una superficie specifica molto elevata (1000-1200m²), a differenza di altri minerali argillosi (Caolinite 15-20 m²). Avere una elevata superficie specifica, vuol dire avere una superficie molto elevata con cui poter fare tantissimi legami. I legami portano alla formazione di una struttura stabile e ordinata, quindi presenta molti spazi vuoti (struttura senza cementi non presenta spazi vuoti). I suoli con densità apparente bassa, hanno capacità drenante elevata e fertile fisicamente.



Figura 11 Andisol

2.1.7 UMBRISOLS

Affinchè un orizzonte A sia Umbric deve avere una saturazione basica < 50% (CSCE occupata da H⁺ e Al³⁺) e deve avere uno spessore di 10 cm e suolo acido. Un suolo acido implica una vegetazione di conifere, un clima fresco e piovoso. Data la presenza di conifere l'orizzonte O sarà Oi e Oe. L'Umbric non è diagnostico per la USDA.

Gli Umbric si formano in suoli acidi dove prevalgono gli acidi fulvici. Siccome il suolo non è calcareo (mancano quindi CaCO₃) quindi i COOH deprotonano i minerali come Biotite, Pirosseni, Plagioclasti. Gli acidi fulvici andranno a legarsi con i materiali delle rocce (Al e Fe) formando il fulvato metallico che è solubile e idrofilo.



Figura 12 Orizzonte Umbric

2.1.8 SPODOSOLS

Gli Spodosols sono terreni che non vengono classificati per proprietà intrinseche, ma per orizzonte diagnostico. Possono essere formati da diverse sequenze di orizzonti: O-A-E-Bhs-Bc oppure O-E-Bhs-Bw-Bc, altrimenti O-E-Bhs. L'orizzonte diagnostico è il Bhs, lo Spodic e ha un colore scuro a differenza dell'orizzonte eluviale E che è bianco/grigio. Lo Spodic si forma con la podsolizzazione (processo di formazione ed evoluzione del suolo, consistente nel progressivo impoverimento degli orizzonti superficiali). Lo Spodosols è un suolo molto acido: uno dei motivi della forte acidificazione è il "Through fall", ovvero la pioggia che passa attraverso gli aghi delle conifere. Il suolo infatti non è calcareo, ma arenaceo e la vegetazione presente è composta da conifere; ogni ago è ricco di CO₂ grazie alla presenza di microrganismi i quali producono anche altri acidi organici solubili. Le conifere producono anche resine (con acidi galvici). Grazie a questi fattori l'acqua può raggiungere pH=3-4, una volta raggiunto il suolo, l'acqua dovrà attraversare l'orizzonte O. L'acqua così può raggiungere pH=2,8-3 e se sono presenti gli acidi fulvici l'orizzonte A è un Umbric, infatti fin tanto che ci sono gli acidi fulvici ci dovrà essere un suolo acido e quindi una vegetazione di conifere e conseguentemente un clima fresco. L'acqua acidificata va ad alterare i minerali in A (i minerali facilmente alterabili sono quelli scuri). Le sostanze alterate verranno liscivate verso Bhs, mentre la porzione di orizzonte alterato di A avrà formato un nuovo orizzonte bianco: l'orizzonte E (albik). L'alterazione di A aumenta anche la porosità del suolo portando a "lessivage". I funghi sono presenti in O perché se l'orizzonte A è un Umbric i cationi di scambio sono H⁺ e Al³⁺ e mancano P, N, Mg. Le piante in seguito ad apoptosi (guidata da ormoni) staccano gli aghi, prima però riassorbono il Mg (dalla clorofilla), N, P, però gli aghi che cadranno a terra avranno rapporti C/N, C/P, Ca/Mg per essere mineralizzati da microrganismi.

Il Bhs si forma quando la carica portata dall'acqua attacca con gli H⁺ i minerali, dissolvendoli. Dai minerali disciolti si ottengono diversi elementi tra cui Al³⁺, Fe²⁺, Mg²⁺, ma anche Na⁺ (dai plagioclasti) o Ca. Le piante assorbono questi elementi, ma dovranno competere con gli acidi fulvici perché hanno potere chelante, in quanto COOH è presente in alte concentrazioni. Gli acidi fulvici come visto acidificano le "Through fall" deprotonando i gruppi carbossilici e con COO⁻ andranno a chelare i cationi; i cationi chelati sono preferibilmente i cationi trivalenti mentre le piante e i microrganismi assorbono preferibilmente i bivalenti, quindi durante la discesa dell'acqua acidificata gli acidi fulvici si arricchiscono di cationi. Quando la molecola fulvo-metallica avrà i COO⁻ legati a metalli fino ad avere rapporto COO⁻/M⁺=1, sarà diventata insolubile e si staccherà dalla soluzione arricchendo così la porzione di suolo di molecole fulvo-metalliche formando il Bhs. Affinchè tutto ciò avvenga, il suolo deve essere ben drenato in modo che le reazioni che liberano i metalli dai minerali non siano in equilibrio: poiché liberati dovranno essere sempre disponibili. L'orizzonte Bhs ricco di fulvati metallici, avrà una struttura grumosa che diminuisce il drenaggio. Così si avranno due scomparti di suolo distinti dal punto di vista chimico: il primo scomparto sarà molto più acido, il secondo avrà concentrazione di CO₂ (quindi H₂CO₃) maggiore rispetto al primo perché viene trattenuta in maniera migliore (non ci sono scambi con l'atmosfera). In questo scomparto il pH=4,5 (in linea con le concentrazioni di CO₂), mentre nel primo scomparto il pH raggiunge valori fino a 2,8. Questo pH permette, anche se più lentamente, di alterare i minerali, infatti a questo valore di pH l'Al³⁺ viene ossidato a Al₂O₃. Al³⁺ è molto tossico, infatti nel primo scomparto dove sono presenti le radici, il 60-70% muoiono e vengono cambiate ogni anno.

La morte annuale delle radici arricchisce il suolo di sostanza organica (Carbonio organico). Nel secondo scomparto le radici riusciranno a sopravvivere più a lungo e l' Al_2O_3 si legherà alla silice ($\text{Si}(\text{OH})_4$), proveniente dalla reazione dei minerali, portando alla formazione di Allofane e Immogulite.

L'orizzonte Bhs è diagnostico quando sono presente proprietà spodiche per l'85% dell'orizzonte e sono:

- 1) ODOE > 0,25, 1:1 di suolo in soluzione di ossido d'ammonio, esaminando lo spettro fotonico e si guarda la quantità di luce sottratta; è indice di quantità della sostanza organica (acidi fulvici).
- 2) PH = < 5,9 (1:1)
- 3) Carbonio organico > 0,6%
- 4) $\text{Al} + 1/2\text{Fe}$ in ossido di ammonio > 0,5%; indica che in Bhs si stanno formando Allofane e Immogulite.



Figura 13 Orizzonte Spodic

2.1.10 CAMBISOL

Nel caso in cui l'orizzonte Bw cambic risulti diagnostico, il suolo è un cambisol, per la FAO mentre, per l'USDA è un inceptisol. Questo orizzonte non ha caratteristiche che lo contraddistinguono così marcatamente visibili. Ha origine da una roccia che ha appena iniziato a diventare suolo e le caratteristiche che lo identificano sono:

- 1) Presenza di struttura,
- 2) Colore giallastro-rossastro,
- 3) Una percentuale di minerali primari > 10% (non molto alterati),
- 4) Spessore > 15cm

Se al di sopra di Bw c'è un A ochric e $Bw < 15$ cm possiamo sommare A+Bw e se questo = 15cm, Bw è considerato diagnostico ed è considerato cambic. Bw è presente sul 60% circa della superficie terrestre. La classificazione è gerarchica, Bw è l'ultimo a essere preso in considerazione.



Figura 14 Orizzonte Cambic

CAPITOLO 3

FUNZIONE DI SERBATOIO DEL SUOLO E STOCCAGGIO DEL CARBONIO

Il cambiamento climatico è spesso considerato un fenomeno che riguarda l'atmosfera. Dopotutto, le piante traggono carbonio per i processi di fotosintesi proprio dall'atmosfera. Ma il carbonio presente nell'atmosfera influisce anche sul suolo, poiché il carbonio non utilizzato per la crescita delle piante in superficie passa nelle radici delle piante, le quali lo depositano all'interno del suolo. Se lasciato indisturbato, il carbonio si stabilizza e resta intrappolato nel suolo anche per migliaia di anni: un suolo in buona salute può dunque contribuire a mitigare il cambiamento climatico.

In termini di stoccaggio del carbonio, non tutti i suoli sono uguali: i suoli più ricchi di carbonio sono quelli composti da torba, diffusi soprattutto in Europa settentrionale, Regno Unito e Irlanda, ma anche i terreni a pascolo o prato sono in grado di stoccarne grandi quantità. Al contrario, i suoli delle aree calde e secche dell'Europa meridionale contengono meno carbonio.

Un ruolo importante durante la deposizione di carbonio, è ricoperto dalla temperatura degli ecosistemi: l'impatto della temperatura può indurre una maggiore crescita vegetale in una determinata area che si riflette in un'aumentata capacità di stoccaggio della materia organica. Però in ecosistemi in cui si assiste ad un aumento drastico della temperatura, si assiste anche ad un impoverimento del suolo e di conseguenza ad una capacità di stoccaggio ridotta, poiché vengono favoriti i processi di mineralizzazione e decomposizione.

Altro fattore importante è dato dal livello di ossigeno presente nelle acque dei suoli: se queste aree diventano più secche si assiste ad un progressivo deterioramento della materia organica, che rilascia CO₂ nell'atmosfera.

Se l'accumulo di CO₂ nell'atmosfera continua, può incrementare l'attività di alcune specie microbiche nel suolo, e di conseguenza può accelerare i processi di decomposizione della sostanza organica, con conseguente rilascio di anidride carbonica.

Oltre a questi fattori, un ruolo importante è ricoperto dalla gestione dei terreni e dei suoli: poiché le principali fonti di stoccaggio di carbonio sono le foreste, una scorretta gestione può portare ad un conseguente rilascio di anidride carbonica dal suolo (come ad esempio le pratiche di disboscamento incontrollato, oppure pratiche di allevamento intensivo). Per cui, per poter gestire al meglio le riserve di carbonio nel suolo è opportuno avere una buona gestione delle foreste. Ciò si rifletterà sulla temperatura degli ecosistemi, riducendo il cosiddetto "effetto serra".

CAPITOLO 3

INTRODUZIONE AL LAVORO DI TESI

IL lavoro che ho svolto si basa principalmente sullo studio di quattro articoli, selezionati utilizzando due database forniti da UNIVPM

- Scopus
- Web of science

CAPITOLO 4

ARTICOLI ACCADEMICI TRATTATI

Gli articoli che ho scelto trattano della presenza di sostanza organica e dello stoccaggio del carbonio in aree dell'America Latina, precisamente nell'Equador (l'ecosistema del Paramo), in Italia nelle Alpi (Monte Rosa), negli Appennini Centrali, in Abruzzo (parco della Majella) e in Spagna, nella regione della Leza Valley. Lo scopo finale del lavoro è stato comparare la quantità di materia organica e la capacità di conservare e di sequestrare il carbonio nei quattro ecosistemi analizzati, molto diversi tra loro.

CAPITOLO 6

AFFORESTATION AND GRAZING IN ANDEAN ENVIRONMENTS CANNOT BE GENERALIZED. (*Forests*, 29 December 2018.)

I cambiamenti nelle proprietà idro-fisiche e nel contenuto di SOM del suolo causati dal rimboschimento e dal pascolo nell'ecosistema delle Ande.

6.1. Introduzione

L'ecosistema delle Ande dell'Equador è caratterizzato da una grande varietà di specie e di ecosistemi, due di questi contraddistinguono questa zona: le foreste presenti in alta montagna e il paramo, un tipo di ecosistema esclusivo del Sud America. Questi ecosistemi sono strettamente correlati alle caratteristiche dei suoli: un alto contenuto di materia organica del suolo (SOM), bassa densità apparente (BD) ($<0,6 \text{ g cm}^{-3}$) e capacità di ritenzione idrica elevata. Le proprietà dell'ecosistema delle Ande hanno subito molteplici modificazioni lungo il corso dei secoli a causa delle attività dell'uomo, tra cui le principali sono l'attività del pascolo e il rimboschimento di pino. L'rimboschimento è stato utilizzato principalmente per due motivi: 1) come fonte di legna per la popolazione e 2) per la capacità di stoccaggio del Carbonio. Per questi motivi la maggior parte delle piantagioni di pino sono state impiantate su siti di importante valore idrologico ed ecologico per la popolazione. L'attività del pascolo negli ecosistemi montani delle Ande è una pratica molto antica e consiste sostanzialmente nella pratica dell'allevamento estensivo e intensivo (allevamento di bovini, cavalli e pecore). In alcuni casi il pascolo viene condotto direttamente nell'ecosistema naturale, dove il bestiame può ottenere foraggi più nutrienti.

Queste attività antropiche (pascolo e rimboschimento) hanno portato a cambiamenti significativi nelle proprietà idro-fisiche del suolo e nel contenuto di SOM. Nel caso del rimboschimento da pino, la variazione nelle proprietà idrologiche del terreno riguardano la tendenza a seccarsi a causa dell'elevata capacità di assorbimento d'acqua degli alberi, che favorisce la decomposizione della SOM e riduce la capacità di ritenzione idrica del suolo. Inoltre, l'attività delle radici degli alberi stessi ha causato un aumento della conducibilità idrica satura (Ksat) dei suoli

Per quanto riguarda il pascolo di bestiame, è stato dimostrato essere una causa di riduzione della BD e un incremento della SOM, il che potrebbe essere correlato all'intensità del pascolo.

Per tal motivo, l'obiettivo principale di questo lavoro è stato quello di valutare l'impatto del rimboschimento dei pini e del pascolo sulle proprietà idro-fisiche e sul contenuto di SOM degli orizzonti superficiali dei principali ecosistemi: l'alta montagna e il páramo.

6.2. Materiali e metodi

6.2.1. Area di studio

Lo studio è stato condotto nella provincia di Azuay, Ecuador meridionale, in un'area la cui elevazione varia tra 2705 e 3766 m sul livello del mare (s.l.m) (Figura 1). L'area è dominata da due ecosistemi: l'alta foresta montana e il páramo.

L'alta foresta montana è costituita da una grande varietà di vegetazione: le specie predominanti appartengono alle famiglie delle Solanacee, Melastomataceae, Rosaceae, delle Ericaceae, delle Chlorantaceae, delle Myrtaceae, delle Lauraceae e delle Podocarpaceae.

Il páramo comprende una vegetazione prevalentemente di tipo arbustivo come: Calamagrostis intermedia, Azorella pedunculata e Plantago rigida.

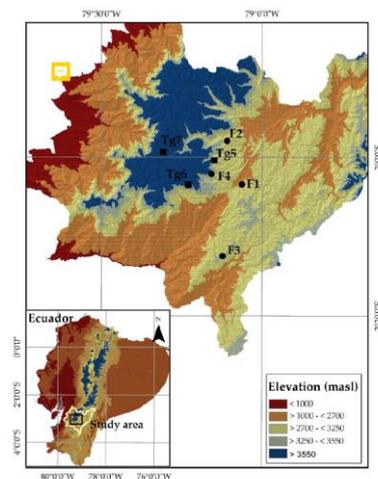


Figure 1. Study area and sampling sites in Azuay province, southern Ecuador. F = High montane forest; Tg = Páramo.

Il clima nell'area di studio è influenzato dal regime della costa del Pacifico e dalle correnti aeree atlantiche. La radiazione solare media annua varia da 11,35 a 14,5 MJ m⁻² d⁻¹, la temperatura media giornaliera varia da 12,5 a 6 °C e precipitazioni medie annue da 900 a 1600 mm ad altitudini tra 2600 e 4100 m s.l.m. Il regime climatico è bimodale con una stagione delle piogge da dicembre a gennaio e una stagione meno piovosa da agosto a settembre.

I suoli che caratterizzano questi ecosistemi delle Ande sono gli Andosol: la loro profondità varia da 0,12 a > 2 m. Essi sono noti per il loro orizzonte di superficie andico (Ah), caratterizzato da un basso valore di BD, elevata porosità, alta Ksat e un contenuto di SOM che può superare il 40%. Questo orizzonte si presenta di colore scuro, a causa della sua elevata capacità di ritenzione idrica, il che permette di controllare in una certa misura la capacità di regolazione dell'acqua.

Le principali attività antropiche effettuate in questi ecosistemi sono: (1) imboscamento di pino (*Pinus patula*) e (2) conversione a prato permanente (*Lolium perenne* L., *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov. e *Dactylis* sp.).

6.2.2. Selezione e implementazione dei siti di studio

Sette siti di studio (Figura 1) sono stati selezionati a tre zone di elevazione: (1) F1 e F2, situate al di sotto di 3250 m s.l.m., corrispondente all'ecosistema di alta foresta montana; (2) F3, F4 e Tg5, situate tra 3250 e 3550 m s.l.m. che rappresenta la zona di transizione tra foresta di alta montagna e il páramo; e (3) Tg6 e Tg7 situati sopra i 3550; m s.l.m. zona esclusiva del páramo. Le zone selezionate presentavano tutte attività antropiche prima citate ed erano dotate di una topografia simile. Per questi siti sono stati poi selezionate le zone in cui vi è stato identificato l'intervento dell'uomo

Le informazioni delle piantagioni di pini e delle aree di pascolo sono state raccolte attraverso visite sul campo e interviste ai proprietari terrieri e ne sono state registrate l'età delle piante e la pendenza del suolo. Per quanto riguarda l'attività del pascolo sono state registrate le attività di pre-lavorazione e lavorazione, la pendenza (SI) del terreno ed il carico animale

(riferito come unità di bovini adulti per ettaro, ABU Ha⁻¹). 17 grafici sono stati realizzati sulle 3 zone di elevazione: sono state riportate le coordinate geografiche e l' elevazione, la pendenza (SI) di ogni appezzamento, insieme alla densità e al numero di alberi per appezzamento (SD). Sono state calcolate ed analizzate alcune proprietà dendrometriche come il diametro all'altezza dalla base (DBH), l'altezza (Ht) e il diametro della chioma (CD) di ogni albero.

6.2.3. Caratterizzazione delle proprietà del suolo

Un campione di terreno (0,5 kg) è stato raccolto nello strato tra 0–10 e 10–25 cm per l'analisi fisica e chimica. In un secondo campionamento, le proprietà idro-fisiche del suolo e il contenuto di SOM sono state determinate negli strati tra 0–10 e 10–25 cm delle aree con copertura naturale indisturbata, insieme alle aree in cui era stato praticato il rimboscamento dei pini e l'attività del pascolo.

Durante le analisi, sono stati campionati solo gli strati superficiali compresi tra 0-10 e 10-25 cm, in quanto rappresentanti la zona con la più alta densità e influenza delle radici e delle attività di lavorazione del terreno. In ciascun strato superficiale di ogni copertura naturale indisturbata e in ciascun appezzamento di pascolo, due campioni di terreno indisturbato (prelevato tramite anelli di Kopecky di 100 cm³) sono stati raccolti in modo casuale insieme a un campione disturbato di 0,5 kg. Nel caso di terreni in cui vi erano stati piantati i pini, i campioni sono stati prelevati a una distanza di 75 e 150 cm dal tronco degli alberi. La scelta degli alberi è stata casuale con un numero di 3 alberi per zona campionata.

La K_{sat} è stata misurata con il metodo del foro della coclea invertita. Per evitare l'effetto della risalita di acqua sulla misurazione del terreno, è stato utilizzato un tubo di plastica a fondo chiuso inserito nei fori. Ciò ha consentito la misurazione e poi successivamente il calcolo della conduttività idraulica orizzontale satura di entrambi gli strati superficiali.

Il terreno può essere considerato isotropo, poiché presenta una bassa densità apparente, assumendo che la conducibilità idraulica satura verticale e orizzontale assumano valori simili.

6.2.4. Analisi di laboratorio

I campioni prelevati durante la fase di raccoglimento sono stati essiccati a temperatura ambiente ($<30^{\circ}C$) e setacciati con un setaccio da 2 mm. Successivamente, sono stati determinati il pH e il contenuto di SOM; il colore del suolo è stato determinato su campioni bagnati utilizzando la Tabella dei colori di Munsell. Il pH è stato misurato con un potenziometro su un terreno con rapporto 1: 2,5 di soluzione d'acqua distillata e il contenuto di SOM è stato determinato mediante riscaldamento del terreno a $410^{\circ}C$ per 16 ore. La BD e la capacità di ritenzione idrica sono stati determinati e sono stati riportati come valori di pF (o logaritmi delle prevalenze negative): a pF 0 (punto di saturazione; pressione 1 cm H_2O), pF 0,5 (pressione 3,1 cm H_2O), pF 1,5 (31 cm H_2O) e pF 2,52 (capacità di campo; pressione 330 cm H_2O). Per la misurazione dell'acqua è stato utilizzato il terreno setacciato al di sotto della capacità di ritenzione, quindi a pF 3,4 (2509 cm H_2O) e pF 4,2 (punto di appassimento; 15300 cm H_2O). Il contenuto d'acqua gravimetrico è stato trasformato in contenuto volumetrico. L'acqua gravitazionale (GW) e l'acqua disponibile per le piante (AW) sono state calcolate come differenza tra il contenuto di acqua del suolo a pF 0 e pF 2,52 e a pF 2,52 e pF 4,2, rispettivamente. BD e pF alla saturazione sono stati considerati come prioritarie per la compattazione del suolo.

6.3 Risultati

6.3.1 Descrizione generale dei siti sperimentali

Nella descrizione delle aree analizzate sono stati individuati e suddivisi i seguenti siti, in base alle attività antropiche praticate. Per distinguerle, è stata usata la seguente dicitura, facente riferimento alle aree soggette alle attività umane:

- Pi, per indicare i siti in cui l'attività antropica era stato l'imboschimento da pino,
- G, per indicare i siti in cui la pratica antropica era stato il pascolo.

per cui i 7 siti individuati che sono stati elencati precedentemente, sono stati riportati come segue:

- F1Pi, F2Pi, F3Pi, F4Pi, Tg5Pi, Tg6Pi, Tg7Pi
- F1G, F2G, F3G, F4G, Tg5G, Tg6G, Tg7G

Per ciascun sito, sono state analizzate la copertura naturale, intesa come le principali specie arboree rintracciabili nell'area individuata, e la pendenza dei suoli. Successivamente, sono state valutate le proprietà dendrometriche sui pini, per vedere come potesse variare la crescita degli alberi di pino nelle diverse zone di studio. Sorprendentemente, è stata riscontrata una crescita minore nei siti esclusivi del paramo (Tg5Pi – Tg7Pi).

Successivamente, é stata valutata l'intensità e la gestione del pascolo di bestiame: é risultato rilevante il pascolo di bestiame principalmente nelle zone F1G, F2G, F3G, Tg6G e Tg7G, mentre per Tg5G non é stato così, in quanto il pascolo fu condotto in copertura naturale, vale a dire senza l'intervento dell'uomo sulle piantagioni preesistenti (per tal motivo il sito Tg5G é stato indicato come Tg5G*). le rispettive analisi sui suddetti terreni sono riportate nelle tabelle 1 e 2.

Table 1. General description and median values of the dendrometric variables in the pine plantations (Azuay province, southern Ecuador).

Elevation Range (m a.s.l.)	Code	Elevation (m a.s.l.)	Previous Land-Use	SI (%)	Age (years)	SD (# of trees/plot)	DBH (cm)	Ht (m)	CD (m)	Management
<3250	F1Pi	2770	Native forest	43	29	34	25.6	19.4	5.1	Without management
	F2Pi	3260	Native forest	20	18	40	20.2	11.3	5.2	Without management
>3250-<3550	F3Pi	3359	Tussock grass subjected to equine grazing	12	17	49	18.4	8.8	5.15	Pruning
	F4Pi	3408	Tussock grasses subjected to bovine grazing	16	16	41	23.1	9.2	5	Pruning
	Tg5Pi	3485	Soils under extensive bovine grazing in burnt tussock grasses pasture.	34	21	47	16.8	8.3	3.88	Without management
>3550	Tg6Pi	3692	Tussock grass	22	19	33	8.75	4.45	1.58	Pruning
	Tg7Pi	3724	Compacted and eroded soil due to bovine grazing in burnt tussock grass	20	17.5	30	11.99	5	2.99	Without management

Legend: FxPi = pine plantation in high montane forest; TgxPi = pine plantation in the páramo; where x = 1-7 indicates sites 1-7; SI = slope; SD = number of trees per 576 m² plot; DBH = diameter at breast height; Ht = tree height; CD = canopy diameter.

Table 2. General description of the grazing sites.

Elevation Range (m a.s.l.)	Code	Elevation (m a.s.l.)	Previous Use	Pre-Tilling and Tilling Activities	Grassland Age (years)	Grass	Animal Load (ABU Ha ⁻¹)
<3250	F1G	2836	Native forest	Preparation through ploughing, liming, and organic fertilization	>10	<i>Pennisetum clandestinum</i>	1
	F2G	3211	Native forest	Preparation through plowing, organic and inorganic fertilization, and pastures irrigation and rotation	>10	<i>Dactylis sp.</i> , <i>Trifolium sp.</i> and <i>Lolium sp.</i>	2
>3250-<3550	F3G	3330	Native forest	Forest logging and burning, solid preparation was made using plowing discs	3	<i>Dactylis sp.</i> and <i>Pennisetum clandestinum</i>	1
	Tg5G*	3477	Tussock grass	Tussock grass burn	<3	<i>Calamagrostis intermedia</i>	<0.2
>3550	Tg6G	3628	Tussock grass	Vegetable cover cleaning, soil preparation through plowing and poultry fertilization	5	<i>Lolium sp.</i>	0.5
	Tg7G	3755	Tussock grass	Ground preparation through harrow and adding of vegetal material into the soil	7	<i>Lolium sp.</i> and <i>Dactylis sp.</i>	0.4

Legend: FG = Grazing in high montane forest; TgG = Grazing in the páramo; TgG* = Tussock grass altered by burning and grazing; ABU Ha⁻¹ = Adult bovine unit per Ha and per year.

6.3.2. Proprietà del suolo in siti di copertura naturali "indisturbati"

I suoli dei siti analizzati, in cui non sono avvenute le attività antropiche precedentemente citata (per cui potremmo identificarli come suoli "indisturbati") sono stati identificati come Andosols, in particolar modo i siti F2 – Tg7, mentre il sito F1 è stato identificato come Cambisol (Tabella 3).

Table 3. Morphological characteristics of the superficial horizons of the soils in the natural undisturbed land cover areas (F = High montane forest; Tg = Páramo).

Elevation Range (m a.s.l.)	Site Code	Type of Horizon ^a	Horizon Thickness (cm)	Number of Roots by dm ⁻²	pH	SOM ^b (%)	Structure ^c	Texture ^d
<3250	F1	A	36-50	11-33	4.58-5.64	7.09-14.75	B-Gr	Fac-FacAr
	F2	Ah	34-106	30-200	4.89-5.72	17.08-39.63	B-Gr	F
>3250-<3550	F3	Ah	44-82	10-40	5.05-5.23	13.53-16.11	Gr-B	F-Fac
	F4	Ah	50-57	32-64	5.06-5.19	19.58-29.85	Gr	Fac
	Tg5	Ah	38-45	50-100	5.69-6.32	20.98-37.50	Gr-B	FL-F
>3550	Tg6	Ah	28-55.5	84->200	5.00-5.49	40.15-42.49	Gr	Fac-FL
	Tg7	Ah	20-38	30-110	5.08-5.82	11.38-23.71	Gr	F-FL

Legend: ^a A = Follic horizon; Ah = Andic horizon; ^b SOM = Soil organic matter content; ^c Gr = Granular; B = Block; ^d F = Silt; FL = Loamy silt; Fac = Loamy clay; FacAr = Loamy clay sand.

Da come si evince nella Tabella, per ciascuna zona e di conseguenza per ciascun orizzonte del suolo individuato, sono state calcolate le seguenti proprietà:

- Spessore dell'orizzonte: il volume e lo spessore di ciascun orizzonte è stato analizzato. I risultati hanno mostrato che lo spessore maggiore si riscontrava in campioni provenienti dai siti F2 e F3, suggerendo che l'orizzonte Andosol ritrovato nei siti di alta montagna abbia uno spessore maggiore rispetto agli Andosol del paramo.
- Numero di radici degli alberi (espresso come numero di radici/dm²): è stata calcolata la densità delle radici degli alberi per area campionata, suggerendo una maggior capacità nutritiva del suolo.
- pH: è stato calcolato il pH di ogni orizzonte, per comprendere il grado di acidità/alcalinità di ogni sito.
- Quantità di sostanza organica del suolo (SOM, espressa in percentuale).
- Struttura.
- Tessitura del suolo.

Dalla Tabella appare evidente come i siti campionati che si trovano ad altezza < 3250 m (in cui vi è il sito F1 con orizzonte Cambisol) appaiano con un volume medio maggiore e un numero di radici medio paragonabile agli altri siti, ma dal punto di vista chimico-fisico, gli orizzonti variano nettamente. Infatti, i siti F1 e F2 registrano tendenze di pH del terreno più acide e quantitativi di SOM (in %) nettamente inferiori agli altri siti (in particolare il sito F1, classificato come Cambisol). Gli altri siti, classificati come Andosol, rispettivamente ad altezze maggiori rispetto, mostrano tendenze lievemente meno acide del suolo, un quantitativo di SOM% più alto. Questi risultati sono ragionevoli se osservati paragonando la densità delle radici nel suolo.

Per lo studio e la comprensione delle proprietà idro-fisiche del suolo si faccia riferimento alla Tabella 4, in cui i risultati sono stati riportati eseguendo il test di correlazione di Spearman.

Table 4. Spearman correlation coefficients (ρ) between elevation and the hydro-physical properties and SOM content of the soil layer at 0–10 cm and 10–25 cm in the undisturbed natural cover areas.

Properties (0–10 cm)	ρ	Properties (10–25 cm)	ρ
K _{sat} 1 (cm h ⁻¹)	-0.74 *	K _{sat} 2 (cm h ⁻¹)	-0.66 *
BD 1 (g cm ⁻³)	-0.29 *	BD 2 (g cm ⁻³)	-0.15
0pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.68 *	0pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.34 *
0.5pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.66 *	0.5pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.33 *
1.5pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.71 *	1.5pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.28 *
2.52pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.70 *	2.52pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.23
3.4pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.08	3.4pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	-0.19
4.2pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.04	4.2pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	-0.11
GW 1 (cm ³ cm ⁻³)	-0.27 *	GW 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.11
AW 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.73 *	AW 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.37 *
SOM 1 (%)	0.32 *	SOM 2 (%)	0.20

Legend: K_{sat} = saturated hydraulic conductivity; BD = bulk density; 0–4.2 pF = water retention capacity at pF 0 to pF 4.2; GW = gravitational water; AW = available water; SOM = soil organic matter content; 1 = 0–10 cm depth; 2 = 10–25 cm depth; * = significant correlations ($p < 0.05$).

6.3.3 Cambiamenti nel contenuto idro-fisico e di SOM nell'rimboschimento di pino

Le proprietà trovate in ciascuno dei siti analizzati negli strati di suolo tra 0-10 e 10-25 cm sono rappresentati nell'appendice A, nella Tabella A2 (piantagione di pini) e nella tabella A3 (pascolo). Secondo il test U di Mann-Whitney ($p < 0,05$), le proprietà nelle piantagioni di pini nello strato di 0-10 cm erano significativamente diverse dalle caratteristiche misurate nello strato di terreno di 10-25 cm dello stesso terreno. Pertanto, gli impatti dell'imboschimento dei pini sono stati valutati considerando entrambe le profondità. D'altra parte, non vi sono state

differenze significative ($p > 0,05$) nelle proprietà tra le distanze di campionamento (75 e 150 cm) dagli alberi in ciascuna delle piantagioni di pini (Tabella A4).

Il rimboschimento da pino ha prodotto cambiamenti significativi nelle proprietà idro-fisiche e nel contenuto di SOM in entrambi i livelli, come illustrato in Figura 2 e nell'appendice A, Tabella A2. La Ksat della parte superiore del terreno nelle piantagioni presenti in F1Pi e F3Pi è stata misurata (rispettivamente 61,72% e 79,06%). Nelle piantagioni di páramo, il valore di Ksat è aumentato significativamente in due delle tre piantagioni (Tg5Pi e Tg6Pi) rispettivamente del 25,23% e del 59,22% (Figura 2a). Il valore di BD non ha mostrato cambiamenti significativi nella maggior parte dei siti ad eccezione di F3Pi che è aumentato significativamente del 18,42% (Figura 2b). Come ulteriormente descritto nella Figura 2c, la capacità di ritenzione dell'acqua a saturazione (pF 0) nello strato superiore è diminuita significativamente nell'F1Pi, F3Pi, nei siti Tg6Pi e Tg7Pi, con una riduzione tra il 2,53% e l'11,10%, mentre in F2Pi il contenuto idrico alla saturazione è aumentato significativamente del 6,30% (Figura 2c). La tendenza mutevole nella capacità di ritenzione idrica nell'intervallo pF da 0,5 a 2,52 (Figura 2d-f) era simile alla variazione della capacità di ritenzione dell'acqua a pF 0 nella maggior parte delle piantagioni, sostenendo in conclusione che l'imboschimento del pino ha portato a cambiamenti significativi nelle proprietà idro-fisiche del suolo. La capacità di ritenzione idrica a pF 3.4 e pF 4.2 (Figura 2g, h) è diminuita significativamente tra il 12,21% e il 27,52% negli F1Pi, F4Pi e Siti Tg6Pi, ma in modo diverso nel sito del Tg7Pi dove l'aumento è stato significativo, variando tra il 15,54% e il 44,31%. La GW in F4Pi, Tg5Pi e Tg6Pi è aumentata in modo significativo (13,15%-39,37%) (Figura 2i), mentre l'AW è notevolmente aumentata in F3Pi e Tg7Pi, con un aumento compreso tra il 42,50% e 57,64% (figura 2j). Il contenuto SOM in F1Pi, F2Pi e F3Pi è diminuito considerevolmente, del 28,97%, del 29,00% e il 47,90% (Figura 2k); mentre nel Tg7Pi il contenuto SOM è stato significativamente ridotto del 77,62%. La Ksat è aumentata significativamente nello strato di 10-25 cm nei siti F1Pi, F2Pi, Tg5Pi e Tg6Pi rispettivamente dell'84,64%, del 30,28%, del 305,24% e del 140%; mentre in F3Pi la Ksat è stata significativamente ridotta del 52,98% (Figura 2a). Un notevole aumento della BD si è riscontrato in F3Pi (9,81%), a differenza del Tg7Pi dove è avuto una significativa riduzione del 2,47% (Figura 2b). Per quanto riguarda la capacità di ritenzione idrica a saturazione, F1Pi è diminuita significativamente del 10,62%, in contrasto con F2Pi e Tg7Pi dove c'è stata un significativo incremento rispettivamente del 9,60% e del 6,32% (Figura 2c). Risultati simili sono stati ottenuti per capacità di ritenzione idrica in pF da 0,5 a pF 1,5 (figura 2d,e). La ritenzione idrica a capacità sul campo diminuiva significativamente in F1Pi, F3Pi e Tg6Pi rispettivamente del 18,92%, 5,68% e 2,2%, mentre è aumentato significativamente a F2Pi del 9,06% (Figura 2f). Le capacità di ritenzione a valori di pF 3.4 e 4.2 sono diminuite significativamente tra il 2,62% e il 30,35% nei siti F1Pi e F4Pi (Figura 2g,h); che sono aumentati significativamente tra il 3,90 e il 25,56% sul sito Tg7Pi. Il GW non ha mostrato cambiamenti significativi nelle piantagioni. L'AW nelle piantagioni F2Pi e F4Pi ha presentato un aumento significativo del 51,55% e 79%. I contenuti SOM in F1Pi, F2Pi e F3Pi sono diminuiti considerevolmente del 55,50%, 9,32% e 23,50%, rispettivamente, a differenza del Tg7Pi dove si è registrato un aumento significativo del 77,62% (Figura 2k). L'analisi di correlazione ha rivelato che Ksat negli strati di 0-10 cm e 10-25 cm presenta forti correlazioni con le variabili di sviluppo degli alberi DBH, Ht e CD, e vi è chiaramente un aumento Ksat con aumento dell'altezza dell'albero. Allo stesso modo, il BD in entrambi gli strati è stato anche positivamente correlato con le variabili di sviluppo

degli alberi ($\rho \geq 0,31$, $p < 0,05$). Vale a dire, con un aumento di crescita degli alberi, c'è un incremento significativo nel BD del suolo. D'altra parte, la capacità di ritenzione idrica e i

contenuti SOM sono negativamente correlati con le variabili di sviluppo degli alberi ($\rho \geq 0,31$, $p < 0,05$). Cioè, in entrambi gli strati del suolo (0-10 e 10-25 cm), la capacità di ritenzione idrica e il contenuto di SOM diminuiscono significativamente con lo sviluppo degli alberi.

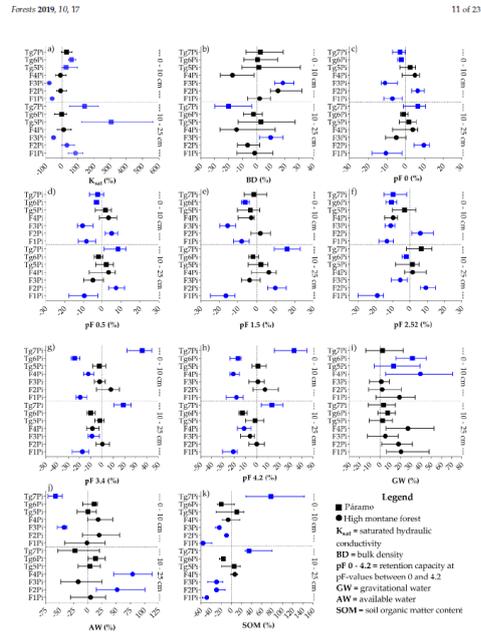


Figure 2. Forest and páramo plots showing the percentage change in hydro-physical properties and SOM content (increase or decrease) of the soils' surface horizons (0-10 and 10-25 cm) due to pine afforestation. Site codes: F1P1 = pine plantation in the high montane forest; Tg1P1 = pine plantation in páramo. Blue-colored lines represent a significant change ($p < 0.05$) and black-colored lines represent a non-significant change ($p > 0.05$) in the variable.

6.3.4 Cambiamenti nel contenuto idrofisico e SOM sotto il pascolo

Il test Mann-Whitney U ($p < 0.05$) ha rivelato cambiamenti significativi nella proprietà sotto pascolo, che si è riflessa principalmente nella Ksat e nella capacità di ritenzione idrica (Appendice A: Tabella A3). C'è stato un maggior numero di siti con cambiamenti significativi nello studio delle proprietà idro-fisiche del suolo nello strato superficiale di 0-10 cm, rispetto allo strato del suolo di 10-25 cm (Figura 3). Nello strato superiore, la Ksat è diminuita significativamente nei siti F1G e Tg5G * del 68,87% e del 75,75%, rispettivamente, mentre c'è stato un aumento significativo del 55,19% nel Tg6G (Figura 3a). Per quanto riguarda il BD nell'F2G e nell'F3G si è registrato un aumento significativo del 64,29% e del 28,25% (Figura 3b). La capacità di ritenzione idrica a saturazione in F3G e Tg6G è diminuita significativamente rispettivamente del 10,10% e del 5,18%, mentre è aumentata significativamente dell'8,97% nel Tg5G * (Figura 3c). I cambiamenti nella capacità di ritenzione idrica a pF 0,5 e pF 1,5 erano simili a quelli di pF 0 (figura 3d,e). Capacità di ritenzione idrica a pF 2,52 in calo significativamente nei siti F3G, Tg6G e Tg7G rispettivamente del 13,11%, dell'8,61% e del 9,77%. D'altro canto, si è avuto un incremento significativo del 10,46% a F2G (figura 3f). La ritenzione idrica capacità a pF 3,4 è aumentata significativamente nei siti F2G, Tg5G * e Tg7G del 17,38%, del 6,15% e 20,46%, rispettivamente. Al contrario, la ritenzione idrica a capacità sul campo è diminuita del 7,36% in F3G. Le variazioni della ritenzione idrica nel punto di appassimento (pF 4.2) sono state simili a quelle di pF 3.4 (figura 3g,h). Cambiamenti in GW (Figura 3i) sono stati notati nel Tg6G e Tg7G, con un incremento rispettivamente del 10,59% e del 36,12%. L'AW (Figura 3j) e il SOM contenuto (figura 3k) non ha mostrato cambiamenti significativi nella maggior parte

dei siti di studio, ad eccezione del contenuto di SOM nel sito F3G dove si è avuto una significativa riduzione del 30,47%. Nello strato del suolo di 10-25 cm, Ksat è diminuito significativamente del 71,01% nel sito F1G, del 1120,09% F3G, del 121,28% nel Tg6G e del 61,35% nel sito del Tg7G (Figura 3a). La BD non ha mostrato variazioni nei siti di pascolo, ad eccezione del Tg7G dove è diminuito significativamente. La capacità di ritenzione idrica a pF 0 è aumentata significativamente del 10,71%, del 4,67% e del 9,57% in F2G, Tg5G * e Tg7G (Figura 3c). In questi siti, le tendenze seguite dai cambiamenti nella ritenzione idrica a capacità a pF 0,5 e pF 1,5 erano simili a quelle di pF 0 (figura 3d,e). A pF 2,52, la ritenzione idrica a capacità produttiva a F2G e Tg5G * è aumentata significativamente del 19,17% e del 5,92% (figura 3f). La capacità di ritenzione idrica a pF 3,4 è aumentata significativamente del 12,92% nel sito F2G, a differenza di F3G, dove è stata riscontrata una significativa riduzione del 13,78% (figura 3g). La maggior parte dei siti non ha mostrato modifiche significative di capacità di ritenzione idrica nel punto di appassimento, ad eccezione dell'F3G, dove si è del 12,06% (figura 3h). Infine, GW, AW e il contenuto SOM non hanno mostrato cambiamenti significativi nei siti di studio (Figura 3i-k).

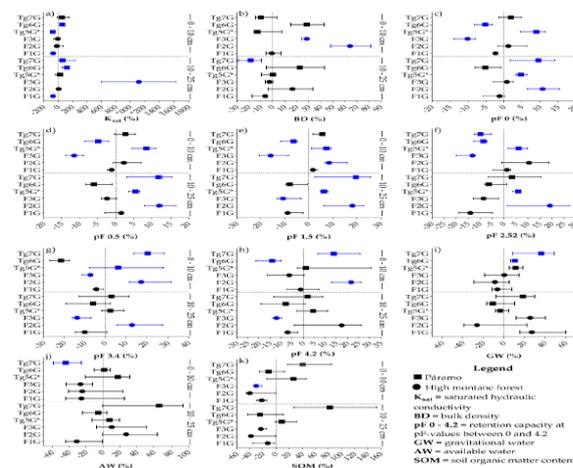


Figure 3. Forest and páramo plots showing the percentage change in the hydro-physical properties and SOM content (increase or decrease) of the soil's surface horizons (0-10 and 10-25 cm) due to grazing. Site codes: FG = grazing in high montane forest; TgG = grazing in the páramo; TgG * = grazing in tussock grass subject to burning. Blue-colored lines represent a significant change ($p < 0.05$) and black-colored lines represent a non-significant change ($p > 0.05$) in the variable.

6.4 Conclusioni

Gli Andosols con il loro orizzonte andico nero sono i suoli predominanti nell'ecosistema montano Andino. La ricerca ha rivelato chiaramente che questo orizzonte, con un'elevata capacità di ritenzione idrica e contenuto di SOM, non è così uniforme. Differenze nelle proprietà idro-fisiche, come la Ksat e la capacità di ritenzione idrica, sono legate al tipo di ecosistema e all'elevazione del terreno. Le differenze nelle proprietà non si verificano solo tra i siti, ma anche all'interno dei siti a diverse profondità di campionamento. Di conseguenza, valori più elevati di Ksat, capacità di ritenzione idrica e SOM contenute sono state registrate nello strato superficiale di 0-10 cm. Le condizioni naturali di variabilità spaziale e di eterogeneità accompagnata nelle proprietà del suolo richiede che per la corretta valutazione dell'impatto del cambiamento dell'uso del suolo, i dati vengono

raccolti sui siti vicini comparabili, inalterati e alterati. Inoltre, la moltitudine di osservazioni e le loro analisi hanno chiaramente rivelato che l'impatto dell'uso del suolo sulle proprietà idro-fisiche non è unico e spesso mascherato da altri fattori quali l'uso antecedente del suolo, la variabilità spaziale, le attività di pre-lavorazione e lavorazione, la consistenza del suolo, l'elevazione e il clima, tra gli altri fattori specifici del sito. A causa di queste differenze, è piuttosto difficile valutare l'impatto delle piantagioni di pini e del pascolo sulle proprietà su scala regionale, e quindi qualsiasi valutazione dell'impatto delle attività antropogeniche deve essere effettuata in siti adiacenti, che garantirebbe condizioni geomorfologiche e climatiche simili. Lo studio ha inoltre rivelato che l'imboschimento del pino influisce in modo positivo o negativo sulla Ksat, la capacità di ritenzione idrica nell'intervallo da pF 0 a 2,52 e il contenuto di SOM della superficie del suolo. Allo stesso modo il pascolo provoca cambiamenti positivi e negativi in Ksat e nella capacità di ritenzione idrica, e come nelle piantagioni di pini, i cambiamenti registrati variano a seconda della profondità di campionamento. Altri fattori di controllo che definiscono l'impatto del pascolo sono l'attività di pre-lavorazione e lavorazione in combinazione con la densità del bestiame. L'eterogeneità spaziale del suolo e la diversità nei fattori locali complicano l'interpretazione e l'estrapolazione dei fenomeni osservati negli ecosistemi montani delle Ande su scala regionale. La corretta valutazione dell'impatto del cambiamento dell'uso del suolo non è solo di importanza cruciale per estrapolare i risultati, ma funge anche da base per una stima accurata degli impatti socio-economici ed ecologici antropogenici che potrebbero avere sulla regolazione dell'acqua e sulle funzionalità di stoccaggio dell'acqua dei suoli delle Ande.

Appendix A Appendix

Table A1. Median and the 25th and 75th percentile of the hydro-physical properties and SOM content of the soil in the undisturbed natural cover areas (Azuzay province, southern Ecuador).

Properties	<3250 m a.s.l.			>3250–3350 m a.s.l.			>3350 m a.s.l.	
	F1	F2	F3	F4	Tg5	Tg6	Tg7	
0–10 cm soil layer								
K _{sat} (cm h ⁻¹)	12.91 (9.34–20.55) Aa	4.92 (3.34–7.10) Aab	17.30 (12.70–19.18) Aa	7.26 (5.62–13.08) Aab	3.33 (2.47–4.12) Aab	1.38 (1.29–1.49) Ab	1.92 (1.65–2.82) Ab	
BD (g cm ⁻³)	0.97 (0.95–1.00) Ba	0.38 (0.34–0.55) Ab	0.72 (0.67–0.78) Bab	0.67 (0.56–0.78) Aab	0.51 (0.43–0.64) Aab	0.32 (0.29–0.36) Bb	0.60 (0.59–0.63) Bab	
0 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.65 (0.63–0.66) Ab	0.71 (0.67–0.75) Ab	0.70 (0.68–0.71) Ab	0.72 (0.67–0.76) Aab	0.75 (0.70–0.79) Aab	0.87 (0.85–0.90) Aa	0.73 (0.72–0.75) Aab	
0.5 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.64 (0.58–0.66) Ab	0.69 (0.66–0.72) Ab	0.69 (0.67–0.70) Aab	0.70 (0.67–0.76) Aab	0.75 (0.70–0.79) Aab	0.85 (0.83–0.89) Aa	0.72 (0.71–0.73) Aab	
1.5 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.54 (0.52–0.56) Ab	0.60 (0.57–0.64) Ab	0.60 (0.57–0.61) Ab	0.65 (0.59–0.71) Aab	0.73 (0.68–0.77) Aa	0.81 (0.77–0.85) Aa	0.66 (0.64–0.69) Aab	
2.52 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.47 (0.46–0.49) Ab	0.49 (0.46–0.52) Ab	0.46 (0.45–0.47) Ab	0.60 (0.50–0.62) Aab	0.64 (0.60–0.66) Aa	0.69 (0.66–0.72) Aa	0.58 (0.55–0.59) Aab	
3.4 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.46 (0.43–0.46) Aab	0.40 (0.39–0.43) Bab	0.37 (0.36–0.38) Ab	0.49 (0.48–0.53) Aa	0.47 (0.46–0.48) Aab	0.55 (0.48–0.57) Aa	0.35 (0.30–0.39) Ab	
4.2 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.40 (0.34–0.44) Aab	0.36 (0.34–0.40) Bab	0.33 (0.32–0.35) Ab	0.47 (0.43–0.48) Aa	0.42 (0.40–0.45) Aab	0.48 (0.46–0.55) Aa	0.35 (0.26–0.35) Ab	
GW (cm ³ cm ⁻³)	0.17 (0.13–0.18) Aab	0.21 (0.18–0.25) Aa	0.24 (0.22–0.27) Aa	0.14 (0.13–0.18) Aab	0.11 (0.11–0.12) Ab	0.18 (0.18–0.19) Aab	0.17 (0.14–0.18) Aab	
AW (cm ³ cm ⁻³)	0.08 (0.04–0.13) Ab	0.11 (0.08–0.15) Ab	0.12 (0.11–0.14) Aab	0.14 (0.07–0.15) Aab	0.20 (0.17–0.25) Aab	0.21 (0.16–0.25) Aab	0.25 (0.22–0.30) Aa	
SOM (%)	10.16 (8.24–11.57) Ab	33.69 (31.06–37.66) Aa	15.36 (13.92–17.38) Aab	25.83 (20.64–31.61) Aab	20.57 (16.75–29.95) Aab	41.15 (29.49–47.22) Aa	15.47 (14.95–18.44) Aab	
10–25 cm soil layer								
K _{sat} (cm h ⁻¹)	2.98 (1.93–4.62) Ba	1.59 (0.92–2.07) Bab	1.84 (1.80–2.62) Bab	1.44 (1.20–2.46) Bab	0.17 (0.15–0.18) Bc	0.30 (0.29–0.31) Bbc	0.37 (0.34–0.46) Bbc	
BD (g cm ⁻³)	1.18 (1.06–1.25) Aa	0.50 (0.41–0.58) Ab	0.92 (0.91–0.96) Aa	0.72 (0.68–0.80) Aab	0.56 (0.51–0.78) Aab	0.43 (0.35–0.44) Ab	0.88 (0.77–0.94) Aa	
0 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.60 (0.57–0.62) Bb	0.68 (0.64–0.70) Aab	0.62 (0.60–0.62) Bb	0.70 (0.67–0.73) Aab	0.74 (0.69–0.77) Aa	0.82 (0.81–0.84) Ba	0.63 (0.60–0.67) Ab	
0.5 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.58 (0.56–0.60) Ab	0.67 (0.63–0.69) Aab	0.61 (0.59–0.61) Bb	0.70 (0.66–0.73) Aab	0.73 (0.68–0.76) Aa	0.82 (0.81–0.84) Aa	0.61 (0.58–0.64) Bb	
1.5 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.54 (0.49–0.57) Ab	0.59 (0.57–0.64) Aab	0.52 (0.51–0.53) Bb	0.64 (0.62–0.67) Aab	0.71 (0.65–0.74) Aa	0.76 (0.77–0.81) Aa	0.53 (0.51–0.59) Bb	
2.52 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.49 (0.46–0.54) Aab	0.52 (0.50–0.57) Aab	0.41 (0.39–0.43) Bb	0.57 (0.56–0.64) Aab	0.63 (0.58–0.66) Aa	0.67 (0.66–0.68) Aa	0.46 (0.41–0.50) Bb	
3.4 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.45 (0.44–0.49) Aab	0.47 (0.44–0.51) Aab	0.40 (0.37–0.40) Aab	0.54 (0.48–0.56) Aa	0.48 (0.46–0.52) Aab	0.51 (0.31–0.57) Aab	0.38 (0.34–0.43) Ab	
4.2 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.41 (0.35–0.42) Aa	0.41 (0.40–0.46) Aa	0.35 (0.33–0.37) Aa	0.46 (0.43–0.53) Aa	0.43 (0.38–0.47) Aa	0.48 (0.26–0.51) Aa	0.36 (0.31–0.39) Aa	
GW (cm ³ cm ⁻³)	0.12 (0.06–0.16) Aab	0.14 (0.11–0.17) Bab	0.20 (0.18–0.22) Ba	0.10 (0.08–0.17) Ab	0.11 (0.10–0.12) Ab	0.15 (0.13–0.16) Bab	0.17 (0.14–0.20) Aab	
AW (cm ³ cm ⁻³)	0.06 (0.06–0.08) Ab	0.11 (0.08–0.15) Aab	0.06 (0.04–0.09) Bb	0.10 (0.06–0.14) Aab	0.20 (0.16–0.22) Aa	0.21 (0.13–0.42) Aa	0.09 (0.07–0.13) Bab	
SOM (%)	8.00 (6.14–8.36) Ab	28.73 (26.64–31.39) Ba	13.19 (11.35–14.39) Aab	18.98 (18.30–22.45) Aab	19.02 (11.45–22.50) Aab	36.65 (25.19–43.98) Aa	8.83 (8.22–10.93) Bb	

F = high montane forest; Tg = páramo; K_{sat} = saturated hydraulic conductivity; BD = bulk density; 0–4.2 pF = retention capacity at pF-values between 0 and 4.2; GW = gravitational water; AW = available water; SOM = soil organic matter content. The letters accompanying each property value represent the results of statistical comparisons. By properties: (1) different capital letters represent the significant differences (p < 0.05) between the two depths in each study site (i.e., 0–10 cm versus 10–25 cm), (2) different lower-case letters represent significant differences (p < 0.05) between sites at the same depth, (3) combinations of lower-case letters represent intermediate groups between two ranges. Letter denotation order was used from highest to the lowest value.

Table A2. Median and the 25th and 75th percentile of the hydro-physical properties and SOM content of the soil in the high montane forest and páramo converted to pine plantation (F = high montane forest; Tg = páramo).

Properties	<3250 m a.s.l.			>3250–<3550 m a.s.l.			>3550 m a.s.l.		
	F1Pi	F2Pi	F3Pi	F4Pi	Tg5Pi	Tg6Pi	Tg7Pi	Tg8Pi	Tg9Pi
<i>K_{sat}</i> (cm h ⁻¹)	4.94 (4.32–6.41) A↓	4.52 (3.25–6.22) A	3.62 (2.99–4.30) A↓	6.59 (4.45–9.06) A	4.17 (3.38–6.53) A↑	2.19 (1.92–2.55) A↑	2.46 (1.85–3.14) A	0.62 (0.55–0.71) B	0.71 (0.68–0.73) A↓
BD (g cm ⁻³)	0.99 (0.91–1.07) B	0.44 (0.42–0.50) A	0.86 (0.81–0.91) B†	0.55 (0.50–0.66) A	0.52 (0.45–0.67) B	0.52 (0.45–0.67) B	0.52 (0.45–0.67) B	0.52 (0.45–0.67) B	0.52 (0.45–0.67) B
0 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.61 (0.58–0.64) A↓	0.75 (0.73–0.78) A†	0.63 (0.61–0.67) A↓	0.75 (0.70–0.77) A	0.77 (0.73–0.79) A	0.85 (0.83–0.86) A↓	0.71 (0.68–0.73) A↓	0.71 (0.67–0.72) A↓	0.71 (0.67–0.72) A↓
0.5 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.59 (0.56–0.62) A↓	0.73 (0.71–0.75) A†	0.62 (0.60–0.66) A↓	0.72 (0.69–0.75) A	0.76 (0.72–0.79) A	0.83 (0.82–0.83) A↓	0.70 (0.67–0.72) A↓	0.70 (0.67–0.72) A↓	0.70 (0.67–0.72) A↓
1.5 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.50 (0.48–0.52) A↓	0.61 (0.58–0.64) B†	0.50 (0.48–0.53) A↓	0.63 (0.59–0.64) B	0.71 (0.66–0.75) A	0.76 (0.74–0.78) A↓	0.65 (0.61–0.69) A	0.65 (0.61–0.69) A	0.65 (0.61–0.69) A
2.52 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.41 (0.39–0.43) A↓	0.52 (0.49–0.55) B†	0.41 (0.39–0.42) A↓	0.55 (0.52–0.56) B	0.62 (0.58–0.66) A	0.61 (0.59–0.63) B↓	0.52 (0.49–0.57) A↓	0.52 (0.49–0.57) A↓	0.52 (0.49–0.57) A↓
3.4 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.37 (0.35–0.39) A↓	0.43 (0.38–0.46) B	0.37 (0.35–0.38) A	0.43 (0.41–0.46) B↓	0.46 (0.43–0.49) A	0.42 (0.40–0.44) B↓	0.47 (0.43–0.50) A†	0.47 (0.43–0.50) A†	0.47 (0.43–0.50) A†
4.2 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.33 (0.29–0.35) A↓	0.39 (0.35–0.43) A	0.33 (0.30–0.35) A	0.37 (0.35–0.39) B↓	0.42 (0.40–0.45) A	0.40 (0.36–0.41) B↓	0.43 (0.38–0.47) A†	0.43 (0.38–0.47) A†	0.43 (0.38–0.47) A†
GW (cm ³ cm ⁻³)	0.21 (0.17–0.23) A	0.22 (0.19–0.26) A	0.25 (0.22–0.26) A	0.20 (0.15–0.25) A†	0.13 (0.11–0.16) A†	0.24 (0.21–0.26) B†	0.17 (0.14–0.21) A	0.17 (0.14–0.21) A	0.17 (0.14–0.21) A
AW (cm ³ cm ⁻³)	0.08 (0.05–0.11) A	0.13 (0.10–0.14) A	0.07 (0.05–0.08) A†	0.15 (0.14–0.20) A	0.20 (0.16–0.25) A	0.22 (0.19–0.24) A	0.10 (0.07–0.13) A↓	0.10 (0.07–0.13) A↓	0.10 (0.07–0.13) A↓
SOM (%)	5.29 (4.36–5.34) A↓	23.92 (23.44–24.71) A↓	10.91 (8.32–12.84) A↓	27.57 (25.58–29.06) A	24.98 (16.62–28.94) A	34.70 (31.33–35.16) A	20.87 (19.64–22.82) A†	20.87 (19.64–22.82) A†	20.87 (19.64–22.82) A†

F1Pi = pine plantation in high montane forest; F2Pi = pine plantation in páramo. *K_{sat}* = saturated hydraulic conductivity; BD = bulk density; 0–4.2 pF = retention capacity at pF-values between 0 and 4.2; GW = gravitational water; AW = available water; SOM = soil organic matter content. The letters accompanying each property value represent the results of statistical comparisons. By properties: (1) different capital letters represent the significant differences (*p* < 0.05) between the two depths in each study site (i.e., 0–10 cm versus 10–25 cm). Letter denotation order was used from highest to the lowest value. ↓ or ↑ stand for a significant decrease or increment (*p* < 0.05 value) when comparing pine plantations vs. undisturbed natural cover.

Table A3. Median and the 25th and 75th percentile of the hydro-physical properties and SOM content of the soil in the high montane forest and páramo under cattle grazing (F = high montane forest; Tg = páramo).

Properties	<3250 m a.s.l.			>3250–<3550 m a.s.l.			>3550 m a.s.l.		
	FIG	F2G	F3G	Tg5G*	Tg6G	Tg7G	Tg8G	Tg9G	
<i>K_{sat}</i> (cm h ⁻¹)	4.02 (2.67–4.38) A↓	3.92 (3.61–8.36) A	16.58 (6.99–19.20) A	0.81 (0.52–0.96) A↓	2.14 (1.77–2.40) A†	2.91 (1.65–4.80) A	0.60 (0.41–1.24) B†	0.60 (0.41–1.24) B†	
BD (g cm ⁻³)	0.97 (0.92–1.04) A	0.62 (0.56–0.69) A†	0.93 (0.89–0.93) A†	0.44 (0.43–0.55) A	0.41 (0.37–0.46) A	0.54 (0.51–0.62) B	0.72 (0.63–0.80) A↓	0.72 (0.63–0.80) A↓	
0 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.64 (0.63–0.64) A	0.72 (0.69–0.75) A	0.63 (0.61–0.65) A↓	0.82 (0.79–0.84) A†	0.82 (0.80–0.84) A†	0.75 (0.72–0.77) A	0.75 (0.72–0.77) A	0.75 (0.72–0.77) A	
0.5 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.63 (0.63–0.64) A	0.71 (0.69–0.74) A	0.61 (0.59–0.63) A↓	0.81 (0.78–0.83) A†	0.81 (0.78–0.84) A†	0.74 (0.72–0.76) A	0.74 (0.72–0.76) A	0.74 (0.72–0.76) A	
1.5 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.55 (0.54–0.56) A	0.65 (0.64–0.70) A†	0.50 (0.47–0.55) A↓	0.79 (0.74–0.80) A†	0.76 (0.71–0.77) A†	0.70 (0.67–0.70) A	0.70 (0.67–0.70) A	0.70 (0.67–0.70) A	
2.52 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.48 (0.45–0.49) A	0.54 (0.48–0.58) B	0.40 (0.37–0.40) A↓	0.68 (0.65–0.70) A†	0.63 (0.60–0.64) A↓	0.52 (0.51–0.55) A↓	0.52 (0.51–0.55) A↓	0.52 (0.51–0.55) A↓	
3.4 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.44 (0.43–0.45) A	0.47 (0.45–0.53) B†	0.35 (0.33–0.35) A↓	0.50 (0.44–0.60) A	0.43 (0.40–0.45) A†	0.42 (0.40–0.45) A†	0.42 (0.40–0.45) A†	0.42 (0.40–0.45) A†	
4.2 pF (cm ³ cm ⁻³)	0.40 (0.37–0.43) A	0.44 (0.41–0.46) A†	0.30 (0.27–0.33) A	0.42 (0.41–0.55) A	0.41 (0.38–0.43) A†	0.37 (0.35–0.41) A†	0.37 (0.35–0.41) A†	0.37 (0.35–0.41) A†	
GW (cm ³ cm ⁻³)	0.16 (0.15–0.19) A	0.19 (0.15–0.22) A	0.24 (0.20–0.28) A	0.13 (0.12–0.14) A	0.20 (0.19–0.20) A†	0.23 (0.18–0.25) A†	0.23 (0.18–0.25) A†	0.23 (0.18–0.25) A†	
AW (cm ³ cm ⁻³)	0.06 (0.05–0.10) A	0.08 (0.07–0.14) A	0.09 (0.07–0.11) A	0.23 (0.16–0.26) A	0.21 (0.19–0.22) A	0.14 (0.10–0.18) A↓	0.14 (0.10–0.18) A↓	0.14 (0.10–0.18) A↓	
SOM (%)	7.94 (7.14–8.72) A	20.11 (18.31–33.54) A	10.68 (10.19–12.00) A↓	25.98 (17.67–30.03) A	36.35 (30.74–46.42) A	21.79 (18.14–28.58) A	21.79 (18.14–28.58) A	21.79 (18.14–28.58) A	

FIG = grazing in high montane forest; TgG = grazing in páramo. *K_{sat}* = saturated hydraulic conductivity; BD = bulk density; 0–4.2 pF = retention capacity at pF-values between 0 and 4.2; GW = gravitational water; AW = available water; SOM = soil organic matter content. The letters accompanying each property value represent the results of statistical comparisons. By properties: (1) different capital letters represent the significant differences (*p* < 0.05) between the two depths in each study site (i.e., 0–10 cm versus 10–25 cm). Letter denotation order was used from highest to the lowest value. ↓ or ↑ stand for a significant decrease or increment (*p* < 0.05 value) when comparing grazing vs. undisturbed natural cover.

Table A4. *p*-values of the comparisons of the hydro-physical properties between 75 and 150 cm of sampling distance in each of the pine plantations in the study area. Elevation: <3250 m a.s.l., >3250–<3550 m a.s.l., >3550 m a.s.l.

Properties	<3250 m a.s.l.			>3250–<3550 m a.s.l.			>3550 m a.s.l.		
	F1Pi	F2Pi	F3Pi	F4Pi	Tg5Pi	Tg6Pi	Tg7Pi	Tg8Pi	Tg9Pi
<i>K_{sat}</i>	0.16	0.59	0.19	0.18	0.36	0.45	0.66	0.45	0.66
BD	0.62	0.82	0.92	0.76	0.92	0.79	0.91	0.91	0.91
0 pF	0.48	0.4	0.38	0.74	0.76	0.3	0.93	0.93	0.93
0.5 pF	0.97	0.43	0.59	0.9	0.76	0.53	0.94	0.94	0.94
1.5 pF	0.97	0.8	0.71	0.08	0.77	0.55	0.93	0.93	0.93
2.52 pF	0.65	0.95	0.36	0.24	0.97	0.42	0.79	0.79	0.79
3.4 pF	0.18	0.53	0.27	0.25	0.24	0.88	0.45	0.45	0.45
4.2 pF	0.32	0.74	0.42	0.19	0.18	0.37	0.93	0.93	0.93
GW	0.93	0.43	0.48	0.32	0.68	0.77	0.58	0.58	0.58
AW	0.8	0.71	0.2	0.81	0.52	0.59	1	1	1

The names of the variables are defined in Table 4. The values in bold indicate that the properties are significantly different between both depths (*p* < 0.05).

CAPITOLO 7

CARBON SEQUESTRATION CAPABILITY OF FAGUS SYLVATICA FORESTS DEVELOPING IN THE MAJELLA NATIONAL PARK (CENTRAL APENNINES, ITALY). (*J. For. Res. (2018)*)

Capacità di sequestro del carbonio nelle foreste di *Fagus sylvatica* nel Parco Nazionale della Majella (Appennino Centrale, Italia).

7.1 Introduzione

Gli ecosistemi terrestri hanno una grande capacità di sequestrare dall'atmosfera l'anidride carbonica (CO₂) attraverso la fotosintesi e tra loro le foreste sono importanti per la grande capacità di sequestro e di stoccaggio del C atmosferico. La capacità del serbatoio terrestre di carbonio è stata stimata essere nell'intervallo di 2,0-3,4 Pg (Petagrammi) di C all'anno. Quindi, è importante quantificare la capacità di immagazzinamento del C di diverse specie di alberi. Tra le foreste europee, le foreste di faggio (*Fagus sylvatica*) sono molto diffuse. Il faggio rappresenta la potenziale vegetazione naturale di molte aree in pianura nell'Europa nord-occidentale e nord-centrale, nella Svezia meridionale e nelle montagne del centro, del sud, e dell'Europa orientale. La distribuzione del faggio è limitata dall'eccessiva umidità del suolo nella pianura alluvionale ad est e dalla siccità nell'Europa meridionale a causa dell'elevata sensibilità di questa specie alla disponibilità di acqua.

I boschi di faggio caratterizzano il paesaggio delle zone di montagna in Italia dalle Alpi fino alle regioni meridionali della Campania, Basilicata, Calabria e Sicilia. La superficie totale coperta dal faggio in Italia è 1.042.129 ha, corrispondente al 9,4% del totale delle foreste del paese. Sull'Appennino, di solito il faggio cresce sopra i 900-1000 m s.l.m. L'Abruzzo è la regione con la maggiore superficie coperta corrispondenti al 12% della superficie totale in Italia. Le attività antropiche hanno modificato in modo significativo la distribuzione, la composizione e la struttura delle fagete. Sebbene il faggio sia stato comunemente gestito come foresta di alta montagna, relativamente ampie aree sono state gestite a bosco ceduo per la produzione di legna da ardere e per la produzione di carbone, soprattutto nella parte inferiore delle catene montuose dell'Europa meridionale. La gestione forestale ha un importante impatto sulla conservazione del C. In particolare, il diradamento può modificare i tratti della popolazione di faggio (densità degli alberi, area basale del popolamento, copertura della chioma) e relative variabili ambientali, come l'umidità del suolo e la temperatura, portando a variazioni della struttura forestale che hanno un impatto sull'accumulo di C. A tal proposito, è stato fondamentale analizzare la capacità di sequestro della CO₂ (riferito alla velocità di assorbimento del carbonio nel corso dell'anno attraverso la fotosintesi) nelle foreste di *F. sylvatica* all'interno della Valle dell'Orfento, Parco Nazionale della Majella (Abruzzo, Italia). Sono stati analizzati boschi e cedui (le più comuni pratiche selvicolturali per il faggio) sottoposte a diversi regimi di gestione (es. diradamento e non diradamento). E' stato ipotizzato che le zone sottoposte a diradamento possedessero differenti capacità di sequestro di CO₂, e che tra le zone non soggette a diradamento, i cedui avevano una maggiore capacità di sequestro di CO₂ eutrofico per una maggiore densità di alberi.

7.2 Materiali e metodi

7.2.1. Zona di studio e clima

Lo studio è stato condotto nel periodo Maggio-Settembre 2015 nella Valle dell'Orfento all'interno del Parco Nazionale della Majella (Abruzzo, Italia). Sono state analizzate sei aree campione sottoposte a una delle due pratiche selvicolturali (foresta e bosco ceduo), le due pratiche di gestione più diffuse per il faggio (Fig.1). Inoltre, per comprendere gli effetti di assottigliando di queste due pratiche selvicolturali, sono stati analizzati un bosco ad alto fusto e un bosco, sottoposti a diradamento. Le restanti aree sono fitte foreste dove negli ultimi anni non è stato effettuato alcun diradamento (per circa 20 anni). Tutte le aree considerate sono state mappate mediante software GIS open source (QGIS) che è stato utilizzato anche per stimare l'estensione di ciascuna la zona. Le zone analizzate sono: area 1 (111 ha, a 1135 m s.l.m.), area 2 (93 ha, a 1130 m s.l.m.) e area 3 (97 ha, a 1529 m s.l.m.) erano boschi di *F. sylvatica*. L'area 1 è stata soggetta a diradamento, mentre l'area 2 non era stata diradata da 30 anni e l'area 3 da 20 anni. L'area 4 (55 ha, a 1110 ms.l.m.), l'area 5 (40 ha, a 1085 m s.l.m.) e l'area 6 (75 ha, 1509 m s.l.m.) erano boschi cedui. L'area 4 è stata assottigliata, ma l'area 5 non ha subito diradamenti da 20 anni e l'area 6 non è stata diradata da 50 anni. Le caratteristiche del suolo di ciascuna area sono elencate nella Tabella 1. Il clima era caratterizzato da una temperatura media dell'aria minima (T_{min}) di $-3,3 \pm 1,7$ C (Febbraio), una temperatura dell'aria massima media (T_{max}) di $22,0 \pm 1,7$ C (Luglio) e una temperatura media annuale dell'aria (T_{mean}) di $8,2 \pm 6,5$ C. La piovosità annua totale è di 1663 mm. Durante il periodo di studio, la T_{max} del mese più caldo era di $25,6 \pm 1,3$ C e la piovosità totale era di 93 mm.

7.2.2 Rilevamenti e misure di *F. sylvatica*

Dieci campioni (400 m² ciascuno) sono stati selezionati casualmente per ciascuna area di campionamento. L'indice di area fogliare (LAI) è stato misurato utilizzando un "LAI 2000 Plant Canopy Analyzer" a Luglio per ciascun campione. Le caratteristiche misurate sono state: diametro dell'albero all'altezza della base (DBH, cm), misurato dal cavalletto dendrometrico a 65 cm e l'altezza dell'albero (H, m) tramite clinometro elettronico. La densità degli alberi (D_t , numero albero ha⁻¹) è stata registrata e l'area basale totale (BA , m² ha⁻¹) è stata calcolata per ogni campione. La superficie fogliare fotosintetica totale (TPS, m²) di ogni area è stata calcolata moltiplicando il valore medio LAI per estensione di ogni area misurata da QGIS.

Sono state analizzate inoltre le caratteristiche del suolo delle aree campionate, in particolare sono state analizzate pH, Azoto totale nel suolo e sostanza organica (SOM). La Tabella 1 ne riporta i risultati trovati.

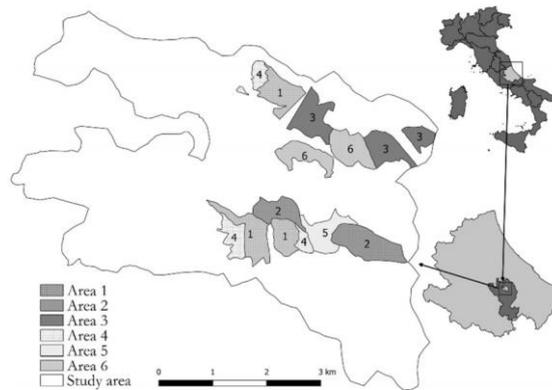


Fig. 1 Location map with the Abruzzo Region in Italy and the research area within the Orfento Valley inside the Majella National Park. Area 1 = high-forest currently subject to thinning; Area 2 = high-forest unmanaged for the last 30 years; Area 3 = high-forest unmanaged for the last 20 years; Area 4 = coppice currently subject to thinning; Area 5 = coppice unmanaged for the last 20 years; Area 6 = coppice unmanaged for the last 50 years

Table 1 Soil characterization of the six sampling areas

	pH	N (%)	C/N	SOM (%)
Area 1	6.73 ± 0.03	0.35 ± 0.01	10.55 ± 0.14	6.41 ± 0.08
Area 2	6.83 ± 0.03	0.47 ± 0.02	11.62 ± 0.45	9.34 ± 0.10
Area 3	7.60 ± 0.06	0.90 ± 0.04	11.30 ± 0.26	17.53 ± 0.43
Area 4	6.33 ± 0.03	0.38 ± 0.01	10.85 ± 0.10	7.14 ± 0.06
Area 5	7.20 ± 0.01	0.37 ± 0.01	10.54 ± 0.19	6.66 ± 0.14
Area 6	7.47 ± 0.03	0.53 ± 0.02	11.68 ± 0.29	10.66 ± 0.66

N = total soil nitrogen content; C/N = ratio between carbon and nitrogen content; SOM = soil organic matter content. Area 1 = high-forest currently subject to cutting; Area 2 = high-forest unmanaged for the last 30 years; Area 3 = high-forest unmanaged for the last 20 years; Area 4 = coppice currently subject to cutting; Area 5 = coppice unmanaged for the last 20 years; Area 6 = coppice unmanaged for the last 50 years. Mean values (± S.E.) are shown (n = 3)

7.2.3. Misurazioni del microclima

Le misurazioni del microclima sono state registrate mensilmente in ogni zona del campione dalle 9:00 alle 16:00 per 4 giorni ogni mese con condizioni meteorologiche paragonabili e senza nuvole. L'umidità relativa (RH %) e la temperatura dell'aria (Ta, C) sono stati registrati a intervalli di 5 minuti dai data logger a 2 m sopra il suolo della foresta. La densità del flusso di fotoni è stata misurata con un fotometro radiometro quantistico con un sensore quantistico LI-190SA. La densità del flusso di fotoni a livello del suolo al di sotto della vegetazione (PFD%) è stato calcolato come: $(PFD\% = PFD_b / PFD_o)$ dove PFD_b era la densità del flusso di fotoni al di sotto della vegetazione e PFD_o la densità del flusso di fotoni all'aperto per ciascuna area.

7.2.4. Lo scambio di CO₂

Lo scambio di anidride carbonica è stato misurato mensilmente (3 giorni al mese con condizioni meteorologiche comparabili) nel periodo di Maggio–Settembre 2015 (periodo in cui le foglie si presentavano completamente espanse). Il tasso fotosintetico netto [NP, $\text{lmol}(\text{CO}_2) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$], la conduttanza stomatale [gs, $\text{mol}(\text{H}_2\text{O}) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$], la traspirazione fogliare [E, $\text{mmol}(\text{H}_2\text{O}) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] e la temperatura fogliare (Tl,C) sono stati misurati da un analizzatore di gas a infrarossi dotato di una camera fogliare. Le misurazioni sono state effettuate in situ nei giorni senza nuvole, nella mattina (dalle 9:00 alle 12:00) per garantire che fosse misurata

la NP giornaliera massima. Su ogni campionamento, le foglie completamente espanse sono state prelevate usando forbici da potatura. Inoltre per rendere le misure comparabili, sono state campionate le foglie con l'esposizione a sud-est. Le misurazioni sono state su cinque alberi rappresentativi per area campione (tre foglie per albero). Durante le misurazioni, la CO₂ all'interno la cuvetta fogliare era di 370-380 ppm e relativa umidità dell'aria 50-65%.

7.2.5. Sequestro di CO₂

La capacità annua totale di sequestro di CO₂ [CO₂S, Mg CO₂ ha⁻¹ a⁻¹] è stata calcolata moltiplicando il TPS per il tasso fotosintetico netto annuo medio e annuo totale per il tempo di attività fotosintetica (indicata in ore). Il coefficiente di CO₂ / C = 3,67 è stato utilizzato per convertire la quantità di CO₂ sequestrata in quantità di C equivalente.

7.2.6. Analisi statistica

Le differenze tra le medie per i parametri misurati sono state testate con l'ANOVA unidirezionale e sono stati considerati significativi a $P < 0,05$ in base ai risultati del Tuckey test. Tutti i dati sono stati mostrati come media \pm errore standard (\pm S.E.). Tutti i test statistici sono stati eseguiti da un software statistico (Statistica 8.0). L'analisi lineare di regressione è stata utilizzata per mettere in relazione NP con G_s (conduttanza stomatale), considerando separatamente le aree a 1000 m s.l.m. (ad es. area 1, 2, 4 e 5) e quelle sopra i 1500 m s.l.m. (cioè aree 3 e 6). È stata utilizzata l'analisi di regressione lineare per correlare PDF% con LAI e Ta con PFD%, considerando tutte le misurazioni effettuate all'interno di ciascuna area. Per capire come sono stati influenzati LAI, Dt, H, DBH e NP_{yearly} e CO₂S (capacità di sequestro dell'anidride carbonica), i predittori sono stati combinati tramite analisi delle componenti principali (PCA) attraverso le sei aree di campionamento. Quindi, è stata utilizzata l'analisi di regressione lineare per mettere in relazione l'asse che spiega la proporzione maggiore di varianza (cioè PC1) con CO₂S.

7.3. Risultati

7.3.1. Microclima

Il Ta più alto e l'UR più basso sono stati misurati a Luglio ($26,1 \pm 1,9$ C e $46,8 \pm 4,0\%$, valore medio, rispettivamente) e l'area 3 presentava Ta più basso e UR più alto ($25,13 \pm 0,12$ C e $54,81 \pm 0,51\%$, rispettivamente). Il Ta più basso è stato misurato a Settembre ($11,7 \pm 1,8$ C, valore medio) e l'area 6 aveva il valore più basso ($9,50 \pm 0,85$ C). La percentuale di PFD più bassa è stata registrata nell'area 5 ($0,49 \pm 0,01\%$) e il valore più alto è stato registrato nell'area 4 ($2,35 \pm 0,20\%$).

7.3.2. Misure di F. sylvatica

Le misure caratteristiche sono elencate nella Tabella 2. La Dt era il più alta nella area 5 (1800 ± 23 albero ha⁻¹) e più bassa nell'area 4 (450 ± 14 alberi ha⁻¹). I massimi DBH e H (altezza dell'albero) sono stati misurati nell'area 1 ($26,3 \pm 0,4$ cm e $24,0 \pm 0,6$ m, rispettivamente) mentre il DBH più basso è stato registrato nell'area 5 ($13,9 \pm 0,3$ cm). L'area 2 aveva il BA più elevato ($55,2 \pm 0,8$ m² ha⁻¹) e l'area 4 il BA più basso ($17,2 \pm 0,6$ m² ha⁻¹). Il valore LAI era il più alto nell'area 5 ($4,38 \pm 0,12$) e il più basso nell'area 4 ($3,00 \pm 0,04$).

7.3.3. Lo scambio di gas

In media, l'NP è stato il più alto a Maggio [$11,5 \pm 0,2$ $\text{lmol}(\text{CO}_2)$ m^{-2} s^{-1} , valore medio delle sei aree] e il più basso in Luglio [$6,4 \pm 0,1$ $\text{lmol}(\text{CO}_2)$ m^{-2} s^{-1} , valore medio] (Fig.2, 3a, b). Sia Gs che NP hanno avuto i loro tassi più alti a Maggio [$0,22 \pm 0,01$ $\text{mol}(\text{H}_2\text{O})$ m^{-2} s^{-1} , valore medio] e il loro minimo a Luglio [$0,07 \pm 0,01$ $\text{mol}(\text{H}_2\text{O})$ m^{-2} s^{-1} , valore medio]. La tendenza opposta è stata osservata per E, con tassi più alti a Luglio [$2,52 \pm 0,12$ $\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})$ m^{-2} s^{-1} , valore medio delle sei aree] e tassi più bassi a Maggio [$1,91 \pm 0,03$ $\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})$ m^{-2} s^{-1} , valore medio]. L' NP medio annuo è stato il più alto nell'area 3 e nell'area 6 [$10,5 \pm 0,1$ $\text{lmol}(\text{CO}_2)$ m^{-2} s^{-1} , valore medio dello studio periodo] diminuendo del 10% nelle aree 1, 2, 4 e 5 (media dei valori).

7.3.4 Sequestro di CO₂ e valore monetario

La CO₂S (valore indicante la capacità di sequestro della CO₂) più alta è stata registrata nell'area 6 [$49,8 \pm 0,67$ Mg CO_2 ha^{-1} a^{-1}], corrispondente a $13,6 \pm 0,18$ MgC ha^{-1} a^{-1} mentre la CO₂S più bassa è stata registrata nell'area 4 [$33,1 \pm 0,44$ Mg CO_2 ha^{-1} a^{-1}], corrispondente a $8,90 \pm 0,12$ Mg C ha^{-1} a^{-1} (Fig.4). La CO₂S media per tutte le aree era $44,3 \pm 2,6$ Mg CO_2 ha^{-1} a^{-1} , corrispondente a $12,1 \pm 0,7$ Mg C ha^{-1} a^{-1}

Table 2 Stand structural traits of *F. sylvatica* trees in the six sampling areas

	Dt (tree number ha^{-1})	DBH (cm)	H (m)	BA ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	LAI ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
Area 1	625 ± 19^a	26.3 ± 0.4^a	24.0 ± 0.6^a	33.0 ± 0.6^a	3.63 ± 0.02^a
Area 2	1150 ± 27^b	24.7 ± 0.2^b	21.8 ± 0.5^b	55.2 ± 0.8^b	3.91 ± 0.06^b
Area 3	725 ± 13^c	23.6 ± 0.2^b	13.7 ± 0.4^c	31.5 ± 0.8^c	3.85 ± 0.09^c
Area 4	450 ± 14^d	22.6 ± 0.2^c	18.5 ± 0.5^c	17.2 ± 0.6^c	3.00 ± 0.04^c
Area 5	1800 ± 23^c	13.9 ± 0.3^d	16.5 ± 0.4^d	26.8 ± 0.8^d	4.38 ± 0.12^d
Area 6	1450 ± 24^f	14.2 ± 0.3^d	9.5 ± 0.4^f	23.6 ± 1.2^f	4.08 ± 0.02^f

Mean values \pm S.E. (n = 100; n = 10 for Dt and LAI value) are shown

Dt tree density, DBH tree diameter at the breast height, H tree height, BA total basal area, LAI leaf area index

Mean values with the same letters are not significantly different (ANOVA, $p \geq 0.05$). The explanations of Areas 1–6 see Table 1

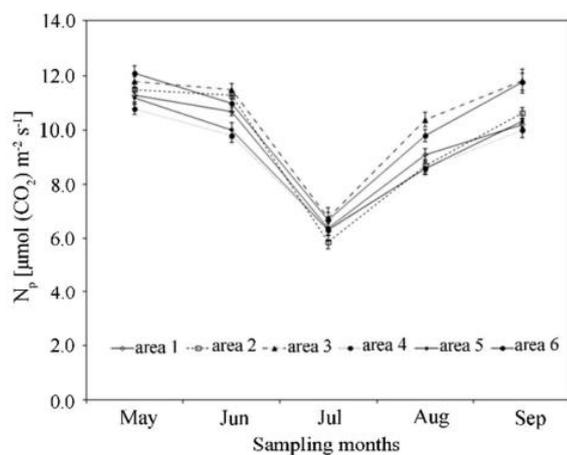


Fig. 2 Monthly trend of net photosynthetic rates (N_p) for *F. sylvatica* in the six samplings areas. Mean values \pm S.E. (n = 45). The explanations of Areas 1–6 see Fig. 1

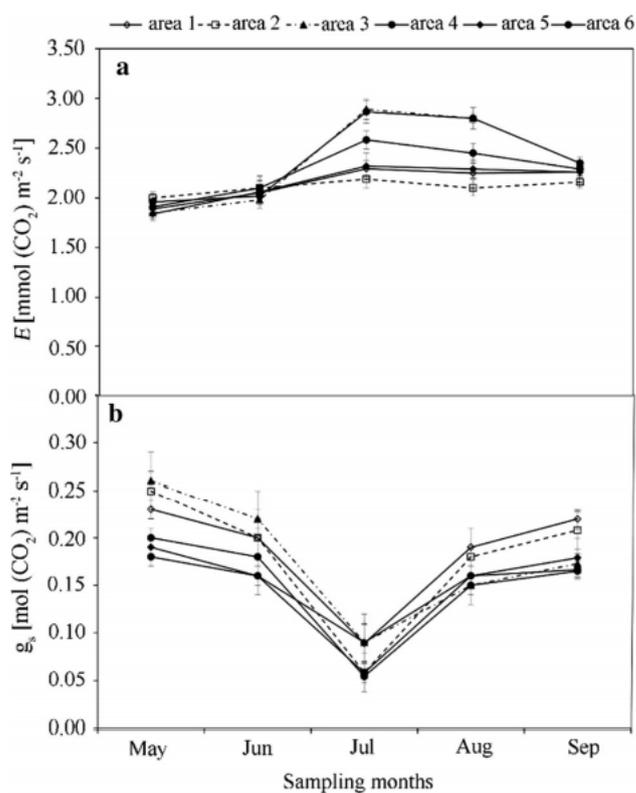


Fig. 3 Monthly trend of **a** leaf transpiration rates (E) and **b** stomatal conductance (g_s) for *F. sylvatica* in the six considered areas. Mean values \pm S.E. (n = 45). The explanations of Areas 1–6 see Fig. 1

7.3.5. Analisi statistica

Il più alto coefficiente di determinazione è stato registrato tra NP e Gs per aree a 1000 e 1500 m s.l.m. ($R^2 = 0,87$ e $0,72$, rispettivamente). Inoltre, le correlazioni lineari tra Ta e PFD% ha mostrato che il 41% della variazione in Ta dipendeva dalla variazione della percentuale di PFD, che a sua volta era stato influenzato dalla variazione della LAI (del 75%) (Tabella 3). La PCA ha restituito due assi di variazioni nelle sei zone campionate. PC1 ha rappresentato il 58% della varianza totale e questo era positivamente correlato a LAI e Dt e negativamente correlato a DBH. PC2 era correlato negativamente a NPyearly, rappresentando il 25% della varianza totale. C'era una significativa relazione positiva tra PC1 e CO₂S ($R^2 = 0,65$, $p < 0,05$) (Fig.5).

7.4 Discussione

La capacità di sequestro del carbonio dipende da diversi fattori, comprese la struttura forestale e la composizione delle specie. La LAI è una variabile importante per caratterizzare la struttura e la funzione della vegetazione, legata proporzionalmente alla fotosintesi dalle foglie della chioma.

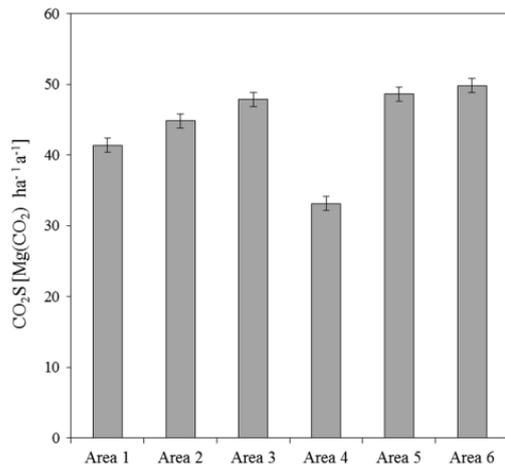


Fig. 4 Carbon dioxide sequestration capability [CO_2S , $\text{Mg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] in the considered areas. Mean values \pm S.E. ($n = 10$). The explanations of Areas 1–6 see Fig. 1

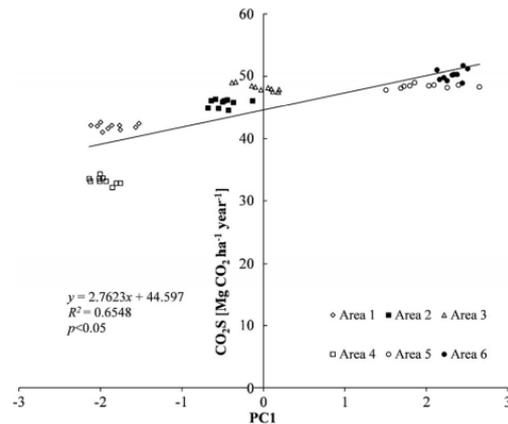


Fig. 5 Linear relationship between the first principal component combining LAI, Dt and DBH (PC1) and the CO₂ sequestration capacity per hectare [CO_2S , $\text{Mg CO}_2 \text{ha}^{-1} \text{year}^{-1}$] across the six considered areas. The equations as well as their R^2 are shown. The relationships were significant at $p < 0.05$. The explanations of Areas 1–6 see Fig. 1

I risultati mostrano quei tratti di posizione strutturale, in particolare la LAI e Dt essere buoni predittori di CO₂S, come attesta la significativa relazione tra la PCA, che spiega la maggior parte della variazione (cioè PC1) e CO₂S. Le aree gestite (ovvero le aree 1 e 4) si sono distinte dalle altre del 28% in meno di CO₂S (valore medio) dovuto ad una LAI inferiore del 18% e Dt inferiore del 58%. Il diradamento è una strategia di gestione comune nelle faggete europee ed è stata segnalata per mostrare effetti positivi sulla crescita radiale degli alberi. In effetti, la DBH in queste aree era 9 e 60% in più rispettivamente nella foresta e nel bosco ceduo, al contrario della controparte non gestita. Il diradamento migliora la rigenerazione naturale nelle faggete, attraverso la formazione di lacune che determinano la penetrazione della luce a livello del suolo, conseguentemente migliorando le variabili abiotiche (una maggiore intensità della luce, contenuto di minerali, disponibilità di acqua e temperatura) per le piantine nelle faggete. Di conseguenza, la percentuale di PFD più elevata nelle aree 1 e 4 è dovuta al diradamento che ha permesso la rigenerazione delle piantine di *F. sylvatica*. Per quanto riguarda le aree non gestite, i risultati mostrano una netta separazione tra i boschi (zone 2 e 3) e i boschi cedui

(aree 5 e 6) con quest'ultima con il 6% in più di CO₂S. Questo risultato è giustificato dal 73% in più di alberi con un 42% in meno di DBH e un H del 27% inferiore rispetto alle forestee. Pertanto, determinando valori di Dt e LAI più alti, si avranno maggiori tassi di CO₂S nei boschi cedui. L'NP annuale medio non era un fattore predittivo principale di CO₂S. Le aree campionate hanno avuto tendenze simili in NP, con NP più alto registrato a Maggio [$11,5 \pm 0,2$ l mol (CO₂) m⁻² s⁻¹, significare valore delle sei aree] in diminuzione del 44% a Luglio (valore medio delle sei aree) a causa della temperatura elevata dell'aria e bassa disponibilità di acqua.

Questa tendenza evidenzia la sensibilità del faggio a questi fattori ambientali. In particolare, l'area 3 e l'area 6 (1500 m s.l.m.) avevano una NP superiore dell'8% a causa di temperatura e di umidità dell'aria favorevole (Ta e UR superiore dell'8%) rispetto alle aree 1, 2, 4 e 5 (1000 m s.l.m.). In queste zone la carenza di precipitazioni nei mesi estivi può essere parzialmente compensata dalla maggiore elevazione, che modera la temperatura e l'umidità dell'aria in modo che l'evapotraspirazione sia più bassa e la formazione di nebbia compensa parzialmente la carenza di precipitazioni. Ciò giustificava anche la massima Gs e tassi E in queste aree nel mese di Luglio, come confermato dall'analisi di regressione. I risultati evidenziano una capacità media di sequestro di CO₂ di $44,3 \pm 2,6$ Mg CO₂ ha⁻¹ a⁻¹, con i dati registrati di *F. sylvatica*, corrispondente a $12,1 \pm 0,7$ Mg C ha⁻¹ a⁻¹. Considerando l'estensione del valore medio di CO₂S sull'intera area coperta dalle foreste di faggio in Abruzzo (122.402 ha; INFC 2005), è stata calcolata una capacità di sequestro totale di CO₂ di 5.422.408 Mg CO₂ anno⁻¹, che corrisponde a 1.477.496 Mg C sequestrati all'anno. Pertanto si deve tenere in considerazione che le foreste non solo hanno un valore economico per la produzione commerciale di legname, ma possiedono anche un valore umanitario per via delle loro importanti funzioni ambientali, tra cui il loro ruolo di serbatoio di carbonio, che contribuiscono alla biodiversità, e a proteggere le risorse idriche. In conclusione, è stato ipotizzato che ci sarebbe stata meno CO₂ sequestrata in boschi gestiti e cedui, e più CO₂ verrebbe sequestrata nei boschi cedui che nelle foreste. Pertanto, considerando che la rigenerazione naturale può svolgere un ruolo cruciale nel ripristino forestale, il diradamento selettivo può essere consigliato per il supporto di pratiche tradizionali di gestione forestale come l'uso civico in alcune zone del Parco Nazionale della Majella. Allo stesso tempo, le zone non gestite dovrebbero essere mantenute nella riserva per dare priorità all'obiettivo di conservazione e valorizzazione naturalistica del patrimonio forestale .

CAPITOLO 8

HIDDEN SOILS AND THEIR CARBON STOCKS AT HIGH-ELEVATION IN THE EUROPEAN ALPS (NORTH-WEST ITALY) (*Elsiever, 2020*)

Suoli nascosti e relativi stock di carbonio ad alta quota nelle Alpi europee (Nord-Ovest dell'Italia)

8.1. Introduzione

La materia organica del suolo (SOM) immagazzinata in terreni alpini (ovvero suoli sviluppati nella tundra alpina) rappresenta una parte considerevole del ciclo globale del C, fungendo da serbatoio per l'anidride carbonica e avendo quindi un ottimo potenziale per sequestrarlo dall'atmosfera. I suoli alpini, soprattutto quelli ricoperti da vegetazione e/o in cui è presente il permafrost, sono capaci di immagazzinare grandi quantità di carbonio organico. Tuttavia, data l'alta sensibilità dei suoli ai cambiamenti climatici, questi terreni possono rilasciare grandi quantità di anidride carbonica a seguito del riscaldamento climatico. In generale, ad altitudini elevate nelle Alpi europee, i suoli sono principalmente classificati come Regosols, Cambisols o Podzols, spesso che mostrano evidenze di crioturbazione. In particolare suoli di alta quota (cioè sopra il limite del bosco alpino) sono influenzati dai processi di azione del gelo (come per esempio frantumazione del gelo, smistamento del gelo, sollevamento del gelo, solifluzione ecc.) indotti dalla penetrazione del gelo stagionale e/o dal permafrost, che ha portato alla formazione di un terreno modellato, tipico degli ambienti periglaciali (es. inclinazione di pietre, blockstream, blockfields, wedges, ecc.). Poiché questi processi sono principalmente guidati dalla temperatura, suoli con trama composta attiva sono sensibili al riscaldamento climatico, che può indurre diversi effetti come la degradazione del permafrost, l'espansione della copertura vegetale (per esempio transizione da comunità di specie pioniere verso prateria più acidofile) e aumento della decomposizione della SOM. Mentre gli stock di carbonio dei suoli forestali e alpini sono ben documentati da diversi studi, si sa molto poco sullo stock di carbonio in ambienti periglaciali di alta quota, soprattutto nelle Alpi europee. Ciò è probabilmente dovuto a diversi motivi, come ad esempio la posizione sfavorevole ad alta quota dei suoli, che sono spesso difficili da raggiungere e richiedono attrezzature tecniche specifiche; oppure, dato che queste aree ad alta quota non sono coperte da vegetazione, hanno ricevuto meno interesse poiché non sono considerati serbatoio di carbonio rilevante; e siccome questi terreni di alta quota sono spesso periglaciali, in ambienti caratterizzati da processi di crioturbazione (indotto da basse temperature e/o permafrost) che consentono l'accoppiamento di terreno modellato e solifluzione, che creano una estrema variabilità spaziale, sono spesso coperti da detriti grossolani che rendono difficile riconoscerli come suoli e di eseguire indagini pedologiche approfondite utilizzando dispositivi manuali. I metodi geofisici possono essere utilizzati grazie alla loro capacità di mappare lo spessore del suolo anche in aree con topografia ondulata, distribuzione spaziale complessa e non omogenea o anisotropa a causa delle proprietà dei materiali studiati. Tra i metodi geofisici disponibili, la tomografia a resistività elettrica (ERT) consente di studiare i contrasti nelle proprietà elettriche tra il suolo (sciolto, poroso, incline alla ritenzione idrica e possibilmente ricco di sostanza organica) e massiccia roccia o depositi grossolani. Lo stesso contrasto nelle proprietà fisiche, insieme a differenze di stratificazione e altre strutture interne, può essere ripreso utilizzando profilazione tramite studio dei profili tramite Ground Penetrating Radar (GPR). ERT e GPR sono ampiamente utilizzati per supportare le indagini pedologiche per la caratterizzazione del suolo, per la

mappatura della presenza, profondità e laterale variabilità degli orizzonti del suolo, per finalità agricole e analisi di contaminazione dalle basse alle medie latitudini e altitudini.

Negli ambienti periglaciali, queste tecniche sono principalmente utilizzate per caratterizzazione del permafrost, di processi idrogeologici e di riconoscimento dell'interfaccia materia-bedrock. La ricerca è stata eseguita nel rigido clima periglaciale dell'altopiano di Stolenberg sul versante meridionale del massiccio del Monte Rosa (NW Alpi italiane) dove, nel 2017, sono stati trovati suoli inaspettatamente ben sviluppati all'interno in blockfield / blockstream. Considerando l'impossibilità di approfondire l'indagine utilizzando dispositivi e macchinari manuali, e la necessità di rilevare la distribuzione di questi suoli nascosti, sono stati applicati metodi geofisici non invasivi a Settembre 2019. In questo contesto, questo lavoro mira a: (1) descrivere e classificare i suoli nascosti, (2) determinare il loro stock di carbonio e (3) indagare la loro distribuzione locale e lo spessore e le potenziali relazioni con presenza / distribuzione del permafrost.

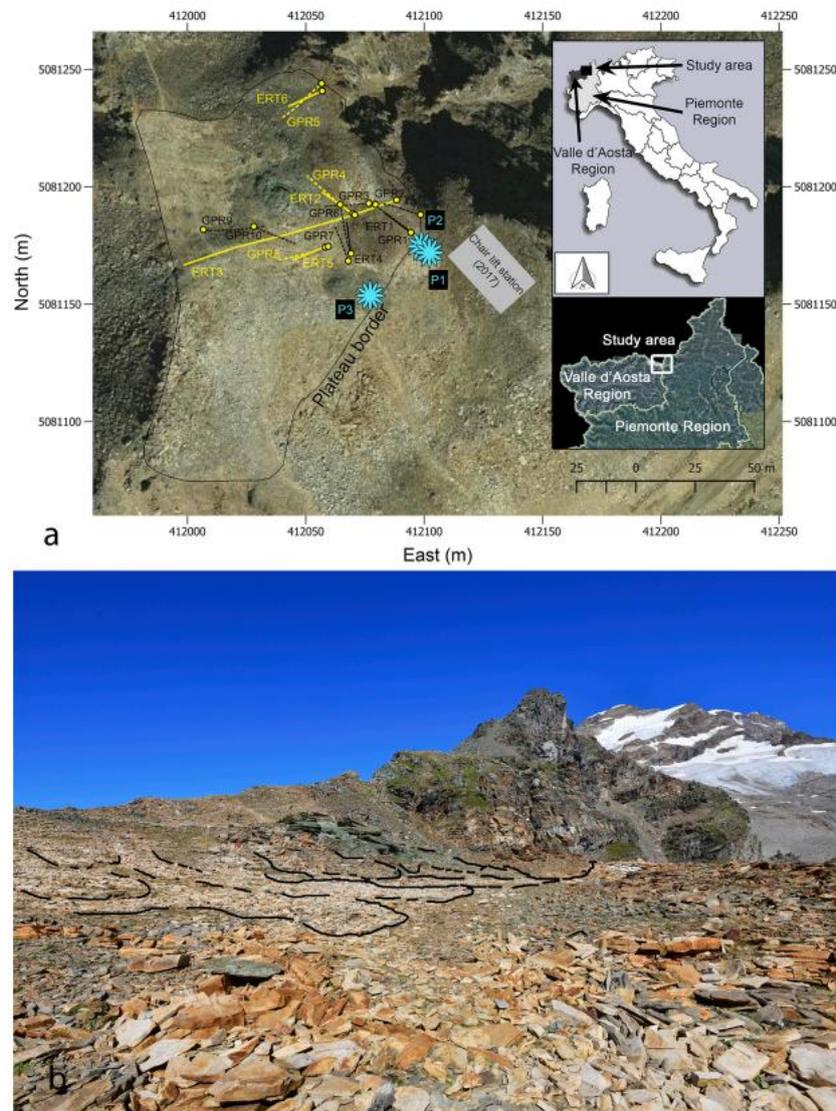


Fig. 1. (a) Location of the study area in the NW Italian Alps (www.pcn.minambiente.it), and overview of the study area (orthoimage Piemonte Region, year 2010); solid and dashed lines indicate ERT and GPR profiles, respectively. Yellow lines indicate the profiles showed and discussed in the manuscript. Yellow circles identify the starting point of each geophysical profile. Cyan polygons indicate the location of the three soil profiles (P1, P2, and P3). (b) View of the plateau (photo by M. D'Amico); dashed lines indicate blockstreams.

8.2. Materiali e metodi

8.2.1 Area di studio

I lavori sono stati eseguiti nell'ambiente periglaciale dell'Altopiano di Stolenberg, un'area quasi pianeggiante di 13.500 m² situata a 3030 m s.l.m., al confine tra la Valle d'Aosta e il Piemonte (Fig. 1a), ai piedi del versante meridionale del Monte Rosa (4634 m) (versante Nord-Ovest delle Alpi Italiane). Il sito di studio rappresenta la parte sommitale del Sito di Ricerca Ecologica a Lungo Termine (LTER) dell'Istituto Scientifico Angelo Mosso (LTER Italia IT19-001-T), appartenente alla rete LTER-Italia. L'area di studio è anche Sito di Importanza Comunitaria e Zona di Protezione Speciale (SIC / SPA IT1204220 “Ambienti glaciali del gruppo del Monte Rosa”) appartenente alla rete Natura 2000. Dal 2007 al 2018 l'area ha avuto una temperatura media annuale di $-2,2$ °C, una nevicata annuale media cumulativa di 818 cm e una precipitazione media annua di ca. 400 mm. Il manto nevoso dura almeno 8 mesi, raggiungendo uno spessore massimo di ca. 350 cm. Nel sito LTER-Italia IT19-001-T, anche se a quota inferiore e con copertura vegetale alpina (neve e distese erbose), i suoli sono stati classificati come Skeletic Dystric Regosol, Skeletic Umbrisol e Skeletic Dystric Cambisol. Il permafrost è stato rilevato a profondità superiori a 3-4 m vicino al Corno del Camoscio (3024 m s.l.m.).

Sull'altopiano la pendenza del versante è inferiore al 10%, con ampie porzioni pianeggianti nella parte centrale e orientale. La zona presenta caratteristiche tipiche di ambienti periglaciali, caratterizzati da morfologie periglaciali attive. In particolare, l'altopiano è ricoperto da uno spesso strato di pietre con dimensione variabile (da decimetro a metro), ben organizzata in blockfield, blockstream / a disposizione ordinata, lobi di gelifluzione, pietre inclinate e cerchie ordinate debolmente sviluppate (Fig. 1b). In particolare, i blockstream in parte riorganizzate in linee ordinate sono visibili su superfici in pendenza, mentre i blockfields, in parte riorganizzati si possono osservare in un terreno a motivi geometrici e ricco di pietre, che dominano le superfici più piatte. L'attività dei processi periglaciali è evidenziata dalla assenza di licheni dalla maggior parte delle pietre. Il “parent material” delle rocce (letteralmente il materiale di origine) è composto da gneiss e micascisti (falda del Monte Rosa, basamento della Pennidica) e meta basiti. Nessuna traccia dei ghiacciai si osserva, poiché tutti i blocchi sembrano autoctoni; si trovano i blockstream meglio sviluppati intorno agli affioramenti rocciosi e sono chiaramente derivati dalla loro crio-fratturazione. La storia glaciale dell'altopiano è attualmente sconosciuta. La copertura vegetale, estremamente scarsa e circoscritta in piccole macchie che raggiungono non più del 5% dell'estensione areale del plateau, è composta principalmente da specie alpine e nivali come *Silene acaulis*, *Carex curvula*, *Salix herbacea* nelle macchie di vegetazione, mentre *Festuca halleri*, *Poa alpina*, *Ranunculus glacialis*, *Leuchanemopsis alpina*, *Cerastium uniflorum* e poche altre specie pioniere crescono anche nell'area coperta di pietre, con valori di copertura estremamente bassi. Una copertura vegetale più alta caratterizza una piccola area nel lato nord, vicino al bordo della scogliera, su anfiboliti leggermente più resistenti agli agenti atmosferici.

8.2.2. Rilievo, campionamento e analisi del suolo

Nel 2017, durante le attività operative per la realizzazione di una nuova seggiovia, la maggior parte dell'altopiano è stata delimitata in modo da proteggere l'ambiente naturale e le caratteristiche periglaciali contro le operazioni di scavo. Tuttavia, sono state aperte tre perforazioni del suolo (da 2 a 10 m di lunghezza, fino a una profondità di circa 1,2 m) nell'area di costruzione, rivelando suoli inaspettati e ben sviluppati sotto la copertura pietrosa.

Questa scoperta è stata possibile solo grazie ai macchinari impiegati, il cui utilizzo è stato eccezionalmente consentito per la costruzione della stazione della seggiovia. La descrizione sul campo dei transetti del suolo è stata eseguita secondo la FAO (2006), mentre la classificazione del suolo è stata effettuata secondo il sistema di classificazione WRB (IUSS Working Group WRB, 2015). I profili delle tre perforazioni sono stati descritti e campionati (Fig. 1a). Ciascun profilo è stato suddiviso in settori caratterizzati da un'analogia sequenza di orizzonti. Complessivamente, sono stati raccolti 27 campioni di suolo da tutti gli orizzonti; in ciascuno è stato campionato almeno un campione per orizzonte per settore (circa 300–500 g per campione). I campioni sono stati essiccati all'aria aperta, setacciati con un setaccio di 2 mm e analizzati secondo i metodi standard. Il pH è stato misurato in sospensione suolo-acqua (suolo: acqua = 1: 2,5). L'analisi delle dimensioni delle particelle è stata eseguita con il metodo della pipetta dopo la degradazione della materia organica con H₂O₂ seguito da dispersione con Na-esametafosfato. Il Carbonio totale (corrispondente al carbonio organico totale-TOC dovuto all'assenza di carbonati) e Azoto (TN), sono stati misurati mediante combustione a secco con un analizzatore elementare (CE Instruments NA2100, Rodano, Italia). Lo stock di carbonio organico del suolo (C-STOCK_{tot} kg m⁻²) dei profili è stato calcolato per settori in cui la sequenza degli orizzonti era simile, secondo la seguente equazione adattata da Batjes:

$$C - STOCK_{tot} = \sum_{i=1}^n TOC * BD * TH * VF * 1000 \quad (1)$$

dove n è il numero di orizzonti del suolo di ogni settore, TOC è la concentrazione di carbonio organico nel suolo (g kg⁻¹) degli orizzonti minerali, BD è la Densità apparente (kg m⁻³) media nei suoli montani, TH è lo spessore dell'orizzonte (m), VF è il volume di terra fine esclusa la frazione minerale grossolana (> 2 mm, stimata visivamente nel campo (%)) per ciascun orizzonte, calcolata come $[1 - (\% \text{ roccia volume} / 100)]$, 1000 è il fattore di correzione dell'unità. Al fine di supportare l'interpretazione delle misurazioni geofisiche, i minerali argillosi sono stati analizzati utilizzando un diffrattometro a radiografia Philips PW1710 (40 kV e 20 mA, radiazione CoK α , mono cromatore in grafite). La frazione di argilla satura di Mg (<2 μ m) è stata separata tramite sedimentazione, floccolata con MgCl₂, lavata fino ad eliminare Cl⁻, e liofilizzata. Sono state eseguite scansioni da 3 a 35° di 2 θ a una velocità di 1° 2 θ min⁻¹, essiccata all'aria, solvatato con etilen glicole e riscaldato (350 ° C e 550 °C) con supporti orientati. Una valutazione semiquantitativa dell'abbondanza di minerali è stata eseguita utilizzando il metodo Mineral Intensity Factors, che considera le aree di picco ottenute. Per il calcolo, il “background” (cioè lo sfondo, inteso come l'analisi fatta senza campione) è stato sottratto e le posizioni di picco, intensità e le aree sono state calcolate utilizzando il software PowderX.

Table 1
Morphological, physical and chemical properties of the soil samples. Textural class: LS – loamy sand; SL – sandy loam. Structure: SB – subangular blocky; BL – blocky; GR – granular; PL – platy; CO – columnar; PR – prismatic; SG – single grain. BDL = below detection limit.

P1																
Sample number	Horizon	Muscel colour, moist	Stone fragment (%)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Textural class	Structure	pH	TOC (%)	TN (%)	TOC/TN	BD (kg m ⁻³)	TH (m)	VF	C-STOCK (kg m ⁻²)
1	A2	10YR 3/2	30	2.8	14.5	82.7	LS	SB	4.8	1.90	0.10	20	1000	0.20	0.70	2.66
2	A1	10YR 3/2	30	2.5	14.9	82.5	LS	SB	4.4	1.08	0.08	13	1000	0.30	0.70	2.26
3	BA	10YR 3/3	40	1.6	23.3	75.2	LS	BL	4.8	0.47	0.04	11	1200	0.20	0.60	0.68
4	A1 + A2	10YR 3/2	40	2.7	15.3	82.0	LS	GR	4.7	1.20	0.10	11	1000	0.30	0.60	2.17
5	A	10YR 3/2	80	2.7	14.5	82.9	LS	GR	4.4	1.86	0.15	13	1000	0.20	0.20	0.74
P2																
6	A	10YR 2/1	30	2.6	20.8	76.5	LS	SB	4.3	0.80	0.08	11	1000	0.20	0.70	1.12
7	A@	10YR 3/2	10	2.3	23.2	74.5	LS	PL/SB	5.6	2.05	0.11	19	1100	0.05	0.90	1.02
8	A2	10YR 3/3	30	1.9	18.3	79.8	LS	SB	4.7	1.10	0.08	14	1000	0.20	0.70	1.53
9	A1	10YR 3/3	70	2.5	12.1	85.4	LS	GR	4.4	1.13	0.11	11	1000	0.10	0.30	0.34
10	BC	10YR 4/4	70	1.4	27.6	71.0	SL	PL/SB	5.3	0.14	BDL	-	1200	0.20	0.30	0.10
11	CB	10YR 5/2	70	1.0	26.3	72.7	LS	SB	5.9	BDL	BDL	-	1200	0.20	0.30	0.00
12	BW	10YR 3/4	60	0.9	25.7	73.4	LS	SB	5.2	0.26	0.03	9	1200	0.20	0.40	0.25
13	A	10YR 3/4	30	4.3	24.1	71.6	SL	BL	4.8	1.09	0.08	14	1000	0.15	0.70	1.15
14	BA	10YR 3/3	50	2.8	29.3	67.9	SL	CO/PR	4.9	1.10	0.07	15	1200	0.20	0.50	1.32
15	A	10YR 3/2	10	3.9	14.0	82.1	LS	GR	4.5	0.71	0.09	8	1000	0.15	0.90	0.96
16	Silt caps	10YR 6/4	10	6.2	41.9	51.9	SL	PL	5.0	0.28	0.03	8	1300	0.03	0.90	0.10
P3																
1	A1	10YR 2/1	70	4.3	8.0	87.7	S	GR	4.9	0.56	0.05	12	1000	0.05	0.30	0.08
2	A2	10YR 3/2	5	3.2	15.6	81.2	LS	GR	4.9	0.87	0.05	17	1000	0.28	0.95	2.28
3	A2	10YR 3/2	5	4.2	15.6	80.1	LS	CO	4.9	1.05	0.07	15	1000	0.25	0.95	2.49
4	A2	10YR 3/2	20	4.8	28.2	66.9	SL	CO	4.8	0.76	0.05	14	1000	0.25	0.80	1.51
5	A2	10YR 3/2	0	4.8	20.7	74.4	SL	SG	4.7	1.18	0.07	17	1000	0.05	1.00	0.59
6	Bw	10YR 5/4	20	2.6	31.8	65.5	SL	SB	5.0	0.15	0.02	7	1200	0.25	0.80	0.35
7	BC	10YR 4/3	50	3.4	16.8	79.9	LS	SB	5.2	0.24	0.02	10	1200	0.20	0.50	0.29
8	A2	10YR 3/2	0	2.8	13.7	83.5	LS	GR	4.9	0.81	0.05	17	1000	0.02	1.00	0.16
9	BC	10YR 4/3	70	4.6	19.5	75.9	LS	PL	5.1	0.31	0.03	9	1200	0.20	0.30	0.22
10	Bw	10YR 3/4	40	3.3	19.6	77.1	LS	SB	5.2	0.16	0.02	8	1200	0.30	0.60	0.36

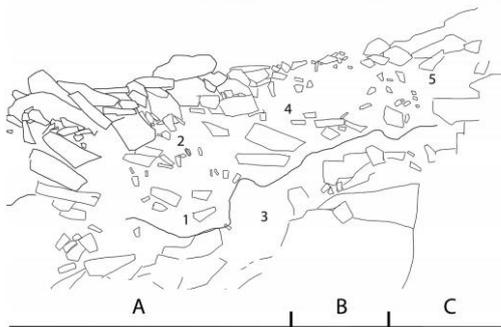


Fig. 2. Soil profile P1, with the corresponding scheme (below) reporting sampling points (number), the horizon limits (lines therein) and sectors (letters) in which C-stocks were estimated.

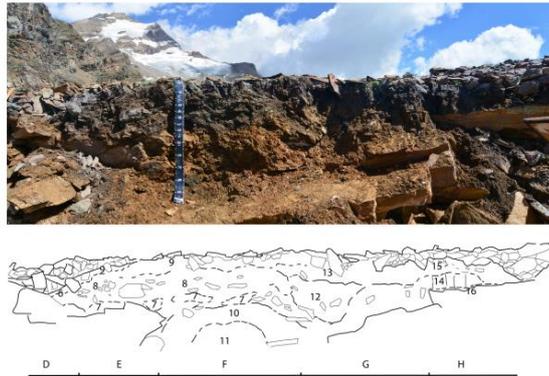


Fig. 3. Soil profile P2, with the corresponding scheme (below) reporting sampling points (number), the horizon limits (lines therein) and sectors (letters) in which C-stocks were estimated.

8.3. Risultati

8.3.1. Le caratteristiche dei profili del suolo

Lo strato pietroso / a blocchi (blockfields e blockstreams, rispettivamente su superfici piane o su pendii) aveva uno spessore di 10-60 cm, era ben graduato con profondità, con le pietre più grossolane in superficie e quelli fini in basso, associati agli orizzonti A1, come di solito osservato nei blockfield e blockstream. Sotto lo strato roccioso, i profili erano caratterizzati da spessori (tra 30 e 65 cm) e orizzonti A e A @ continui, scuri con blocchi subangolari, a struttura piatta o granulare (Tabella 1, Figure 2, 3 e 4). Questi orizzonti erano caratterizzati da poche radici vive o morte e in scarsa quantità, aggregati granulari molto fini e deboli, isolati, biogenici. Sono stati classificati come orizzonti Umbric secondo la WRB (IUSS Working Group WRB, 2015). Infatti, i criteri diagnostici per gli orizzonti umbrici, analizzati i primi 20 cm, si presentano di colore scuro (croma umido e valore ≤ 3), più colori scuri rispetto agli orizzonti sottostanti o al "parent material", morbido o a consistenza friabile e struttura non massiccia, con la TOC $\geq 0,6\%$, pH $< 5,5$ o stato di base $< 50\%$. Al di sotto degli orizzonti umbrici c'erano quelli cambici in Bw spesso sviluppati anche se discontinui, caratterizzati dal colore bruno e struttura a blocchi subangolari ben sviluppata (Tabella 1, Figure 2, 3 e 4). Le pietre erano piuttosto scarse, in particolare negli orizzonti A, evidenziando lo scioglimento del gelo e la crioespulsione. Le pietre erano moderatamente alterate e sono state facilmente rotte con una vanga, in particolare negli orizzonti Bw, mentre erano debolmente alterate nello strato superficiale. All'interno dei profili dei suoli sono state osservate le caratteristiche di crioturbazione, l'inclusioni di materiali di superficie A in profondità (orizzonti n. 7 in Fig.3) e le convoluzioni e lo spostamento del blocco sopra le pietre. Nel profilo 3, i blocchi indicati come "a" in Fig. 2 sono stati dislocati e sollevati mediante processi di congelamento-scongelo dallo strato roccioso evidenziato dalle lettere "b" e "c", sopra una profonda frattura (cuneo). Sono stati osservati porzioni di limo spessi e densi anche sulle facce superiori di frammenti di pietra. Al di sotto degli orizzonti Bw, BC e CB, il substrato roccioso fratturato è stato osservato. I suoli sono stati classificati come Skeletic Umbrisol (Arenic, Turbic), secondo la IUSS Working Group WRB (2015).

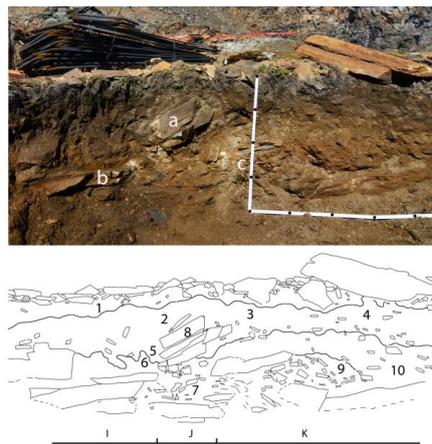


Fig. 4. Soil profile P3, with the corresponding scheme (below) reporting sampling points (number), the horizon limits (lines therein) and sectors (letters I, J, K) in which C-stocks were estimated. Letter "a" indicates blocks dislocated from the rock layer evidenced by letters "b" and "c", above a deep fracture (wedge); notches in the meter rule indicate 20 cm intervals.

8.3.2. Proprietà fisiche e chimiche dei suoli

La tessitura del suolo di tutti gli orizzonti era generalmente sabbiosa o sabbiosa-terriccio, con una consistente prevalenza di sabbia (77% in media) rispetto alle frazioni di limo (20%) e argilla (3%) (Tab. 1). La frazione di argilla era composta da ca. 60% quarzo, 20% mica / illite, 10% clorito, 10% plagioclasio e altri minerali in tracce, che riflettono una simile mineralogia come "parental material". I valori di pH variavano da estremamente a moderatamente acido, compreso tra 4,3 e 5,9. Il contenuto di TOC variava da 0 a oltre il 2%, raggiungendo valori massimi negli orizzonti A, mentre i valori di TN erano molto bassi in tutti i campioni. Il rapporto TOC / TN variava tra 7 e 20, raggiungendo i valori massimi negli orizzonti A. Considerando C-STOCK_{tot} (la somma delle riserve di carbonio totale nel terreno) di ogni settore all'interno dei profili (Tabella 2, Fig. 2, 3 e 4), stati individuati diversi settori con valori differenti: in P1 i valori erano compresi tra 0,7 e oltre 5 kg m⁻², raggiungendo valori minimi e massimi nel settore C e A rispettivamente; nel profilo P2 i valori compresi tra 1,12 e ≈ 3 kg m⁻² raggiungendo valori minimi nel settore D e massimi nel settore F; il C-STOCK_{tot} di P3 ha raggiunto il valore minimo di 2,17 kg m⁻² in settore K e un massimo di 3,30 in kg m⁻² nel settore I.

Table 2
Total C-stock of the profiles for each sector.

P1	Sector	Horizon	Sample number	C-STOCK _{tot} (kg m ⁻²)
A	A1	2	5.18	
	A2	1		
	BA	3b		
B	A1 + A2	4	2.85	
	BA	3		
C	A	5	0.74	
P2	D	A	6	1.12
	A1	9	2.89	
E	A2	8		
	A@	7	2.99	
F	A1	9		
	A2	8		
	A@	7		
	BC	10		
G	CB	11	1.50	
	A	13		
	Bw	12		
H	BC	10b	2.38	
	A	15		
	BA	14		
P3	Silt caps	16		
	I	A1	1	3.30
J	A2	2		
	A2	5		
	Bw	6	3.02	
	A1	1		
K	A2	3		
	A2	8		
	A2	7		
	BC	1	2.17	
	A1	4		
	Bw	10		
	BC	9		

8.4. Discussione

8.4.1. Proprietà del suolo e stock di carbonio

L'apertura delle perforazioni ha rivelato la presenza inaspettata di suoli complessi e ben sviluppati (Umbrisols) sotto il manto pietroso, con convoluzioni e inclusioni di materiali diversi, come risultato di processi di crioturbazione descritti in terreni colpiti da permafrost. Nonostante la forte attività geomorfica che caratterizza quest'area periglaciale, i suoli osservati erano estremamente ben sviluppati, in particolare all'interno di morfologie periglaciali (blockfields e blockstream). Considerando il notevole spessore di orizzonti A (fino a 60 cm), questi terreni sono notevolmente più sviluppati rispetto ai suoli circostanti con o senza vegetazione, a livelli simili o inferiori di elevazione, dove i Skeletic Regosols sono debolmente sviluppati e poco profondi, mentre i Cambisols o Umbrisol con orizzonte A più sottile (fino a 25-30 cm) erano più comuni. Tuttavia, la classe strutturale, così come i valori di pH, erano paragonabili a quelli trovati nei dintorni dei suoli sotto la vegetazione del letto nevoso. Considerando l'assenza di una significativa copertura vegetale sul plateau e l'alta quota, lo stock di carbonio totale stimato per ciascuno settore, era sorprendentemente alto. Nel complesso, gli stock di carbonio erano paragonabili a quelli riportati per i suoli ad alta quota e crioturbati nel Valle d'Aosta, anche se generalmente ricoperta dalla tundra alpina, per la quale sono stati stimati valori intorno a 2–3 kg m⁻². I valori erano anche nell'intervallo riportato per altri suoli vegetati negli ecosistemi della tundra alpina. Inoltre, i risultati ottenuti, in particolare dal profilo del suolo P1, nonostante la mancanza di vegetazione, hanno rilevato valori presenti nel range normale degli stock di carbonio da suoli forestali o brughiere moderatamente sviluppati in Valle d'Aosta, come Entic Podzols.

8.5. Conclusione e prospettive

Durante le attività operative per la realizzazione di una nuova seggiovia presso l'altopiano di Stolenberg, la perforazione del terreno ha rivelato, inaspettatamente, la presenza di suoli estremamente ben sviluppati sotto una fitta copertura pietrosa costituita da blockfields periglaciali e blockstream. Questi suoli, classificati come Umbrisol, erano caratterizzati da una quantità di riserva di C sorprendentemente alta, paragonabile alla tundra alpina o anche ai suoli forestali, nonostante la mancanza di vegetazione e la presenza del manto pietroso. L'applicazione di metodi geofisici non invasivi hanno rivelato che questi terreni nascosti erano diffusi sull'altopiano sotto il manto pietroso, di medio spessore di circa 50 cm, che generalmente aumentava (fino a circa 90 cm) dove i blockfield / blockstream periglaciali erano i più presenti. Questi terreni ricchi di C, senza vegetazione e nascosti all'interno di morfologie periglaciali, possono rappresentare un pedoambiente unico che suggerisce nuova prospettiva sugli stock reali di C in ambiente di alta montagna.

CAPITOLO 9

SOIL QUALITY AND SOIL ORGANIC CARBON STORAGE IN ABANDONED AGRICULTURAL LANDS: EFFECTS OF REVEGETATION PROCESSES IN A MEDITERRANEAN MID-MOUNTAIN AREA. (Wiley, 2020)

Qualità del suolo e stoccaggio organico del carbonio del suolo in terreni agricoli: Effetti dei processi di rivetagezione in un Area mediterranea di montagna

9.1. Introduzione

Il suolo è il principale serbatoio di carbonio organico (C) negli ecosistemi terrestri, rappresentando circa il doppio del C nell'atmosfera (750 Pg C) e tre volte la quantità di C nella biomassa (560 Pg C). La quantità di C immagazzinata nel terreno risulta in equilibrio tra gli ingressi di C dall'atmosfera e il rilascio di Carbonio dal suolo in atmosfera. Questo equilibrio determina se il terreno funge da serbatoio di C o come fonte per C. I residui vegetali costituiscono il principale apporto di C nel suolo naturale. Le uscite del carbonio sono perdite dovute alla mineralizzazione, alla materia organica e all'erosione del suolo; un'ipotetica riduzione del 10% di carbonio organico del suolo (SOC) sarebbe l'equivalente di tutta la (CO₂) emessa dall'uomo nei prossimi 30 anni, il che rafforzerebbe il fenomeno del riscaldamento globale. Pertanto, c'è un grande interesse a ridurre la perdita di C dal suolo e ad aumentarne il sequestro, per evitare il degrado del suolo e per mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici. La composizione della copertura vegetale influisce sul contenuto e sulla qualità di materia organica nel terreno e sui tassi di decomposizione. Così, per secoli, le aree mediterranee in Europa, in particolare quelle più recenti, sono state sottoposte a forti pressioni da parte dell'uomo, che ha utilizzato le risorse naturali per attività agrosilvopastorali. L'uso del suolo da parte degli esseri umani si è ampliato al suo massimo tra la metà del XIX e la metà del XX secolo, in coincidenza con una maggiore pressione demografica. L'occupazione prolungata da parte degli esseri umani ha costituito paesaggi culturali, con usi del suolo molto diversi in cui pascoli e i terreni erano la matrice paesaggistica, mentre foreste e arbusti coprivano un'area più piccola. Gli ampi cambiamenti nella politica socioeconomica avvenuti a partire dalla metà del XX secolo (crescita industriale, l'edilizia nelle pianure e sulla costa, la meccanizzazione dell'agricoltura, l'aumento dell'allevamento intensivo nelle zone produttrici di foraggi) ha emarginato le montagne del Mediterraneo e ha portato a grave spopolamento e abbandono delle attività agrosilvopastorali tradizionali. L'abbandono dei terreni e la riduzione del pascolo sulle colline ha stimolato i processi di rivegetazione naturale che portano al predominio di foreste e arbusti, caratteristiche principali del paesaggio attuale. Tuttavia, va sottolineato che i processi di rivegetazione su campi abbandonati sono processi complessi determinati da fattori naturali e umani, dove il fattore temporale è molto importante per coprire le varie fasi, ma non l'unica, poiché la topografia, la gestione umana (prima e dopo l'abbandono) e le variazioni del clima svolgono un ruolo significativo. Ci sono due problemi principali nei processi di rivegetazione naturale a causa del loro coinvolgimento nella qualità del suolo: la struttura della copertura vegetale diventa sempre più complessa; con specie erbacee dominanti nella prima fase, con pochissimi arbusti, mentre alla fine del processo, ci sono tre strati di vegetazione (alberi, arbusti ed erbacei, con un'ampia varietà di specie), la copertura erbacea rimane per tutte le fasi della successione delle piante, con graminacee dominanti, seguite da specie leguminose. Le montagne di media elevazione del Mediterraneo sono attualmente viste come un'area marginale, a causa del grave spopolamento, del degrado del suolo, della scarsità delle attività

economiche e l'uniformità del paesaggio risultante da intensi processi di rivegetazione registrati dalla metà del 20° secolo. Le medie montagne del Mediterraneo hanno tutte le limitazioni delle aree montane: pendii ripidi, poche aree pianeggianti, un clima invernale, pochi abitanti, scarse infrastrutture e servizi, e canali di comunicazione scadenti con le città. Inoltre, non hanno i vantaggi delle montagne alpine: pascoli e boschi abbondanti, aree pianeggianti a causa di ghiacciai, paesaggi mozzafiato, e così via fornendo grande potenziale per l'allevamento e il turismo. Pertanto, le medie montagne non solo rendono scarso contributo dal punto di vista socio-economico ai paesi mediterranei in Europa, ma costituiscono anche un'area ad alto rischio per l'ambiente e il paesaggio a causa degli aumentati incendi e dell'erosione del suolo, con conseguente perdita di biodiversità e di degrado dei paesaggi culturali. Tuttavia, i terreni abbandonati hanno un forte potenziale per fornire servizi ecosistemici pertinenti (ad esempio, acqua, suolo), quindi l'Unione europea incoraggia i ricercatori e i manager per implementare strategie di gestione che contribuiscano ad aumentare il contributo delle aree abbandonate alla società. Tra i servizi ecosistemici che potrebbero essere offerti vi sono un migliore mantenimento della qualità del suolo, principalmente il contenuto di SOC, di importanza cruciale per il ciclo globale del carbonio nella mitigazione dei cambiamenti climatici. Arbusti estesi e foreste modificano le caratteristiche del suolo e influenzano le scorte di SOC. L'ipotesi di questo studio è che, nelle medie montagne del Mediterraneo, i processi di rivegetazione naturale dopo abbandono della terra, implementi una migliore qualità fisico-chimica del suolo e stock SOC terrestri più elevati. Lo scopo di questa ricerca era quello di studiare gli effetti dei processi di rivegetazione naturali nei campi agricoli abbandonati, la qualità fisico-chimica del suolo e gli stock di SOC in una parte marginale dell'Area mediterranea di media montagna (Valle di Leza, Spagna). L'obiettivo secondario era quello di scoprire il ruolo della composizione di SOC della vegetazione nel profilo del suolo (0-40 cm).

9.2 MATERIALI E METODI

9.2.1 Area di studio e usi del suolo

9.2.2. Descrizione dell'area di studio

La Valle di Leza (nel settore nord-occidentale delle montagne Iberiche, Spagna) è stata scelta come area di studio, in quanto ha rappresentato da vicino le caratteristiche delle medie montagne mediterranee (Figura 1). Essa copre una superficie di 274,2 km². La litologia dominante include quarzite e arenaria e il settore più occidentale risale al mesozoico ed è calcareo. Il rilievo presenta dolci pendenze fino alle creste (pendenza del 20-40%), adatte all'agricoltura della regione, fin quando le colline diventano più ripide avvicinandosi ai letti del fiume. I suoli dominanti sono i districi Cambisol. Il clima nella Valle di Leza è classificato come montagna mediterranea. Le precipitazioni annue vanno da 600 e 1.000 mm, a seconda dell'altitudine e dell'esposizione, con oltre il 60% in primavera e in autunno; le estati sono secche. La temperatura media annua è di circa 11°C a 600 m s.l.m. e 6°C a 1.800 m s.l.m. La copertura vegetale presenta dei picchi che comprende principalmente foreste di *Fagus sylvatica* e *Quercus pyrenaica*, mentre *Quercus ilex* sp. cresce a quote più basse. Alcune zone sono ricoperte di pini (*Pinus sylvestris* e *Pinus nigra*) a causa del rimboschimento negli anni '70 e '80. Arbusti contenenti *Genista scorpius*, *Thymus vulgaris*, *Rosmarinus officinalis* e *Buxus sempervirens* dominano i terreni calcarei, mentre *Cistus laurifolius* è la pianta più comune sul terreno siliceo essendo la specie dominante nel sito di studio. La Valle di Leza è

una zona montana fortemente rappresentativa dell'agricoltura intensiva in passato e improvvisamente abbandonata dalla metà del XX secolo, a causa dello spopolamento.

La terra aveva uno strato disboscato dal XII secolo per stabilire terreni al pascolo per nutrire i greggi in estate. Nei secoli XVIII e XIX, le colline erano costantemente ruotate per la coltivazione di cereali (grano, avena e segale) per nutrire la popolazione locale. Tra gli anni '50 e anni '80, le aree agricole sono state abbandonate con allevamenti di pecore e di razze di bovini, gestiti da titolari senza esperienza zootecnica. Nell'ampia area dei terreni abbandonati (11.834 ha), c'era un sistema di pascoli che era mal gestito dalle mandrie, che ha promosso un processo di rivegetazione naturale che ha portato gli arbusti a diventare il principale LULC ("land uses and land cover") del paesaggio.

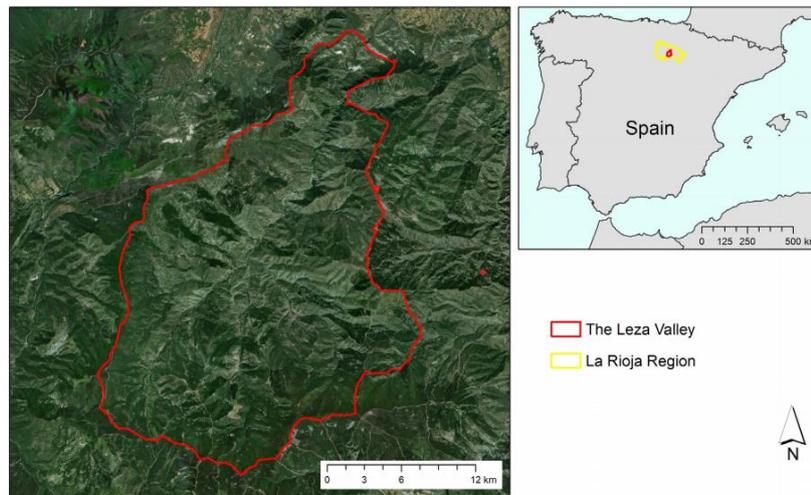


FIGURE 1 Study site location. Leza Valley (Iberian System Range, Spain) [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

9.2.3 Valutazioni degli usi del suolo nei campi abbandonati

Fotografia aerea (dal 1956), ortofotografie (2014), lavoro sul campo e su ArcGIS 10.3 ha individuato l'ubicazione e l'estensione dei terreni agricoli, così come quello gestito nel 2014. Questo ci ha permesso di trovare i principali LULC (Figura 2) nei campi abbandonati: (a) pascoli (5 anni di abbandono), b) arbusti (*C. laurifolius*, specie dominanti, 20-35 anni di abbandono), (c) cespugli (*Juniperus communis*, la specie dominante, 35-50 anni di abbandono), di foreste giovani (*Q. pyrenaica* con un grande strato di cespugli; 50-70 anni di abbandono) e vecchie foreste o "dehesa" (più di 70 anni di abbandono). Questi ultimi si trovano generalmente nei campi abbandonati prima del 1956 (a causa della pesante pressione demografica e del bestiame sulla terra, sono stati utilizzati come pascolo). Ciò ha dato origine alle foreste di *Q. pyrenaica*, con uno strato di arbusti che copre un'area molto piccola, e uno strato erbaceo molto denso. Informazioni relative ai periodi di abbandono dei terreni e gli attuali usi del suolo sono stati tracciati attraverso la fotointerpretazione e la mappatura da fotografie aeree. Fotografie aeree del 1956 e del 1981 alle scale 1:33.000 e 1:25.000, rispettivamente, sono stati utilizzati e un SIG è stato impiegato per calcolare l'area occupata dall'agricoltura. Le fotografie aeree del 1957 consentono di identificare l'abbandono, perché in questa data, alcuni dei campi erano ancora coltivati e altri erano stati abbandonati di recente. La cartografia dell'abbandono dei terreni e degli usi del suolo (Figura 3) è stata digitalizzata e implementata in un sistema di informazione geografica (ArcGIS 10.1) su una scala di 1:50.000.

9.3 Metodi

9.3.1. Progettazione e campionamento degli esperimenti: suolo e vegetazione

Durante una campagna di campionamento nel 2017, tre appezzamenti (6×6 m) per LULC sono stati selezionati con condizioni topografiche simili (altitudine, pendenza e esposizione). Sono stati effettuati ampi lavori sul campo e campionamenti del suolo in ogni zona. Sono stati raccolti sistematicamente utilizzando una coclea (10 cm di diametro): tre sotto-campioni (a circa 1 metro di distanza) per zona e profondità (0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm) (totale sotto-campioni 180). Più avanti nel campo, sono stati prelevati campioni di terreno composito da ciascuno di questi appezzamenti mescolando delicatamente tre sotto-campioni per campionamento. In totale, 60 campioni composti (12 per LULC) sono stati analizzati in laboratorio. Inoltre, sono stati prelevati 100 cc di “nuclei”, cioè piccole porzioni di campioni indisturbati per stimare la densità apparente in ogni profondità di appezzamento. In ogni LULC, in coincidenza con le zone di campionamento del suolo (6×6 m), tre aree sono state “isolate” per misurare le caratteristiche della vegetazione. È stato effettuato un inventario delle specie vegetali visive in situ, identificando tutte le specie e stimando la copertura di ogni specie vegetale in ogni appezzamento in tre strati di vegetazione: arboreo, arbustivo ed erbaceo. Sono state registrate 126 specie vegetali nei diversi LULC, la maggior parte dei quali nello strato erbaceo.

9.3.2. Caratterizzazione del suolo

I campioni di terreno sono stati essiccati all'aria e setacciati attraverso un setaccio a rete da 2 mm in laboratorio. I seguenti parametri del suolo sono stati determinati in laboratorio (Figura 2): (a) la densità (BD) è stata stimata da nuclei indisturbati che sono stati essiccati al forno a 105°C per 24 ore; (b) conducibilità elettrica (CE) e pH sono stati misurati in una sospensione d'acqua deionizzata (1:2.5) utilizzando un pHmetro con un misuratore di conducibilità; (c) il fosforo disponibile (P) è stato determinato con il metodo di Bray; (d) la tessitura del suolo (dopo aver ossidato il materiale organico con perossido) è stata determinata utilizzando analizzatore di particelle; (e) la materia organica del suolo (SOM) è stata determinata utilizzando il metodo di ossidazione umida dell'acido cromico di Walkley-Black; (f) carbonio totale (TC) e l'azoto totale (TN) sono stati misurati mediante combustione a secco in un analizzatore elementare (analizzatore Vario Max e N); (g) il carbonio organico del suolo (Corg) è stato calcolato utilizzando il fattore di van Bemmelen di 0,58, utilizzando come fattore di conversione (a causa dell'assenza di CaCO_3 misurata con il metodo calcimetrico di Bernard); (h) carbonio organico del suolo (SOC) e scorte di azoto (TN) nel suolo sono state espresse in Mg ha^{-1} (calcolato ponderando ogni valore Corg e TN in base al rispettivo intervallo di profondità [10 cm] e densità di massa); (i) Il rapporto C/N è stato calcolato utilizzando Corg e TN. Inoltre, è stato applicato un indice fisico-chimico di qualità del suolo (SQI) per riassumere tutti i risultati ottenuti. Tramite tecnica di indicizzazione sono state misurate variabili fisiche e chimiche del suolo, attraverso un'analisi dei componenti principali (PCA), normalizzata e poi integrato in un SQI ad additivo ponderato.

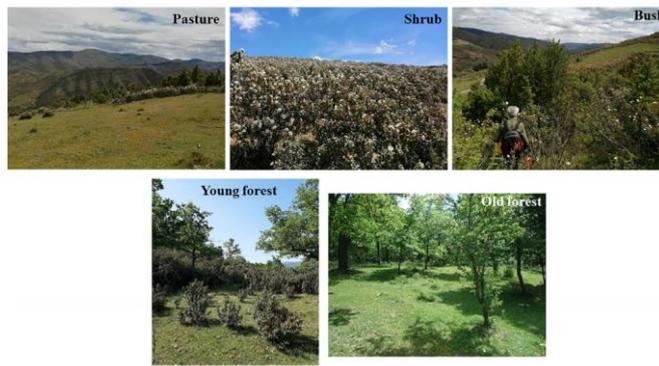


FIGURE 2 Overview of the different land uses and land covers: pasture, shrub, bush, young forest and old forest [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

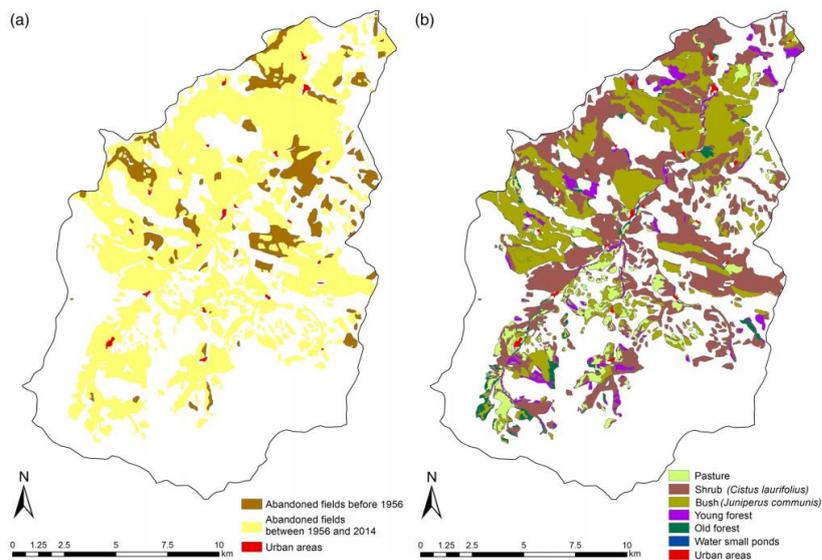


FIGURE 3 (a) Cultivated fields and age of abandonment. Only cultivated and abandoned area has been mapped. (b) Spatial distribution of land cover in abandoned fields in the Leza Valley. Source: Own preparation from digitization of aerial photographs of the corresponding year on the SIOSE cartography (2014). Only cultivated and abandoned area has been mapped [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

9.4. Analisi statistica

Oltre all'analisi fisico-chimiche, sono state esaminate le variabili del suolo per la distribuzione e le differenze tra gli usi del suolo e le profondità del suolo. Poiché l'ipotesi della distribuzione normale per fattore non è stata trovata usando il test di normalità di Shapiro-Wilk; è stato utilizzato quello di Kruskal-Wallis non parametrico in modo da monitorare le differenze tra LULC e la profondità del terreno, e il metodo di Dunn-Bonferroni per identificare quale LULC statisticamente si differenziava dagli altri. La copertura vegetale è stata anche esaminata per verificare le differenze tra le varie LULC in composizione erbacea. Poiché il numero di specie erbacee è elevato, per l'analisi statistica sono state raggruppate la specie nelle famiglie, come leguminoseae, gramineae (più abbondanti) e altre (Figura 3 a). Solo l'area coltivata e quella abbandonata sono state mappate. Infine, tutti i dati (proprietà fisiche e chimiche del suolo e solo le coperture erbacee presenti in tutte le LULC) sono state analizzate tramite PCA. Quest'analisi è stata effettuata sulla matrice di correlazione e utilizzata per determinare il grado in cui il LULC influisce sulle caratteristiche del suolo e sulla copertura erbacea in esame. L'adeguatezza del campionamento delle variabili è stata analizzata dalla misura di Kaiser-Meyer-Olkin ($>0,50$) e dal test di sfericità di Bartlett ($<0,05$). Nessuna variabile è stata scartata

poiché i valori di comunità erano $> 0,5$. La selezione dei principali componenti si basava sul criterio di radice latente con autovalori $> 1,0$. Per l'analisi statistica è stato adottato un livello di significatività di $p < 0,05$, salvo diversa indicazione ($p < 10$).

9.5.risultati

9.5. L'uso del suolo e della copertura nei terreni agricoli abbandonati.

La figura 3a mostra l'area dei campi abbandonati per periodi diversi (prima del 1956 e tra il 1956 e il 2014). La copertura delle terre abbandonate è pari a 11.834 ha (43,2% del sito di studio). 1.578 ha (13,3% terra) era già stata abbandonata prima del 1956, mentre 10.256 ha (86,7%) furono abbandonati dopo il 1956. La figura 3b mostra i LULC per i campi abbandonati nel 2014. Il terreno occupato da pascolo presenta un'area di 1.156 ha (9,8%); arbusti 5.631 ha (47,6%); cespugli 4.066 ha (34,3%); foreste giovani 646 ha (5,5%) e vecchie foreste 324 ha (2,7%).

9.5.2 Composizione vegetale

La composizione della vegetazione varia a seconda dei LULC (Tabella 1). I pascoli avevano una struttura semplice, in quanto non c'erano alberi, e gli arbusti coprono solo il 6,3%, mentre la copertura erbacea raggiunge l'85%. Foresta vecchia e la foresta giovane avevano la struttura più complessa dei LULC studiati, con tre strati di vegetazione: alberi, arbusti ed specie erbacee, anche se la vecchia foresta aveva il maggior numero di specie in tre strati. Arbusti e cespugli costituiscono coperture transitorie tra pascoli e foreste; non c'erano alberi, ma arbusti densi e copertura erbacea. In tutti i campionamenti della vegetazione, abbiamo registrato 126 specie vegetali, la maggior parte di loro nello strato erbaceo ($n = 107$). La presenza e la copertura percentuale delle specie vegetali sono elencate nella tabella S1. Le specie più frequenti erano *C. laurifolius*, *Galium s.p.*, *Lotus corniculatus*, *Polygala vulgaris* e *Bromus erectus* che sono presenti in tutte le LULC. La vecchia foresta (19 famiglie e 41 specie) e arbusti (13 famiglie e 28 specie) aveva rispettivamente il numero più alto e più basso di famiglie e specie. I pascoli e cespugli mostravano valori simili in un certo numero di famiglie. In base alle loro percentuali di copertura, le più alte sono state trovate per *Q. pyrenaica* e *Brachypodium sylvaticum* nelle giovani e nelle vecchie foreste, *J. communis* e *Brachypodium pinnatum subsp.* nei cespugli, *C. laurifolius* nei prati e negli arbusti e *B. erectus* nei pascoli. Per quanto riguarda le famiglie di arbusti, sono state osservate differenze significative per le coperture Cistaceae, Rosaceae, Cupressaceae e Fagaceae tra LULC diversi ($p < 0,05$) (cfr. tabella S2a). Relativo allo strato erbaceo, che è stato analizzato in dettaglio, l'elevata diversità è stata osservata tra le famiglie (per un totale di 27) nei cinque LULC (Figura 4). Non sono state osservate differenze significative nella copertura erbacea e al numero di famiglie tra LULC (cfr. Tabella S2b). I risultati sono i seguenti: (a) le gramineae occupavano la superficie più grande, con arbusti di valore più elevato (70%) e foresta vecchia la più bassa (44%); b) le leguminose sono state la seconda famiglia più comune, con la vecchia foresta con il valore più alto (18%) e arbusti il più basso (11%) e (c) la vecchia foresta aveva la più alta diversità di famiglie (19), con 17 famiglie che formano il gruppo degli "altri": insieme, questi coprivano il 38,5% della superficie totale. Ci sono meno famiglie che in altri LULC, ed è degno di nota che il gruppo "altro" abbia avuto la più piccola area di arbusti (19%).

9.5.3. Proprietà fisiche e chimiche del suolo

La Tabella 3 presenta i valori medi e la deviazione standard di tutto il suolo e delle proprietà fisiche e chimiche misurate. I risultati del KruskalWallis hanno mostrato differenze significative tra i LULC: diverse proprietà fisiche e chimiche come composizione della trama, pH, contenuti CE e P estraibili (a p livello .05), e contenuti SOC e Rapporto C/N a p livello .10; che la profondità ha avuto un effetto significativo su tutti le variabili ad eccezione del rapporto C/N, del pH, dell'argilla e del contenuto di P estraibile (Tabella 2). Sono state osservate differenze significative tra le profondità e la consistenza del suolo. In generale, sono state osservate forti differenze tra le prime fasi dell'abbandono dei terreni e le foreste giovani e antiche. Sono state osservate anche differenze significative tra diverse profondità nel contenuto di limo e sabbia nei cespugli e nei vecchi siti forestali (Tabella 3). La concentrazione di P disponibile variava in relazione alle diverse LULC: i valori più alti sono stati registrati nei siti della vecchia foresta e negli arbusti e i più bassi nelle aree di pascolo. Non sono state osservate variazioni nei valori di BD relativi agli LULC, ma la BD è aumentata con la profondità del suolo tra tutti gli LULC (Tabella 3). Generalmente, il contenuto di Corg è gradualmente aumentato durante le diverse fasi dei processi di rivegetazione e diminuito con la profondità del suolo (Tabella 3 e Figura 5a). Simile al contenuto di Corg, il contenuto di TN del suolo con la rivegetazione è diminuito con la profondità del suolo (Figura 5b). Rispetto a quello dei pascoli, lo stock di SOC in 0-10 cm è aumentato significativamente dai primi anni di abbandono ai giovani e le vecchie fasi delle foreste (cfr. Tabella 3 e Figura 6a). Mentre non vi è alcun aumento significativo degli stock di SOC e TN negli strati del suolo (>20 cm). Inoltre, gli stock di SOC a profondità hanno mostrato variazione tra i due primi strati (0-20 cm) e le profondità poco profonde (20-40 cm). Gli stock totali di SOC per l'intero profilo del suolo variavano tra $60,0 \pm 17,1$ Mg C ha⁻¹ (pascoli), $84,0 \pm 9,9$ Mg C ha⁻¹ (arbusti), $86,7 \pm 1,3$ Mg C ha⁻¹ (cespugli), $106,9 \pm 13,7$ Mg C ha⁻¹ (vecchia foresta) e $117,8 \pm 27,3$ Mg C ha⁻¹ (foresta giovane). Lo stock di SOC a una profondità di 0-20 cm rappresentava 68, 65, 67, 71 e 74% del SOC totale fino a 40 cm di profondità nel pascolo, arbusti, cespugli, foresta giovane e vecchia foresta, rispettivamente. Alla luce del profilo totale degli stock di SOC (fino a 40 cm), sono state osservate le uniche differenze significative tra pascoli e foreste giovani e vecchie. Risultati simili sono stati trovati per il contenuto di TN e stock di TN del suolo (cfr. Figura 6b). Nessuna differenza in C/N sono stati osservati. Infine, è stato applicato un SQI per sommarli a tutte le proprietà fisico-chimiche del suolo (Figura 7). I tre componenti sono stati utilizzati per l'analisi PCA, che ha spiegato quasi l'80% della varianza totale: PC1 56,33%, PC2 16,05% e PC3 7,39%. A seguito di un'analisi di correlazione, è stato creato il set di dati minimo finale, SOM e contenuto di TN del suolo per PC1, contenuto di sabbia e rapporto C/N per PC2, limo e contenuti P disponibili per PC3. Prendendo singolarmente le profondità del suolo, sono stati trovati i seguenti risultati: (a) il valore SQI più alto è stato registrato nei primi 10 cm nella vecchia foresta, e i valori più bassi sono stati registrati nei 20-40 cm nei siti di pascolo; (b) sono state osservate differenze significative tra pascoli e cespugli e foreste giovani e (c) differenze tra strati superiori del suolo (0-20 cm) e sono stati registrati anche strati (20-40 cm) (figura 7).

TABLE 1 Summary of the structure of the vegetation cover depending on the LULCs

	Pasture		Shrub		Bush		Young forest		Old forest	
	% Cov.	N° Sp.	% Cov.	N° Sp.	% Cov.	N° Sp.	% Cov.	N° Sp.	% Cov.	N° Sp.
Tree	—	—	—	—	—	—	76.7	1	65.5	4
Shrubland	6.3	4	76.0	5	64.0	6	40.0	7	14.3	8
Herbaceous	85.0	42	25.7	28	64.0	35	68.0	33	79.0	41

Note: To analyse all the species, please see Table S1. %Cov: % Cover. N° Sp.: number of plant species. Note that the different vegetation layers (trees, shrubland and herbaceous) have been analysed independently, and consequently covers in each LULC do not add up to 100%.

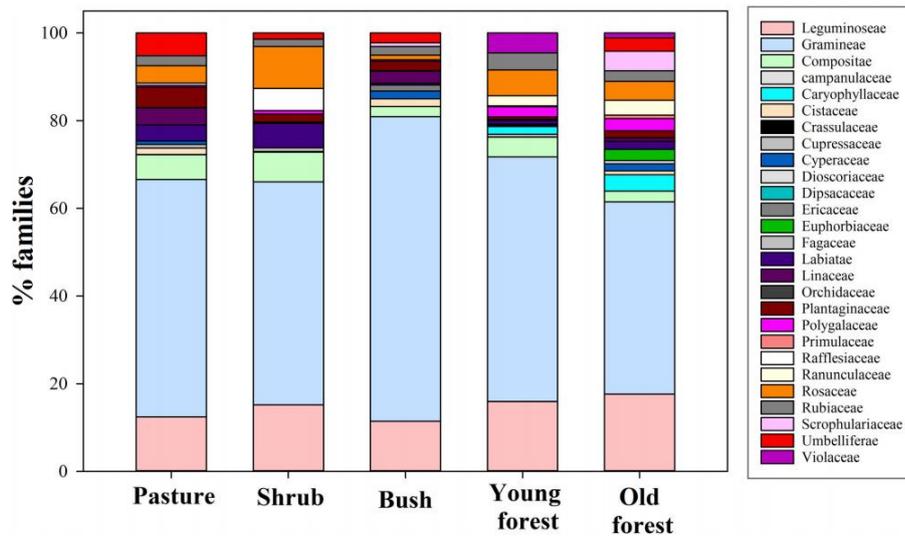


FIGURE 4 Percentages of the surface occupied by the different families in the herbaceous stratum [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

9.5.4 Copertura delle specie vegetali e proprietà del suolo

I principali risultati della PCA hanno consentito una visione sintetica dei risultati in diversi LULC ottenuti (tra cui le proprietà chimico-fisiche del suolo e la copertura erbacea). Le prime due componenti della PCA hanno spiegato il 69,7% della varianza totale (Figura 8), con la prima PCA (Figura 4) che spiega le percentuali della superficie occupata dalle diverse famiglie nello strato erbaceo, mentre la seconda PCA che spiega il 56,8% della varianza totale. I valori degli autovettori erano alti (correlazione > 0,4) e positivi per il contenuto di sabbia, per tutte le variabili in merito a SOC e TN del suolo (Ctotal, Corg, SOC, materia organica, TN contenuto e stock TN) e per l'SQI, sia alto che negativo per limo e contenuto di argilla. Le leguminose e altre famiglie sono state distribuite sul lato positivo di PC1. La seconda componente ha spiegato il 12,9% della varianza e le variabili con alti valori positivi di autovettori (correlazione > 0,4) erano EC, P, SQI, leguminose, altre famiglie, tutte le variabili SOC e TN del suolo (Ctotal, Corg, SOC, materia organica, contenuto di TN e stock di TN), mentre alti e negativi per le graminacee e i valori di BD. La Figura 8 mostra anche i punteggi PC nel piano di PC1 e PC2 per i diversi LULC mostrando netta separazione, soprattutto con i siti arbustivi e con quelli delle giovani e vecchie foreste. I siti degli arbusti sono sul lato negativo di PC1, con valori bassi di SOC e TN, e bassi valori di copertura delle graminacee. D'altra parte, i siti delle giovani foreste sono sul lato positivo di PC1 ed entrambi i lati positivo e negativo di PC2, chiaramente separati dagli altri siti: alti valori del contenuto di SOC e N

del suolo, di stock e del contenuto di sabbia. Anche i siti delle vecchie foreste sono differenziati e situati sul lato positivo di PC1 con elevata variabilità in tutto il PC2. Tuttavia, i siti di pascolo e cespugli hanno mostrato un'elevata variabilità tra entrambi le componenti e sono raggruppati insieme, principalmente sul lato negativo di PC1 e PC2, entrambi con una forte presenza di graminacee (vedi Figura 4) e i valori più bassi per i contenuti di Corg e TN del suolo (vedere Figura 5).

9.6. DISCUSSIONE

9.6.1. Qualità fisico-chimica del suolo e SOC in terreno agricolo abbandonato

Sono state valutate le differenze nella qualità fisico-chimica del suolo e tra SOC e TN del suolo (contenuto e stock) come componenti essenziali della qualità del terreno, in cinque LULC (pascoli, arbusti, cespugli, giovani foreste e vecchie foreste) a diverse profondità nelle montagne del Mediterraneo (Leza Valley, Spagna) a seguito dell'abbandono dei terreni coltivati. I LULC riflettono diverse fasi della successione delle piante che si svolgono nei campi abbandonati (Figura 3). E' stato osservato che nell'area di studio, in un primo stadio di rivegetazione naturale, le specie erbacee sono cresciute per fornire il pascolo; dopo alcuni anni (3-5) hanno cominciato a prendere piede arbusti, in particolare *C. laurifolius* come specie dominante, che gradualmente ricoprì per la maggior parte il terreno (Figura 2). Su terreni degradati, *C. laurifolius* può rimanere per decenni con quasi nessun cambiamento (20–35 anni). *J. communis* rappresenta una fase più avanzata nella successione delle piante. Prima nei campi abbandonati e successivamente in quelli in cui la rivegetazione è veloce, viene raggiunto lo stadio della foresta giovane mentre lo stadio di vecchia foresta si trova in alcune zone nell'area di studio, a volte su campi abbandonati prima del 1956 (Figura 3). I risultati supportano l'ipotesi che i processi di rivegetazione naturale nelle aree montane mediterranee favoriscono un miglioramento nella qualità fisico-chimica del suolo e un aumento di stock di SOC e TN, con differenze tra LULC come mostrato dall'analisi PCA (Figura 8). La materia organica del suolo, il carbonio organico totale (Tavola 2) l'azoto totale è maggiore nelle ultime fasi della rivegetazione naturale (Figura 5). Inoltre, è stato osservato che lo stock di SOC è aumentato con il progredire della rivegetazione, tranne che nell'ultima fase della vecchia foresta ($60 \text{ Mg C ha}^{-1} < 84 \text{ Mg C ha}^{-1} < 87 \text{ Mg C ha}^{-1} < 107 \text{ Mg C ha}^{-1} < 117,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$ per pascoli, arbusti, cespugli, boschi vecchi e giovani foresta, rispettivamente in Figura 6), essendo significativamente differenti tra loro valori tra pascoli (primi anni di abbandono della terra) e foresta giovane e vecchia (Tabelle 2 e 3). L'aumento delle scorte di SOC e TN nel suolo è spiegato dal maggiore apporto di lettiera dalla fitta vegetazione, derivati dai processi naturali di rivegetazione, poiché arbusti e gli alberi forniscono più biomassa sotterranea e più lettiera di foglie e necromassa sopra il terreno, che risultano essere importanti fonti di carbonio organico integrabile nel suolo (protetto e stabilizzato). Per quanto riguarda lo stock di SOC, il valore più grande (0-40 cm) si trova nella foresta giovane (118 Mg C ha^{-1}) (Figura 6), con valori leggermente superiori rispetto alla vecchia foresta (107 Mg C ha^{-1}) (sebbene non siano state osservate differenze significative). Ciò può essere correlato alla copertura arbustiva più estesa nella foresta giovane (40%) rispetto alla vecchia foresta (14,3%) (Tabella 1 e Figura 4), il che significa un maggiore accumulo di lettiera, e quindi un maggior accumulo di SOC. E' stato scoperto che il più grande stock di SOC si trovava negli strati superiori del suolo nelle foreste di media età (60-120 anni), mentre negli strati inferiori, gli stock sono diminuite man mano che l'età della foresta è aumentata e si è concluso che il carbonio si accumula rapidamente nei primi 10-50 anni dopo l'abbandono e poi si stabilizza. Un altro motivo potrebbe essere la presenza di pascoli solo nella vecchia foresta, ma non nella

foresta giovane. Tuttavia, il ruolo del pascolo negli stock di SOC non è chiaro. Le differenze significative più elevate negli stock di SOC si sono verificate negli strati superiori del suolo attribuiti a grandi quantità di materia organica sommata al suolo superiore (Figura 6). Nei cinque LULC, il più alto accumulo di SOC si verifica nei primi 20 cm di terreno, specialmente nei primi 10 cm (38, 42, 31, 38, 48%, rispettivamente, in pascolo, arbusti, cespugli, foresta giovane e vecchia). I più grandi stock di SOC negli strati superiori del suolo (0-10 e 10-20 cm) sono stati osservati nella vecchia foresta (48 e 74% nei primi 10 e 20 cm, rispettivamente) (Figura 6). Ciò può essere spiegato dall'ampia copertura erbacea e la sua elevata diversità, con una forte presenza di graminacee. E' stato dimostrato che le graminacee di solito hanno radici più fini rispetto ad altre erbe. Le radici sono una primaria fonte di accumulo di materia organica nel suolo; contribuiscono anche a migliorare la stabilità degli aggregati negli strati superficiali del suolo, il che aiuta a stabilizzare il carbonio nel suolo. La tessitura del suolo è particolarmente importante nella stabilizzazione del materiale organico, dal momento che argille e limi trattengono la materia organica più antica, mentre la sabbia contiene la materia più nuova. I risultati mostrano valori elevati di sabbia nella vecchia foresta che coincidono con alti valori delle azioni di SOC (Tabella 3). I risultati ottenuti negli strati superiori del suolo hanno suggerito che la composizione del manto vegetale influenza la materia organica nel suolo, con biomassa di specie erbacee in decomposizione e integrandosi nel terreno più facilmente della biomassa degli arbusti. Un risultato notevole è stato la minore quantità di SOC negli orizzonti minerali della vecchia foresta e della giovane foresta. Inoltre, lo studio ha rilevato che la proporzione di SOC negli strati inferiori (più di 20 cm) di suolo è molto basso in tutti e cinque i LULC. Una spiegazione potrebbe essere la scarsa percentuale di rinnovamento di radici rispetto agli strati superiori, dove formano una grande biomassa sotterranea.

TABLE 3 Means per land use, three replicates per LU, of the studied soil properties

	Soil depth (cm)	Pastures	Shrub	Bush	Young forest	Old forest
Corg (%)	0-10	1.6 ± 0.6 ^a A	2.7 ± 0.1 ^{ab} A	2.0 ± 1.1 ^{ab} AB	3.2 ± 0.5 ^{bc} A	3.8 ± 0.7 ^c A
	10-20	1.2 ± 0.3 ^a AB	1.3 ± 0.2 ^{ab} AB	2.3 ± 0.8 ^{bc} A	2.7 ± 0.6 ^c AB	1.9 ± 0.2 ^{abc} B
	20-30	0.6 ± 0.2 ^{AB}	1.2 ± 0.5 ^B	1.1 ± 0.1 ^A	1.5 ± 0.6 ^{AB}	1.0 ± 0.2 ^C
	30-40	0.6 ± 0.3 ^B	0.8 ± 0.2 ^B	0.8 ± 0.1 ^B	0.8 ± 0.5 ^B	0.8 ± 0.2 ^C
N (%)	0-10	0.2 ± 0.06 ^a A	0.3 ± 0.04 ^{ab} A	0.2 ± 0.07 ^a A	0.3 ± 0.05 ^b A	0.4 ± 0.09 ^b A
	10-20	0.1 ± 0.03 ^a AB	0.2 ± 0.04 ^{ab} AB	0.2 ± 0.07 ^{ab} A	0.3 ± 0.07 ^b AB	0.2 ± 0.04 ^{ab} B
	20-30	0.1 ± 0.02 ^B	0.1 ± 0.03 ^B	0.1 ± 0.01 ^{AB}	0.1 ± 0.06 ^B	0.1 ± 0.01 ^C
	30-40	0.1 ± 0.02 ^B	0.1 ± 0.03 ^B	0.1 ± 0.02 ^B	0.1 ± 0.08 ^B	0.1 ± 0.01 ^C
SOC (mg ha ⁻¹)	0-10	22.9 ± 6.7 ^a A	35.1 ± 1.1 ^{ab} A	27.3 ± 11.5 ^{ab} A	44.3 ± 6.2 ^{bc} A	51.5 ± 7.3 ^c A
	10-20	17.6 ± 3.5 ^a AB	19.5 ± 2.7 ^a AB	30.7 ± 9.1 ^{ab} A	37.9 ± 7.2 ^b AB	27.8 ± 2.0 ^{ab} B
	20-30	10.1 ± 3.6 ^B	17.1 ± 6.2 ^B	16.7 ± 2.0 ^B	22.6 ± 8.6 ^{BC}	15.1 ± 3.5 ^C
	30-40	9.3 ± 4.4 ^B	12.3 ± 2.7 ^B	12.0 ± 1.2 ^B	13.0 ± 7.3 ^C	11.9 ± 3.1 ^C
TN (mg ha ⁻¹)	0-10	3.0 ± 0.8 ^{ab} A	3.4 ± 0.5 ^{ab} A	2.4 ± 0.7 ^a A	4.7 ± 0.6 ^{bc} A	5.6 ± 1.1 ^c A
	10-20	1.7 ± 0.5 ^{AB}	2.1 ± 0.5 ^{AB}	2.8 ± 0.8 ^A	3.7 ± 0.9 ^{AB}	2.9 ± 0.6 ^B
	20-30	1.3 ± 0.3 ^B	1.6 ± 0.4 ^B	1.5 ± 0.1 ^B	1.9 ± 0.9 ^B	1.9 ± 1.2 ^C
	30-40	1.2 ± 0.2 ^B	1.4 ± 0.3 ^B	1.2 ± 0.3 ^B	1.5 ± 1.3 ^B	1.5 ± 0.2 ^C
CN ratio	0-10	7.9 ± 2.6	10.5 ± 1.3	11.1 ± 2.5	9.3 ± 0.5	9.2 ± 0.5
	10-20	10.7 ± 1.5	9.4 ± 1.4	10.9 ± 0.4	10.8 ± 3.0	9.9 ± 1.6
	20-30	7.9 ± 1.3	10.8 ± 2.1	10.9 ± 2.1	12.1 ± 2.6	8.5 ± 2.0
	30-40	7.3 ± 2.3	9.1 ± 0.8	10.2 ± 2.3 ^A	10.2 ± 3.2	8.0 ± 2.6
OM (%)	0-10	2.8 ± 1.0 ^a A	4.7 ± 0.2 ^{ab} A	3.5 ± 1.8 ^a A	5.5 ± 0.9 ^b A	6.6 ± 1.2 ^b A
	10-20	2.1 ± 0.5 ^a AB	2.3 ± 0.4 ^a AB	4.0 ± 1.4 ^b A	4.6 ± 1.0 ^{ab} AB	3.2 ± 0.3 ^{ab} B
	20-30	1.1 ± 0.4 ^B	2.0 ± 0.7 ^B	2.0 ± 0.3 ^{AB}	2.6 ± 1.0 ^{BC}	1.7 ± 0.4 ^C
	30-40	1.0 ± 0.5 ^B	1.4 ± 0.3 ^B	1.4 ± 0.1 ^B	1.4 ± 0.8 ^C	1.3 ± 0.4 ^C
pH	0-10	6.3 ± 0.1 ^a	5.9 ± 0.3 ^{ab}	5.8 ± 0.1 ^b	6.1 ± 0.5 ^{ab}	5.3 ± 0.3 ^b
	10-20	5.9 ± 0.4	5.4 ± 0.5	5.8 ± 0.1	6.0 ± 0.5	5.2 ± 0.1
	20-30	5.8 ± 0.3	5.5 ± 0.7	5.6 ± 0.1	6.0 ± 0.3	5.6 ± 0.5
	30-40	5.5 ± 0.2	5.4 ± 0.3	5.5 ± 0.2	6.2 ± 0.2	6.0 ± 0.5
EC (µS cm ⁻¹)	0-10	94.14 ± 34.3	181.4 ± 82.6 ^A	97.1 ± 34.3 ^A	105.3 ± 5.3	197.8 ± 203.3 ^A
	10-20	102.1 ± 28.2 ^{ab}	108.1 ± 26.3 ^a AB	102.1 ± 28.2 ^a A	85.6 ± 25.7 ^{ab}	43.6 ± 1.8 ^b B
	20-30	51.1 ± 17.7	93.1 ± 10.1 ^B	51.19 ± 17.7 ^{AB}	63.0 ± 21.9	37.5 ± 9.0 ^B
	30-40	46.9 ± 11.7 ^{ab}	71.8 ± 8.6 ^a B	46.9 ± 11.8 ^{ab} B	43.2 ± 16.6 ^{ab}	31.5 ± 8.0 ^b BC
Clay (%)	0-10	7.2 ± 0.5 ^{ab} A	9.5 ± 0.7 ^a	9.8 ± 2.3 ^a	2.9 ± 0.4 ^b	3.7 ± 0.6 ^{ab}
	10-20	8.5 ± 0.4 ^{ab} AB	11.6 ± 1.1 ^a	9.4 ± 2.6 ^{ab}	3.5 ± 0.8 ^b	5.0 ± 0.2 ^{ab}
	20-30	9.5 ± 0.3 ^{ab} B	11.4 ± 1.9 ^a	12.5 ± 1.0 ^{ab}	3.1 ± 0.9 ^b	5.7 ± 0.2 ^{ab}
	30-40	9.6 ± 0.7 ^{ab} B	11.6 ± 2.3 ^{ab}	12.8 ± 1.3 ^a	3.2 ± 1.4 ^b	6.0 ± 0.3 ^{ab}
Silt (%)	0-10	52.1 ± 4.1 ^a	50.1 ± 0.7 ^{ab}	49.7 ± 4.9 ^{ab} A	40.6 ± 4.6 ^b	47.5 ± 1.9 ^{ab} A
	10-20	53.8 ± 3.9	55.1 ± 3.3	49.1 ± 6.7 ^{AB}	46.2 ± 5.2	46.1 ± 3.9 ^A
	20-30	56.1 ± 3.7 ^{ab}	54.6 ± 5.4 ^{ab}	58.3 ± 1.6 ^{ab} B	42.5 ± 10.9 ^a	61.9 ± 1.4 ^b B
	30-40	55.8 ± 3.3 ^{ab}	55.9 ± 4.5 ^{ab}	59.3 ± 3.3 ^{ab} B	41.4 ± 16.7 ^a	63.4 ± 1.8 ^b B
Sand (%)	0-10	40.7 ± 4.6 ^a	40.4 ± 1.4 ^{ab}	40.4 ± 7.2 ^a B	46.6 ± 1.9 ^b	48.8 ± 2.4 ^{ac} A
	10-20	37.6 ± 4.2 ^a	33.3 ± 4.4 ^{ab}	41.5 ± 9.3 ^{ab} AB	50.3 ± 6.0 ^b	38.9 ± 4.1 ^{ab} B
	20-30	34.4 ± 3.7 ^a	34.0 ± 7.3 ^a	29.2 ± 2.3 ^{ab} B	54.4 ± 11.8 ^{ac}	32.4 ± 1.6 ^a B
	30-40	34.5 ± 3.7 ^a	32.5 ± 6.8 ^a	28.0 ± 4.4 ^{ab} B	55.4 ± 18.1 ^{ac}	30.6 ± 1.9 ^a B

TABLE 2 χ^2 and resulting p value of the Kruskal-Wallis one-way analysis of variance of the individual soil properties over the different land-use classes, consisting of three replicates per LU

	Corg	TN content	SOC	TN	C/N ratio	SOM	pH	EC	Clay	Silt	Sand	P	BD
Land cover	χ^2 7.293	5.947	7.902	7.023	9.351	7.232	16.198	16.578	48.021	20.634	25.433	48.486	5.820
	p .121	.203	.095	.135	.059	.124	.003	.002	.000	.000	.000	.000	.213
Soil depth	χ^2 37.260	37.006	36.966	35.489	2.972	37.261	1.582	19.415	3.705	15.249	13.361	0.548	39.838
	p .000	.000	.000	.000	.396	.000	.663	.000	.295	.002	.004	.908	.000

Note: Values in italic are significantly different.

Abbreviations: BD, bulk density; Corg, Organic carbon content; EC, electrical conductivity; P, available phosphorus; SOC, soil organic carbon stock; SOM, organic matter; TN, nitrogen content; TN, total nitrogen stock.

TABLE 3 (Continued)

	Soil depth (cm)	Pastures	Shrub	Bush	Young forest	Old forest
P (mg kg ⁻¹)	0-10	27.6 ± 13.7 ^a	107.9 ± 9.1 ^{ab}	39.9 ± 22.1 ^{ab}	78.5 ± 11.6 ^{ab}	118.1 ± 14.3 ^b
	10-20	34.0 ± 14.9 ^a	96.7 ± 14.3 ^{ab}	49.6 ± 29.2 ^{ab}	75.8 ± 2.5 ^{ab}	106.6 ± 14.3 ^b
	20-30	29.9 ± 14.2 ^a	104.6 ± 15.7 ^{ab}	33.3 ± 15.3 ^{ab}	71.2 ± 15.6 ^{ab}	115.7 ± 8.3 ^b
	30-40	35.3 ± 23.6 ^a	101.4 ± 11.5 ^{ab}	61.4 ± 29.3 ^{ab}	65.0 ± 21.4 ^{ab}	122.9 ± 6.0 ^b
BD (g cm ⁻³)	0-10	1.41 ± 0.06 ^A	1.29 ± 0.01 ^A	1.37 ± 0.12 ^A	1.39 ± 0.04 ^A	1.35 ± 0.04 ^A
	10-20	1.47 ± 0.04 ^{AB}	1.45 ± 0.03 ^{AB}	1.34 ± 0.09 ^A	1.42 ± 0.04 ^A	1.48 ± 0.01 ^B
	20-30	1.54 ± 0.04 ^B	1.47 ± 0.06 ^B	1.48 ± 0.02 ^A	1.51 ± 0.05 ^{AB}	1.55 ± 0.02 ^C
	30-40	1.55 ± 0.04 ^B	1.52 ± 0.03 ^B	1.52 ± 0.01 ^B	1.57 ± 0.04 ^B	1.57 ± 0.02 ^C

Note: Means with the different lower case letters within a row are significantly different between land uses at 0.05 level of significance ($p < 0.05$). Means with the different upper case letters within a column are significantly different between depths at 0.05 level of significance ($p < 0.05$). Abbreviations: BD, bulk density; Corg, Organic carbon content; EC, electrical conductivity; P, available phosphorous; SOC, soil organic carbon stock; SOM, organic matter; TN (%), nitrogen content; TN, total nitrogen stock.

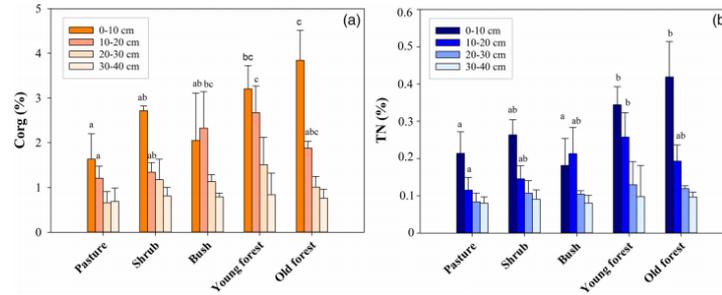


FIGURE 5 (a) Organic carbon, and (b) total soil nitrogen contents in the different land covers and depths. Means with different lower case letters are significantly different at 0.05 level of significance ($p < 0.05$) (land uses) (see also Table 3 for comparisons between depths). Bars are standard deviation values [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](#)]

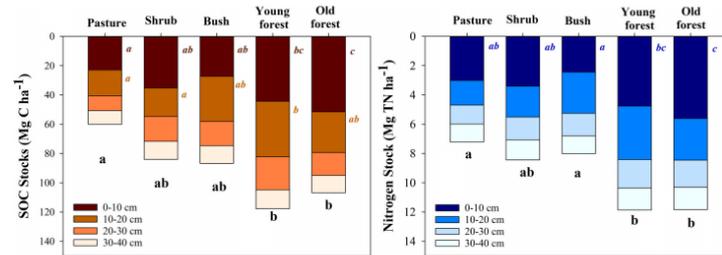


FIGURE 6 Soil organic carbon (SOC) stocks (Mg C ha⁻¹) and soil nitrogen (TN) stocks (Mg N ha⁻¹) for the different land covers. Note: Means with different lower case letters (at different depths) are significantly different at 0.05 level of significance ($p < 0.05$). Bold letters are related to complete SOC and TN stocks and indicate differences between LULCs [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](#)]

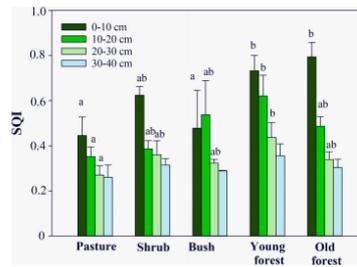


FIGURE 7 Soil quality index (SQI) value calculated based on Armenise et al. (2013) for the different depths and different land covers. Bars are standard deviation values [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

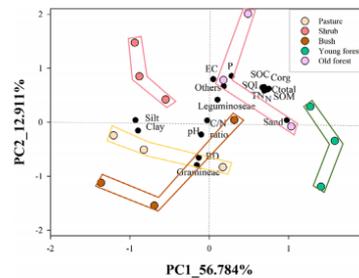


FIGURE 8 Principal component analysis (PCA) of soils and percentage of herbaceous coverage values. Eigenvectors from the principal component analysis (PCA) and PC scores plotted in the plane of the first two components. Corg, Organic carbon content; N, nitrogen content; SOC, soil organic carbon stock; TN, total nitrogen stock; SOM, organic matter; EC, electrical conductivity; P, available phosphorus; BD, bulk density; others in the figure consider all the herbaceous families (except gramineae and leguminosae that have been considered individually) [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

9.7 CONCLUSIONI

Lo scopo di questa ricerca era fornire informazioni sul ruolo dei processi di rivegetazione naturale in campi abbandonati sulla qualità fisico-chimica del suolo, in particolare nel mostrare il contenuto degli stock di SOC e degli stock di TN nel suolo. I risultati hanno dimostrato che gli stock di SOC e TN del suolo aumentano con il progredire della rivegetazione (confermando la prima ipotesi), sebbene i valori di SOC elevati siano stati registrati nella foresta giovane. L'accumulo maggiore di SOC e TN del suolo avviene negli strati superiori del terreno. La rivegetazione naturale porta ad un miglioramento della qualità fisico-chimica del suolo.

CAPITOLO 10

CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi sono stati analizzati quattro tipi di ecosistemi (il paramo delle montagne delle Ande, la riserva naturale del parco della Majella in Abruzzo, la Leza Valley in Spagna e l'altopiano del Stolenberg sul massiccio del Monte Rosa) e, di conseguenza, quattro tipi di suolo molto diversi tra loro. Anche se gli articoli trattati analizzano i campioni di suoli utilizzando metodi di indagine diversi tra loro, il mio lavoro si è focalizzato sull'analisi della sostanza organica (SOC e TOC) e sulla capacità di stoccaggio del Carbonio di questi suoli. Da come è potuto emergere, ciascun suolo ha un reservoir diverso di Carbonio: per cui, ognuno ha quantitativi di SOC specifici e peculiari e di conseguenza capacità di stoccaggio della materia organica esclusivi. Inoltre, i processi di uso del suolo hanno evidenziato come si possa "disturbare" il terreno e di conseguenza influire sulla capacità di stoccaggio di carbonio, modificando anche le proprietà idrofisiche del suolo. Basti pensare alle attività di pascolo, di rimboschimento da pino e attività di diradamento per poter capire come il suolo subisca dei cambiamenti profondi e di conseguenza modifichi la propria funzione di riserva.

CAPITOLO 11

BIBLIOGRAFIA

- **Changes in Soil Hydro-Physical Properties and SOM Due to Pine Afforestation and Grazing in Andean Environments Cannot Be Generalized.** Franklin Marín Carlos Quiroz Dahik • Giovanni M. Mosquera • Jan Feyen • Pedro Cisneros • and Patricio Crespo. *Forests*, 29 December 2018.
 - 1. Buytaert, W.; Cuesta-Camacho, F.; Tobón, C. **Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions.** *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2011.
 - Célleri, R.; Feyen, J. **The hydrology of tropical Andean ecosystems: Importance, knowledge status, and perspectives.** *Mt. Res. Dev.* 2009.
 - Mosquera, G.; Lazo, P.; Célleri, R.; Wilcox, B.; Crespo, P. **Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands.** *Catena* 2015.
 - Mosquera, G.; Célleri, R.; Lazo, P.; Vaché, K.; Perakis, S.; Crespo, P. **Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem.** *Hydrol. Process.* 2016.
 - Correa, A.; Windhorst, D.; Tetzlaff, D.; Crespo, P.; Célleri, R.; Feyen, J.; Breuer, L. **Temporal dynamics in dominant runoff sources and flow paths in the Andean Páramo.** *Water Resour. Res.* 2017
 - Buytaert, W.; Celleri, R.; Willems, P.; De Bievre, B.; Wyseure, G. **Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes.** *J. Hydrol.* 2006
 - Poulenard, J.; Podwojewski, P.; Herbillon, A.J. **Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos.** *Geoderma* 2003
 - Buytaert, W.; Deckers, J.; Dercon, G.; De Bièvre, B.; Poesen, J.; Govers, G. **Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador.** *Soil Use Manag.* 2002
- **Carbon sequestration capability of Fagus sylvatica forests developing in the Majella National Park (Central Apennines, Italy)** Loretta Gratani • Luciano Di Martino • Anna Rita Frattaroli • Andrea Bonito • Valter Di Cecco • Walter De Simone • Giorgia Ferella • Rosangela Catoni. *J. For. Res.* (2018)
 - Aranda I, Gil L, Pardos JA (2000) **Water relations and gas exchange in Fagus sylvatica L. and Quercus petraea (Mattuschka) Liebl.** in a mixed stand at their southern limit of distribution in Europe. *Trees* 14:344–352
 - Aussenac G (2000) **Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture.** *Ann For Sci*
 - Baldocchi D (1997) **Measuring and modelling carbon dioxide and**

water vapour exchange over a temperate broad-leaved forest during the 1995 summer drought. *Plant, Cell Environ*

Beaumont NJ, Jones L, Garbutt A, Hansom JD, Tobermann M (2014) **The value of carbon sequestration and storage in coastal habitats.**

Brunet J, Fritz O, Richnau G (2010) **Biodiversity in European beech forests—a review with recommendations for sustainable forest management. *Ecol Bull***

Cole JJ, Prairie YT, Caraco NF, McDowell WH, Tranvik LJ, Striegl RG, Duarte CM, Kortelainen P, Downing JA, Middelburg JJ, Melack J (2017) **Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems***

Damesin C (2003) **Respiration and photosynthesis characteristics of current-year stems of *Fagus sylvatica*: from the seasonal pattern to an annual balance. *New Phytol***

de Pury DGG, Farquhar GD (1997) **Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant, Cell Environ***

de Simon G, Alberti G, Delle Vedove G, Zerbi G, Peressotti A (2012) **Carbon stocks and net ecosystem production changes with time in two Italian forest chronosequences. *Eur J For Res***

Evrendilek F, Berberoglu B, Taskinsu-Meydan S, Yilmaz E (2006) **Quantifying carbon budget of conifer Mediterranean forest ecosystems, Turkey. *Environ Monit Assess***

Feliziani R (2006) **Forest management in protected areas in Italy.** In: Gafta D, Akeroyd J (eds) *Quantifying carbon budget of conifer Mediterranean forest ecosystems, Turkey. Nature conservation. Springer, Berlin*

Fotelli MN, Rienks M, Rennenberg H, Geßler A (2004) **Climate and forest management affect 15 N-uptake, N balance and biomass of European beech seedlings. *Trees***

Garrigues S, Shabanov NV, Swanson K, Morisette JT, Baret F, Myneni RB (2008) **Inter comparison and sensitivity analysis of Leaf Area Index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands. *Agric For Meteorol* 148:1193–1209**

Gower ST, Norman JM (1991) **Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations. *Ecology***

Granata MU, Gratani L, Bracco F, Sartori F, Catoni R (2016) **Carbon stock estimation in an unmanaged old-growth forest: a case study from a broad-leaf deciduous forest in the northwest of Italy. *Int For Rev***

Gratani L, Varone L (2006) **Carbon sequestration by *Quercus ilex* L. and *Quercus pubescens* Willd. and their contribution to decreasing air temperature in Rome. *Urban Ecosyst* 9:27–37**

Gratani L, Varone L (2007) **Plant crown traits and carbon sequestration capability by *Platanus hybrida* Brot. in Rome. *Lands, Urban Plan***

Gratani L, Catoni R, Varone L (2011) ***Quercus ilex* L. carbon sequestration capability related to shrub size. *Environ Monit***

Assess

Gratani L, Varone L, Ricotta C, Catoni R (2013) **Mediterranean shrublands carbon sequestration: environmental and economic benefits**. *Mitig Adapt Strat Glob Change*

- **Hidden soils and their carbon stocks at high-elevation in the European Alps (North-West Italy)** Emanuele Pintaldi , Michele E. D'Amico , Nicola Colombo Chiara Colombero , Luigi Sambuelli , Claudio De Regibus , Diego Franco , Luigi Perotti , Luca Paro , Michele Freppaz. *Elsiever, 2020*
- Alberto, W., Palomba, M., Perotti, L., 2018. **SMART GROUND project test-sites topographic and morphologic characterization: Instruments and methodologies**. *Rendiconti Online Societa ` Geologica Italiana*.
- Allred, B.J., Daniels, J.J., Ehsani, M.R., 2008. **Handbook of Agricultural Geophysics**. CRC Press Taylor Francis Group, Boca Raton.
- Andre, F., van Leeuwen, C., Saussez, S., van Durmen, R., Bogaert, P., Moghadas, D., de Resseguier, L., Delvaux, B., Vereecken, H., Lambot, S., 2012. **High-resolution imaging of a vineyard in south of France using ground penetrating radar, electromagnetic induction and electrical resistivity tomography**. *J. Appl. Geophys.*
- Archie, G.E., 1942. **The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics**. *Trans. Am. Inst. Mech. Eng.*
- Arteaga, G.A., Calderon, N.G., Krasilnikov, P.V., Sedov, S.N., Targulian, V.O., Rosas, N. V., 2008. **Soil altitudinal sequence on base-poor parent material in a montane cloud forest in Sierra Juarez, Southern Mexico**. *Geoderma*
- Ballantyne, C.K., Matthews, J.A., 1982. **The development of sorted circles on recently deglaciated terrain, Jotunheimen, Norway**. *Arct. Alp. Res*
- Ballantyne, C.K., 2010. **A general model of autochthonous blockfield evolution**. *Permafr. Periglac. Proc.*
- Baroni, C., Orombelli, G., 1996. **The Alpine "Iceman" and Holocene Climatic Change**. *Quat. Res.*
- Batjes, N.H., 1996. **Total carbon and nitrogen in the soils of the world**. *Eur. J. Soil Sci.*
- Birchak, J.R., Gardner, C.G., Hipp, J.E., Victor, J.M., 1974. **High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture**.
- Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, D.A., Schoeneich, P., Romanovsky, V.E., Lewkowicz, A.G., Abramov, A., Allard, M., Boike, J., Cable, W.L., Christiansen, H.H., Delaloye, R., Diekmann, B., Drozdov, D., Etzelmüller, B., Grosse, G., Guglielmin, M., Ingeman-Nielsen, T., Isaksen, K., Ishikawa, M., Johansson, M., Johansson, H., Joo, A., Kaverin, D., Kholodov, A., Konstantinov, P., Kroger, T., Lambiel, C., Lanckman, J.-P., Luo, D., Malkova, G., Meiklejohn, I., Moskalenko, N., Oliva, M., Phillips, M., Ramos, M., Sannel, A.B.K., Sergeev, D., Seybold, C., Skryabin, P., Vasiliev, A., Wu, Q., Yoshikawa, K., Zheleznyak, M., Lantuit, H., 2019. **Permafrost is warming at a global scale**. *Nat. Commun*
- Bockheim, J.G., Munroe, J.S., 2014. **Organic Carbon Pools and Genesis of Alpine Soils with Permafrost: A Review**. *Arct. Antarct. Alp. Res*
- Bockheim, J.G., Tarnocai, C., 1998. **Recognition of cryoturbation for classifying**

permafrost-affected soils. *Geoderma*

Bojko, O., Kabala, C., 2017. **Organic carbon pools in mountain soils — Sources of variability and predicted changes in relation to climate and land use changes.** *Catena*

Boone, R.D., Grigal, D.F., Sollins, P., Ahrens, R.J., Armstring, D.E., 1999. **Soil sampling, preparation, archiving, and quality control.** In: Robertson, G.P., Coleman, D.C.,

Bledsoe, C.S., Sollins, P. (Eds.), **Standard soil methods for long-term ecological research.** *Oxford University Press, New York.*

Carrivick, J.L., Smith, M.W., Quincey, D.J., 2016. **Structure from Motion in the Geosciences.** John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.

- **Soil quality and soil organic carbon storage in abandoned agricultural lands: Effects of revegetation processes in a Mediterranean mid-mountain area.** Teodoro Lasanta | Pedro Sánchez-Navarrete | Luis Miguel Medrano-Moreno | Makki Khorchani | Estela Nadal-Romero, Allen, B., Kretschmer, B., Baldock, D., Menadue, H., Nanni, S., Tucker, G. 2014. **Space for energy crops—Assessing the potential contribution to Europe's energy future.** *London: Institute for European Environmental Policy.*
Armenise, E., Redmile-Gordon, M. A., Stellacci, A. M., Ciccarese, A., & Rubino, P. (2013). **Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment.** *Soil and Tillage Research.*
Arnáez, J., Lana-Renault, N., Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P., & Castroviejo, J. (2015). **Effects of farming terraces on hydrological and geomorphological processes.** *Catena.*
Arnáez, J., Lasanta, T., Errea, M. P., & Ortigosa, L. (2011). **Land abandonment, landscape evolution, and soil erosion in a Spanish Mediterranean mountain region: The case of Camero Viejo.** *Land Degradation & Development*
Arnáez, J., Oserin, M., Ortigosa, L., & Lasanta, T. (2008). **Plant cover and land uses changes in the northwestern Iberian range (Los Cameros, La Rioja, Spain) between 1956 and 2001.** *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*
Badalamenti, E., Battipaglia, G., Gristina, L., Novara, A., Rühl, J., Sala, G., ... La Mantia, T. (2019). **Carbon stock increases up to old growth forest along a secondary succession in Mediterranean Island ecosystems.** *PLoS One*
Bernués, A., Ruiz, R., Olaizola, A., Villalba, D., & Casasús, I. (2011). **Sustainability of pasture-based livestock farming systems in the European Mediterranean context: Synergies and trade-offs.** *Livestock Science.*
Boix-Fayos, C., de Vente, J., Albaladejo, J., & Martínez-Mena, M. (2009). **Soil carbon erosion and stock as affected by land use changes at the catchment scale in Mediterranean ecosystems.** *Agriculture, Ecosystems and Environment.*

Bracchetti, L., Carotenuto, L., & Catorci, A. (2012). **Land-cover changes in a remote area of central Apennines (Italy) and management directions.** *Landscape and Urban Planning*.

Brantley, S. T., & Young, D. R. (2010). **Shrub expansion stimulates soil C and N storage along a coastal soil chronosequence.** *Global Change Biology*, 16, 2052–2061. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02129.x>

CAPITOLO 12

SITOGRAFIA

<https://www.eea.europa.eu/it/segnali/segnali-2015/articoli/il-suolo-e-il-cambiamento-climatico>

<https://www.humusitaliano.it/sostanza-organica-importanza-ed-effetti/>

Ringraziament

“Ringrazio a tutti con loro che mi sono stati vicino in questo percorso di studio.”