

# INFLUENZA DELLA MICROTOPOGRAFIA E DELLA VARIABILITA' STAGIONALE SUL CICLO DI CARBONIO E AZOTO IN SUOLI DEL PIANO SUBALPINO

Emanuele Pintaldi <sup>(a\*)</sup>, Gianluca Filippa <sup>(b)</sup>, Consolata Siniscalco <sup>(c)</sup>, Michele Freppaz <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari, Università degli Studi di Torino

<sup>(b)</sup> Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Valle D'Aosta, ARPA VdA

<sup>(c)</sup> Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi, Università degli Studi di Torino

\*Autore corrispondente: [emanuele.pintaldi@unito.it](mailto:emanuele.pintaldi@unito.it)

## Introduzione

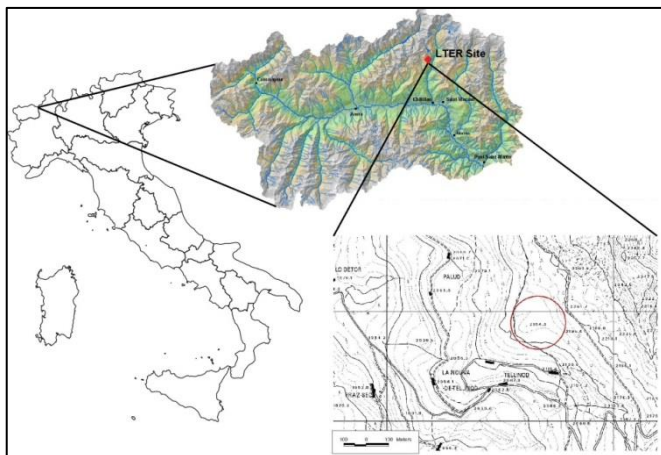
I cuscinetti erbosi (*earth hummocks*) sono piccoli monticelli di origine criogenica, generalmente di altezza inferiore ad 1.5 m (Grab, 2005), coperti da vegetazione erbacea, riuniti a gruppi solitamente in pascoli o aree umide con pendenze deboli o nulle. Queste formazioni sono strettamente legate ai processi di crioturbazione, indotti dalla presenza stagionale del gelo e influenzati dal contenuto di umidità del suolo, con o senza permafrost (Van Vliet-Lanoë, 2014). Il fenomeno dei cuscinetti erbosi è ampiamente diffuso, soprattutto alle latitudini elevate (e.g., Tarnocai and Zoltai, 1978; Luoto and Seppälä, 2002; Kviderová et al., 2011; Van Vliet-Lanoë et al., 1998), tuttavia la loro presenza è stata riportata sovente anche negli ambienti alpini e subalpini dell'emisfero settentrionale (e.g. Trembl et al., 2010) e meridionale (e.g., Mark, 1994; Scott et al., 2008; Grab, 1994, 2005) e nelle aree tropicali (Grab, 2002). Esistono molteplici teorie relative ai meccanismi di formazione degli *hummocks*. La teoria dei sollevamenti differenziali da gelo è quella maggiormente riconosciuta (Van Vliet-Lanoë 1991; Grab 2005), tuttavia esistono altre teorie tra cui la crioespulsione di clasti (Van Vliet-Lanoë e Seppälä 2002), la pressione idrostatica o criostatica (Lundqvist 1969; Tarnocai e Zoltai, 1978) e il modello di circolazione cellulare (Mackay, 1980). Le numerose teorie di formazione degli *hummocks*, dimostrano che esiste ancora una certa incertezza relativa alla loro formazione, tuttavia è probabile che essi abbiano uno sviluppo poligenico (Beschel, 1966; Grab, 2005). La presenza di cuscinetti erbosi è stata riscontrata su diversi materiali a tessitura fine, suscettibili ai fenomeni di crioturbazione, quali torba e suoli minerali di origine glaciale (Grab, 2005), spesso caratterizzati da un elevato contenuto di limo e argilla. A seguito della crioturbazione, sovente, i suoli a cuscinetti erbosi presentano lungo il profilo orizzonti superficiali sepolti o lenti di sostanza organica e cenere convoluti (e.g., Schunke, 1977; Zoltai and Tarnocai, 1981; Scotter and Zoltai, 1982; Ellis, 1983; Schunke and Zoltai, 1988; Van Vliet-Lanoë, 1991; Gerrard, 1992; Van Vliet-Lanoë et al., 1998). Gli *hummocks* privi di segni recenti di attività sono considerati forme relitte di un passato con condizioni climatiche più fredde (McCraw, 1959; Billings and Mark, 1961; Mark e Bliss, 1970). La presenza di cuscinetti erbosi risulta essere maggiore in quelle aree in cui la copertura nevosa è ridotta o redistribuita dal vento (Schunke e Zoltai, 1988): in particolare sugli apici degli *hummocks* la copertura nevosa è minore ed ha durata inferiore rispetto alle zone di *interhummocks* (depressioni tra *hummocks* consecutivi). Tale differenza, associata al potere isolante del manto nevoso, crea sensibili differenze di temperatura, in particolare durante il periodo autunnale e all'inizio dell'inverno: le zone di *interhummocks* risultano essere generalmente più calde (Mark, 1994; Grab, 1997) e rimangono prevalentemente non congelate, mentre gli *hummocks* rimangono congelati per diverse settimane (e.g., Van Vliet-Lanoë, 1991; Mark, 1994; Grab, 1997). Quando il differenziale di temperatura tra *hummocks* ed *interhummocks* è significativo, si creano le condizioni favorevoli al mantenimento della microtopografia esistente (Mark, 1994; Grab, 1997). Per quanto riguarda la vegetazione, essa è considerata un fattore importante nella formazione (Tyrtikov, 1969) e nello sviluppo degli *hummocks* (Schunke and Zoltai, 1988). Tyrtikov (1969) suggerisce che la vegetazione modifica le caratteristiche di congelamento del suolo, influenzando la formazione degli *hummocks*. La microtopografia influenza i processi di trasformazione e ritenzione dell'azoto del suolo (Reddy e Patrick, 1984, Ford et al., 2007), la distribuzione della tessitura (Grab, 1997), la densità apparente (Benscoter et al., 2005; Quinton e Marsh, 1998), l'umidità (Admiral e Lafleur, 2007; Quinton e Marsh, 1998), la temperatura degli *hummocks* (Mark, 1994, Grab, 1997, Scott et al., 2008) e la quantità di radiazione incidente (Shen et al., 2006). Tutti questi fattori influenzano la varietà delle specie vegetali contribuendo alla formazione di microambienti unici in cui alcune specie si adattano meglio di altre (Ashworth, 1997; Smith, 2011). A tal proposito Biasi et al. (2005) riportano che le zone di *interhummock* sono generalmente dominate dai muschi, i quali agendo da isolanti termici, diminuiscono le temperature estive del suolo favorendo ulteriormente l'eterogeneità ambientale (Longton, 1988), mentre gli *hummocks*, caratterizzati da temperature più calde durante la stagione di crescita (Zoltai e Tarnocai, 1974), sono soprattutto dominati da carici, erbe ed arbusti nani. La microtopografia degli *hummocks* può pertanto essere un fattore in grado di incrementare la biodiversità vegetale ad una scala spaziale ridotta (Smith, 2011), la quale a sua volta, influenza la decomposizione della lettiera e il ciclo dei nutrienti.

Gli effetti dovuti all'interazione di microtopografia suolo e vegetazione variano notevolmente a seconda del bioma considerato, pertanto delle analisi sito-specifiche sono necessarie, in particolare nelle aree alpine. Sulla base di tali considerazioni lo scopo del presente lavoro è quello di valutare gli effetti indotti dalla microtopografia e dalla variabilità stagionale, sulle caratteristiche chimico-fisiche del suolo e sulla copertura vegetale in una prateria del piano subalpino. Lo studio si prefigge di indagare le cause che determinano la particolare distribuzione spaziale della vegetazione, probabilmente dovuta alle peculiari condizioni microclimatiche indotte dalla microtopografia, la quale,

in associazione con la variabilità stagionale, è in grado di influenzare il ciclo dei principali macroelementi (C,N) del suolo e la distribuzione specifica della vegetazione.

## Materiali e metodi

Il sito oggetto di studio è una prateria subalpina, soggetta a pascolamento bovino fino al 2007, anno cui anno l'area è stata delimitata dall'ARPA Valle d'Aosta, per la realizzazione di un sito sperimentale (ID: T19-005-T) della rete italiana LTER (*Long Term Ecological Research*). Il sito è situato nelle Alpi nord-occidentali a pochi chilometri dall'abitato di Torgnon in Valle d'Aosta, ad una quota di 2160 m.s.l.m (Fig. 1). La prateria è posta su di un pianoro con esposizione Sud (195°N), caratterizzato da una pendenza modesta di circa 4°. L'area occupa una superficie di circa 2800 m<sup>2</sup>, in corrispondenza della fascia altitudinale subalpina, collocandosi al limite della vegetazione forestale. Il sito è caratterizzato da un clima intra-alpino semi-continentale con una temperatura media annua di 3.1° C e precipitazioni medie annue di 880 mm. La prateria, una formazione a *Nardus stricta* appartenente all'associazione *Siervesio-Nardetum strictae* Lüdi 1948, presenta una morfologia complessa con suoli a cuscinetti erbosi (*earth hummocks*), caratterizzati dall'alternanza di zone concave (*interhummocks - down*) e zone convesse (*hummocks - up*) (Fig. 2). La microtopografia dell'area genera una distribuzione localizzata della vegetazione, con presenza esclusiva di *Nardus stricta* sulle zone convesse (97-98% della copertura) e prevalenza di dicotiledoni quali *Crocus vernus*, *Geum montanum*, *Trifolium alpinum*, *Arnica montana*, *Ranunculus pyrenaicus* nelle zone concave (50-75 % della copertura) (Pintaldi *et al.* submitted). Tale distribuzione suggerisce la presenza di sensibili differenze nelle caratteristiche chimico-fisiche dei suoli tra le zone di *up* e *down*, legate a variazioni nel ciclo dei principali macroelementi. Al fine di appurare tali ipotesi, nel Novembre 2013 sono stati prelevati 60 campioni di topsoil (0-10 cm di profondità) in corrispondenza di *hummocks* (30) e *interhummocks* (30). I campioni, setacciati a 2 e 0.5 mm, sono stati analizzati per la determinazione delle principali caratteristiche chimico-fisiche (Tab. 1). I dati ottenuti sono stati elaborati statisticamente con un'analisi della varianza univariata (ANOVA), applicando il test HSD di Tukey ( $p < 0.05$ ) al fine di valutare le differenze chimico-fisiche tra i suoli di *hummocks* e *interhummocks*. L'analisi statistica dei dati è stata effettuata utilizzando il software R (R Core Team 2015).



**Figura 1.** Localizzazione geografica del sito LTER di Tellinod, gestito dall'ARPA Valle d'Aosta all'interno della Rete LTER Italia



**Figura 2.** Suolo a cuscinetti erbosi (*earth hummocks*)

**Tabella 2.** Analisi del suolo. CSC= capacità di scambio cationico; TOC= total organic carbon; P<sub>tot</sub>= fosforo totale; P<sub>Olsen</sub>= fosforo disponibile; DOC= dissolved organic carbon; TDN= total dissolved nitrogen.

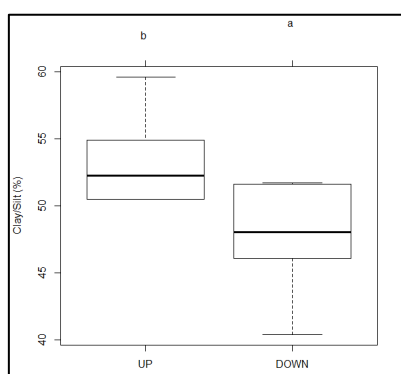
Analysis	Method	Reference
pH <sub>H2O</sub>	soil:water = 1:2.5	Van Reeuwijk, 2002.
Particle-size	pipette-method	Van Reeuwijk, 2002.
CSC/ Cat.scamb	BaCl <sub>2</sub> solutions (pH 8.1); atomic absorption spectrometry (Analyst 400, Perkin Elmer, Waltham, MS, USA)	Rhoades, 1982.
TOC-C/N	CN elemental analyzer (CE Instruments NA2100, Rodano, Italy)	Nelson, D.W. e L.E. Sommers. 1982.
P <sub>tot</sub>	acid persulphate digestion	Nelson, 1987
P <sub>Olsen</sub>	NaHCO <sub>3</sub> extraction; ascorbic acid molybdate blue method	Murphy and Riley, 1962
DOC/TDN	1M KCl extracts; HCl acidification; TOC analyzer (Elementar, Vario TOC, Hanau, Germany)	Thomsen <i>et al.</i> , 2001.
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1M KCl extracts; UV-vis spectrophotometer	Crooke and Simpson, 1971.
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1 M KCl extracts	Miranda <i>et al.</i> , 2001.

## Risultati e discussione

Le analisi di laboratorio e l'elaborazione statistica (ANOVA univariata) hanno confermato la presenza di differenze significative tra i suoli delle zone di *up* e *down* (Tab. 2). Dal punto di vista granulometrico, gli *hummocks* sono caratterizzati da un maggior contenuto di argilla e limo, mentre nelle zone di *interhummocks* prevale la frazione sabbiosa (Tab. 2, Fig. 3). Per quanto riguarda le proprietà chimiche, gli *hummocks* sono caratterizzati da un pH più acido, da un maggior contenuto di TOC, DOC estraibile, DON estraibile e da un rapporto C/N più elevato rispetto alle zone di *interhummocks*, nelle quali è stato invece rilevato un maggior contenuto di  $\text{NO}_3^-$  (Tab. 2, Fig. 4).

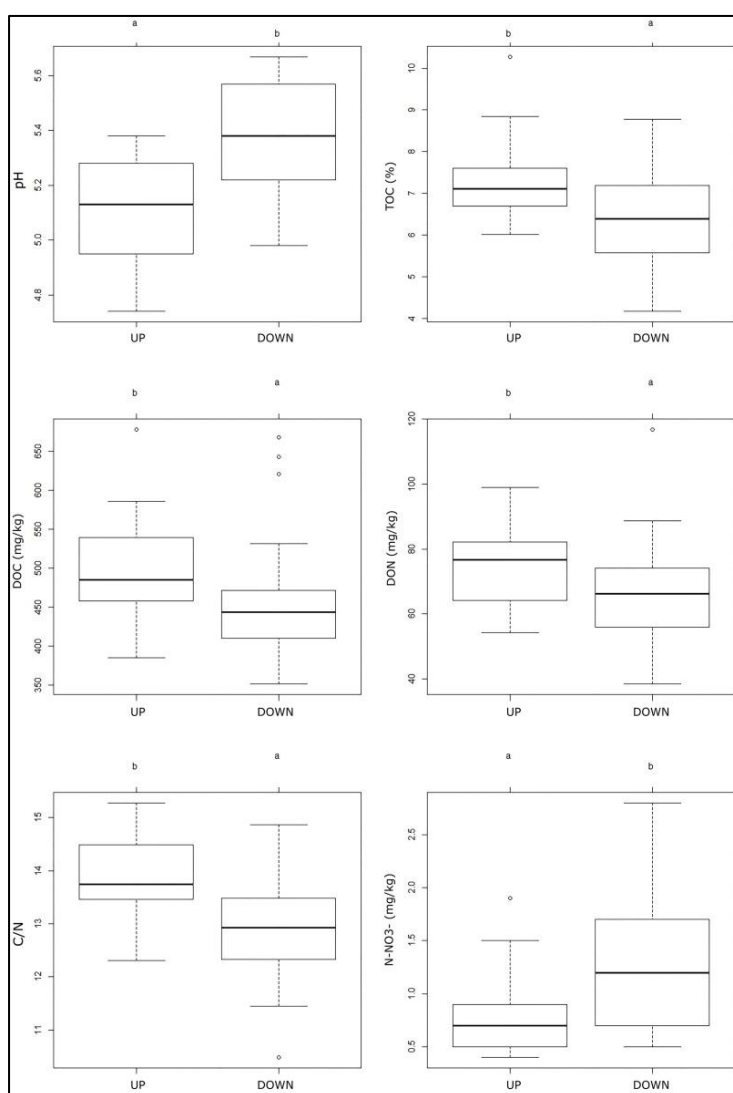
**Tabella 2.** Caratteristiche chimico-fisiche del topsoil di *hummocks* (UP) e *interhummocks* (DOWN); DIN= dissolved inorganic nitrogen ( $\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$ ); DON= dissolved organic nitrogen (TDN-DIN); \* differenze significative tra le zone UP e DOWN ( $p < 0.05$ ). Tra parentesi la deviazione standard.

	Sabbia	Limo	Argilla	pH	TOC	N	C/N	CSC	Ca sc.	Mg sc.	K sc.	Sat. Bas	P <sub>tot</sub>	P <sub>Olsen</sub>	DOC	TDN	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	DIN	DON
	%				%			cmol(+) kg <sup>-1</sup>					mg kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>					
UP	46.7 (3.5)	37.4 (4.6)	15.9 (2.5)	5.1* (0.2)	7.3* (0.9)	0.5 (0.1)	14* (0.7)	34.4 (3.5)	2.4 (0.4)	0.8 (0.1)	0.3 (0.1)	10.1 (2.2)	601 (143.0)	40.7 (6.4)	498* (60.2)	88.9 (13.4)	12.7 (3.6)	0.8* (0.4)	13.5 (3.7)	75.4* (11.5)
DOWN	52.4 (4.2)	33.6 (4.1)	14.0 (2.4)	5.4 (0.2)	6.4 (1.2)	0.5 (0.1)	13 (1.0)	31.3 (4.6)	2.5 (0.7)	0.8 (0.3)	0.3 (0.1)	11.8 (4.0)	637 (117.1)	36.1 (12.3)	454 (77.2)	81.7 (17.5)	14.2 (5.0)	1.3 (0.7)	15.5 (5.3)	66.2 (15.3)



**Fig. 3.** Boxplots (n = 16) : contenuto di limo e argilla di *hummocks* (UP) e *interhummocks* (DOWN). Le lettere indicano le differenze statisticamente significative.

Le differenze riscontrate nelle caratteristiche chimico-fisiche del topsoil di *hummocks* e *interhummocks*, sono coerenti con quanto rilevato da altri studi. In particolare il maggior contenuto di limo e argilla degli *hummocks* è dovuto alla selezione associata all'attività di gelo-disgelo (Van Vliet-Lanoë, 1991; Grab, 1997; Smith, 2011). Numerosi studi (e.g., Tarnocai e Zoltai, 1978; Schunke, 1981; Schunke e Zoltai, 1988; Grab, 1997, 2005; Smith, 2011) sostengono infatti che le frazioni più fini del suolo vengono dislocate dalle zone di *interhummocks* verso gli apici degli *hummocks*, come risultato della crioturbazione. In base ai dati analitici e a quanto rilevato da ulteriori indagini pedologiche (Pintaldi *et al. submitted*) nel sito di studio, è verosimile ipotizzare che l'origine degli *hummocks* sia legata alla presenza passata del *permafrost* e che l'attuale mantenimento delle formazioni sia favorito da periodici fenomeni di crioturbazione, durante gli inverni più freddi e con ridotta copertura nevosa.



**Figura 4.** Boxplots (n = 60) : valori di pH, TOC, DOC, DON, C/N e N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nel topsoil di *hummocks* (UP) e *interhummocks* (DOWN). Le lettere indicano le differenze statisticamente significative

Le differenti caratteristiche chimiche osservate tra *up* e *down* sono legate alle specifiche condizioni microtopografiche e alla presenza di diverse specie vegetali, le quali sono caratterizzate da esigenze edafiche differenti e da un diverso tasso di decomposizione (Pintaldi *et al. submitted*). Inoltre la microtopografia, influenzando il pattern di distribuzione e la durata del manto nevoso può aver influenzato in modo significativo il regime idrico e termico dei suoli, con ripercussioni sul tasso di mineralizzazione della SOM.

In particolare il differente pH tra *hummocks* e *interhummocks* riscontrato nella prateria, è coerente con quanto rilevato dagli studi effettuati da De Biasi *et al.* (2005) sui suoli a cuscinetti erbosi della tundra artica in Siberia (*Hummock Tundra Ecosystem*). Tale differenza potrebbe essere legata alle differenti condizioni di lisciviazione associate alla microtopografia e/o alla presenza di specie acidificanti e poco degradabili. Inoltre il diverso pH tra *up* e *down* potrebbe essere legato al maggiore contenuto di sostanza organica riscontrato nel topsoil degli *hummocks*. A tal proposito, il maggior contenuto di TOC degli *hummocks* (già osservato da Grab, 1997), potrebbe essere legato a differenze nella tipologia di lettiera e di produttività vegetale. La minore degradazione della vegetazione presente sui cuscinetti erbosi (Pintaldi *et al. submitted*) si riflette sul maggior rapporto C/N del topsoil degli *hummocks*. Un'altra significativa differenza tra *up* e *down* è relativa al maggior contenuto di DOC e DON riscontrato nel topsoil degli *hummocks*, legato probabilmente al minor tasso di mineralizzazione della sostanza organica (Kalbitz *et al.*, 2000) ed alla maggiore quantità di lettiera legata alla dominanza del nardo. A fine autunno e durante la fusione del manto nevoso, le minori temperature del suolo e gli eventuali cicli di gelo/disgelo indotti dal diverso pattern di distribuzione della neve (specialmente negli inverni più rigidi), possono causare oltre ad un minor tasso di mineralizzazione della sostanza organica, anche il rilascio di DOC (e probabilmente DON) per effetto della degradazione fisica della lettiera e conseguenti fenomeni di lisciviazione dagli orizzonti organici (Kalbitz *et al.*, 2000; Grogan *et al.*, 2004; Vestgarden and Austnes, 2009).

Per quanto riguarda le forme solubili di N, sussistono differenze significative, infatti nelle zone di *interhummocks* prevalgono i nitrati, mentre nel topsoil degli *hummocks* è stato rilevato un maggior contenuto di DON. In particolare la maggiore presenza di nitrati nelle zone di *down* è in accordo con quanto riportato da Biasi *et al.* (2005), i quali suggeriscono che le forme inorganiche di N tendono ad accumularsi nelle depressioni di *interhummocks*, come risultato dei flussi idrici laterali dalle zone di rilievo a quelle di depressione (Quinton, 2000). Il maggior contenuto di DON negli *hummocks*, oltre al minor tasso di mineralizzazione della sostanza organica, potrebbe essere favorito dagli eventuali stress termici a cui sono sottoposti i suoli delle zone di *up*, a inizio primavera e fine autunno (durante gli inverni più rigidi e con ridotte precipitazioni nevose), per effetto della ridotta copertura del manto nevoso e del minor contenuto idrico rispetto alle zone di *interhummocks*; il verificarsi di periodi con temperature molto rigide, abbinato all'assenza del manto, può comportare un aumento della DON in relazione ai cicli di gelo/disgelo, dovuto alla lisi cellulare con liberazione del citoplasma (Morley *et al.*, 1983).

La specifica distribuzione delle specie vegetali gioca un ruolo fondamentale nella differenziazione delle caratteristiche chimiche del topsoil tra *up* e *down*. Il minor tasso di mineralizzazione della sostanza organica, associato ai processi di lisciviazione, potrebbero incidere sul livello trofico, causando una minore disponibilità di nutrienti per le piante durante la stagione di crescita, e favorendo di fatto, nelle zone di *up*, le specie oligotrofiche quali *Nardus Stricta*. Il nardo è una specie erbacea caratterizzata da un elevato contenuto di lignina, pertanto la lettiera, costituisce di fatto materia organica più recalcitrante alla decomposizione (Güsewell *et al.*, 2005) rispetto ad altre specie erbacee, inoltre gli elevati valori di fitomassa rilevati nell'area di studio da D'Alessandro e Solly (2009), potrebbero essere una conseguenza del basso tasso di decomposizione del nardo (Güsewell *et al.*, 2005), con conseguente accumulo di lettiera. Il *Nardus stricta* dà inoltre origine ad un esteso apparato radicale con organi longevi e lenti alla decomposizione (Van der Krift e Berendse, 2002) che contribuiscono all'accumulo di carbonio a lungo termine nel suolo, in particolare nelle convessità. Il maggior contenuto di lignina, dovuto alla presenza dominante del nardo nelle zone di *up*, potrebbe interagire con l' $\text{NH}_4^+$  dando origine ad amminoderivati stabili, poco degradabili, con conseguente accumulo di SOM (aumento C/N). La formazione di amminoderivati stabili, comporta un sequestro di N inorganico, che si traduce in una minor disponibilità per le piante (ma anche per i microrganismi), contribuendo a rafforzare la presenza del nardo sugli *hummocks*.

Nelle zone di *interhummocks* il maggior contenuto idrico osservato in campo qualche settimana dopo la fusione del manto nevoso, potrebbe aver influenzato l'inerzia termica, tamponando le escursioni termiche e favorendo una maggiore attività microbica. Tale aspetto, associato ad una maggiore decomponibilità delle dicotiledoni, può favorire un maggiore tasso di mineralizzazione della SOM (riduzione del C/N), con conseguente aumento dei pool di nutrienti (es.  $\text{NO}_3^-$ ). Nelle zone di *down* pertanto, le forme labili di C ed N (DOC e DON estraibili) vengono maggiormente mineralizzate rispetto alle zone di *up*, come testimoniato dal minor contenuto di tali forme nelle depressioni. Questi aspetti, abbinati a fenomeni di traslocazione dei nutrienti da *hummocks* a *interhummocks* legati ai flussi idrici e alla tessitura (sabbioso-franca), possono favorire la presenza di specie più esigenti caratterizzate anche da maggiore precocità e velocità di sviluppo (es. Arnica montana, *Tripholium alpinum* ecc..) rispetto al nardo.

## Conclusioni

I risultati ottenuti dal presente lavoro hanno permesso di constatare che la microtopografia e la variabilità stagionale agiscono in modo sinergico, alterando i cicli biochimici e favorendo una distribuzione molto localizzata della vegetazione, con sensibili differenze nella composizione vegetale e nel contenuto di nutrienti nell'arco di pochissimo spazio nel passaggio da *hummocks* a *interhummocks*. A sua volta il diverso tipo di vegetazione, influenza nel tempo le caratteristiche e la composizione della SOM, differenziando in modo sempre più marcato le caratteristiche biochimiche del suolo. Le principali differenze riscontrate nei parametri chimico-fisici tra *hummocks* e *interhummocks*, sono relative alla tessitura, al pH, al contenuto di DOC e DON estraibile, TOC,  $\text{NO}_3^-$  e al rapporto C/N. Per quanto riguarda la tessitura gli *hummocks* presentano un maggiore contenuto di limo e argilla, mentre nelle zone di *interhummock* prevale la frazione sabbiosa. Tali differenze sono da imputare alla selezione associata ai fenomeni di crioturbazione, legati alla genesi e ai meccanismi di mantenimento degli *hummocks*. Dal punto di vista chimico le differenze riscontrate sono legate alle specifiche condizioni microclimatiche e alle diverse caratteristiche della lettiera. Le zone di *up* sono colonizzate esclusivamente da *Nardus Stricta*, specie che produce una lettiera recalcitrante, difficile da degradare, che, associata alle differenti condizioni microclimatiche, rallenta il ciclo di

mineralizzazione, causando un accumulo di sostanza organica che determina abbassamento di pH ed aumento di DOC e DON nel suolo. Nelle zone di *down* sono presenti specie differenti, soprattutto dicotiledoni (*Crocus vernus*, *Geum montanum*, *Trifolium alpinum*, *Arnica montana*, *Ranunculus pyrenaicus* ecc.), più esigenti dal punto di vista edafico rispetto al nardo, segno quindi di un diverso livello trofico rispetto alle zone di *up*. Il maggiore livello trofico può essere imputato ad alcuni fattori tra cui: i fenomeni di lisciviazione dei nutrienti dalle zone *up*; il maggiore contenuto idrico, in grado di limitare le escursioni termiche favorendo la mineralizzazione; le caratteristiche chimiche della lettiera, più facile da degradare rispetto a quella prodotta dal nardo (Pintaldi *et al. submitted*). La morfologia complessa dei suoli a cuscinetti erbosi, instaura specifiche condizioni microclimatiche, in grado di favorire una distribuzione specifica delle specie vegetali, le quali a loro volta, in funzione delle caratteristiche della lettiera, producono variazioni del topsoil e un diverso sviluppo del suolo in corrispondenza *hummocks* e *interhummocks* (Pintaldi *et al. submitted*). L'interazione di questi fattori contribuisce al mantenimento della biodiversità della prateria e alla creazione di un pedoambiente dalle caratteristiche uniche.

## Ringraziamenti

Si ringraziano il DISAFA e l' ARPA VdA per il supporto tecnico e logistico. Il lavoro è stato svolto anche grazie al contributo del progetto NextData - "Data-LTER-Mountain".

## Bibliografia

- Admiral, S.W. and Lafleur P.M., 2007. Partitioning of latent heat flux at a northern peatland. *Aquat. Bot.* 86, 107-116.
- Benscoter, B.W., Wieder, R.K. and Vitt, D.H., 2005. Linking microtopography with post-fire succession in bogs. *J. Veg. Sci.* 16, 453-460.
- Beschel, R.L., 1966. Hummocks and their vegetation in the high Arctic. Washington, DC: US National Academy of Science, National Research Council Publication 1287, 13-20.
- Biasi, C., Wanek, W., Rusalimova, O., Kaiser, C., Meyer, H., Barsukov, P. and Richter, A., 2005. Micro-topography and plant-cover controls on nitrogen dynamics in hummock tundra ecosystems in Siberia. *Arctic Alpine Res.* 37, 435-443. DOI: 10.1657/1523-0430(2005)037[0435:MAPCON]2.0.CO;2.
- Billings, W.D., Mark, A.F., 1961. Interactions between alpine tundra vegetation and patterned-ground in mountains of southern New Zealand. *Ecology* 42, 18-31.
- Crooke, W.M. and Simpson, W.E., 1971. Determination of ammonium in Kjeldahl digests of crops by an automated procedure. *J. Sci. Food Agric.* 22, 9-10.
- D'Alessandro S., 2009. tesi di laurea "Relazioni tra fenologia della comunità vegetale e bilancio del carbonio in un pascolo subalpino a *Nardus stricta* L."
- Edwards, A.C. and Cresser, M.S., 1992. Freezing and its effect on chemical and biological properties of soil. *Adv. Soil Sci.* 18, 61-79.
- Ellis, S., 1983. Stratigraphy and 14C dating of two earth hummocks, Jotunheimen, South Central Norway. *Geogr. Ann.* 65A, 279-87.
- Ford, D.J., Cookson, W.R., Adams, M.A., Grierson, P.F., 2007. Role of soil drying in nitrogen mineralization and microbial community function in semi-arid grasslands of north-west Australia. *Soil Biol. Biochem.* 39, 1557-1569.
- Gerrard, A. J., 1992. The nature and geomorphological relationships of earth hummocks (thufur) in Iceland. *Z. Geomorphol. Suppl.* 86, 173-182.
- Grab, S.W., 1994. Thufur in the Mohlesi Valley, Lesotho, Southern Africa. In: *Permafrost Periglacial Process.* 5, 111-118. DOI: 10.1002/ppp.3430050205.
- Grab, S.W., 1997. Thermal regime for a thufa apex and its adjoining depression, Mashai Valley, Lesotho. *Permafrost Periglacial Process.* 8, 437-45.
- Grab, S.W., 2002. Periglacial phenomena in Ethiopia: a review. In: *Permafrost and Periglacial Processes* 13, 71-76 DOI: 10.1002/ppp.405.
- Grab, S.W., 2005. Aspects of the geomorphology, genesis and environmental significance of earth hummocks (thúfur, pounus): miniature cryogenic mounds *Prog. Phys. Geogr.* 29 (2), 139-155. DOI: 10.1191/0309133305pp440ra.
- Grogan, P., Michelsen A., Ambus P., Jonasson S., 2004. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms. *Soil Biol. Biochem.* 36, 641-654.
- Güsewell, S., Jewell, P.L., Edwards P.J., 2005. Effects of heterogeneous habitat use by cattle on nutrient availability and litter decomposition in soils of an Alpine pasture. *Plant Soil* 268, 135-149.
- Kalbitz, K., Solinger S., Park J.H., 2000. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Sci.* 165, 277-304.
- Kvıderová, J., Elster, J. and Šimek, M., 2011. In situ response of *Nostoc commune* s.l. colonies to desiccation in Central Svalbard, Norwegian High Arctic. *Fottea* 11, 87-97.
- Longton, R.E., 1988. *Biology of polar bryophytes and lichens.* Cambridge: Cambridge University Press. 391 pp.
- Lundqvist, J., 1969. Earth and ice mounds: a terminological discussion. *The periglacial environment*, ed. Péwé, T.L., Montreal: McGill-Queen's University Press, pp. 203-15.
- Luoto, M. and Seppälä, M., 2002. Characteristics of earth hummocks (pounus) with and without permafrost in Finnish Lapland. *Geogr. Ann.* 84A, 127-136.
- Mackay, J.R., 1980. The origin of hummocks, western Arctic coast, Canada. *Can. J. Earth Sci.* 17, 996-1006.

- Mark, A.F., 1994. Patterned ground activity in a southern New Zealand high-alpine cushionfield. *Arctic Alpine Res.* 26, 270-280. DOI: 10.2307/1551939.
- Mark, A.F., Bliss L.C., 1970. The high-alpine vegetation of Central Otago, New Zealand. *N. Z. J. Bot.* 8, 381-451.
- McCraw, J.D., 1959: Periglacial and allied phenomena in western Otago. *N. Z. Geog.* 15, 61-68.
- Miranda, K.M., Espey, M.G. Wink, D.A., 2001. A rapid, simple spectrophotometric method for simultaneous detection of nitrate and nitrite. *Nitric Oxide-Biol. Ch.* 5(1), 62-71.
- Morley, C.R., Trofymow, J.A., Coleman, D.C., Cambardella, C., 1983. Effects of freeze/thaw stress on bacterial populations in soil microcosms. *Microb. Ecol.* 9, 329-340.
- Murphy, J., Riley, P., 1962. A modified single-solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27, 31-36.
- Nelson, N.S., 1987. An acid-persulfate digestion procedure for determination of phosphorus in sediments. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 18, 359-369.
- Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter, pp. 539-579, in: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney, eds., *Methods of Soil Analysis*, part 2, 2nd edition. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Quinton, W. L., 2000. Subsurface drainage from hummock-covered hillslopes in the Arctic tundra. *J. Hydrol.* 237, 113-125.
- Quinton, W.L. and Marsh P., 1998. The influence of mineral earth hummocks on subsurface drainage in the continuous permafrost zone. *Permafrost Periglacial Process.* 9, 213-228.
- Reddy, K. R. and Patrick W.H., 1984. Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments. *CRC Crit. Rev. Environ. Control* 13, 273-309.
- Rhoades, J.D., 1982. Cation exchange capacity. In: Page, A.L., et al. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2*, 2nd edn. Agron. Monogr. vol. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 149- 157.
- Schunke, E., 1977. Zur genese der thufur Islands und Ost-Grönlands. *Erdkunde* 31, 279-87.
- Schunke, E., 1981. Zur kryogenen Bodendynamik der arktischen Tundren Nordamerikas und Nordeuropas, *Polarforschung*, 51, 161-74.
- Schunke, E. and Zoltai, S.C., 1988. Earth hummocks. In Clark, M.J., *Adv. Periglac. Geomorphol.* Chichester: Wiley, 231-45.
- Scott, M.B., Dickinson, K.J.M., Barratt, B.I.P. and Sinclair, B.J., 2008. Temperature and moisture trends in non-sorted earth hummocks and stripes on the Old Man Range, New Zealand: implications for mechanisms of maintenance. *Permafrost Periglacial Process.* 19, 305-314. DOI: 10.1002/ppp.627.
- Scotter, G.W. and Zoltai, S.C., 1982. Earth hummocks in the Sunshine area of the Rocky Mountains, Alberta and British Columbia. *Arctic* 35, 411-16.
- Shen, H., Tang, Y. and Washitani I., 2006. Morphological plasticity of *Primula nutans* to hummock-and-hollow microsites in an alpine wetland. *J. Plant Res.* 119, 257-264.
- Smith, M., 2011. Thesis "Characteristics of hummocks and hummocked wetlands in Colorado".
- Solly, E., 2009. Tesi di laurea "Monitoraggio della fenologia in un pascolo subalpino a *Nardus stricta* L.: un approccio integrato."
- Tarnocai, C. and Zoltai, S.C., 1978. Earth hummocks of the Canadian Arctic and Subarctic. *Arctic Alpine Res.* 10, 581-94.
- Treml, V., Krizek, M. and Engel, Z., 2010. Classification of patterned ground based on morphometry and site characteristics: a case study from the High Sudetes, Central Eu-rope. *Permafrost Periglacial Process.* 21, 67-77. DOI: 10.1002/ppp.671
- Tyrtikov, A.P., 1969. Effects of vegetation on the freezing and thawing of soils. New Delhi: Amerind Publishing Co. 192 p.
- Van Reeuwijk, L.P., 2002. Procedures for Soil Analysis. Technical Paper n. 9. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, Netherlands.
- Van der Krift, T.A.J., Berendse F., 2002. Root life spans of four grass species from habitats differing in nutrient availability. *Funct. Ecol.* 16, 198-203.
- Van Vliet-Lanoë B., 1991. Differential frost heave, load casting and convection: converging mechanisms: a discussion of the origin of cryoturbations. *Permafrost Periglacial Process.* 2, 123-39.
- Van Vliet-Lanoë, B., 2014. Patterned ground and climate Change. *Permafrost: distribution, composition and impacts on infrastructure and ecosystems*". Ed. Oleg Podrovsky, chap 2 pp.67-106, Nova Science Publishers, Inc, Results of the IPEV CRYOCLIM 2004 program.
- Van Vliet-Lanoë, B., Bourgeois, O. and Dauteuil, O., 1998. Thufur formation in northern Iceland and its relation to Holocene climate change. *Permafrost Periglacial Process.* 9, 347-365. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1530(199810/12).
- Van Vliet-Lanoë, B. and Seppälä, M., 2002. Stratigraphy, age and formation of peaty earth hummocks (pounus), Finnish Lapland. *Holocene* 12, 187-99.
- Vestgarden L.S., Austnes K., 2009. Effects of freeze-thaw on C and release from soils below different vegetation in a montane system: a laboratory experiment. *Glob. Chang. Biol.* 15, 876-887.
- Williams, P.J. and Smith, M.W., 1989. *The Frozen Earth. Fundamentals of Geocryology.* Studies in Polar Research Series. xvi + 306 pp. Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press. ISBN 0 521 36534 1.
- Zoltai, S.C. and Tarnocai, C., 1974. Soils and vegetation of hummocky terrain: Environmental-Social Committee, Task Force on Northern Oil Development, Government of Canada. Report 74-5, 86 pp.
- Zoltai, S.C. and Tarnocai, C., 1981. Some nonsorted patterned ground types in northern Canada. *Arctic Alpine Res.* 13, 139 - 51.