

IMPATTI AMBIENTALI DELLE UTILIZZAZIONI FORESTALI E STRATEGIE DI MITIGAZIONE

Enrico Marchi¹, Giacomo Certini²

¹Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari Alimentari e Forestali (GESAAF), Università degli Studi di Firenze, Firenze; enrico.marchi@unifi.it

²Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DISPAA), Università degli Studi di Firenze, Firenze

Uno degli aspetti su cui si sta concentrando l'attenzione nel settore delle utilizzazioni forestali è la cosiddetta "forest operation ecology". Questo termine indica l'approccio operativo alla sostenibilità delle utilizzazioni forestali e mira allo sviluppo di tecnologie e sistemi di utilizzazione compatibili con l'ambiente, all'uso efficiente delle risorse, alla riduzione della produzione di rifiuti ed emissioni ed al contenimento degli impatti alle strutture e alle funzioni delle "sfere" ambientali. Lo sviluppo di reti viabili forestali e sistemi di raccolta del legno a basso impatto ambientale è un elemento chiave per la moderna selvicoltura. Le utilizzazioni forestali possono avere rilevanti impatti sull'ambiente, come la compattazione e l'alterazione della morfologia del suolo. Questi possono avere conseguenze negative sull'ecologia del suolo e sulla produttività delle foreste. In particolare, la riduzione della porosità implica una riduzione degli scambi gassosi e dell'infiltrazione dell'acqua con effetti sui microrganismi del suolo e sulle piante.

La compattazione del suolo può essere anche causa di scorrimento superficiale delle acque meteoriche e di fenomeni erosivi localizzati o diffusi.

Questo lavoro riassume i risultati della ricerca, sviluppata a livello nazionale ed internazionale, sugli impatti che possono derivare dall'esecuzione maldestra dei lavori forestali. I sistemi per la mitigazione di questi impatti sono discussi. Vengono inoltre sottolineati i punti sui quali appare indispensabile intervenire per migliorare la sostenibilità delle utilizzazioni forestali nell'applicazione degli interventi selvicolturali.

Parole chiave: utilizzazioni forestali, strade forestali, sistemi di esbosco, impatti ambientali, suolo.

Keywords: forest operation, forest road, extraction system, environmental impact, soil.

<http://dx.doi.org/10.4129/2cis-em-imp>

1. Introduzione

Nell'ultimo decennio nell'ambito delle utilizzazioni forestali si è registrata una crescente attenzione a quella che Heinimann (2007) ha definito "forest operation ecology".

Questo termine caratterizza l'approccio operativo alla sostenibilità delle utilizzazioni forestali e mira allo sviluppo di tecnologie e sistemi di utilizzazione compatibili con l'ambiente, all'uso efficiente delle risorse, alla riduzione della produzione di rifiuti ed emissioni ed al contenimento degli impatti alle strutture e alle funzioni delle "sfere" ambientali (atmosfera, biosfera, idrosfera e litosfera).

Lo sviluppo di reti viabili forestali e sistemi di raccolta del legno a basso impatto ambientale è un quindi un elemento chiave per la moderna selvicoltura.

L'esecuzione delle utilizzazioni forestali e l'apertura di strade e piste forestali o la loro non corretta manutenzione possono avere rilevanti impatti sull'ambiente e in particolare sul suolo forestale. I suoli forestali sono comunemente visti come sistemi sani. Essi tuttavia possono essere oggetto di varie forme di degrado, alcune delle quali sono indotte dall'uomo. Il suolo è molto

sensibile agli impatti causati dalla gestione forestale effettuata con mezzi e sistemi impropri, in particolare se applicati su ampia scala. I sistemi di esbosco per via terrestre, basati sull'impiego di macchine, sono oggi ampiamente diffusi in terreni pianeggianti o leggermente inclinati, che in genere forniscono ambiente di lavoro sicuro e elevate produttività del lavoro (Akay e Sessions, 2001).

Una vasta gamma di macchine come skidder, forwarder e trattori, con organi di propulsione diversi (pneumatici, cingoli, semi-cingoli) vengono comunemente utilizzate nell'esbosco del legname (Bygdén *et al.*, 2004; Jansson e Johansson, 1998; Picchio *et al.*, 2009, 2011; Seixas e McDonald, 1997). Tali macchine trasportano il materiale legnoso, strascicandolo o sollevato da terra, agli imposti passando sul terreno forestale. Negli ultimi anni questi veicoli sono diventati progressivamente più potenti ed efficienti, ma anche più pesanti, quindi sempre più impattanti sul suolo (Vossbrink e Horn, 2004; Horn *et al.*, 2007).

I conseguenti danni sul suolo, spesso di lunga durata e talvolta addirittura irreversibili, si ripercuotono negativamente sulla produttività delle foreste e la funzionalità degli ecosistemi (Hartmann *et al.*, 2014).

2. Obiettivo del lavoro

Nel contesto sopra descritto il presente lavoro vuole offrire una panoramica delle problematiche e della ricerca sugli impatti delle utilizzazioni forestali con particolare riferimento al suolo.

Sono stati analizzati i principali fattori che influenzano tali impatti e le loro principali tipologie. Alcuni sistemi di riduzione e/o mitigazione degli impatti sono stati descritti. Infine, il presente lavoro individua alcuni punti chiave per il futuro della ricerca e del trasferimento dell'innovazione, per il miglioramento dei metodi di esecuzione degli interventi selvicolturali, nell'ottica di una sempre maggiore riduzione degli effetti negativi delle utilizzazioni forestali sull'ambiente.

3. Interazione macchina-terreno

Il passaggio dei mezzi di esbosco esercita inevitabilmente forze verticali e orizzontali, nonché forze di taglio, sul suolo (Alakukku *et al.*, 2003). Conseguenza di ciò è l'alterazione dello stato fisico del suolo, la cui gravità dipende da diversi fattori, come la massa del veicolo, il peso che grava sull'assale/ruota/cingolo, la pressione dei pneumatici, l'area di contatto tra il veicolo e il suolo, la pendenza del terreno, e le forze di taglio dinamiche, le caratteristiche del suolo ed il suo stato di umidità (Jansson e Johansson, 1998; Alakukku *et al.*, 2003; Bygdén *et al.*, 2004).

La massa di veicoli forestali varia tra 5 e 40 Mg (Eliasson, 2005). Questa massa esercita il suo peso sulla superficie di contatto, la porzione del pneumatico o del cingolo a diretto contatto con il terreno. È difficile determinare esattamente le dimensioni e la forma dell'area di contatto perché dipende dalla deformazione dei pneumatici, che è influenzata da caratteristiche del pneumatico, dalla pressione di gonfiaggio, dal carico sulla ruota, e dalla plasticità del suolo (Hallonborg, 1996). Bassa pressione di gonfiaggio, alto carico di pneumatici, e terreno morbido contribuiscono ad aumentare l'area di contatto. La dimensione dell'area di contatto cambia continuamente durante il tragitto, soprattutto a causa della superficie irregolare del suolo. Inoltre, la pressione non è distribuita uniformemente sulla superficie di contatto, e in alcuni punti può essere più volte (anche dieci) superiore alla pressione media (Hillel, 1998; Gysi *et al.*, 2001).

Nei veicoli cingolati, i valori di picco di pressione al suolo di solito si registrano sotto i rulli (Wong, 1986) e dipendono molto dal baricentro del veicolo e dalla disposizione del cingolo (Koolen e Kuipers, 1983). Le interazioni macchina-terreno sono molto complesse. In una recente review, Cambi *et al.* (2015) hanno evidenziato che negli studi basati su prove in campo (48 i lavori analizzati) spesso mancano dati essenziali per il confronto e la sintesi dei risultati ottenuti. Ad esempio, per quanto riguarda i dati relativi alle caratteristiche del suolo, nel 19% degli studi analizzati mancavano i dati relativi all'umidità dello stesso al momento del passaggio dei mezzi e nel 62% dei casi mancavano informazioni sul contenuto di sostanza organica, entrambi aspetti importanti nel definire la portanza del suolo.

Per quanto riguarda i mezzi utilizzati, nell'82% dei casi di impiego di veicoli gommati e nel 79% dei cingolati mancavano i valori della pressione esercitata al suolo.

4. Impatti al suolo

I principali effetti degli stress impartiti al suolo dai mezzi meccanici sono la compattazione e la solcatura, quest'ultima frutto sia della prima che dello spostamento laterale del suolo più superficiale.

4.1 Compattazione

La compattazione è il costipamento del suolo che si verifica quando questo è sottoposto a pressioni superiori che superano la sua intrinseca resistenza meccanica.

La compattazione causata dal passaggio dei mezzi meccanici durante i lavori di utilizzazione implica l'aumento della densità apparente e delle resistenze a penetrazione e taglio e la riduzione della porosità.

La variazione di tali parametri fisici del suolo dipende da molti fattori come la densità apparente iniziale, il contenuto di umidità e di sostanza organica e la pressione esercitata dalle macchine. L'aumento della densità apparente è ovvia conseguenza della riduzione della porosità totale, che si può ammontare in alcuni casi anche al 50-60% (Ampoorter *et al.*, 2007; Picchio *et al.*, 2012; Solgi and Najafi, 2014). Tale riduzione di porosità avviene prevalentemente a carico dei pori più grossi, i cosiddetti "macropori", quelli preposti al drenaggio del suolo ed al rifornimento d'aria alle radici (Kutílek *et al.*, 2006). In proporzione sul totale aumentano i micropori, che trattengono più fortemente l'acqua e ciò rende dunque più lento lo smaltimento d'acqua del suolo in condizioni di saturazione ("permeabilità").

4.2 Solcatura

I solchi sono il risultato dello spostamento verticale ed orizzontale delle particelle di suolo associato alle sollecitazioni di taglio e compressione causate dai mezzi meccanici e si formano soprattutto quando il suolo è bagnato (Horn *et al.*, 2007). I solchi possono diventare dei percorsi preferenziali per il deflusso della acque meteoriche, che implicano un minor trattenimento delle stesse nel suolo ed una forte perdita di suolo superficiale - quello più fertile - per via del ruscellamento (Schoenholtz *et al.*, 2000).

Conseguenze della formazione dei solchi possono essere anche le colate di fango e detriti e, in situazioni pianeggianti, il ristagno idrico. In alcuni casi l'acqua può rimanere così a lungo da dare origine a "figure redoximorfiche", cioè a variazioni cromatiche caratteristiche che rivelano condizioni di anossia nel suolo (Herbauts *et al.*, 1996). La formazione dei solchi è la prova evidente che i veicoli hanno superato la capacità portante del terreno (Yong *et al.*, 1984). La profondità e le dimensioni dei solchi dipendono essenzialmente dal peso del veicolo, dal tipo di organo di propulsione, dal tipo di suolo, dalla pendenza del terreno, dal numero di passaggi e dalle condizioni di umidità del suolo (Bygdén *et al.*, 2004).

Le conseguenze per la produttività dei soprassuoli possono essere considerevoli, tanto che il numero e la

lunghezza dei solchi e la profondità sono state proposte come indicatori approssimativi della perdita di tale produttività in ambito forestale (Lacey e Ryan, 2000).

4.3 Impatti indiretti

La compattazione del suolo e la solcatura comportano una serie di effetti secondari sulla funzionalità dei suoli. L'alterazione della porosità influisce sui rapporti pianta-acqua, sull'aerazione, e sulla profondità di congelamento nel suolo, con possibile sviluppo di un ambiente meno favorevole alla crescita delle piante.

Una volta compattato, un suolo può trattenere più acqua che non prima della compattazione (Currie, 1984), ma questo non implica necessariamente una maggiore disponibilità d'acqua per le piante. Infatti, i micropori sono più efficienti nel trattenere l'acqua, ma la trattengono con una forza tale da renderla talvolta indisponibile per le piante.

La compattazione del suolo significa anche riduzione della permeabilità all'aria, con ovvie limitazioni negli scambi gassosi con l'atmosfera e una riduzione nella disponibilità di ossigeno per le radici (Frey *et al.*, 2009). Una volta compattato, il suolo è quindi caratterizzato da maggiori concentrazioni di CO₂ rispetto alle condizioni di partenza (Goutal *et al.*, 2013).

Gaertig *et al.* (2002) hanno valutato che la concentrazione di CO₂ in suoli compattati può essere fino a tre volte superiore che in quelli non compattati e che la densità delle radici diminuisce significativamente con la diminuzione della permeabilità all'aria.

Elevate concentrazioni di CO₂ nel suolo possono infatti inibire la respirazione (Qi *et al.*, 1994) e la crescita (Viswanathana *et al.*, 2011) degli apparati radicali. La limitazione nella crescita delle radici dopo la compattazione del suolo è anche dovuta alla sua maggiore resistenza alla penetrazione (Taylor e Brar, 1991).

La crescita delle radici di molti alberi è limitata quando la resistenza del suolo alla penetrazione supera 2,5 MPa (Greacen and Sands, 1980).

La compattazione del suolo o la rimozione degli orizzonti superficiali, di solito i più fertili, può provocare la riduzione nella crescita delle piante e/o difficoltà di rigenerazione (Williamson e Neilsen, 2000), con effetti anche sulla diversità vegetale (Pinard *et al.*, 2000). L'effetto della compattazione sulla componente biologica del suolo è un altro aspetto di grande rilevanza.

La microfauna del suolo viene alterata in modo significativo, soprattutto perché risultano stravolti i rapporti relativi tra i volumi d'acqua e d'aria nel suolo (Radford *et al.*, 2001).

La riduzione della porosità totale, l'alterazione della distribuzione dimensionale dei pori e della loro connettività hanno effetti anche sulla quantità e sull'attività dei microorganismi presenti nel suolo (Tan *et al.*, 2008; Frey *et al.*, 2009), quali batteri e funghi (Smeltzer *et al.*, 1986).

A tutt'oggi appare oscuro quale sia l'effetto a medio e lungo termine della compattazione del suolo sulla importantissima capacità dello stesso di stoccare carbonio ai fini del contrasto al cambiamento climatico

in atto; e ciò, sostanzialmente, per la mancanza di studi focalizzati sul tema.

È noto tuttavia che la compattazione modifica il tasso di scambio di gas ad effetto serra – quali CO₂, CH₄ e N₂O – dei suoli forestali con l'atmosfera (Yashiro *et al.*, 2008).

5. Tecniche di prevenzione e mitigazione degli impatti

Molti sono gli studi improntati sui sistemi e le tecniche per la riduzione o la mitigazione dei danni causati al suolo durante le utilizzazioni forestali. Le principali misure da adottare allo scopo appaiono essere: i) ridurre, quanto più possibile, la pressione nelle aree di contatto tra macchine e suolo, ii) operare in condizioni di suolo relativamente secco, quando la capacità portante dello stesso è elevata, iii) pianificare attentamente i lavori di utilizzazione. Riguardo al primo punto, se i residui di utilizzazione vengono lasciati sul terreno la pressione esercitata dalle macchine viene distribuita su una superficie maggiore e la pressione sul suolo si riduce sensibilmente (Ampoorter *et al.*, 2007; Labelle e Jaeger, 2012). Altre soluzioni tecniche atte a ridurre la pressione che i veicoli esercitano sul suolo sono rappresentate dall'utilizzo di basse pressioni di gonfiaggio dei pneumatici, di pneumatici più larghi o di semingoli.

In tal senso, l'adozione di sistemi di controllo della pressione dei pneumatici (TPCS), che ottimizzano tale pressione in base alle condizioni di lavoro, sono una soluzione tecnologica affidabile che aiuta a migliorare la trazione e la mobilità e può essere utile per la riduzione degli impatti (Lotfalian e Parsakhoo, 2009).

Una soluzione semplice al problema è quella di effettuare i lavori di utilizzazione nei periodi in cui il terreno è relativamente secco oppure congelato, quindi poco incline alla compattazione (Sutherland, 2003; Šušnjar *et al.*, 2006). Molti autori hanno evidenziato che un sistema efficace per ridurre l'impatto negativo sul suolo è quello di una accurata progettazione e pianificazione del lavoro. In particolare, un attento tracciamento di piste permanenti consente di limitare il "disturbo" del suolo su alcune aree selezionate (Chamen *et al.*, 2003; Horn *et al.*, 2007; Lotfalian e Parsakhoo, 2009; Picchio *et al.*, 2012). Tra l'altro, il suolo delle piste, una volta compattato, ha una capacità portante superiore rispetto alle aree circostanti e sopporta meglio i successivi passaggi dei mezzi, rendendo così più agevole il loro utilizzo.

6. Conclusioni

L'attività di ricerca inerente gli impatti sul suolo causati durante le utilizzazioni forestali è stata sicuramente ampia e articolata. Tuttavia, alcuni studi hanno evidenziato risultati contrastanti e in alcuni ambiti l'attività di ricerca è ancora carente o del tutto assente.

È quindi necessario continuare a indagare questa importante tematica, possibilmente migliorando i sistemi di raccolta e presentazione dei dati, magari attraverso una standardizzazione dei principali parametri da rilevare.

Ciò potrebbe consentire un più efficace lavoro di confronto e sintesi dei risultati ottenuti.

Contemporaneamente è importante svolgere attività di informazione e formazione degli operatori del settore, sia per renderli consapevoli dell'importanza del problema sia per aumentarne le conoscenze in materia, in particolare sui sistemi di mitigazione dei danni.

SUMMARY

Environmental impact of forest operations and possible countermeasures

One of the major challenges in forest management is to comply with forest operation ecology, which is a modus operandi aimed at: developing and deploying environmentally sound forest operation technologies; efficiently using resources; and minimizing the production of wastes and the overall impact on the structure and function of the environmental spheres – atmosphere, biosphere, hydrosphere, and lithosphere.

The development of environmentally sound forest operations is a key factor in modern silviculture.

Forest operations may induce considerable environmental impacts. Impacts on residual stand and forest soil are usually the main concern. Topsoil compaction and alteration of ground morphology are crucial direct effects of forest harvesting, with negative consequences for soil ecology and forest productivity. In particular, soil porosity reduction implies limitations in oxygen and water supply to soil microorganisms and plants. Soil compaction has also dramatic ramifications in terms of runoff and erosion of the most fertile soil compartment. This paper aims to review the national and international literature dealing with the environmental impact of forest operations carried out for implementing planned silvicultural treatments.

This paper addresses issues related to the impacts caused by forest operations and approaches for their mitigation. Main guidelines for improving the sustainability of forest operations in the close future are also addressed.

BIBLIOGRAFIA CITATA E DI RIFERIMENTO

Akay A., Sessions J., 2001 – *Minimizing road construction plus forwarding costs under a constraint of soil disturbance*. Proceedings of the International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium, Dec. 10-13, Seattle, WA., pp. 61-70.

Alakukku L., Weisskopf P., Chamen W.C., Tijink F.G., van der Linden J., Pires S., Sommer C., Spoor G., 2003 – *Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review*. Soil Till. Res., 73: 145-160.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00107-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00107-7)

Ampoorter E., Goris R., Cornelis W.M., Verheyen K., 2007 – *Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils*. Forest Ecology and Management, 241: 162-174.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.019>

Ares A., Terry T., Miller R., Anderson H., Flaming B., 2005 – *Ground-based forest harvesting effects on soil physical properties and Douglas-fir growth*. Soil Sci. Soc. Am. J., 69: 1822-1832.

<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.0331>

Bygdén G., Eliasson L., Wästerlund I., 2004 – *Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks*. J. Terramechanics, 40: 179-190.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2003.12.001>

Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E., 2015 – *The impact of heavy traffic on forest soils: A review*. Forest Ecology and Management, 338: 124-138.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>

Chamen T., Alakukku L., Pires S., Sommer C., Spoor G., Tijink F., Weisskopf P., 2003 – *Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices*. Soil Till. Res., 73: 61-174.

[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00108-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00108-9)

Currie J.A., 1984 – *Gas diffusion through soil crumbs: the effects of compaction and wetting*. J. Soil Sci., 35: 1-10.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1984.tb00253.x>

Dominati E., Patterson M., Mackay A., 2010 – *A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils*. Ecol. Econ., 69: 1858-1868.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>

Eliasson L., 2005 – *Effects of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction*. Silva Fenn., 39: 549-557.

<http://dx.doi.org/10.14214/sf.366>

Frey B., Rüdert A., Sciacca S., Matthies D., 2009 – *Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure*. Eur. J. Soil Biol., 45: 312-320.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.05.006>

Gaertig T., Schack-Kirchner H., Hildebrand E.E., von Wilpert K., 2002 – *The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany*. Forest Ecology and Management, 159: 15-25.

[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00706-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00706-X)

Goutal N., Renault P., Ranger J., 2013 – *Forwarder traffic impacted over at least four years soil air composition of two forest soils in northeast France*. Geoderma, 193-194: 29-40.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.012>

Greacen E.L., Sands R., 1980 – *Compaction of forest soils. A review*. Aust. J. Soil Res., 18: 163-189.
<http://dx.doi.org/10.1071/SR9800163>

Gysi M., Maeder V., Weisskopf P., 2001 – *Pressure distribution underneath tyres of agricultural vehicles*. Trans. ASAE, 44: 1385-1389.

<http://dx.doi.org/10.13031/2013.7001>

Hallonborg U., 1996 – *Super ellipse as tyre-ground contact area*. J. Terramechanics, 33: 125-132.

[http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4898\(96\)00013-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4898(96)00013-4)

Hamza M.A., Anderson W.K., 2005 – *Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions*. Soil Till. Res., 82: 121-145.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>

- Hartmann M., Niklaus P., Zimmermann S., Schmutz S., Kremer J., Abarenkov K., Lüscher P., Widmer F., Frey B., 2014 – *Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction*. ISME J., 8: 226-244.
<http://dx.doi.org/10.1038/ismej.2013.141>
- Heinimann H.R., 2007 – *Forest operations engineering and management – The ways behind and ahead of a scientific discipline*. Croat. J. For. Eng., 28: 107-121.
- Herbauts J., El-Bayad J., Gruber W., 1996 – *Influence of logging traffic on the hydromorphic degradation of acid forest soils developed on loessic loam in middle Belgium*. Forest Ecology and Management, 87: 193-207.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03826-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03826-1)
- Hillel D., 1998 – *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego, CA.
- Horn R., Vossbrink J., Peth S., Becker S., 2007 – *Impact of modern forest vehicles on soil physical properties*. Forest Ecology and Management, 248: 56-63.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.037>
- Jansson K., Johansson J., 1998 – *Soil changes after traffic with a tracked and a wheeled forest machine: a case study on a silt loam in Sweden*. Forestry, 71: 57-66. <http://dx.doi.org/10.1093/forestry/71.1.57>
- Koolen A.J., Kuipers H., 1983 – *Agricultural Soil Mechanics*. Springer-Verlag, Berlin.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-69010-5>
- Kutilek M., Jendele L., Panayiotopoulos K.P., 2006 – *The influence of uniaxial compression upon pore size distribution in bi-modal soils*. Soil Till. Res., 86: 27-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.02.001>
- Labelle E.R., Jaeger D., 2012 – *Quantifying the use of brush mats in reducing forwarder peak loads and surface contact pressure*. Croat. J. For. Eng., 33: 249-274.
- Lacey S.T., Ryan P.J., 2000 – *Cumulative management impacts on soil physical properties and early growth of Pinus radiata*. Forest Ecology and Management, 138: 321-333.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00422-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00422-9)
- Lotfalian M., Parsakhoo A., 2009 – *Investigation of forest soil disturbance caused by rubber-tyred skidder traffic*. Int. J. Nat. Eng. Sci., 3: 79-82.
- Picchio R., Maesano M., Savelli S., Marchi E., 2009 – *Productivity and energy balance in conversion of a Quercus cerris L. coppice stand into high forest in Central Italy*. Croat. J. For. Eng., 30: 15-26.
- Picchio R., Neri F., Maesano M., Savelli S., Sirna A., Blasi S., Baldini S., Marchi E., 2011 – *Growth effects of thinning damage in a Corsican pine (Pinus laricio Poiret) stand in central Italy*. Forest Ecology and Management, 262: 237-243.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.03.028>
- Picchio R., Neri F., Petrini E., Verani S., Marchi E., Certini G., 2012 – *Machinery-induced soil compaction in thinning two pine stands in central Italy*. Forest Ecology and Management, 285: 38-43.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.008>
- Pinard M., Barker M., Tay J., 2000 – *Soil disturbance and post-logging forest recovery on bulldozer paths in Sabah, Malaysia*. Forest Ecology and Management, 130: 213-225.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00192-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00192-9)
- Qi J.E., Marshall J.D., Mattson K.G., 1994 – *High soil carbon dioxide concentrations inhibit root respiration of Douglas fir*. New Phytol., 128: 435-442.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.1994.tb02989.x>
- Radford B.J., Wilson-Rummenie A.C., Simpson G.B., Bell K.L., Ferguson M.A., 2001 – *Compacted soil affects soil macrofauna populations in a semi-arid environment in Central Queensland*. Soil Biol. Biochem., 33: 1869-1872.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00104-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00104-3)
- Schoenholtz S., van Miegroet H., Burger J., 2000 – *A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities*. Forest Ecology and Management, 138: 335-356.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0)
- Seixas F., McDonald T., 1997 – *Soil compaction effects of forwarding and its relationship with 6 - and 8 - wheel drive machines*. Forest Prod. J., 47: 46-52.
- Smeltzer D.L.K., Bergdahl D.R., Donnelly J.R., 1986 – *Forest ecosystems responses to artificially induced soil compaction. II. Selected soil microorganism populations*. Can. J. For. Res., 16: 870-872.
<http://dx.doi.org/10.1139/x86-154>
- Solgi A., Najafi A., 2014 – *The impacts of ground-based logging equipment on forest soil*. J. For. Sci., 60: 28-34.
- Šušnjar M., Horvat D., Šešelj J., 2006 – *Soil compaction in timber skidding in winter conditions*. Croat. J. For. Eng., 27: 3-15.
- Sutherland B.J., 2003 – *Preventing soil compaction and rutting in the boreal forest of western Canada: a practical guide to operating timber-harvesting equipment*. FERIC Adv. 4: 1-52.
- Tan X., Chang S.X., Scott X., Kabzems, R., 2008 – *Soil compaction and forest floor removal reduced microbial biomass and enzyme activities in a boreal aspen forest soil*. Biol. Fert. Soils, 44: 471-479.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00374-007-0229-3>
- Taylor H.M., Brar G.S., 1991 – *Effect of soil compaction on root development*. Soil Till. Res., 19: 37-52.
[http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90080-H](http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987(91)90080-H)
- Viswanathana B., Volder A., Watson W.T., Aitkenhead-Peterson J.A., 2011 – *Impervious and pervious pavements increase soil CO₂ concentrations and reduce root production of American sweetgum (Liquidambar styraciflua)*. Urban For. Urban Gree., 10: 133-139.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2011.01.001>
- Vossbrink J., Horn R., 2004 – *Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties*. Eur. J. For. Res., 123: 259-267.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10342-004-0040-8>
- Williamson J.R., Neilsen W.A., 2000 – *The influence of forest site on rate and extent of soil compaction and profile disturbance of skid trails during ground-based harvesting*. Can. J. For. Res., 30: 1196-1205.
<http://dx.doi.org/10.1139/x00-041>

Wong J.Y., 1986 – *Computer aided analysis of the effects of design parameters on the performance of tracked vehicles*. J. Terramechanics, 23: 95-124.
[http://dx.doi.org/10.1016/0022-4898\(86\)90017-0](http://dx.doi.org/10.1016/0022-4898(86)90017-0)

Yashiro Y., Kadir W.R., Okuda T., Koizumi H., 2008 – *The effects of logging on soil greenhouse gas (CO₂,*

CH₄, N₂O) flux in a tropical rain forest, Peninsular Malaysia. Agr. For. Meteorol., 148: 799-806.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.01.010>

Yong R.N., Fattah E.A., Skiadas N., 1984 – *Vehicle Traction Mechanics*. Elsevier Science Pub. Co., Inc., New York, NY.