

GHERARDO CHIRICI (*) (***) (°) - FRANCESCA BOTTALICO (*)
FRANCESCA GIANNETTI (*) - PATRIZIA ROSSI (*) - BARBARA DEL PERUGIA (*)
DAVIDE TRAVAGLINI (*) - SUSANNA NOCENTINI (*) - ENRICO MARCHI (*)
CRISTIANO FODERI (*) - MARCO FIORAVANTI (*) - LORENZO FATTORINI (**)
ANNIBALE GUARIGLIA (***) - ORAZIO CIANCIO (***) - LORENZO BOTTAI (****)
PIERMARIA CORONA (*****) - BERNARDO GOZZINI (*****)

STIMA DEI DANNI DA VENTO AI SOPRASSUOLI FORESTALI IN REGIONE TOSCANA A SEGUITO DELL'EVENTO DEL 5 MARZO 2015

(*) Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali - GESAAF, Via San Bonaventura, 13 - 50145 Firenze, Italy.

(**) Università degli Studi di Siena, Dipartimento di Economia Politica e Statistica, P.za S. Francesco, 8 53100 Siena, Italy.

(***) GEOCART S.p.A., Viale Del Basento, 120 - 85100 Potenza (Pz) - Italy.

(****) Accademia Italiana di Scienze Forestali, P.zza Edison, 11 - 50133 Firenze, Italy.

(*****) Consorzio LaMMA Via Madonna del Piano, 10 - 50019 Sesto Fiorentino (FI) Italy.

(*****) Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Forestry Research Centre (CREA-SEL), Viale Santa Margherita 80, 50100 Arezzo, Italy.

(°) Autore corrispondente; gherardo.chirici@unifi.it

Il vento è uno dei maggiori fattori di disturbo per le foreste europee e i cambiamenti climatici hanno provocato un aumento di eventi estremi negli ultimi anni. La regione Toscana tra il 4 e il 5 marzo 2015 è stata colpita da una tempesta di vento che ha provocato notevoli danni ai soprassuoli forestali. L'obiettivo di questo lavoro è di sviluppare una metodologia speditiva per la mappatura delle aree danneggiate in termini di superfici interessate, numero di piante atterrate e volume legnoso a terra. Il contributo illustra a tal fine l'utilizzo di dati telerilevati e in particolare le potenzialità dei dati Airborne Laser Scanning (ALS).

Parole chiave: cambiamenti climatici; danni da vento; Airborne Laser Scanning (ALS).

Key words: climate changes; wind damages; Airborne Laser Scanning (ALS).

Citazione: Chirici G., Bottalico F., Giannetti F., Rossi P., Del Perugia B., Travaglini D., Nocentini S., Marchi E., Foderi C., Fioravanti M., Fattorini L., Guariglia A., Ciancio O., Bottai L., Corona P., Gozzini B., 2016 - *Stima dei danni da vento ai soprassuoli forestali in Regione Toscana a seguito dell'evento del 5 marzo 2015*. L'Italia Forestale e Montana, 71 (4): 197-213. <http://dx.doi.org/10.4129/ifm.2016.4.02>

1. INTRODUZIONE

Il vento, insieme agli incendi e agli attacchi parassitari, è uno dei maggiori fattori di disturbo per le foreste europee e negli ultimi anni i cambiamenti climatici hanno indotto un aumento nella frequenza e nell'intensità delle tempeste di vento causando gravi danni ai popolamenti forestali (Gardiner *et al.*, 2010).

Un altro fattore che ha determinato l'incremento dei danni causati dal vento nelle foreste è la mancanza di una gestione attiva del bosco. L'assenza di cure colturali e una eccessiva densità, determinano una diminuzione della stabilità dei soprassuoli che diventano maggiormente suscettibili ad eventi estremi (Seidl *et al.*, 2011).

A seguito di una tempesta di vento è importante poter ottenere rapidamente informazioni circa l'area interessata dal danno, per pianificare le operazioni forestali di rimozione e messa in sicurezza del materiale atterrato e supportare le scelte di gestione forestale (Honkavaara *et al.*, 2013).

Il telerilevamento costituisce una valida fonte informativa in termini di rapporto costo/benefici per il monitoraggio delle aree forestali colpite da eventi di disturbo. In particolare la tecnologia *Airborne Laser Scanning (ALS)*, basata sul rilievo tramite un sensore laser (LiDAR - *Light Detection and Ranging*) aviotrasportato, permette la mappatura tridimensionale delle aree danneggiate consentendo non solo la loro precisa individuazione e perimetrazione, ma anche la stima degli effetti del disturbo sul soprassuolo boschivo e le caratteristiche del materiale presente a terra o ancora in piedi. Per uno stato dell'arte sulle applicazioni forestali delle tecniche ALS in Italia si veda per esempio Montagni *et al.* (2013).

Alcuni studi che hanno previsto l'utilizzo di dati ALS per la stima delle superfici forestali affette da danni provocati da fattori abiotici (vento o neve) sono stati condotti in Nord Europa (vd. Vastaranta *et al.*, 2011; Honkavaara *et al.*, 2013). Non sono invece disponibili studi che tentino di analizzare gli effetti del danno in termini di numero di tronchi a terra e volume legnoso abbattuto sulla base di dati ALS. Il presente studio è stato effettuato a seguito di una tempesta di vento che ha colpito la Regione Toscana nella notte tra il 4 e il 5 marzo 2015. La tempesta ha causato ingenti danni ad aree verdi urbane e soprassuoli boschivi, specie nei rimboschimenti di conifere.

Lo scopo di questo lavoro è di sviluppare e testare un metodo innovativo e speditivo per la quantificazione dei danni da vento tramite ALS, non potendo eseguire un'analisi di tipo multi temporale per mancanza del dato ALS pre-evento.

2. MATERIALI E METODI

2.1 *Area di studio*

Tra la tarda sera del 4 (18 UTC) e la mattina (06 UTC) del 5 marzo 2015 la Regione Toscana è stata interessata da venti di burrasca con raffiche di fortunale (con picchi oltre i 165 km/h) con direzione dominante di provenienza da nord-est (LaMMA, 2015).

Per maggiori informazioni sulle caratteristiche dell'evento meteorologico si rimanda a Gozzini (2016).

L'area indagata comprende l'intera Regione Toscana (22.994 km²), che è coperta da boschi e altre terre boscate per 11.515 km².

Per poter procedere alla mappatura delle aree danneggiate è stato necessario eseguire un rilievo ALS *ad hoc*. Ma a causa degli elevati costi non è stato possibile eseguire un volo che coprisse tutta la Regione. Per questo motivo è stata necessaria una fase di ricognizione preliminare per individuare le aree maggiormente danneggiate su cui concentrare il monitoraggio.

In un primo momento sono state raccolte le segnalazioni della presenza di danni da parte di vari enti territoriali locali, queste in seguito sono state armonizzate e informatizzate in un unico strato informativo geografico con indicato il livello di danno per i soprassuoli boschivi suddiviso nelle seguenti tre classi:

- *Livello 1* - aree dove si sono create numerose (circa >20) aperture nella copertura forestale a seguito del crollo totale o quasi del soprassuolo arboreo (la superficie di ciascuna apertura è in genere di estensione pari ad almeno 2000 m²);
- *Livello 2* - aree dove si sono create poche (circa 10-20) aperture nella copertura forestale a seguito del crollo totale o quasi del soprassuolo arboreo (la superficie di ciascuna apertura è in genere di estensione pari ad almeno 2000 m²);
- *Livello 3* - aree interessate principalmente dalla caduta (o stroncamento) di singole piante o di piccoli gruppi di alberi (generalmente gruppi di superficie inferiore a 2000 m²).

Da questa analisi preliminare le aree danneggiate sono risultate complessivamente pari a 20.906 ha per il livello 1, 8.972 ha per il livello 2 e 17.243 ha per il livello 3.

In totale sono state incluse nel piano volo con sensore ALS 26 aree per una superficie complessiva di 43.623 ha (Figura 1) scelte tra quelle con livello di danno più elevato e di particolare importanza ambientale o storico-culturale.

2.2 Dati

Il volo è stato realizzato dalla società GEOCART tra il 4 e l'8 maggio 2015 con vettore aereo a pala rotante Eurocopter AS350 B3 equipaggiato con sistema LiDAR RIEGL LMS-Q680i e sistema di camere digitali DIGICAM H39 RGB e CIR. L'acquisizione laser si è basata su un'emissione di circa 4,4 impulsi a m² (il numero totale degli impulsi di ritorno dopo la mosaicatura delle strisciate è risultato in media pari a 10 punti a m²) e un'acquisizione in modalità *full waveform*, il volo è stato realizzato a una quota di 1100 m a.g.l. con una velocità media di 70 kn. L'angolo massimo di scansione laser è stato di 60° risultante in uno SWAT medio di 1100 m, la *pulse frequency* è stata di 300 kHz con 80 linee per secondo e 2500 misure per linea. La lunghezza d'onda utilizzata è stata di 1550 nm. Le ortofoto digitali nel visibile e nell'infrarosso vicino hanno risoluzione di 20 cm. Il vettore aereo utilizzato e il relativo piano di volo sono riportati in Figura 2.

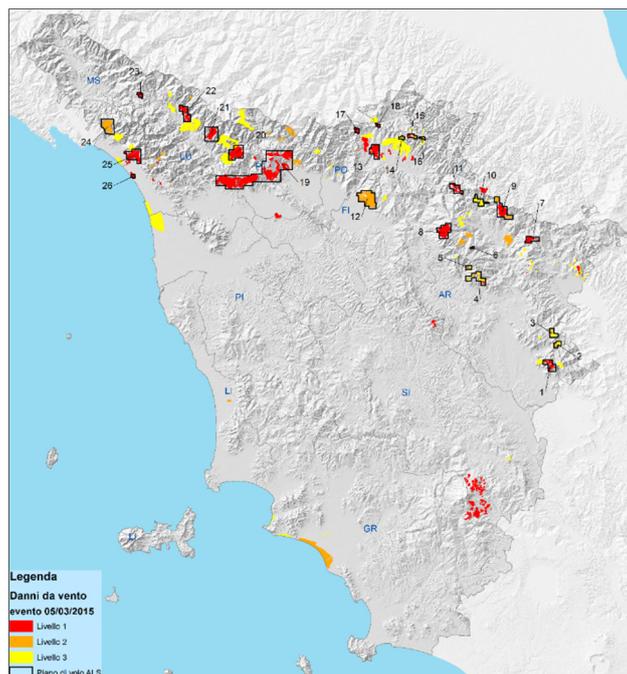


Figura 1 - Individuazione delle aree boschive maggiormente danneggiate da vento a seguito dell'evento del 5 marzo 2015 con la perimetrazione delle zone scelte per il monitoraggio aereo.

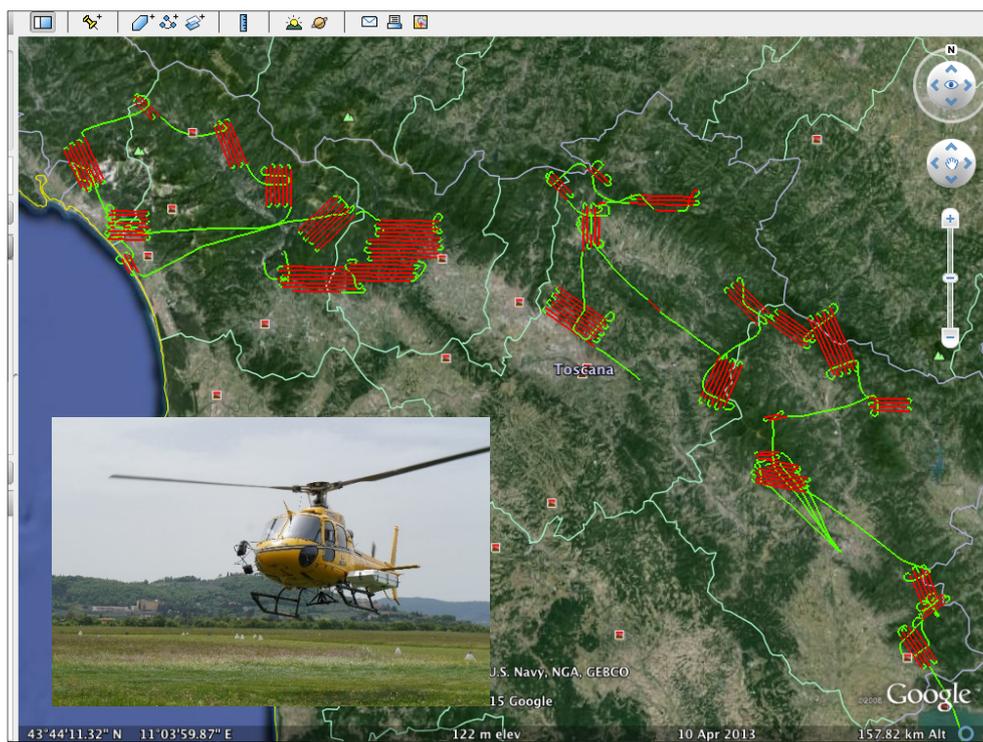


Figura 2 - Vettore aereo utilizzato per il rilievo e relativo piano di volo.

2.3 Metodologia per la stima dei danni

La metodologia utilizzata per l'individuazione e la caratterizzazione delle aree forestali interessate dai danni della tempesta di vento del 4-5 marzo 2015 ha previsto più fasi di lavoro (Figura 3) ed è dettagliatamente descritta in Chirici *et al.* (sottomesso). Nelle diverse fasi sono stati utilizzati differenti dati *pre* e *post* evento per individuare, con tecniche di *change detection*, le aree interessate dai danni e stimare i parametri di interesse. Le tradizionali tecniche di fotointerpretazione manuale sono state integrate con le tecniche di analisi dei dati ALS per poter migliorare le stime.

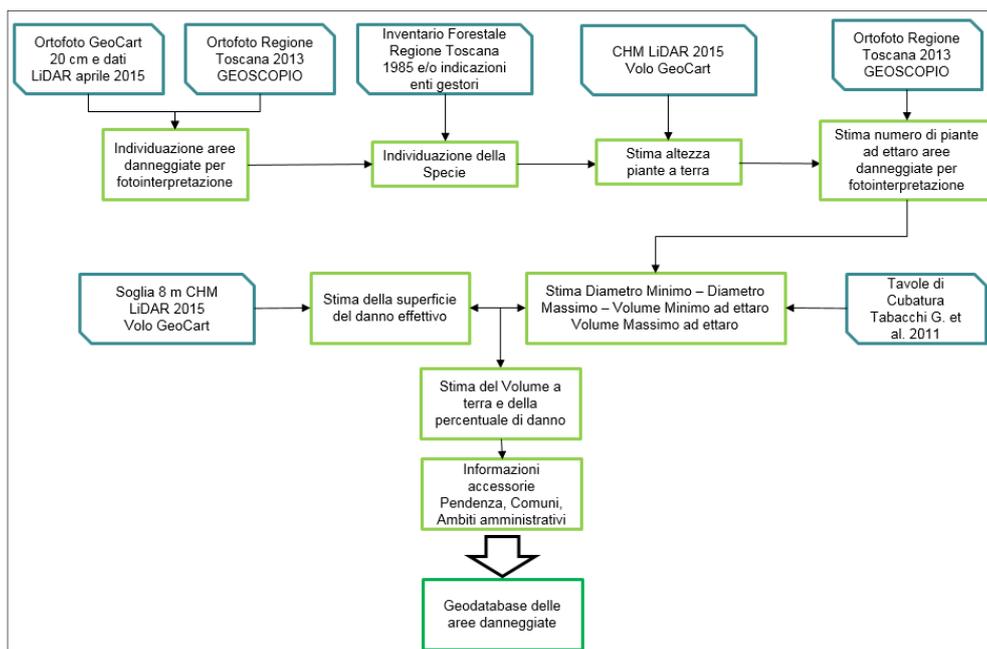


Figura 3 – Schema della metodologia utilizzata per l'individuazione delle aree danneggiate e per la stima del volume delle piante atterrate.

I dati *pre-evento* utilizzati sono stati:

- ortofoto digitali della Regione Toscana (colori naturali e infrarosso falso colore) acquisite nella primavera 2013 con risoluzione geometrica pari a 1 m (fonte: Geoscopio Regione Toscana);
- dati rilevati a terra nell'ambito dell'Inventario Forestale della Regione Toscana (Regione Toscana, 1998), griglia raster con lato pari a 400 m. Per ogni cella erano state raccolte numerose informazioni, nell'ambito di questo lavoro è stata utilizzata l'indicazione della composizione specifica riportata in ogni cella;
- equazioni per il calcolo dei volumi legnosi per le diverse specie forestali sviluppate nell'ambito dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio INFC 2005 (Tabacchi *et al.*, 2011).

I dati *post-evento* utilizzati sono stati:

- ortofoto digitali acquisite nel 2015 da GeoCart in concomitanza con i dati ALS con risoluzione geometrica pari a 0,2 m;
- dati ALS ottenuti tramite il volo GeoCart 2015;
- Shape file di progettazione del volo GeoCart con informazioni relative alle specie danneggiate fornite dagli enti territoriali locali.

2.4 Mappatura delle aree danneggiate

La prima fase di lavoro ha previsto le pre-elaborazioni della nuvola di punti derivata dal volo GeoCart (Figura 4). A partire dai dati ALS in formato grezzo sono stati derivati un *Digital Terrain Model* (DTM) e un *Digital Surface Model* (DSM) con passo di 1 m, utilizzati poi per realizzare un *Canopy Height Model* (CHM). Il CHM è stato derivato per sottrazione tra il DSM e DTM.

Le aree danneggiate sono state individuate e perimetrate per fotointerpretazione manuale delle ortofoto del 2015 e del CHM (Figure 5 e 6).

Attraverso una fotointerpretazione delle ortofoto del 2013 della Regione Toscana sono stati individuati, nelle aree interessate dal danno, i *gap* pre-evento e sottratti all'area danneggiata.



Figura 4 - Esempio di cross-profile della nuvola di punti LiDAR del volo GeoCart in una delle zone danneggiate. Si individuano chiaramente le aree con alberi ancora in piedi e quelle con alberi a terra.

2.5 Stima della massa legnosa a terra

Nelle aree interessate dal danno non tutte le piante sono risultate effettivamente a terra ma si sono riscontrate numerose zone con alberi non danneggiati. Per calcolare la superficie di danno effettivo, cioè con piante a terra, si è proceduto all'individuazione delle aree non danneggiate attraverso una riclassificazione del CHM all'interno dell'area interessata dal danno. Tutti i pixel sotto una soglia posta pari a 8 metri all'interno dell'area danneggiata sono stati considerati come aree con materiale a terra e quindi area di danno effettivo. La soglia di 8 metri è stata scelta dopo alcuni rilievi a terra realizzati in diverse tipologie forestali (Figura 7).

L'attribuzione della specie interessata dal danno nelle aree cartografate è stata realizzata integrando l'indicazione dell'Inventario Forestale della Regione Toscana con le indicazioni fornite dai vari enti territoriali locali al momento della progettazione del volo e da sopralluoghi a terra.

L'altezza delle piante a terra e il numero delle piante ad ettaro è stata stimata utilizzando i dati del CHM delle isole non danneggiate o delle aree immediatamente limitrofe, laddove per confronto con l'ortofoto pre-evento sia stata appu-

rata la concordanza di queste con le aree danneggiate in termini compositivi e strutturali. A partire dai valori di altezza media stimata sul CHM, tramite le tavole di cubatura (Tabacchi *et al.*, 2011), sono stati identificati due valori di diametro (uno di riferimento superiore e uno di riferimento inferiore) rispetto al diametro medio riferito all'altezza stimata. Ai due valori diametrici estremi è stato riportato il rispettivo valore di provvigione e tra i due è stata calcolata la media.

Al geo-database sono state aggiunte delle informazioni accessorie relative agli ambiti amministrativi: Provincia di appartenenza, SIC e ZPS, Riserve Naturali, Unione dei Comuni.

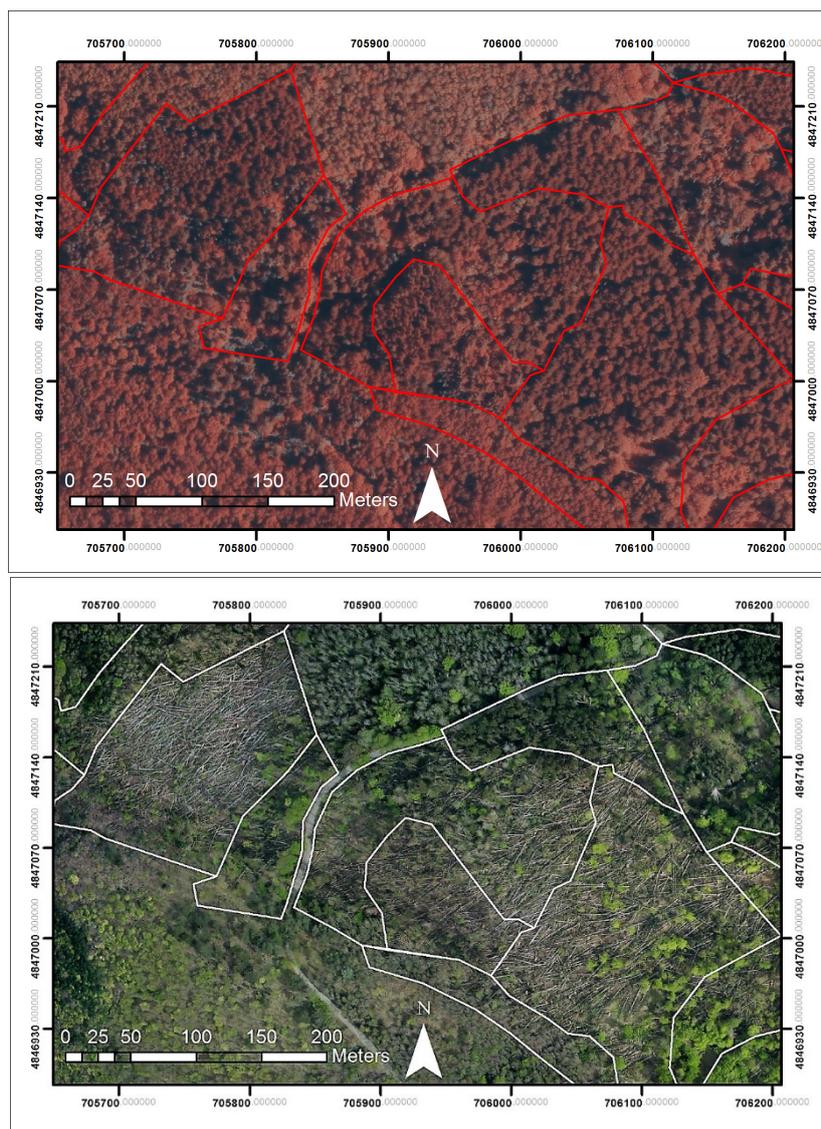


Figura 5 - Esempio di individuazione di un'area danneggiata, per fotointerpretazione di confronto tra ortofoto 2013 pre-evento (sopra) e ortofoto 2015 post evento (sotto).

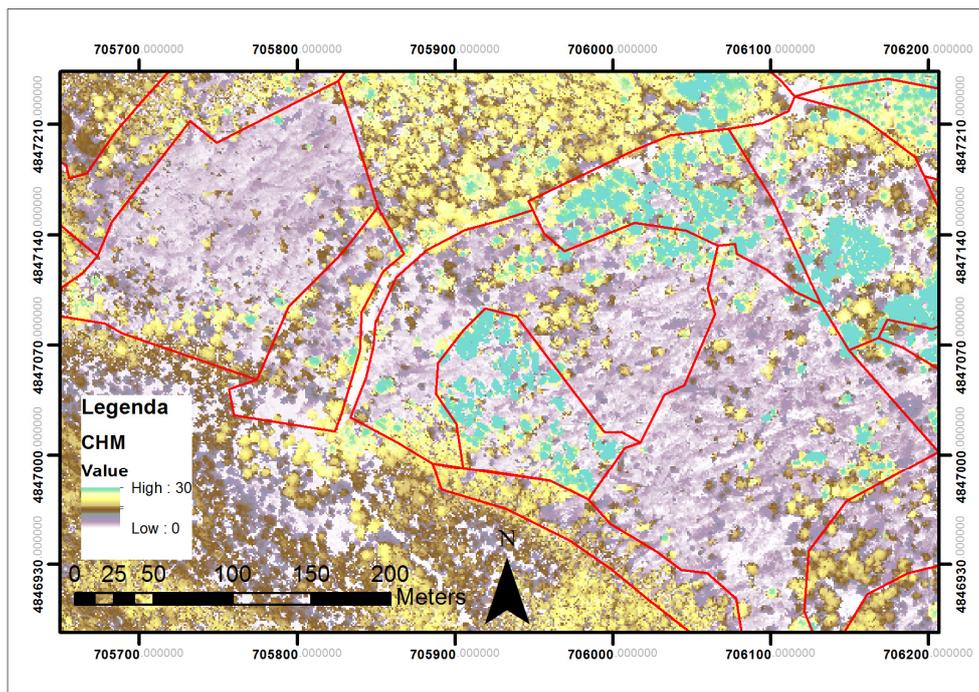


Figura 6 - Esempio di individuazione di un'area danneggiata, fotointerpretazione CHM LiDAR 2015 GeoCart.

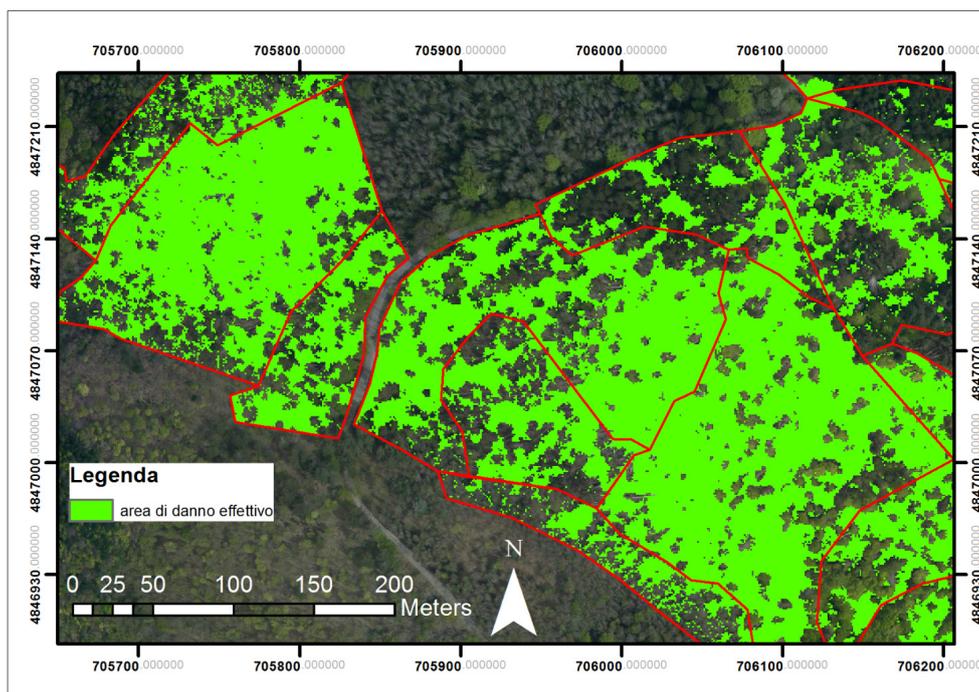


Figura 7 - Esempio di individuazione dell'area di danno effettivo con eliminazione delle isole non danneggiate.

2.6 Validazione

Al fine di valutare l'accuratezza delle stime ottenute tramite la procedura basata sull'uso dei dati ALS sono stati effettuati dei rilievi a terra. Sono stati selezionati 10 soprassuoli nei quali è stato effettuato un campionamento a terra tramite la tecnica del *Line Intersect Sampling* (LIS). Sono stati generati con posizione e orientamento casuale 25 transetti lineari di 20 metri di lunghezza ognuno (Figura 8). A terra per ogni intersezione tra transetti e alberi o tronchi a terra ne è stato misurato il diametro.



Figura 8 - Esempio di individuazione dell'area di danno effettivo con eliminazione delle isole non danneggiate.

Lo stimatore di Horvitz-Thompson (HT) del totale del volume di massa legnosa degli alberi e dei tronchi a terra nello stand di superficie A per l' i -esimo transetto è stimabile pari a:

$$\hat{T}_i = \sum_{j \in S_i} \frac{v_j}{p_j} = \frac{\pi A}{2L} \sum_{j \in S_i} \frac{v_j}{l_j}$$

dove S_i è il campione di alberi e tronchi intercettati dal transetto i , mentre v_j è il volume dell'albero o tronco j di diametro d_j e lunghezza l_j . L è invece pari a 500 m. Quindi, se il volume è misurato con il metodo di Huber, ovvero se:

$$v_j = \pi \left(\frac{d_j}{2} \right)^2 l_j$$

la stima del totale si riduce a:

$$\hat{T}_i = \sum_{j \in S_i} \frac{v_j}{p_j} = \frac{\pi^2 A}{8L} \sum_{j \in S_i} d_j^2$$

Il totale stimato tramite LIS derivante da rilievo a terra è stato confrontato con la stima ottenuta dalla metodologia basata su ALS ottenendo una eccellente concordanza con un R^2 di 0.97, un errore quadratico medio di 27,01 m³/ha pari all'1,08% dei valori misurati a terra.

3. RISULTATI

La superficie coperta dal volo è stata pari a 43.623 ha, 35.400 dei quali sono risultati boscati sulla base della mappa dell'Uso del Suolo della Regione Toscana (<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html>). Le superfici danneggiate dalla tempesta di vento del 4-5 marzo 2015 sono pari a 2.017 ha (il 5,7% della superficie boscata). L'area di danno effettivo, non considerando le piante rimaste in piedi, è pari a 1.127 ha (Tabella 1).

Tabella 1 - Stima dei danni per le superfici volate.

ID Area (Figura 1)	Stima superficie forestale interessata dall'evento (ha)	Stima della superficie effettiva di danno (ha)	Volume a terra (m ³)	Piante a terra (n)	Superficie volata (ha)	Percentuale di danno sulla superficie volata (%)
1	69	57	22074	16541	1162	6
2	1	0	139	119	433	0
3	2	1	608	324	668	0
4	52	32	31978	14963	1576	3
5	2	1	451	157	298	1
6	15	3	2000	1057	96	16
7	30	8	5308	2444	902	3
8	233	71	43447	18362	2001	12
9	37	7	4153	1394	2210	2
10	126	30	28116	16014	891	14
11	20	7	1004	1756	1076	2
12	3	2	1208	445	3080	0
13	25	10	3378	2539	1404	2
14	14	3	1030	679	192	7
15	3	1	169	133	443	1
16	5	1	186	310	165	3
17	2	1	475	312	270	1
18	5	3	499	904	153	3
19	931	678	129911	228431	16063	6
20	28	17	4122	3677	2220	1
21	36	19	2067	3202	2330	2
22	53	23	10075	5976	1389	4
23	10	5	1354	1013	302	3
24	118	47	6914	9104	2128	6
25	111	68	21905	13545	1978	6
26	88	34	9232	3767	193	45
<i>Totale</i>	<i>2017</i>	<i>1127</i>	<i>331802</i>	<i>347168</i>	<i>43623</i>	<i>5</i>

Tabella 2 - Stima dei danni per provincia.

Provincia	Specie	Stima superficie forestale interessata dall'evento (ha)	Stima della superficie effettiva di danno (ha)	Volume a terra (m ³)	Piante a terra (n)
Arezzo	<i>Abies alba</i>	131	45	34070	16898
	<i>Castanea sativa</i>	1	1	24	108
	<i>Fagus sylvatica</i>	16	5	2892	932
	<i>Pinus nigra</i>	123	55	47459	24895
	<i>Pinus pinaster</i>	18	17	1688	3231
	<i>Pinus radiata</i>	3	2	194	834
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	43	13	8763	6211
	<i>Quercus pubescens</i>	0	0	60	34
<i>Totale</i>		335	138	95149	53143
Firenze	<i>Abies alba</i>	224	68	40317	17478
	<i>Cupressus arizonica</i>	2	1	61	297
	<i>Fagus sylvatica</i>	1	0	67	20
	<i>Picea abies</i>	4	1	1085	482
	<i>Pinus nigra</i>	48	16	5309	4170
	<i>Pinus pinaster</i>	2	1	327	219
	<i>Pinus radiata</i>	2	0	48	150
	<i>Pinus sylvestris</i>	9	3	603	862
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	13	5	2933	1305
	<i>Quercus pubescens</i>	4	2	323	327
<i>Totale</i>		308	98	51074	25310
Lucca	<i>Abies alba</i>	17	11	6438	3784
	<i>Castanea sativa</i>	147	96	7907	30989
	<i>Pinus nigra</i>	123	76	41058	21945
	<i>Pinus pinaster</i>	119	79	21362	23000
	<i>Pinus pinea</i>	88	34	9232	3767
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	13	6	3609	1344
	<i>Robinia pseudoacacia</i>	17	10	1236	3145
	<i>Totale</i>		523	312	90843
Massa-Carrara	<i>Castanea sativa</i>	72	28	3839	6156
	<i>Ostrya carpinifolia</i>	4	1	85	298
	<i>Pinus pinaster</i>	100	53	14480	9906
	<i>Quercus cerris</i>	3	1	141	250
<i>Totale</i>		180	83	18545	16610
Pistoia	<i>Castanea sativa</i>	65	52	5284	18123
	<i>Pinus nigra</i>	36	24	8564	8331
	<i>Pinus pinaster</i>	416	312	50277	98734
	<i>Quercus cerris</i>	1	1	75	251
	<i>Robinia pseudoacacia</i>	153	108	11991	38692
<i>Totale</i>		671	497	76191	164131
Totale complessivo		2017	1127	331802	347168

Tabella 3 - Stima dei danni per specie.

Specie	Stima superficie forestale interessata dall'evento (ha)	Stima della superficie effettiva di danno (ha)	Volume a terra (m ³)	Piante a terra (n)
<i>Abies alba</i>	372	124	80825	38160
<i>Castanea sativa</i>	285	177	17054	55376
<i>Cupressus arizonica</i>	2	1	61	297
<i>Fagus sylvatica</i>	17	5	2959	952
<i>Ostrya carpinifolia</i>	4	1	85	298
<i>Picea abies</i>	4	1	1085	482
<i>Pinus nigra</i>	331	171	102390	59341
<i>Pinus pinaster</i>	655	461	88135	135090
<i>Pinus pinea</i>	88	34	9232	3767
<i>Pinus radiata</i>	4	2	242	984
<i>Pinus sylvestris</i>	9	3	603	862
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	69	24	15305	8860
<i>Quercus cerris</i>	4	2	216	501
<i>Quercus pubescens</i>	4	2	384	361
<i>Robinia pseudoacacia</i>	170	118	13227	41837
<i>Totale</i>	<i>2017</i>	<i>1127</i>	<i>331802</i>	<i>347168</i>

Complessivamente i danni stimati ammontano a 347.168 piante morte a terra per un totale di 331.802 m³ di volume di massa legnosa.

L'area maggiormente danneggiata, con una superficie interessata dall'evento pari a 931 ha e con un volume a terra pari a 129.911 m³, è l'area 19 (Figura 1) che copre una zona delle provincie di Lucca e Pistoia, seguita dall'area 8, la Riserva Naturale Statale Biogenetica di Vallombrosa, dove sono stati stimati 43.447 m³ di legname a terra per 233 ha interessati dall'evento (Tabella 1).

La provincia che risulta aver subito più danni in termini di massa legnosa a terra è Arezzo con 95.149 m³ su 335 ha, seguita da Lucca con 90.842 m³ su 523 ha, Pistoia 76.191 m³ su 671 ha, Firenze 51.073 m³ su 308 ha e Massa Carrara 18.545 m³ su 180 ha (Tabella 2).

La specie che hanno subito più danni risultano essere le conifere in particolare il *Pino nero*, il *Pino marittimo* e l'*Abete bianco*. Tra le latifoglie le specie più colpite sono il *Castagno* e la *Robinia* soprattutto nella zona di Lucca, Massa Carrara e Pistoia (Tabella 3).

In Tabella 4 sono riportate le stime del danno sulla base dell'Ente Gestore e si nota come la maggior parte dei boschi danneggiati (1.855 ha) non hanno un ente gestore definito, spesso sono di proprietà privata e non vengono gestiti attivamente. L'Unione dei Comuni Montani del Casentino è l'ente territoriale che ha subito i

danni maggiori a seguito dell'evento del 4-5 marzo 2015 con 123 ha di superficie danneggiata e 24.184 m³ di volume a terra. Questo dato è confermato dalle stime per complesso forestale (Tabella 5), le Foreste Casentinesi risultano il complesso maggiormente danneggiato con 110 ha di superficie interessata e 22.549 m³ di legname atterrato. Per quanto riguarda le aree protette (SIC, ZPS, Riserve Naturali Statali) la zona maggiormente colpita è quella di Vallombrosa (Tabelle 6, 7 e 8).

Tabella 4 - Stima dei danni per ente gestore.

Gestore	Specie	Stima superficie forestale interessata dall'evento (ha)	Stima della superficie effettiva di danno (ha)	Volume a terra (m ³)	Piante a terra (n)
Unione dei comuni montani del Casentino	<i>Abies alba</i>	47	11	10448	5299
	<i>Pinus nigra</i>	41	9	7008	5050
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	36	9	6728	4615
<i>Totale</i>		123	29	24184	14964
Unione di comuni Pratomagno	<i>Pinus nigra</i>	3	2	2786	1140
	<i>Pinus radiata</i>	3	2	194	834
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	3	1	713	462
	<i>Quercus pubescens</i>	0	0	60	34
<i>Totale</i>		9	6	3752	2470
Unione di comuni Valdarno e Val di Sieve	<i>Abies alba</i>	3	1	164	174
	<i>Cupressus arizonica</i>	2	1	61	297
	<i>Pinus nigra</i>	2	0	52	89
	<i>Pinus radiata</i>	2	0	48	150
	<i>Pinus sylvestris</i>	9	3	603	862
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2	0	76	184
<i>Totale</i>		20	7	1004	1756
Unione montana dei comuni del Mugello	<i>Abies alba</i>	5	1	186	310
	<i>Picea abies</i>	0	0	32	23
	<i>Pinus nigra</i>	5	1	225	203
<i>Totale</i>		9	2	443	536
Ente gestore non definito	<i>Abies alba</i>	317	112	70028	32377
	<i>Castanea sativa</i>	285	177	17054	55376
	<i>Fagus sylvatica</i>	17	5	2959	952
	<i>Ostrya carpinifolia</i>	4	1	85	298
	<i>Picea abies</i>	4	1	1052	459
	<i>Pinus nigra</i>	279	158	92318	52859
	<i>Pinus pinaster</i>	655	461	88135	135090
	<i>Pinus pinea</i>	88	34	9232	3767
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	28	13	7789	3599
	<i>Quercus cerris</i>	4	2	216	501
	<i>Quercus pubescens</i>	4	2	323	327
	<i>Robinia pseudoacacia</i>	170	118	13227	41837
	<i>Totale</i>	1855	1083	302418	327442
Totale complessivo		2017	1127	331802	347168

Tabella 5 - Stima dei danni per complessi forestali.

Complesso	Specie	Stima superficie forestale interessata dall'evento (ha)	Stima della superficie effettiva di danno (ha)	Volume a terra (m ³)	Piante a terra (n)
Alpe di Catenaiia	<i>Pinus nigra</i>	1	0	162	170
<i>Totale</i>		1	0	162	170
Foreste Casentinesi	<i>Abies alba</i>	42	10	10019	5097
	<i>Pinus nigra</i>	33	7	6299	4311
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	34	9	6231	4328
<i>Totale</i>		110	26	22549	13736
Giogo Casaglia	<i>Abies alba</i>	5	1	186	310
	<i>Picea abies</i>	0	0	32	23
	<i>Pinus nigra</i>	5	1	225	203
<i>Totale</i>		9	2	443	536
Pratomagno	<i>Abies alba</i>	4	1	429	202
Casentino	<i>Pinus nigra</i>	7	2	547	569
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	1	1	497	287
<i>Totale</i>		12	3	1473	1058
Pratomagno Valdarno	<i>Pinus nigra</i>	3	2	2786	1140
	<i>Pinus radiata</i>	3	2	194	834
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	3	1	713	462
	<i>Quercus pubescens</i>	0	0	60	34
<i>Totale</i>		9	6	3752	2470
Rincine	<i>Abies alba</i>	3	1	164	174
	<i>Cupressus arizonica</i>	2	1	61	297
	<i>Pinus nigra</i>	2	0	52	89
	<i>Pinus radiata</i>	2	0	48	150
	<i>Pinus sylvestris</i>	9	3	603	862
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2	0	76	184
<i>Totale</i>		20	7	1004	1756

Tabella 6 - Stima dei danni per ZPS.

Codice ZPS	Denominazione	Specie	Stima superficie forestale interessata dall'evento (ha)	Stima della superficie effettiva di danno (ha)	Volume a terra (m ³)	Piante a terra (n)
IT5180004	Camaldoli, Scodella, Campigna, Badia Prataglia	<i>Abies alba</i>	35	6	3918	1305
<i>Totale</i>			35	6	3918	1305
IT5180011	Pascoli montani e cespuglieti del Pratomagno	<i>Abies alba</i>	1	0	70	93
		<i>Castanea sativa</i>	1	1	24	108
		<i>Pinus nigra</i>	6	3	1722	1698
		<i>Pinus radiata</i>	3	2	194	834
		<i>Pseudotsuga menziesii</i>	6	3	1492	1266
		<i>Quercus pubescens</i>	0	0	60	34
<i>Totale</i>			16	10	3561	4033
IT5180016	Monte Dogana	<i>Pinus nigra</i>	2	1	608	324
<i>Totale</i>			2	1	608	324

Tabella 7 - Stima dei danni per SIC.

Codice SIC	Denominazione	Specie	Stima superficie forestale interessata dall'evento (ha)	Stima della superficie effettiva di danno (ha)	Volume a terra (m ³)	Piante a terra (n)
IT5140004	Giogo – Colla di Casaglia	<i>Abies alba</i>	5	1	186	310
		<i>Picea abies</i>	1	0	66	47
		<i>Pinus nigra</i>	3	0	101	102
		<i>Totale</i>	9	2	354	459
IT5140008	Monte Morello	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	3	2	1208	445
<i>Totale</i>			3	2	1208	445
IT5140012	Vallombrosa e Bosco di S. Antonio	<i>Abies alba</i>	195	60	35760	14936
		<i>Fagus sylvatica</i>	1	0	67	20
		<i>Picea abies</i>	3	1	1018	435
		<i>Pinus nigra</i>	6	2	897	419
		<i>Pseudotsuga menziesii</i>	6	2	1175	364
		<i>Totale</i>	210	64	38917	16174
IT5180002	Foreste Alto Bacino dell'Arno	<i>Abies alba</i>	57	14	15106	6991
		<i>Pinus nigra</i>	34	7	6455	4444
		<i>Pseudotsuga menziesii</i>	36	9	6791	4668
		<i>Totale</i>	128	30	28351	16103
IT5180007	Monte Calvano	<i>Pinus nigra</i>	7	2	786	714
<i>Totale</i>			7	2	786	714
IT5180011	Pascoli montani e cespuglieti del Pratomagno	<i>Abies alba</i>	1	0	70	93
		<i>Castanea sativa</i>	1	1	24	108
		<i>Pinus nigra</i>	6	3	1722	1698
		<i>Pinus radiata</i>	3	2	194	834
		<i>Pseudotsuga menziesii</i>	6	3	1492	1266
		<i>Quercus pubescens</i>	0	0	60	34
		<i>Totale</i>	16	10	3561	4033
IT5180016	Monte Dogana	<i>Pinus nigra</i>	2	1	608	324
<i>Totale</i>			2	1	608	324
IT5180018	Foreste di Camaldoli e Badia Prataglia	<i>Abies alba</i>	35	6	3918	1305
		<i>Totale</i>	35	6	3918	1305
IT5180101	La Verna - Monte Penna	<i>Fagus sylvatica</i>	16	5	2892	932
<i>Totale</i>			16	5	2892	932

Tabella 8 - Stima dei danni per Riserve naturali.

Denominazione	Specie	Stima superficie forestale interessata dall'evento (ha)	Stima della superficie effettiva di danno (ha)	Volume a terra (m ³)	Piante a terra (n)
Riserva naturale Camaldoli	<i>Abies alba</i>	35	6	3918	1305
<i>Totale</i>		35	6	3918	1305
Riserva naturale Vallombrosa	<i>Abies alba</i>	184	57	33451	13887
	<i>Fagus sylvatica</i>	1	0	67	20
	<i>Picea abies</i>	3	1	1018	435
	<i>Pinus nigra</i>	6	2	897	419
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	6	2	1175	364
	<i>Totale</i>	200	61	36608	15125

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

In questo lavoro viene presentata una nuova metodologia speditiva per la mappatura dei danni causati ai boschi toscani dalla tempesta di vento che tra il 4 e il 5 marzo 2015 ha colpito la regione.

I risultati ottenuti dimostrano che è possibile ottenere una stima del danno attraverso l'utilizzo di dati ALS post-evento integrati con altre fonti di dati tradizionali (ortofoto digitali e informazioni ausiliarie) anche in assenza di dati ALS pre-evento, che in Italia non sono ancora disponibili su vaste superfici. Questo metodo di mappatura e quantificazione del danno può essere replicato facilmente in altri contesti e in altre situazioni a seguito di eventi estremi, quali tempeste di vento o incendi, e consente una rapida quantificazione del danno in termini di superfici interessate, numero di piante abbattute e volume legnoso a terra.

Le stime così ottenute sono essenziali per poter pianificare le operazioni di rimozione del materiale atterrato, la messa in sicurezza delle aree danneggiate e gli interventi necessari per favorire la ricostituzione del potenziale forestale.

Negli ultimi anni i cambiamenti climatici hanno determinato un aumento della frequenza e dell'intensità di eventi estremi che causano ingenti danni alle nostre foreste. L'assenza di una gestione attiva del bosco e la mancanza o il ritardo nell'applicazione degli interventi selvicolturali hanno determinato spesso una riduzione nella stabilità dei popolamenti.

In Toscana i soprassuoli che hanno subito i maggiori danni a seguito della tempesta di vento del marzo 2015 sono gli impianti di conifere, che spesso non sono stati diradati al momento opportuno e manifestano oggi una elevata instabilità. Inoltre, si tratta di popolamenti artificiali in cui specie come l'abete bianco, il pino nero e il pino marittimo sono state utilizzate fuori o al limite del proprio areale di distribuzione e mostrano frequentemente segni di deperimento e attacchi fitoparassitari.

Le stime ottenute attraverso questo studio costituiscono una importante base di dati per la Regione Toscana e per gli enti gestori, utili per supportare le future scelte di gestione forestale, che dovranno necessariamente essere orientate verso l'aumento della capacità di adattamento dei soprassuoli forestali ai cambiamenti climatici.

SUMMARY

Assessment of forest damage following the wind storm of the 5th of March 2015 in Tuscany (Italy)

Wind is a major disturbing agent to European forests and climate change is increasing the occurrence of extreme events in the last years. On March 5th 2015, the Tuscany region was hit by a windstorm that caused extensive damage to forest stands. The aim of this work is to present a simple methodology to map damaged forest area and number and volume of fallen trees. The use of remote sensing data and in particular the potentiality of Airborne Laser Scanning (ALS) data is discussed in this study.

BIBLIOGRAFIA

- Chirici G., Botalico F., Giannetti F., Rossi P., Del Perugia B., Travaglini D., Nocentini S., Kutchartt E., Marchi E., Foderi C., Fioravanti M., Fattorini L., Guariglia A., Ciancio O., Bottai L., McRoberts R.E., Næsset E., Corona P., Gozzini B. (sottomesso) - *Assessing forest windthrow damages using single-date, post-event airborne laser scanning data*. Forest Ecology and Management.
- Gardiner, B., Blennow K., Carnus J.-M., Fleischer P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M., Marzano M., Nicoll B., Orazio C., Peyron J.-L., Reviron M.-P., Schelhaas M.-J., Schuck A., Spielmann M., Usbeck T., 2010 - *Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts*. Final Report to EC DG Environment.
<http://ec.europa.eu/environment/forests/fprotection.htm>.
- Honkavaara E., Litkey P., Nurminen K., 2013 - *Automatic Storm Damage Detection in Forests Using High-Altitude Photogrammetric Imagery*. Remote Sens., 5: 1405-1424.
<http://dx.doi.org/10.3390/rs5031405>
- INFC, 2005 - *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio*. Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali, Ispettorato Generale - Corpo Forestale dello Stato. Consiglio per la Ricerca e Sperimentazione in Agricoltura Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale (CRA-MPF).
- LaMMA, 2015 - *Report meteorologico. 4-5 marzo 2015*. Available at:
http://www.lamma.rete.toscana.it/clima/report/eventi/vento_4-5_marzo_2015.pdf
- Montaghi, A., Corona, P., Dalponte, M., Gianelle, D., Chirici, G., Olsson H., 2013 - *Airborne laser scanning of forest resources: An overview of research in Italy as a commentary case study*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 23: 288-300.
- Regione Toscana, 1998 - *L'inventario forestale*. Boschi e macchie di Toscana. Regione Toscana, Giunta regionale, p. 137-142.
- Seidl R., Schelhaas M.-J., Lexer M.J., 2011 - *Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe*. Glob. Change Biol. 17, 2842e2852. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02452.x>
- Tabacchi G., Di Cosimo L., Gasparini P., Morelli S., 2011 - *Stima del volume e della fitomassa delle principali specie forestali italiane. Equazioni di previsione, tavole del volume e tavole della fitomassa arborea epigea*. Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Trento, 412 p.
- Vastaranta M., Korpela I., Uotila A., Hovi A., Holopainen M., 2011 - *Area-Based Snow Damage Classification of Forest Canopies Using Bi-Temporal Lidar Data*. In: Proceedings of the ISPRS Workshop on Laser Scanning, Calgary, AB, Canada, 29-31 August 2011.