

Prospettive e potenzialità della digitalizzazione del settore forestale in Italia

PIERMARIA CORONA, ENRICO MARCHI, GHERARDO CHIRICI, ELENA MARRA,
ALESSANDRO ALIVERNINI, ROBERTO BARBETTI, SARA BERGANTE, LEONARDO BIANCHINI,
SIMONE CANTAMESSA, RAFFAELE CAVALLI, FRANCESCO CHIANUCCI, PIER MARIO CHIARABAGLIO,
CORRADO COSTA, VALERIO DI STEFANO, CARLOTTA FERRARA, CRISTIANO FODERI,
MASSIMO GENNARO, FRANCESCA GIANNETTI, GIACOMO GOLI, STEFANO GRIGOLATO,
ANTOINE HARFOUCHE, ANDREA LASCHI, BRUNO LASSERRE, FRANCESCO LATTERINI,
MAURO MAESANO, MAURIZIO MARCHI, BARBARA MARIOTTI, FRANCESCO NERI,
ALESSANDRO PANSECCO, DANIELE PENNA, GIANNI PICCHI, RODOLFO PICCHIO,
MANUELA PLUTINO, FEDERICO PRETI, NICOLA PULETTI, MANUELA ROMAGNOLI,
MAURIZIO SABATTI, SANDRO SACCHELLI, FABIO SALBITANO, DAVIDE TRAVAGLINI,
GENNARO VASSALINI, RACHELE VENANZI, MICHELA ZANETTI

Prospettive e potenzialità della digitalizzazione del settore forestale in Italia

PIERMARIA CORONA, ENRICO MARCHI, GHERARDO CHIRICI, ELENA MARRA,
ALESSANDRO ALIVERNINI, ROBERTO BARBETTI, SARA BERGANTE, LEONARDO BIANCHINI,
SIMONE CANTAMESSA, RAFFAELE CAVALLI, FRANCESCO CHIANUCCI, PIER MARIO CHIARABAGLIO,
CORRADO COSTA, VALERIO DI STEFANO, CARLOTTA FERRARA, CRISTIANO FODERI,
MASSIMO GENNARO, FRANCESCA GIANNETTI, GIACOMO GOLI, STEFANO GRIGOLATO,
ANTOINE HARFOUCHE, ANDREA LASCHI, BRUNO LASSERRE, FRANCESCO LATTERINI,
MAURO MAESANO, MAURIZIO MARCHI, BARBARA MARIOTTI, FRANCESCO NERI,
ALESSANDRO PANSECCO, DANIELE PENNA, GIANNI PICCHI, RODOLFO PICCHIO,
MANUELA PLUTINO, FEDERICO PRETI, NICOLA PULETTI, MANUELA ROMAGNOLI,
MAURIZIO SABATTI, SANDRO SACCHELLI, FABIO SALBITANO, DAVIDE TRAVAGLINI,
GENNARO VASSALINI, RACHELE VENANZI, MICHELA ZANETTI

Prospettive e potenzialità della digitalizzazione del settore forestale in Italia

Publicazione realizzata dal Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA) nell'ambito delle attività previste dalla Scheda 22.2 "Foreste" del programma Rete Rurale Nazionale (RRN) 2014-2020.

AUTORI

Piermaria Corona - CREA, Foreste e Legno
Enrico Marchi - Università di Firenze, DAGRI
Gherardo Chirici - Università di Firenze, DAGRI
Elena Marra - Università di Firenze, DAGRI
Alessandro Alivernini - CREA, Foreste e Legno
Roberto Barbetti - CREA, Foreste e Legno
Sara Bergante - CREA, Foreste e Legno
Leonardo Bianchini - Università della Toscana, DAFNE
Simone Cantamessa - CREA, Foreste e Legno
Raffaele Cavalli - Università di Padova, TESAF
Francesco Chianucci - CREA, Foreste e Legno
Pier Mario Chiarabaglio - CREA, Foreste e Legno
Corrado Costa - CREA, Ingegneria e trasformazioni agroalimentari
Valerio Di Stefano - CREA, Foreste e Legno
Carlotta Ferrara - CREA, Foreste e Legno
Cristiano Foderi - Università di Firenze, DAGRI
Massimo Gennaro - CREA, Foreste e Legno
Francesca Giannetti - Università di Firenze, DAGRI
Giacomo Goli - Università di Firenze, DAGRI
Stefano Grigolato - Università di Padova, TESAF
Antoine Harfouche - Università della Toscana, DIBAF
Andrea Laschi - Università di Palermo, SAAF
Bruno Lasserre - Università del Molise, DIBT
Francesco Latterini - CREA, Ingegneria e trasformazioni agroalimentari
Mauro Maesano - Università della Toscana, DIBAF
Maurizio Marchi - Consiglio Nazionale delle Ricerche, IBBR
Barbara Mariotti - Università di Firenze, DAGRI
Francesco Neri - Università di Firenze, DAGRI
Alessandro Pansecco - Geoponica s.r.l.
Daniele Penna - Università di Firenze, DAGRI
Gianni Picchi - Consiglio Nazionale delle Ricerche, IBE
Rodolfo Picchio - Università della Toscana, DAFNE
Manuela Plutino - CREA, Foreste e Legno
Federico Preti - Università di Firenze, DAGRI
Nicola Puletti - CREA, Foreste e Legno
Manuela Romagnoli - Università della Toscana, DIBAF

Maurizio Sabatti - Università della Tuscia, DIBAF
Sandro Sacchelli - Università di Firenze, DAGRI
Fabio Salbitano - Università di Firenze, DAGRI
Davide Travaglini - Università di Firenze, DAGRI
Gennaro Vassalini - CREA
Rachele Venanzi - Università della Tuscia, DAFNE
Michela Zanetti - Università di Padova, TESAF

CON IL CONTRIBUTO DI

Luciano Orteni (CREA, Ingegneria e trasformazioni agroalimentari)
Simona Violino (CREA, Ingegneria e trasformazioni agroalimentari)
Simone Figorilli (CREA, Ingegneria e trasformazioni agroalimentari)

IMMAGINI DI COPERTINA

Francesca Giannetti (sinistra)
Claudia Cocozza (destra in basso)
Mauricio Acuna (destra in alto)

IMPAGINAZIONE E STAMPA

Magonza editore

EDITORE

Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA)

FORMA DI CITAZIONE CONSIGLIATA

Corona et al. 2022. **Prospettive e potenzialità della digitalizzazione del settore forestale in Italia**. Rete Rurale Nazionale 2014-2020, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Roma, ISBN: 9788833852157

ISBN: 9788833852157

Sommario

1. INTRODUZIONE	<i>p. 11</i>
2. DEFINIZIONE E SVILUPPI DELLA <i>PRECISION FORESTRY</i>	<i>p. 13</i>
3. GENERALITÀ	<i>p. 15</i>
3.1. Tecnologie di informazione e comunicazione	<i>p. 15</i>
3.1.1. <i>Hardware</i>	<i>p. 15</i>
3.1.2. Algoritmi e <i>software</i>	<i>p. 16</i>
3.1.3. Rete	<i>p. 16</i>
3.1.4. Sistemi informativi ed informatici	<i>p. 16</i>
3.1.5. Sicurezza	<i>p. 17</i>
3.1.6. Basi di dati	<i>p. 17</i>
3.2. <i>Cyber-Physical System</i>	<i>p. 17</i>
3.3. <i>Internet of Things and Services</i>	<i>p. 18</i>
3.4. <i>Smart Factory</i>	<i>p. 18</i>
3.5. Strumenti di intelligenza artificiale	<i>p. 19</i>
3.6. Sistemi di navigazione satellitare	<i>p. 20</i>
3.7. Tecnologie di telerilevamento remoto e prossimale	<i>p. 20</i>
3.7.1. Sensori passivi	<i>p. 21</i>
3.7.2. Sensori attivi	<i>p. 25</i>
3.7.2.1. <i>Laser Scanning</i>	<i>p. 25</i>
3.7.2.2. <i>Radar</i>	<i>p. 29</i>
4. MONITORAGGIO E INVENTARIAZIONE FORESTALE	<i>p. 33</i>
4.1. Rilievi inventariali a terra	<i>p. 33</i>
4.1.1. Misurazioni dendrometriche	<i>p. 33</i>
4.1.2. <i>Laser scanner</i> terrestre	<i>p. 37</i>
4.1.3. Foto digitali	<i>p. 38</i>
4.2. Stima spazialmente esplicita di variabili forestali	<i>p. 41</i>
4.3. Monitoraggio dei processi fisiologici	<i>p. 43</i>
4.4. Monitoraggio dei processi idrologici e analisi della stabilità dei versanti	<i>p. 44</i>
4.5. Sistemi integrati di monitoraggio <i>real-time</i> ed <i>early warning</i>	<i>p. 48</i>
4.6. Integrazione delle informazioni in sistemi informativi forestali	<i>p. 50</i>
4.7. <i>Citizen Science</i>	<i>p. 51</i>
5. GESTIONE SELVICOLTURALE	<i>p. 55</i>
5.1. <i>App</i> per la martellata forestale	<i>p. 55</i>
5.2. Mappatura di variabili forestali a scala di azienda e a livello di particella forestale	<i>p. 58</i>
5.2.1. Acquisizione delle aree di saggio	<i>p. 59</i>
5.2.2. Dati fotogrammetrici da drone	<i>p. 60</i>
5.2.3. Dati da drone con <i>laser scanner</i>	<i>p. 62</i>
5.2.4. Singolo albero - <i>Individual Tree Detection</i>	<i>p. 63</i>
5.3. Pianificazione e progettazione delle infrastrutture forestali	<i>p. 65</i>
5.3.1. Rilievo della viabilità	<i>p. 65</i>
5.3.2. Accessibilità	<i>p. 67</i>
5.3.3. Pianificazione dei tracciati di esbosco	<i>p. 69</i>
5.3.4. Progettazione della viabilità	<i>p. 71</i>
5.4. Ottimizzazione della pianificazione delle operazioni forestali	<i>p. 73</i>
5.4.1. Piano delle utilizzazioni	<i>p. 73</i>
5.4.2. Pianificazione dei tracciati di esbosco	<i>p. 75</i>

5.5. Quantificazione delle utilità ecosistemiche	p. 77
5.6. <i>Urban Forestry</i>	p. 77
5.7. Sistemi di supporto alle decisioni	p. 79
6. GESTIONE DELLE PIANTAGIONI DA LEGNO	p. 83
6.1. Tecniche di impianto e di coltivazione	p. 83
6.1.1. Impianto	p. 83
6.1.1.1. Identificazione dei tipi di suolo mediante <i>soil proximal sensing</i>	p. 83
6.1.1.2. Tecnologie per il livellamento del terreno	p. 85
6.1.1.3. Tecnologie per lo schema di impianto e l'apertura delle buche	p. 85
6.1.2. Coltivazione	p. 87
6.1.2.1. Irrigazione	p. 87
6.1.2.2. Trattamenti fitosanitari	p. 88
6.1.2.3. Utilizzazione	p. 88
6.2. Monitoraggio	p. 88
6.2.1. Monitoraggio delle produzioni su larga scala	p. 88
6.2.2. Monitoraggio dello stato di salute	p. 89
6.2.2.1. Sistemi di <i>early warning</i> in pioppicoltura	p. 90
6.2.2.2. Individuazione dello stress idrico	p. 93
7. VIVAISTICA FORESTALE	p. 97
7.1. Raccolta, conservazione e selezione del seme e dei materiali per la propagazione vegetativa	p. 97
7.2. Produzione di materiale forestale di moltiplicazione	p. 98
7.2.1. Ricerca e innovazione tecnologica	p. 98
7.2.2. Valutazione e monitoraggio delle condizioni di crescita e degli stati di stress delle piante in vivaio	p. 99
7.3. Tracciabilità del materiale vivaistico	p. 101
7.3.1. Piantine forestali	p. 101
7.3.2. Pioppelle	p. 102
8. UTILIZZAZIONI FORESTALI (<i>PRECISION HARVESTING</i>)	p. 103
8.1. Industria 4.0 (<i>Forestry 4.0</i>)	p. 103
8.2. Applicazioni ICT alle utilizzazioni forestali	p. 104
8.2.1. Sistemi di comunicazione	p. 105
8.2.2. Mezzi forestali equipaggiati con multisensori	p. 107
8.3. Piattaforme e <i>software</i> per la gestione dei dati	p. 108
8.3.1. Ottimizzazione delle rese	p. 110
8.3.2. Ottimizzazione dei tracciati	p. 111
8.4. Pianificazione e programmazione dei cantieri	p. 112
8.4.1. Ettaro-coltura forestale	p. 112
8.4.2. Progettazione esecutiva degli interventi	p. 112
8.5. Assortimentazione e misurazione dei prodotti legnosi	p. 117
8.6. Ergonomia, sicurezza e stato di salute degli operatori	p. 119
8.6.1. Monitoraggio del benessere e dello stato di salute	p. 119
8.6.2. Valutazione del rischio degli operatori	p. 121
8.6.3. Sistemi di localizzazione e condivisione della posizione degli operatori	p. 121
8.7. Monitoraggio e mitigazione degli impatti	p. 124
8.7.1. Monitoraggio degli impatti al suolo	p. 124
8.7.2. Mappe di trafficabilità	p. 127
8.8. Formazione degli operatori forestali	p. 129
8.8.1. Realtà immersiva	p. 129
8.8.2. Sistemi digitali a supporto della formazione al lavoro in condizioni complesse	p. 132
8.9. Cenni sull'automazione	p. 134
9. TRACCIABILITÀ DEI PRODOTTI FORESTALI	p. 137
9.1. Gestione delle informazioni nella filiera legno	p. 137
9.2. Tecnologie per la tracciabilità	p. 138
9.2.1. Sistemi per la marcatura del legno	p. 138

9.2.2. Sistemi di identificazione ottici	p. 139
9.2.3. Sistemi di identificazione elettronici	p. 140
9.2.4. Architetture di <i>infotracing</i> e <i>blockchain</i>	p. 142
9.2.5. Esempi applicativi	p. 144
9.3. Valutazione economica dell'implementazione delle tecnologie di tracciabilità nella filiera legno	p. 146
10. TECNOLOGIE E SISTEMI PER LA VALORIZZAZIONE DEI PRODOTTI LEGNOSI	p. 147
10.1. Determinazione della qualità e quantità del legname all'imposto	p. 147
10.2. Ottimizzazione nella prima trasformazione	p. 150
10.2.1. Filiera dei segati	p. 151
10.2.2. Filiera degli sfogliati	p. 154
11. DIGITALIZZAZIONE E POLITICHE EUROPEE PER IL SETTORE FORESTALE	p. 157
12. INFORMAZIONE E <i>NETWORKING</i> PER LE COMPETENZE DIGITALI NEL SETTORE FORESTALE	p. 159
EXTENDED ABSTRACT - <i>Perspectives and Potential for Forestry Digitalization in Italy</i>	p. 161
Bibliografia	p. 163

ACRONIMI

AdP	Agricoltura di Precisione
ADS	Area di Saggio
AGORS	Active Ground Optical Remote Sensing
AHP	Analytic Hierarchy Process
AI	Intelligenza Artificiale
ALS	Airborne Laser Scanning
AOI	Area of Interest
BEAST	Bayesian Estimator of Abrupt change, Seasonal change, and Trend
BLE	Bluetooth Low Emission
BLOS	Beyond Line of Sight
CAN	Controller Area Network
CCCI	Canopy Chlorophyll Content Index
CCDA	Continuous Change Detection Algorithm
CCDC	Continuous Change Detection and Classification
CHM	Modello Digitale delle Chiome
CPS	Cyber-Physical System
DAP	Disponibilità A Pagare
DBMS	Sistema di Gestione Database
DL	Deep Learning
DN	Digital Number
DSM	Modello Digitale della Superficie
DSM	Digital Soil Mapping
DSS	Sistemi di Supporto alle Decisioni
DTM	Modello Digitale del Terreno
DTW	Depth-To-Water
DVR	Documento per la Valutazione del Rischio
ECS	European Chainsaw Standard
ESA	European Space Agency
ETC	Evapotraspirazione della Coltura
EVI	Enhanced Vegetation Index
EWMACD	Exponentially Weighted Moving Average Change Detection
EWS	Early Warning System
FIS	Forest Information System
FLEX	Fluorescence Explorer
GATT	Bluetooth Generic Attribute Profile
GCP	Ground Control Points
GIS	Geographical Information System
GNDVI	Green Normalized Vegetation Index
GNSS	Sistema Globale di Navigazione Satellitare
GPR	Ground Penetrating Radar
GPS	Global Positioning System
GRVI	Green-Red Vegetation Index
GSM	Global System for Mobile Communications
HDA	Helicase-Dependent Amplification
HMLS	Hand-Held Mobile Laser Scanner
ICT	Tecnologie di Informazione e Comunicazione
ID	Identificativo univoco
ILO	International Labour Organization
IOT	Internet of Things and Services
IRGA	Infrared Gas Analyzers
ISPA	International Society of Precision Agriculture
ITD	Individual Tree Detection
KC	Coefficiente colturale
KTTC GRN	Greenness Component Kauth-Thomas Tasseled Cap
LAMP	Loop-Mediated Isothermal Amplification
LiDAR	Light Detection and Ranging

MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
MCDM	Analisi Multi-Criterio
ML	Machine Learning
MLM	Modelli di Apprendimento Automatico
MSA	Maggior Sostenibilità Ambientale
NBR	Normalized Burned Ratio Index
NBS	Nature Based Solutions
NDRE	Normalized Difference Red Edge
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NFC	Near Field Communication
NIR	Near Infrared
PAC	Politica Agricola Comune
PAF	Piattaforma Amministrativa delle Foreste
PCR	Polymerase Chain Reaction
PF	Precision Forestry
PLS	TLS portatile
PMF	Piattaforma di Monitoraggio delle Foreste
POI	Points of Interest
PRFA	Progetti di Riqualificazione Forestale Ambientale
PRI	Photochemical Reflectance Index
PRIF	Piattaforma di Rilievo e Informazione Forestale
PSG	Piattaforma di Supporto della Governance
PU	Piano delle Utilizzazioni
RDBM	Real Distance Buffer Method
RFID	Identificazione a Radio Frequenze
RGB	Rosso, Verde, Blu
ROIC	Circuiti Integrati di Lettura
RPA	Recombinase Polymerase Amplification
RPII	Relative Path Impact Index
RS	Remote Sensing
RS	Raman Spectroscopy
SAPR	Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto
SAR	Synthetic Aperture Radar
SDF	Sistema Digitale delle Foreste
SINFOR	Sistemi Informativi Forestali
SIF	Sun Induced Fluorescence
SFM	Structure from Motion
SLAM	Simultaneous Location And Mapping
SSAP	Slope Stability Analysis Program
TCP	Transmission Control Protocol
TLS	Terrestrial Laser Scanner
TOF	Time of Flight
TS	Serie Temporali Satellitari
XRF	X-Ray Fluorescence Spectroscopy
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
UE	Unione Europea
UHF	Ultra High Frequency
VI	Vegetation Index
VIS-NIR	Visible Near Infrared Spectroscopy
VLOS	Visual Line of Sight
VRT	Variable Rate Treatment

Introduzione

Le risorse forestali (*sensu lato*, incluse le aree verdi urbane, le piantagioni da legno e gli alberi fuori-foresta) offrono un'ampia gamma di utilità ecosistemiche. Nel quadro dei principi di sostenibilità, volti a valorizzare la multifunzionalità dei sistemi forestali, l'utilizzo delle **tecnologie di informazione e comunicazione (ICT)** può svolgere un ruolo significativo per l'innovazione e l'efficientamento dei processi gestionali e la creazione di nuovi prodotti e servizi a sostegno dei proprietari di boschi e piantagioni da legno, imprenditori, tecnici forestali e cittadini. L'ottimizzazione della gestione forestale può, infatti, determinare importanti positive ricadute sulla qualità delle produzioni legnose, sulla riduzione dei costi di produzione e sulla minimizzazione degli impatti ambientali e sociali. L'impiego delle tecnologie ICT contribuisce a: i) realizzare analisi complesse di dati in modo semplice ed economico; ii) supportare scelte progettuali e gestionali secondo percorsi standardizzati e ripetibili; iii) ottimizzare l'uso delle risorse riducendo gli impatti sull'ambiente; iv) favorire la comunicazione e l'approccio partecipativo sulla base di piattaforme informative condivise e ad alta accessibilità (ad esempio, *Web-Gis* e *App* per terminali mobili).

La disponibilità di metodi e strumenti ICT si traduce nell'applicazione di quella che viene definita "selvicoltura di precisione" (*precision forestry*). Questa monografia presenta una rassegna commentata dell'offerta metodologica e tecnologica disponibile in merito, con riferimento all'inventariazione avanzata delle risorse forestali, ai sistemi di gestione selvicolturale, ai sistemi di impianto e coltivazione delle piantagioni da legno, alla vivaistica forestale, ai sistemi di utilizzazione forestale, alla tracciabilità dei prodotti forestali e alla valorizzazione tecnologica degli assortimenti legnosi. La trattazione dà per acquisite le conoscenze di base relativamente ai temi sviluppati in ciascun capitolo e analizza in modo dettagliato i più recenti **avanzamenti** della **ICT** che possono rendere più efficienti la **gestione delle risorse forestali e delle piantagioni da legno** e la **filiera foresta-legno** in Italia: in particolare, sono evidenziati i **punti di forza e di debolezza** che influiscono sulle possibilità di effettiva implementazione di queste tecnologie con riferimento alle condizioni del nostro Paese e le auspicabili **soluzioni migliorative** nel quadro delle sfide per lo **sviluppo** del settore.

Definizione e sviluppi della *precision forestry*

Il termine *precision forestry (PF)* è usato per definire un concetto sviluppato a partire dai primi anni 2000 e che ha poi avuto una rapida diffusione nella comunità tecnico-scientifica forestale (Taylor et al. 2002). Il termine è inizialmente derivato da quello di agricoltura di precisione (AdP) (in inglese *Precision Farming*), introdotto per la prima volta nel 1990 in un workshop nel Montana (USA – Katiyar et al. 2021), ma da questo si è poi gradualmente differenziato. Qui di seguito si introduce brevemente il significato del primo e l'evoluzione semantica che porta all'attuale accezione del secondo.

L'AdP è una strategia di gestione dell'agricoltura che prende in considerazione la variabilità inter e intra-campo delle colture sulla base di un elevato numero di informazioni multiscalarì e multiplatforma. I dati raccolti vengono combinati per orientare decisioni finalizzate al miglioramento dell'efficienza nell'uso delle risorse, ottimizzando la produttività agricola sia in termini di rendita quali-quantitativa, sia in termini di sostenibilità ambientale (*International Society of Precision Agriculture* - ISPA 2018). Questi obiettivi sono conseguiti grazie alle più avanzate applicazioni dell'ICT, mediante le quali si possono ottenere dettagliate informazioni sulle condizioni delle colture e del suolo e sulle loro variazioni nello spazio e nel tempo, e anche grazie all'implementazione di sistemi di supporto alle decisioni (DSS - vedi § 5.7), che permettono, per esempio, l'ottimale distribuzione dell'irrigazione, dei fertilizzanti e degli anticrittogamici a livello aziendale e di singola coltura.

Il termine *PF* entra a fare parte del vocabolario tecnico a seguito del “*First Precision Forestry Symposium*” organizzato nel 2001 dall'Università di Washington (USA) (Corona et al. 2017), che già nel 1999 aveva fondato la *Precision Forestry Cooperative*. Alla base del concetto di *PF* vi era l'impiego di strumenti analitici e di rilevamento ad alta tecnologia a supporto di un processo decisionale sito-specifico volto massimizzare la sostenibilità economica e ambientale della filiera foresta-legno (Bare e Dean 2001). Questa prima definizione non fa riferimento esplicito al concetto di conservazione/miglioramento dell'ambiente (Corona et al. 2017), che viene inserito nelle successive definizioni e diventa uno dei pilastri della moderna accezione di *PF*. Taylor et al. (2002) definiscono la *PF* come la “pianificazione e realizzazione di attività forestali sito-specifiche e di azioni volte al miglioramento della qualità della produzione legnosa riducendo le emissioni e incrementando i profitti, preservando la qualità dell'ambiente”. Anche se ancora non esiste una definizione di *PF* univocamente accettata (Tabella 2.1), si concorda sul fatto che si tratti dell'**uso delle moderne tecnologie ICT per la gestione sostenibile in tutte le attività forestali** (Heinimann 2007) (vedi § 3.1). La parola “*precision*” si riferisce quindi prioritariamente all'uso di computer, tecnologie di rilevamento e altri dispositivi ICT per coordinare e controllare i processi su scala spaziale e per gestire la variabilità temporale (Heinimann 2007, IUFRO 2015). Il termine “*forestry*”, tradotto in italiano come “selvicoltura”, è inteso in un senso ampio includendo l'insieme di attività di monitoraggio, pianificazione, gestione e utilizzazione delle risorse forestali (Corona et al. 2017).

Il concetto di *PF* si riferisce all'utilizzo di metodi e tecnologie per ottenere informazioni di dettaglio sui sistemi forestali allo scopo di migliorare i processi decisionali e garantire il raggiungimento degli obiettivi di gestione

forestale sostenibile. In una visione moderna, il concetto di *PF* è esteso anche alla classificazione, collaudo e prime lavorazioni del legno e alla commercializzazione e certificazione, sia di prodotti forestali, sia di utilità ecosistemiche (Dyck 2003, Heinimann 2007, Sarre 2001, Taylor et al. 2011).

<i>Definizione</i>	<i>Riferimento bibliografico</i>
Using high technology sensing and analytical tools to support site-specific economic, environmental, and sustainable decision making for the forestry sector.	IUFRO 2014
La disciplina che utilizza i dispositivi informatici per migliorare la gestione forestale, tramite la più efficiente misurazione e rilevazione dei dati al fine di ottenere un sistema di supporto decisionale.	Lubello e Cavalli 2006
Looking at the given (long) list of different tools, which may appear under the term of Precision Forestry, the integrative power of this discipline becomes evident. Thus, this new term is more than just the enumeration of some tools. It holds the promise that in this integrated approach the latest technology becomes available for forestry, with a strong focus on the best and tailor-made solution for forest specific challenges.	Ziesak 2006
Planning and conducting site-specific forest management activities and operations to improve wood product quality and utilization, reduce waste, and increase profits, and maintain the quality of the environment. Further we propose that the general field of precision forestry be separated into two main categories: i) using geospatial-information to assist forest management and planning, and ii) site-specific silvicultural operations.	Taylor et al. 2002
Precision forestry deploys high-resolution data to support site-specific tactical and operational decision-making. This allows for highly repeatable measurements, actions, and processes to grow and harvest trees, as well as to protect and enhance riparian zones, wildlife habitat, esthetics, and other environmental resources. Precision Forestry provides valuable information linkages between resource managers, the environmental community, and processors. It links the practice of sustainable forestry with conversion facilities and markets to produce the best economic and environmental returns.	Bare e Dean 2001

Tabella 2.1. Definizioni di *Precision Forestry* (fonte: IUFRO 2015, modificato)

Generalità

3.1. TECNOLOGIE DI INFORMAZIONE E COMUNICAZIONE

Le ICT sono l'insieme dei metodi, strumenti e tecniche che realizzano i sistemi di trasmissione, ricezione ed elaborazione delle informazioni in forma digitale (Fig. 3.1).

Secondo la definizione della World Bank (World Bank 2017), una tecnologia ICT è rappresentata da qualsiasi tipo di dispositivo o applicazione che permetta il trasferimento o la collezione di dati attraverso l'interazione o la trasmissione. La sempre maggiore disponibilità di questi dispositivi e applicazioni è stata favorita dallo sviluppo tecnologico, coniugato alla riduzione dei prezzi e all'aumento dell'accessibilità di alcuni strumenti, come ad esempio gli smartphone e i dati satellitari, che hanno reso tali tecnologie ubiquitarie e trasferibili ai vari campi applicativi, a supporto degli utenti, compresi quelli del comparto agro-forestale.

Gli elementi base per il funzionamento di un dispositivo sono l'*hardware*, il *software* e gli algoritmi di funzionamento.

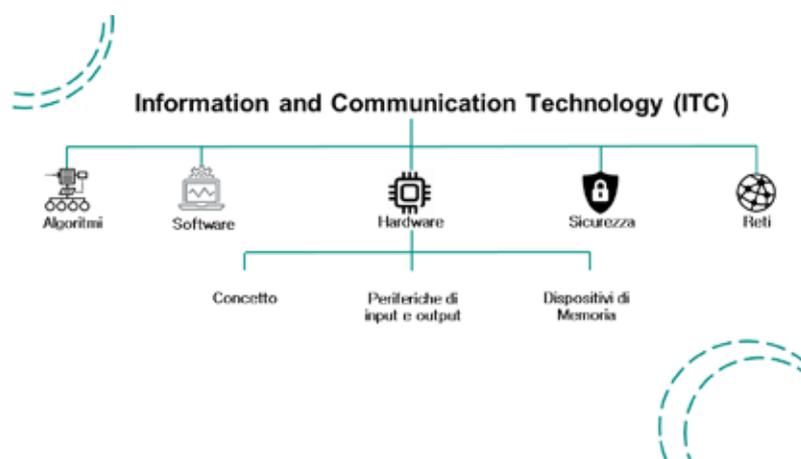


Figura 3.1. Concetti base dell'ICT (immagine: Francesca Giannetti)

3.1.1. Hardware

L'*hardware* costituisce la parte fisica di un elaboratore e/o uno strumento informatico, cioè l'insieme dei suoi componenti elettronici, elettro-meccanici e meccanici. L'*hardware* di per sé non è in grado di svolgere alcun calcolo/elaborazione: per essere operativo ha bisogno di una serie di *software* (vedi § 3.1.3) che eseguono sull'*hardware* una serie di processi a partire da input forniti dall'utente. Il concetto è inteso in modo ampio e viene utilizzato per indicare tutti i componenti fisici di una tecnologia.

3.1.2. Algoritmi e software

Un algoritmo è un procedimento che risolve un determinato problema attraverso un numero finito di passi elementari, concetto fondamentale dell'informatica, perché è alla base della nozione teorica di calcolabilità. Un problema è calcolabile (risolvibile) quando è risolvibile mediante un algoritmo. L'algoritmo è un procedimento cardine anche della fase di sviluppo e programmazione di un *software* (vedi § 3.1.3). Dato un problema da risolvere, la programmazione costituisce la traduzione o codifica di un algoritmo per tale problema, scritto in un certo linguaggio, che possa quindi essere eseguito da un calcolatore.

Il *software* è l'insieme dei programmi appartenenti a una specifica piattaforma o sistema che consente di elaborare informazioni e produrre dati. I *software* sono una sequenza di istruzioni che svolgono un determinato compito.

I *software* possono essere classificati in base alla loro funzione, al tipo di licenza o in base al grado di utilizzabilità da parte dell'utente; se ne distinguono quattro tipi:

- *firmware*, permette all'*hardware* di un dispositivo di dialogare con il *software* di quel dispositivo;
- *software di base o sistema*, rappresenta il *software* che permette di usare l'*hardware* presente sul dispositivo (sistema operativo);
- *driver*, permette ad un determinato sistema operativo di dialogare con un determinato dispositivo hardware;
- *software applicativo*, consente di svolgere una particolare funzione.

3.1.3. Rete

Per rete si intende un qualsivoglia numero di sistemi indipendenti collegati tra loro in maniera tale da permettere uno scambio di dati. I sistemi collegati tra loro devono presentare, oltre a una connessione fisica *wire* o *wireless*, anche una connessione logica. Quest'ultima viene prodotta attraverso protocolli di rete specifici come quello *TCP (Transmission Control Protocol)*. La connessione tra due computer è già una rete.

Le reti vengono configurate con uno scopo preciso, che può essere la trasmissione di dati da un sistema all'altro o rendere disponibili nella rete risorse comuni quali *server*, database o risorse *hardware*.

3.1.4. Sistemi informativi ed informatici

Un sistema informativo è un insieme di risorse, umane e materiali, che ha l'obiettivo di produrre e scambiare informazioni necessarie al funzionamento e alla gestione di una data azienda, organizzazione, sistema. All'interno di sistemi e organizzazioni che lavorano nel settore della *PF* è auspicabile prevedere la realizzazione di sistemi informativi in forma esplicita, composti dai seguenti elementi:

- un insieme di strumenti in grado di acquisire dati;
- una base di dati da cui produrre informazioni;
- un insieme di procedure automatiche o semiautomatiche che elabori le informazioni;
- un insieme di persone che gestiscono le procedure;
- un insieme di regole organizzative e gestionali.

Pertanto, il sistema informativo può essere definito come l'insieme di persone, risorse e macchine che trattano dati allo scopo di produrre informazioni a supporto di operazioni e decisioni.

Tra i sistemi informativi più utilizzati nel campo della *PF* possiamo rico-

noscere due grandi gruppi:

- sistema informativo operativo, che riguarda l'insieme delle operazioni che fluiscono all'interno tra processi e/o tra processi interni ed ambiente operativo esterno;
- sistema informativo decisionale, che riguarda l'insieme di informazioni necessarie a guidare i singoli processi operativi nel loro divenire.

Un sistema informatico è la parte automatizzata di un particolare sistema informativo, in cui le informazioni vengono raccolte e trattate in maniera digitale con l'ausilio di strumenti informatici. Pertanto, il sistema informatico è un sottoinsieme del sistema informativo. Con l'introduzione e l'avanzamento delle tecnologie, visto il crescente numero di mezzi informatici sempre più economici e potenti, anche nel campo della *PF* si tende a far coincidere sistema informativo e sistema informatico, diminuendo drasticamente le aree dove le informazioni vengono gestite senza l'ausilio di tecnologie informatiche.

3.1.5. Sicurezza

Con l'aumento dei servizi digitali a supporto della *PF*, difendere e proteggere il patrimonio delle informazioni raccolte rappresenta un elemento chiave per una gestione ottimale dei servizi stessi, al fine di contrastarne possibili cause di compromissione. In termini di sicurezza informatica, il compito di un sistema informativo è sia salvaguardare i dati trasmessi sulla rete sia custodire adeguatamente quelli archiviati.

3.1.6. Basi di dati

Le banche dati rappresentano un elemento imprescindibile all'interno dei sistemi informativi: permettono di memorizzare, modificare, elaborare e interconnettere le informazioni necessarie al corretto funzionamento di *software* (vedi § 3.1.3) e *App*.

Ciò è reso possibile da tecnologie che permettono di gestire dati destrutturati e processare ampi volumi di dati in tempo reale ma anche dalla diffusione di algoritmi e metodologie di analisi innovative, in grado di estrapolare autonomamente le informazioni nascoste nei dati. Si distinguono quattro classi di *analytics* utilizzate nell'analisi dei dati:

- *descriptive analytics*, strumenti orientati a descrivere la situazione attuale e passata dei processi o aree funzionali;
- *predictive analytics*, strumenti che effettuano l'analisi dei dati per rispondere a domande relative a cosa potrebbe accadere nel futuro;
- *prescriptive analytics*, strumenti capaci di proporre al *decision-maker* soluzioni strategiche sulla base delle analisi svolte;
- *automated analytics*, strumenti capaci di implementare autonomamente l'azione proposta in base al risultato delle analisi dati svolte.

3.2. CYBER-PHYSICAL SYSTEM

Questi sistemi sono dispositivi in grado di interagire in maniera continua con l'ambiente fisico in cui si trovano ad operare. Per essere classificato come *Cyber-Physical System (CPS)* un sistema deve essere composto dalle seguenti caratteristiche: capacità computazionale, comunicazione, capacità di controllo.

I più comuni sistemi *CPS* sono gli smartphone e i tablet o i più complessi sistemi di controllo elettronico (*Electronic Control Unit*) dei veicoli e di mezzi meccanici, vari sensori *Internet of Things and Services (IoT)* (vedi §

3.3) e qualunque scheda di controllo che abbia un proprio *hardware* (vedi § 3.1.1) e un *firmware* (vedi § 3.1.3). Questi sistemi sono la base per la realizzazione di sistemi domotici, robotici, di telecomunicazioni, di *smart factory* (vedi § 3.4).

3.3. INTERNET OF THINGS AND SERVICES

Con “internet delle cose” (*IoT*) viene indicato un insieme di tecnologie che permettono di collegare dispositivi, sensori e macchinari tra di loro, attraverso la rete internet. Lo scopo è di monitorare, trasferire e utilizzare le informazioni interconnesse e generare servizi utili.

L’*IoT* trova sempre più sviluppo anche nel settore della *PF* con strumenti che vengono sviluppati per acquisire e trasferire informazioni in tempo reale o quasi-reale. Peraltro, l’implementazione di queste tecnologie in campo forestale è talor limitata dalla scarsa copertura della rete nelle aree rurali e di montagna e dalla necessità di sviluppare dispositivi resistenti a condizioni climatiche estreme. I dispositivi *IoT* in ambito forestale sono utilizzati soprattutto per l’acquisizione in continuo di dati in modo preciso e mirato (cadenza temporale prestabilita) per specifici campi applicativi (a esempio: centraline meteo, dendrometri e *tree talker* - Fig. 3.2, vedi § 4.3).



Figura 3.2. Esempio di strumenti che utilizzano l’approccio dell’*Internet of Things and Services (IoT)* in ambito forestale: dendrometro (sinistra - foto: Claudia Coccozza) e *tree talker* (centro e destra - foto: Ilaria Zorzi)

Secondo la classificazione dei dispositivi *IoT* si possono riconoscere quattro tipologie di dispositivi, a secondo della loro finalità prioritaria:

1. rilevare, comunicare e trasferire dati;
2. effettuare un primo livello di elaborazione (selezione) dei dati a livello locale per trasferire solo i dati che corrispondono a determinati requisiti;
3. raccogliere dati, eseguire un primo livello di selezione ed effettuare azioni in funzione delle istruzioni ricevute;
4. rilevare dati, selezionarli, trasmettere quelli necessari ai progetti nel quale sono coinvolti, effettuare azioni sulla base delle indicazioni ricevute ed effettuare azioni in funzione di una capacità elaborativa locale.

3.4. SMART FACTORY

La fabbrica intelligente, o ‘*smart factory*’, riguarda l’utilizzo di varie tecnologie digitali al fine di coordinare persone, processi, e lavorazioni analizzando anche gli aspetti ambientali circostanti. La fabbrica intelligente è un concetto dinamico atto ad aumentare la capacità di produzione, anche in relazione alle caratteristiche di un sito e di un prodotto.

Le fabbriche intelligenti possono essere messe in relazione e sincronizzate anche con le funzioni della catena di approvvigionamento, nel caso forestale dei prodotti legnosi o non legnosi, consentendo una maggiore efficienza dei processi di produzione e di tutti gli attori coinvolti nella lavorazione. Il concetto di *smart factory* è importante in *PF* per comprendere la transizione verso una “*digital supply chain*”.

Le fabbriche intelligenti si avvantaggiano dall'applicazione delle tecnologie digitali in grado di sviluppare processi efficienti e flessibili attraverso un sistema interconnesso di sincronizzazione della domanda di un prodotto con la sua disponibilità, in modo tale da meglio soddisfare le richieste da parte degli utenti finali.

3.5. STRUMENTI DI INTELLIGENZA

ARTIFICIALE

L'intelligenza artificiale (AI) può essere definita come l'area di studio che, nel campo dell'informatica, si occupa dello sviluppo di elaboratori in grado di impegnarsi in processi di pensiero, apprendimento e autocorrezione (Kok et al. 2009) o anche qualsiasi tecnica che consenta ai computer di imitare l'intelligenza umana, utilizzando la logica, le regole logiche, gli alberi decisionali (*decision tree*) e le tecniche di *machine learning* (incluso il *deep learning* - *DL*). Gli approcci basati sull'AI rappresentano ad oggi un buon compromesso tra la capacità di minimizzare l'errore di fronte a eventi imprevedibili e quella di rispondere con la dovuta efficienza agli eventi prevedibili. Proprio come per l'intelligenza umana, la chiave di volta nello sviluppo delle tecniche di AI sta nella corretta impostazione del processo di apprendimento (*learning*).

Il *machine learning* (*ML*) è un termine coniato da Samuel nel 1959 (Samuel 1956) per indicare il campo di studi che conferisce ai computer la capacità di imparare senza essere programmati in modo esplicito. Esso può essere definito come un sottoinsieme delle tecniche di AI che include tecniche statistiche che consentono di sviluppare algoritmi di apprendimento basati sull'esperienza (*learning*). Per raggiungere questo risultato è necessario che i dati per l'apprendimento siano strutturati, ovvero organizzati in strutture definite, adeguate ad essere “lette” dagli algoritmi. Secondo Mitchell (1997), un programma per computer apprende dall'esperienza (E) rispetto ad alcune classi di attività (T) e alla misura delle prestazioni (P) se la sua prestazione in attività in T, come misurata da P, migliora con l'esperienza E.

L'AI permette ai sistemi di capire il proprio ambiente, mettendosi in relazione con esso e risolvendo problemi, verso un obiettivo predefinito. In questi sistemi i dati grezzi raccolti tramite sensori (per esempio una videocamera) devono essere pre-processati per essere quindi interpretati dai sistemi di AI, che adatteranno il proprio comportamento analizzando gli effetti delle azioni precedenti e lavorando in autonomia. L'AI è centrale per la trasformazione digitale della società ed è diventata una delle priorità dell'Unione Europea (UE - EUROPEAN COMMISSION 2021).

Tipi di AI sono i *software* (vedi § 3.1.3) - assistenti virtuali, motori di ricerca, sistemi di riconoscimento vocali e di caratteristiche (*features*) - e l'intelligenza incorporata - robot, veicoli autonomi, droni.

Il *DL* può essere definito come parte del *ML* che è in grado non solo di imparare una regola ma anche di imparare le caratteristiche salienti del problema stesso. Questo tipo di approccio viene usato, ad esempio, per classificare immagini o suoni e consiste nello stratificare il livello di complessità dell'algoritmo di riconoscimento in maniera tale che esso impari caratteristiche di complessità sempre crescente. Gli algoritmi di *DL* hanno un nu-

mero molto grande di parametri: per questa ragione vengono allenati su dataset composti da milioni di elementi; una volta allenati possono essere adattati ad applicazioni più restrittive semplicemente cambiando i dettagli nel *layer* più profondo e riallenandoli su un dataset più ristretto e specifico; questo procedimento viene detto *transfer learning* e risulta efficiente e di facile utilizzo perché sfrutta tutte le informazioni già apprese dal sistema.

3.6. SISTEMI DI NAVIGAZIONE SATELLITARE

I sistemi di navigazione satellitare utilizzano una rete di satelliti per fornire un posizionamento geo-spaziale autonomo, attraverso l'uso di un ricevitore, sulla superficie terrestre. Gli apparati riceventi determinano la propria posizione grazie all'uso di segnali a radiofrequenza trasmessi da satelliti dedicati. Esistono vari sistemi di navigazione satellitare a scala globale (*Global Navigation Satellite System* - GNSS) sviluppati da programmi nazionali o sovranazionali, come il *Global Positioning System* (GPS-USA), il *GLObal Navigation Satellite System* (GLONASS-Russo), il BEIDOU Cinese e il più recente GALILEO (ESA-EU).

3.7. TECNOLOGIE DI TELERILEVAMENTO REMOTO E PROSSIMALE

Il telerilevamento permette di ottenere informazioni, qualitative e quantitative, sull'ambiente e su oggetti posti a distanza da un sensore mediante misure di radiazione elettromagnetica (emessa, riflessa o trasmessa) interagente con le superfici fisiche di interesse. Il telerilevamento si distingue in due branche: il telerilevamento remoto (*remote sensing* - RS), che consente il rilevamento dei *target* di interesse da strumenti, tecnologie e sensori che sono posizionati lontano (come i sistemi satellitari o aerei), e il telerilevamento prossimale (*proximal sensing*), che consente di raccogliere informazioni con strumenti, tecnologie e sensori posti vicino all'oggetto e che in genere possono acquisire le informazioni con grande dettaglio, in maniera non distruttiva. I dati da *remote* e *proximal sensing* acquisiti con vari tipi di piattaforme (Fig. 3.3) possono essere integrati tra di loro e con altre fonti di dati georeferenziate.

Il telerilevamento in generale (sia *remote* che *proximal*) può essere diviso in due grandi gruppi (Fig. 3.4):

- telerilevamento passivo - utilizza sensori che sono in grado di misurare la radiazione elettromagnetica proveniente dalle superfici investigate a seguito dell'irraggiamento solare;
- telerilevamento attivo - utilizza sensori che emettono energia elettromagnetica e misurano la quantità di energia riflessa a partire da questa fonte.

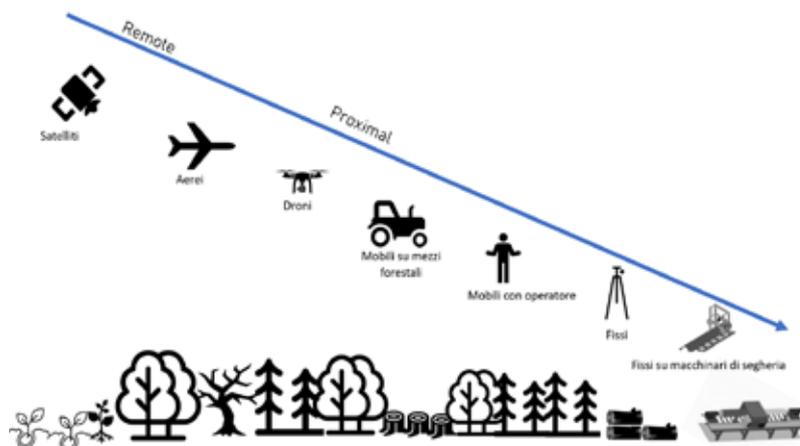


Figura 3.3. Piattaforme *remote* e *proximal sensing* (immagine: Francesca Giannetti)

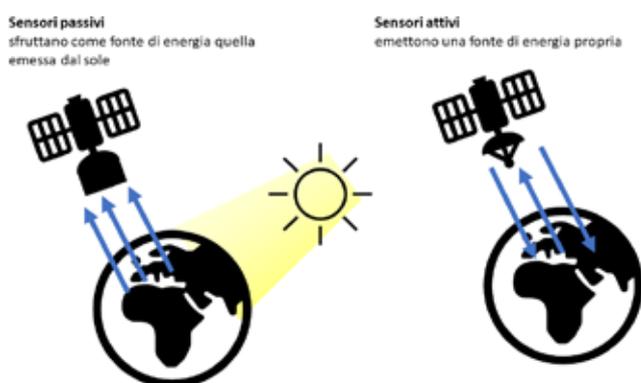


Figura 3.4. Rappresentazione di sensori passivi e attivi (immagine: Francesca Giannetti)

3.7.1. Sensori passivi

I sensori di telerilevamento di tipo passivo più utilizzati in campo forestale sono in grado di misurare la radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie terrestre a seguito dell'irraggiamento solare in determinate lunghezze d'onda (Fig. 3.5).

Questi sensori comunemente dotati di detector e/o camere possono essere equipaggiati:

- a bordo di satelliti - misurano la radiazione elettromagnetica a intervalli specifici di lunghezze d'onda, chiamate generalmente bande;
- a bordo di aerei - generalmente sono rappresentati da camere multispettrali in grado di acquisire immagini nelle lunghezze d'onda del Rosso (*R*), Verde (*G*), Blu (*B*), vicino infrarosso (*NIR*), eventualmente in altre porzioni dell'infrarosso, o iperspettrali;
- a bordo di droni - generalmente si tratta di camere multispettrali o *RGB*; nel caso dei droni si possono avere camere calibrate o camere ottiche modificate con filtri che consentono l'acquisizione anche nell'infrarosso vicino (*NIR*);
- a terra fisse - generalmente *RGB* in grado di acquisire informazioni in continuo;
- a terra in movimento - mosse da un operatore o da una piattaforma mobile in grado di acquisire informazioni in continuo *RGB* o *RGB-NIR*.

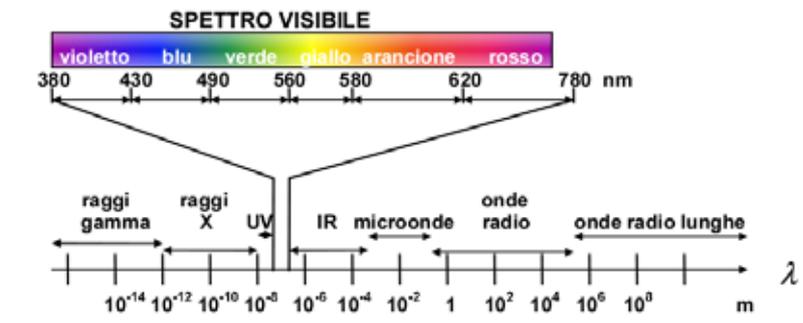


Figura 3.5. Spettro elettromagnetico (immagine: Claudio Oleari e Andrea Peri https://it.m.wikiversity.org/wiki/File:Spettro_elettromagnetico.png)

I sistemi passivi restituiscono un'immagine digitale, che consiste in una matrice di celle (*pixel*) contenenti un valore discreto (*Digital Number - DN*) che rappresenta una misura relativa dell'intensità della radiazione registrata, il cui valore è funzione della risoluzione radiometrica del sensore, e può essere convertito in una misura assoluta di riflettanza. Le immagini hanno caratteristiche diverse (risoluzioni) a seconda del sensore, del cono visivo del sensore e della distanza a cui questo acquisisce:

- risoluzione spaziale o geometrica, solitamente espressa dalla dimensione del *pixel* (m o cm);
- risoluzione spettrale, che è la larghezza dell'intervallo spettrale a cui è acquisita l'informazione di una determinata banda ed è connessa anche numero di bande spettrali (maggiore la risoluzione spettrale e maggiore il numero di bande necessarie a coprire un determinato intervallo spettrale); in sensori multispettrali (4-20 bande) e iperspettrali (20-200 bande) ogni banda relativa a una determinata lunghezza dello spettro elettromagnetico corrisponde ad una diversa immagine;
- risoluzione radiometrica, solitamente misurata in bit (cifre binarie), cioè la gamma di valori di luminosità disponibili, che nell'immagine corrisponde al valore massimo del *DN*; per esempio, un'immagine con risoluzione di 8 bit dispone a $2^8=256$ valori discreti di *DN*, rappresentati usualmente in scala di grigi tra 0 (nero) e 255 (bianco) (Richards e Jia 2006).

Per i sensori satellitari o sensori che acquisiscono informazioni a terra in modo continuo è determinata anche la risoluzione temporale, cioè il tempo che intercorre per acquisire un nuovo dato sulla stessa porzione della superficie terrestre.

Le immagini multispettrali (Tabella 3.1, Fig. 3.6) che hanno bande nella lunghezza dell'infrarosso vicino e lontano possono essere utilizzate per calcolare diversi indici di vegetazione come il *Normalized Vegetation Index (NDVI)*, il *Normalized Burned Ratio Index (NBR)*, il *Green Normalized Vegetation Index (GNDVI)*, utili ad analizzare lo stato di salute della vegetazione e l'attività fotosintetica (Tabella 3.2).

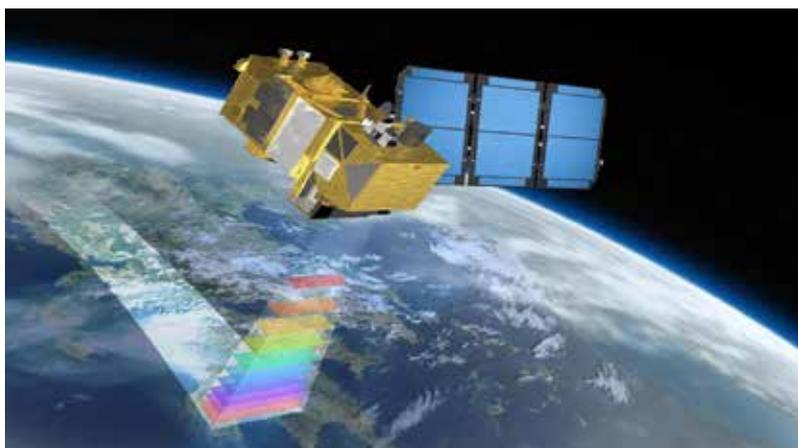


Figura 3.6. Sensori satellitari di tipo multispettrale acquisiscono più bande, comprese quelle nella lunghezza dell'infrarosso vicino: un esempio è il Sentinel-2 (fonte: ESA)

<i>Piattaforma</i>	<i>Esempi</i>	<i>Risoluzione geometrica</i>	<i>Risoluzione temporale</i>	<i>Risoluzione spettrale</i>
satellite	MODIS	(250-1000 m)	1 giorno	36 bande
	Sentinel-2 (ESA) dati <i>open source</i>	(10-60 m)	5 giorni (2 satelliti gemelli)	12 bande
	Landsat (NASA) dati <i>open source</i>	(30 m)	15 giorni	11 bande
	microsatelliti (non <i>open source</i>)	(<3 m)	1 giorno	da 3 a 4 bande
	photogrammetry Satellite	(<3 m)	su richiesta	da 3 a 4 bande
	PRISMA (Iperspettrale)			250 bande (1 pancromatico)
Aereo (acquisizione nazionale)	RGB	(20 cm)	3 anni / quando necessario	3 bande
	NIR-RE-R-G-B	(20 cm)	3 anni / quando necessario	5 bande (4)
Droni	RGB	(<10 cm)	quando necessario	3 bande
	NIR-RE-R-G-B	(<10 cm)	quando necessario	5 bande (3/4)
Fisse	RGB		oraria	3 bande
	Multispettrali		oraria	5 bande (3/4)
Operatore	RGB	(<10 cm)	quando necessario	3 bande
	NIR-RE-R-G-B	(<10 cm)	quando necessario	5 bande (3/4)

Tabella 3.1. Piattaforme e dati telerilevati passivi più utilizzati per applicazioni di *Precision Forestry*

Indice di vegetazione	Formula	Significato operativo
Normalized Vegetation Index	$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)}$	Misura la presenza di attività fotosintetica, normalizzando la dispersione della luce da parte delle foglie verdi nello spettro del vicino infrarosso (NIR) e l'assorbimento della clorofilla nello spettro del rosso (RED). I valori dell'indice sono compresi tra -1 e +1: valori maggiori di 0.2 indicano la presenza di vegetazione.
Normalized Burned Ratio Index	$NBR = \frac{(NIR-SWIR)}{(NIR+SWIR)}$	Individua e caratterizza la severità di un incendio poiché ottenuto dal rapporto tra le riflettanze della vegetazione nel vicino infrarosso e nell'infrarosso ad onde corte (SWIR). Infatti, a seguito di un incendio, la riflettanza nel NIR diminuisce con la perdita del materiale fotosintetizzante, mentre aumenta la riflettanza nell'infrarosso ad onde corte. Il valore NBR varia da -1 a +1 con valori decrescenti al crescere della severità dell'incendio.
Green Normalized Vegetation Index	$GNDVI = \frac{(NIR-G)}{(NIR+G)}$	Indicatore utile per determinare la presenza di acqua, umidità e l'assorbimento di azoto ed è molto sensibile alla variazione del contenuto di clorofilla (G rappresenta la banda del verde). Il valore GNDVI varia da -1 a +1, con valori positivi crescenti che indicano l'aumentare della copertura vegetale.

Tabella 3.2. Esempi di indici vegetazionali, relative formulazioni e descrizione

Le immagini acquisite con tecniche stereoscopiche (Fig. 3.7) da piattaforme satellitari, aeree o da droni possono essere elaborate attraverso tecniche di fotogrammetria (*Structure from Motion Photogrammetry - SfM*) per ricavare immagini georiferite ed ortorettificate (ortomosaici) e dati tridimensionali come nuvole di punti tridimensionali. Le immagini stereoscopiche sono costituite da almeno due immagini del medesimo soggetto riprese dalla stessa distanza ma spostate lateralmente con uno scarto pari alla distanza binoculare (stereoscopia naturale) o ad una maggiore o minore distanza (stereoscopia artificiale).

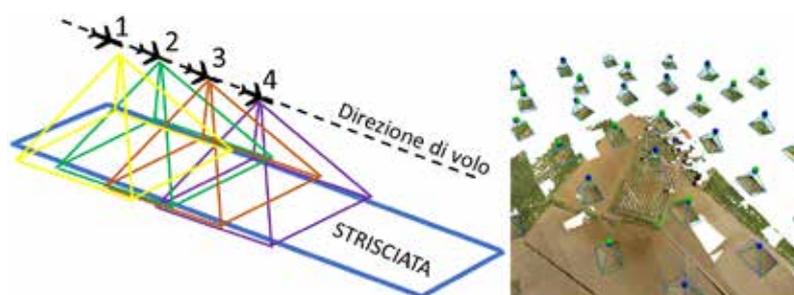


Figura 3.7. Coppie di immagini stereoscopiche (immagini: Francesca Giannetti)

Le tecniche di *SfM* sono utilizzate per ottenere dati tridimensionali al fine di ricavare modelli digitali (vedi § 4.3), come i modelli digitali del terreno (DTM), che indicano la superficie del suolo nudo, o della superficie terrestre (Modelli Digitali della Superficie - DSM), che invece indicano la superficie terrestre comprensiva di tutti gli elementi presenti sopra di essa come, ad esempio, la vegetazione o gli edifici (Fig. 3.8).

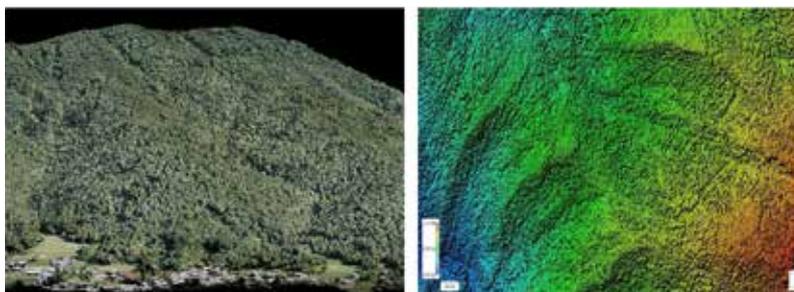


Figura 3.8. Nuvola di punti 3D fotogrammetrica acquisita con drone (alto) e DSM derivante da dato fotogrammetrico acquisito con drone (basso) (immagini: Francesca Giannetti)

Dalle immagini telerilevate può essere derivata una vasta gamma di informazioni relative a un dato fenomeno sulla superficie terrestre (*Earth Observation*). Un esempio è la derivazione di cartografie di copertura del suolo (come le carte forestali) mediante tecniche di *image processing*. In particolare, la procedura informatica di classificazione dell'immagine in funzione del tipo di copertura del suolo può essere *pixel-based* (analisi di singolo pixel) oppure *object-based* (analisi di insiemi di pixel), può essere basata su un approccio di tipo assistito (*supervised*) o non-assistito (*unsupervised*) o una combinazione delle due tecniche, assegnando a ogni *pixel* o a ogni oggetto il grado di appartenenza ad una specifica classe. Nel processo *object-based* vengono utilizzate tecniche di segmentazione per identificare e separare aree (poligoni) con attributi e caratteristiche simili che vengono successivamente assegnate alle diverse classi tematiche (Chirici et al. 2006).

3.7.2. Sensori attivi

3.7.2.1. Laser Scanning

Con il termine laser si intende l'amplificazione della luce per mezzo dell'emissione stimolata di radiazioni (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). La tecnologia *laser*, che si basa pertanto su una sorgente luminosa attiva, permette di acquisire informazioni geometriche e morfometriche tridimensionali su grandi estensioni territoriali e con elevata precisione metrica.

L'acronimo *LiDAR* (*Light Detection And Ranging*) identifica la tecnologia che misura la posizione e la distanza tridimensionale (*ranging*) da un oggetto rispetto a una sorgente laser e che di conseguenza è in grado di restituire informazioni tridimensionali ad alta risoluzione dell'ambiente circostante. Un *LiDAR* utilizza tipicamente diversi componenti: laser, fotorelevatori e circuiti integrati di lettura (ROIC) con capacità di tempo di volo (*Time of Flight - TOF*) per misurare la distanza illuminando un bersaglio e analizzando la luce riflessa.

Conoscendo la velocità del segnale (velocità della luce, pari a $300.000 \text{ km s}^{-1}$) e calcolando il tempo del raggio luminoso per andare dalla sorgente verso un bersaglio (riflettente) e tornare indietro verso il rilevatore, di cui è nota la posizione tramite sistema GNSS, è possibile determinare la posizione tridimensionale dell'oggetto colpito dall'impulso laser (Fig. 3.9). Applicando questo principio a tutti gli impulsi laser che ritornano dagli oggetti colpiti dall'impulso laser, si può ottenere una 'nuvola' di punti georeferenziati. La nuvola dei punti può essere poi elaborata digitalmente per estrarre informazioni tridimensionali sugli oggetti di interesse.

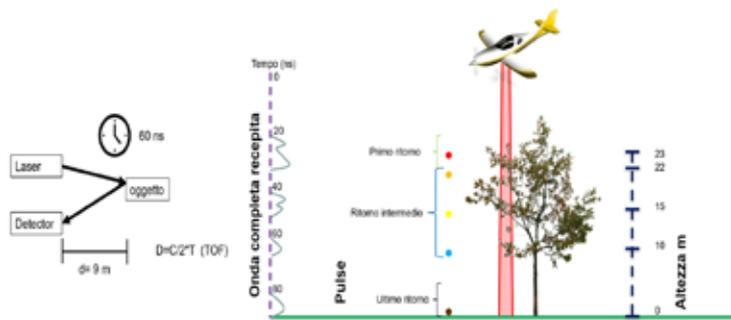


Figura 3.9. Schema descrittivo di *LiDAR* aereo (immagine: Francesca Giannetti)

La tecnologia *LiDAR* rappresenta un valido strumento per molteplici applicazioni nel campo del monitoraggio della superficie terrestre ed ha trovato un largo uso nelle applicazioni forestali. I sensori *LiDAR* possono essere montati su vari tipi di piattaforme: esistono sensori *LiDAR* portati su satellite (a esempio, GEDI), aviotrasportati su aeromobile (i più utilizzati in campo forestali), aviotrasportati su drone, montati su piattaforme a terra fisse, su piattaforme mobili a terra (macchine o operatori che si muovono), oppure montate su macchine in segheria per ricostruire la tridimensionalità del tronco che deve essere lavorato (Fig. 3.10).

In Tabella 3.3 si riportano i tipi di *LiDAR* in relazione alla piattaforma utilizzata.

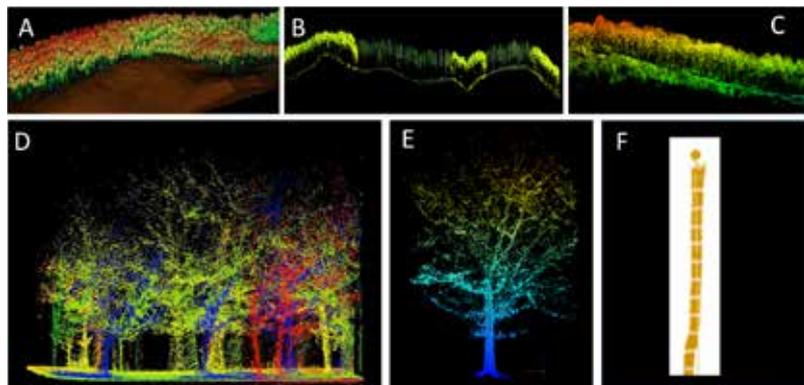


Figura 3.10. Nuvole di punti acquisite con diversi tipi di Laser Scanner. A e B: rilievo *LiDAR* aereo, C: rilievo *LiDAR* da UAV, D: soprassuolo forestale rilevato con laser scanner terrestre portatile, E: albero rilevato con sistema *LiDAR* Terrestre Fisso, F: immagine di un tronco in segheria acquisita con sistemi *LiDAR* (immagini: Francesca Giannetti e Nicola Puletti)

Piattaforma	scala (punti m ²)
satellite	.
aereo (acquisizione nazionale)	0.2-10
droni	10-200
fissi a terra	200-500
mobili a terra (mezzi)	200-500
mobili a terra (operatore)	200-500
su macchine in segheria	200-500

Tabella 3.3. Elenco dei tipi di *LiDAR* utilizzati per applicazioni di *Precision Forestry*

I dati *LiDAR* acquisiti da aereo (*Airborne Laser Scanning – ALS*) permettono di ricavare informazioni di dettaglio tridimensionali della struttura dei soprassuoli forestali. In particolare, grazie alla capacità di penetrare la copertura fogliare consentono di ricavare DTM e DSM e di ricavare per sottrazione di questi due modelli (DSM-DTM - Fig. 3.11) i Modelli Digitali delle Chiome (CHM).

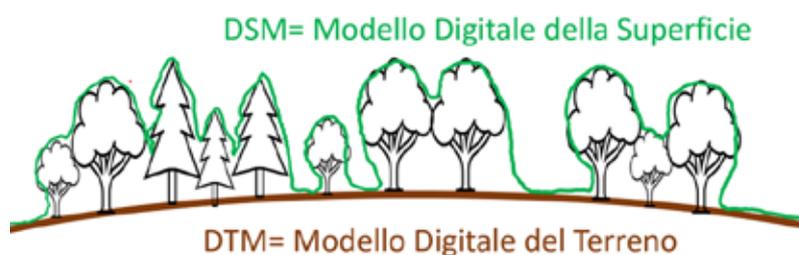


Figura 3.11. L'acquisizione di dati *LiDAR* da aereo permette di ricavare informazioni di dettaglio tridimensionali della struttura forestale come i Modelli digitali del Terreno (DTM) e della superficie (DSM) e di ricavarne per sottrazione (DSM-DTM) i modelli digitali delle Chiome (CHM) (immagine: Francesca Giannetti)

Gli strumenti con sensori lidar a terra *TLS* (*Terrestrial laser scanner* - Fig. 3.12) possono essere di tipo fisso, mobile o portatile. I primi due tipi sono spesso pesanti ed ingombranti, non solo come apparecchiatura principale, ma anche per la strumentazione accessoria quali il tripode e i *targets*; questa attrezzatura non sempre rende possibile l'accesso al popolamento forestale di interesse ed è per questo che, negli ultimi anni, è stata adottata una tecnologia *TLS* portatile (*PLS*) per i rilievi in bosco. I *PLS* sono di tipo compatto, portati solitamente mediante un piccolo zaino e consentono di muoversi in autonomia in bosco. Le acquisizioni con sistemi *LiDAR* di tipo terrestre fisso, mobile e portatile hanno schemi di acquisizioni differenti (Fig. 3.13, 3.14 e 3.15).



Figure 3.12. Esempi di *Terrestrial Laser Scanner (TLS)*: a sinistra TLS fisso e a destra TLS Portatile (PLS) (immagini: Pietro Castellucci, Nicola Puletti, Francesca Giannetti e Elena Marra)

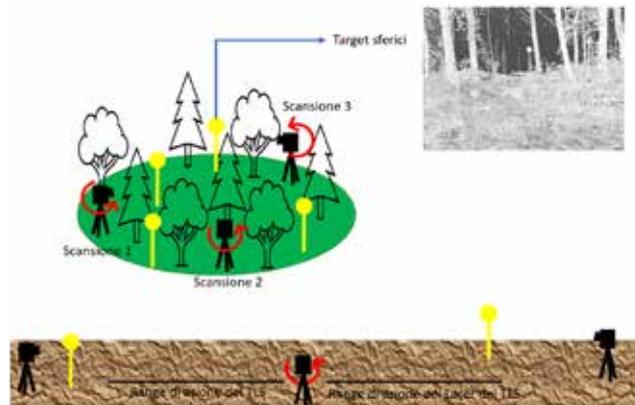


Figure 3.13. Schema di acquisizione con *Terrestrial Laser Scanner (TLS)* fisso in un'area di saggio (in alto) e in una strada forestale (in basso). I *TLS* fissi eseguono una scansione a 360° e rimangono fissi in un punto del terreno. Per acquisire le aree di interesse è necessario eseguire più scansioni: nel caso di aree di saggio in foresta, per evitare di avere punti non rilevati a causa di oggetti che mascherano altri oggetti; nel caso di strade, per eseguire scansioni lungo tutto l'asse tenendo conto della portata di azione del laser del *TLS* che può variare a seconda dello strumento che si utilizza. I *target* sferici sono utilizzati per allineare in un unico rilievo scansioni eseguite da punti differenti. Nel caso in cui si voglia georiferire il sistema in un sistema geografico e non locale è necessario acquisire i punti sferici con un ricevitore *GNSS* in modo da georeferenziare il rilievo (immagine: Francesca Giannetti)

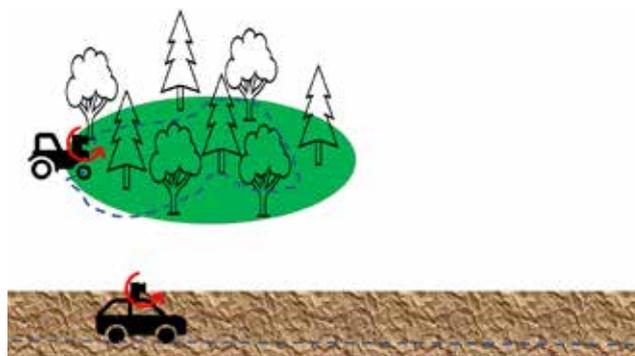


Figura 3.14. Schema di acquisizione di una porzione di bosco con *Terrestrial Laser Scanner (TLS)* mobile montato su macchina operatrice e di una strada con *TLS* Mobile posizionato su un'auto. I *TLS* di tipo mobile sono

montati su mezzi e consentono di acquisire scansioni lungo il percorso. Lo strumento solitamente ruota e acquisisce a 360° o a 270° rispetto al punto in cui si trova. I *TLS* mobili possono essere forniti di un proprio sistema *GNSS* e consentono l'acquisizione di dati già in un sistema geografico; se non sono dotati di sistema *GNSS* acquisiscono i dati in un sistema di riferimento locale (immagine: Francesca Giannetti)

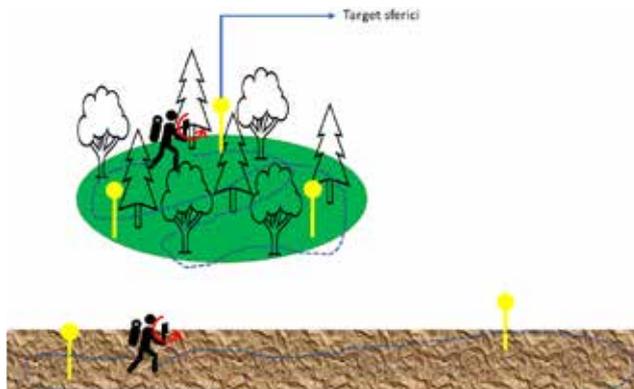


Figure 3.15. Schema di acquisizione con *Terrestrial Laser Scanner* portatile (*PLS*) in un'area di saggio (in alto) e in una strada forestale (in basso). I *PLS*, portati da un operatore, eseguono una scansione lungo il percorso, utilizzando algoritmi *GEOSLAM* per ottenere una scansione senza necessità di allineamenti. Solitamente questi strumenti non sono dotati di sistema di posizionamento geografico ed eseguono un rilievo in un sistema locale. I *target sferici* nei sistemi *PLS* sono utilizzati per georiferire il rilievo. I *target sferici* se acquisiti con un ricevitore *GNSS* consentono di generare rilievi direttamente in un sistema geografico (immagine: Francesca Giannetti)

3.7.2.2. Radar

Il *Radar* (*Radio Detection and Ranging*) è un sistema di telerilevamento di tipo attivo (vedi § 3.7.2.1) mediante l'emissione di un segnale elettromagnetico nella lunghezza d'onda delle microonde e la ricezione del segnale di ritorno attraverso un'apposita antenna. I dati radar possono penetrare le nuvole, rendendoli particolarmente utili nelle regioni tropicali, subtropicali e montane, dove, invece, sensori di tipo ottico possono avere significative limitazioni dovute alla frequente nuvolosità. L'intensità del segnale misurata dal sensore (*backscatter*) *SAR* (*Synthetic Aperture Radar*) dipende dalla modalità di emissione e di acquisizione del segnale stesso, dalla lunghezza d'onda impiegata (a esempio, banda C, X o L – Tab. 3.4) e dalle caratteristiche geometriche ed elettromagnetiche della superficie riflettente. Esistono varie missioni satellitari che acquisiscono dati radar a microonde, la più recente delle quali è finanziata da *ESA* e denominata *Sentinel-1*, composta da una costellazione di due satelliti *SAR* in banda C posti in orbita polare (Fig. 3.16). Si tratta di satelliti dotati di un'alta risoluzione di 5-20 m e un tempo di ritorno tra 5 e 10 giorni, con una copertura geografica completa a scala globale. Ogni oggetto sulla superficie terrestre a seconda delle sue condizioni ha un *backscattering* differente che può essere utilizzato per estrarre informazioni anche di tipo tridimensionale dei soprassuoli forestali (Fig. 3.17).

Banda di frequenza	Gamma di frequenza (GHz)	Gamma di lunghezza d'onda (cm)
L band	1-2	15-30
S band	2-4	7,5-15
C band	4-8	3,75-7,5
X band	8-12	2,5-3,75
Ku band	12-18	1,67-2,5
K band	18-27	1,11-1,67
Ka band	17-40	0,75-1,11
V band	40-75	0,4-0,75
W band	75-110	0,27-0,4

Tabella 3.4. Lunghezza d'onda utilizzate dal *Radio Detection and Ranging*



Figura 3.16. *European Space Agency (ESA) Sentinel-1* (fonte: *ESA*, <https://www.esa.int/Applications/>)

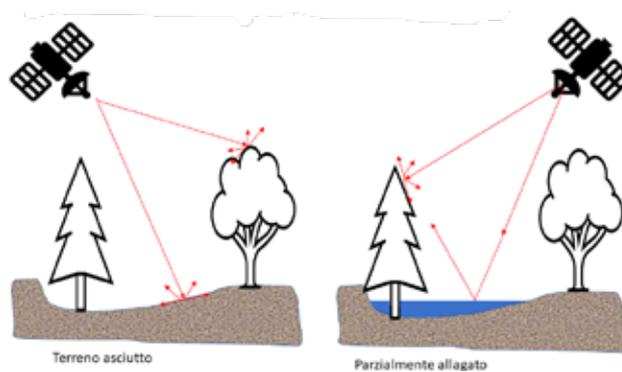


Figura 3.17. Esempio di *backscattering* per la banda C Radar di un soprassuolo vegetato con terreno asciutto o parzialmente allagato (immagine: Francesca Giannetti)

Il radar terrestre o georadar (*Ground Penetrating Radar, GPR*) è una tecnologia che si basa sullo stesso principio di funzionamento dei radar convenzionali: misura il tempo di andata e ritorno dell'impulso elettromagnetico ad alta frequenza (tipicamente 10-3000 MHz) e di breve durata (qualche ns), inviato nel sottosuolo o nel mezzo investigato mediante un'antenna trasmittente, e la sua successiva riflessione, dovuta ad un contrasto di proprietà elettromagnetiche tra materiali diversi (Fig. 3.18).

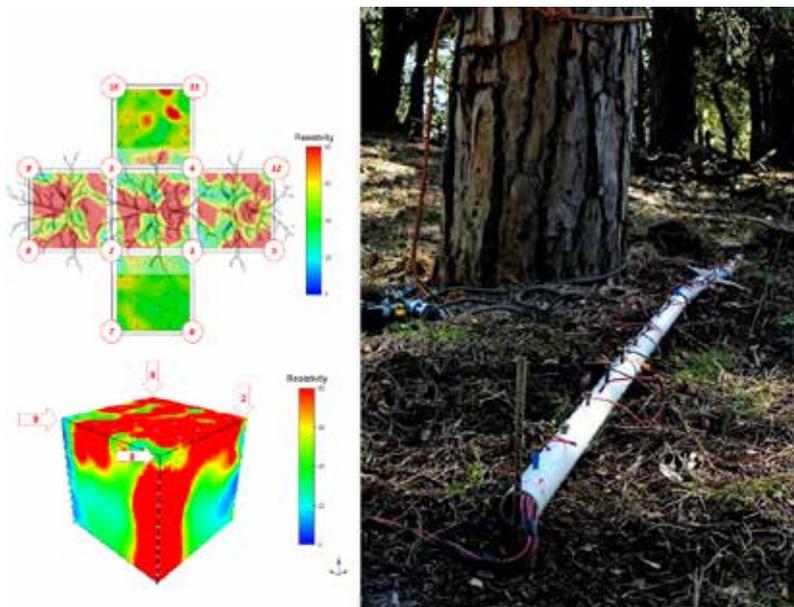


Figura 3.18. Esempio di applicazione *ground penetrating radar* e geofisica per il monitoraggio degli apparati radicali (fonte: Giambastiani et al. 2022 - modificato)

Le applicazioni della tecnica *GPR* in ambito ambientale e forestale, grazie alla rapidità di esecuzione, la ripetibilità, l'elevata risoluzione e la non-invasività, sono molteplici: rilevazione di cambiamenti nelle proprietà del suolo, risorse idriche, stratigrafia, livello di falde acquifere, cavità, eventuale tracciamento di contaminanti, nonché valutazione dello stato di salute della vegetazione arborea attraverso lo studio e il monitoraggio del tronco e dell'apparato radicale (Ferrara et al. 2013, 2014, 2017; Barone e Ferrara 2019).

Monitoraggio e inventariazione forestale

Al fine di supportare la transizione verso sistemi di *PF* basati su un flusso continuo di informazioni geospaziali di elevato dettaglio tematico e che forniscano informazioni complesse a supporto della gestione multifunzionale dei sistemi forestali, è necessario che i sistemi di inventariazione e monitoraggio tradizionali siano integrati da nuove sorgenti di dati. In tal senso è auspicabile la transizione verso inventari forestali avanzati (*enhanced forest inventory*), che consentano la mappatura e la stima su base spaziale esplicita (con errore della stima associato) delle variabili forestali grazie all'integrazione dei rilievi classici a terra (aree di saggio - ADS) con dati telerilevati da varie sorgenti.

4.1. RILIEVI INVENTARIALI A TERRA

4.1.1. Misurazioni dendrometriche

Quantificare e classificare accuratamente gli assortimenti legnosi ritraibili da alberi in piedi permette di supportare e ottimizzare la valorizzazione e l'allocazione della produzione legnosa. Caratteristiche strutturali dell'albero come, ad esempio, l'altezza, il diametro a petto d'uomo, l'altezza della base della chioma, la distribuzione dei rami lungo il fusto, la rastremazione e la curvatura del fusto, oltre alla presenza di difetti, sono tra le variabili più importanti per valutare la qualità degli assortimenti ritraibili.

La quantificazione di tali attributi, se condotta secondo metodi, comporta l'abbattimento dell'albero stesso. In questo senso, il recente sviluppo di tecnologie che permettono approcci non distruttivi, i cui prodotti consentono di mettere in relazione tra loro le diverse proprietà dimensionali degli alberi, costituiscono un progresso rilevante.

L'inventariazione delle risorse forestali con tecniche dendrometriche tradizionali viene eseguita mediante misurazioni manuali periodiche in campo con nastri metrici, cavalletti dendrometrici e ipsometri per la misura del diametro e dell'altezza dei fusti arborei. Oggi sono disponibili nuovi strumenti dendrometrici che permettono l'archiviazione automatica dei dati. I cavalletti elettronici registrano i diametri (eventualmente insieme ad altre caratteristiche di ciascun albero misurato) che vengono poi trasmessi a un personal computer direttamente in campo con porte Bluetooth® e/o infrarosso o mediante collegamento con attacco USB. Ipsometri laser o ad ultrasuoni sono in grado di misurare le altezze e di trasmettere le informazioni direttamente al cavalletto elettronico.

I dendrometri (Fig. 4.1), misurando in continuo i diametri, permettono di effettuare anche studi fisiologici, per esempio per la valutazione degli effetti degli stress (Giovannelli et al. 2007).



Figura 4.1. Dendrometro per il monitoraggio in continuo dell'attività cambiale (foto: Elena Paoletti)

Accanto ai moderni strumenti dendrometrici digitali, negli ultimi anni sono state anche sviluppate numerose *App* per smartphone che permettono di acquisire misure in bosco sfruttando i giroscopi, le camere e i *GNSS* presenti nei telefoni cellulari di ultima generazione.

Ad esempio, l'*App* MOTI è indirizzata ai professionisti dell'ambito forestale e consente di rilevare in modo semplice, economico ed affidabile misure dendrometriche essenziali, quali l'area basimetrica, il numero di alberi a ettaro, l'altezza dendrometrica e il volume legnoso (Fig. 4.2). È dotata anche di funzionalità avanzate come: supporto per la navigazione *GPS*, aggiunta del modello di auxologia forestale SiWaWa, supporto per il backup dei dati, supporto per la calibrazione, esportazione diretta dei dati.



Figura 4.2. Screenshot dell'App MOTI

L'App Trees consente, con l'ausilio anche di altri strumenti, di stimare l'altezza degli alberi (Fig. 4.3). L'App lavora attraverso tre *step*: 1 – l'utente deve inserire la distanza tra l'albero che intende misurare e lo smartphone attraverso un telemetro tradizionale o un metro; 2 – l'utente deve impostare l'angolo superiore/inferiore attraverso l'obiettivo con la fotocamera dello *smartphone*; 3 – l'App calcola l'altezza. È possibile utilizzare l'App anche per raccogliere dati acquisiti con altri strumenti come, ad esempio, il diametro a petto d'uomo.

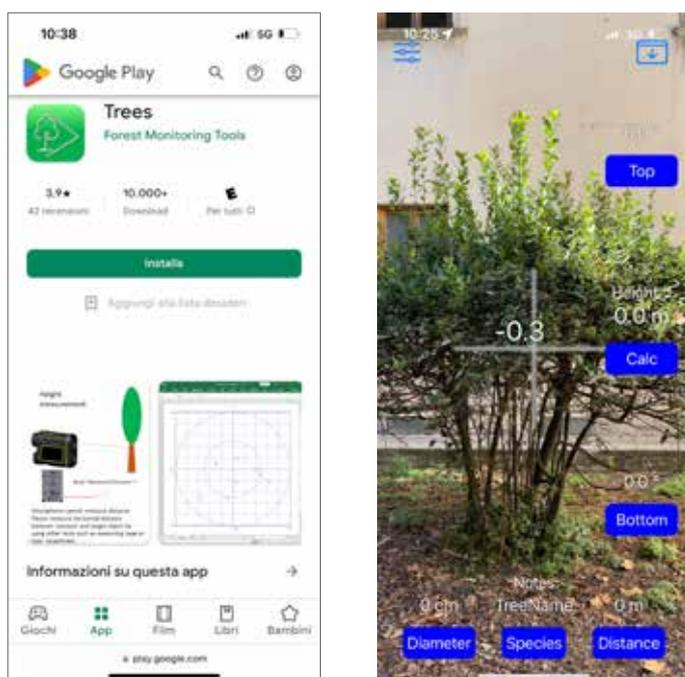


Figura 4.3. Screenshots dell'App Trees

Negli ultimi anni Apple ha introdotto su iPhone e iPad un sensore a basso range *LiDAR* (5 m) che consente di ricavare informazioni tridimensionali sulla porzione basale del tronco ad alta definizione (Fig. 4.4). In Irlanda, sulla base dei dispositivi Apple con *LiDAR* è stata sviluppata l'applicazione Arboreal che consente di effettuare misure dendrometriche utilizzando i principi delle *App* descritte anche in precedenza e sfruttando il *LiDAR*. Questa *App* consente anche di individuare i limiti delle ADS e memorizzare in automatico tutte le informazioni di ogni singolo albero e di calcolare con precisione l'altezza degli alberi attraverso un'interfaccia semplice ed intuitiva (Fig. 4.5).

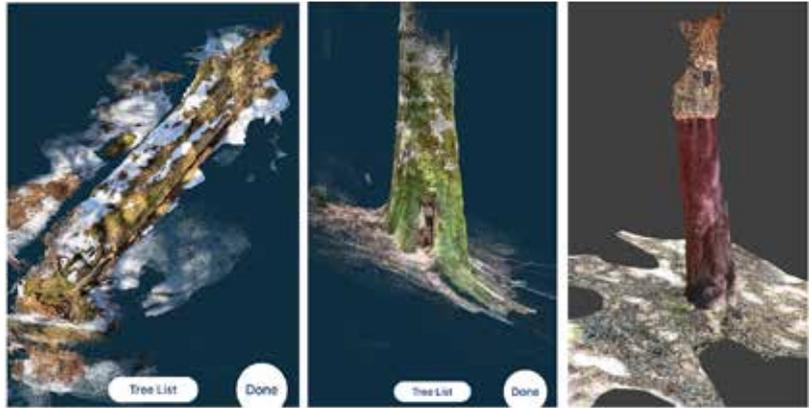


Figura 4.4. Scansione *LiDAR* con iPhone di un tronco morto a terra (sinistra - immagine: Francesco Parisi) e del tronco basale di un albero in piedi (centrale - immagine: Francesco Parisi, destra immagine: Francesca Giannetti e Lorenzo Massai)

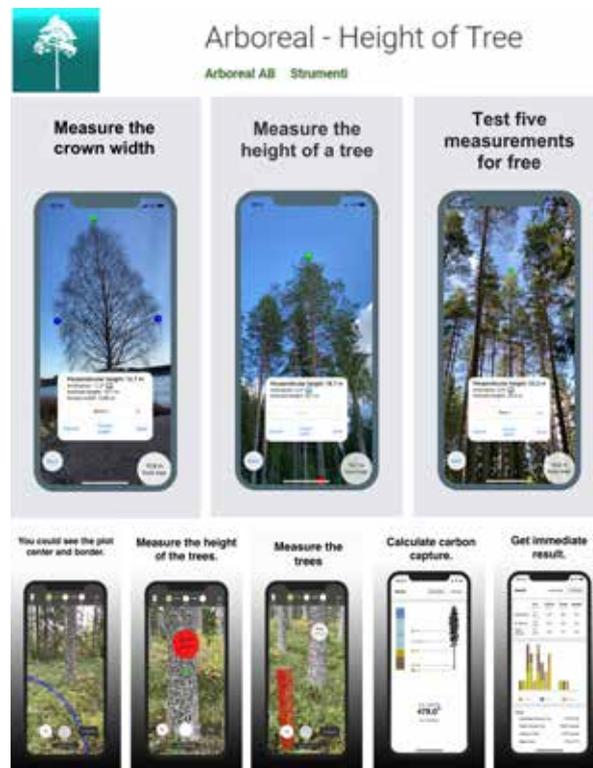


Figura 4.5. Screenshots della *App* Arboreal

4.1.2. Laser scanner terrestre

Grazie all'elevato dettaglio e alla capacità di georiferire le posizioni degli oggetti, il *TLS* (vedi § 3.7.2) è in grado di fornire informazioni dettagliate e 3D sulla posizione, la dimensione e la forma dei fusti arborei, rami compresi, come pure dati di struttura a livello di intero popolamento forestale (Fig. 4.6 e 4.7). Il tutto realizzato con metodo di misurazione non distruttivo, garantendo così la ripetibilità della misura nel tempo.

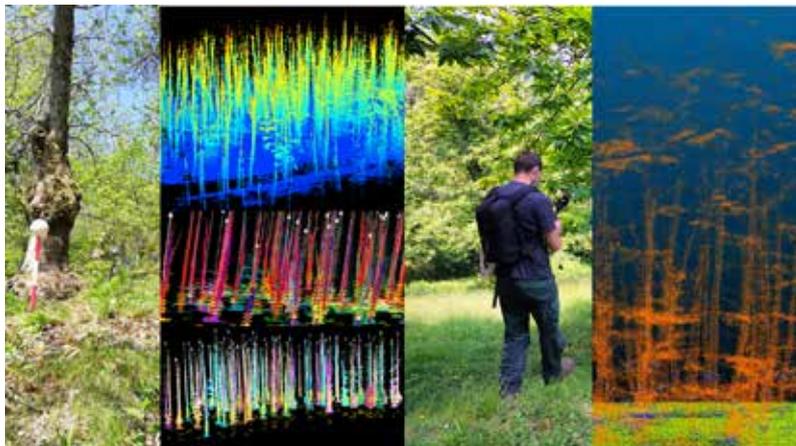


Figura 4.6. Un moderno dispositivo TLS e PLS possono arrivare a misurare 104-106 punti al secondo con una precisione che va da 0,1 a 1 cm. In figura sono riportate le immagini di due strumenti in fase di acquisizione: a sinistra Faro (TLS Fisso) e a destra un sistema ZEB (PLS mobile) e le relative nuvole di punti acquisite (immagine: Francesca Giannetti, Dario Matteoli, Nicola Puletti, Pietro Castellucci)

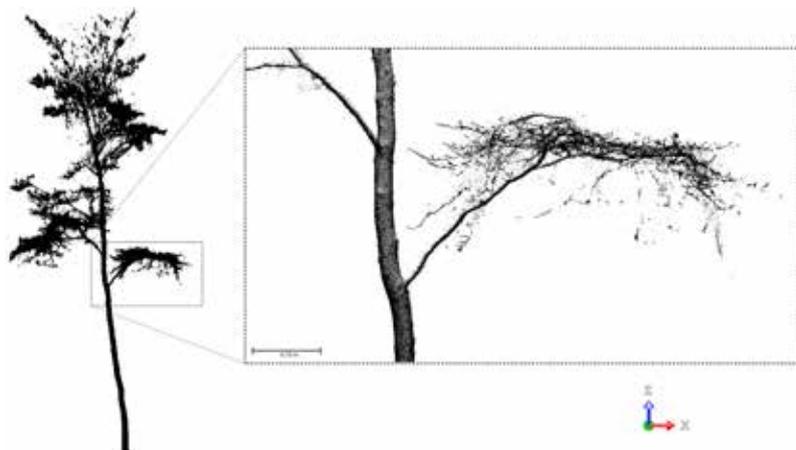


Figura 4.7. Ripresa TLS di una latifolia con il dettaglio relativo all'inserzione di un ramo che mostra come attraverso queste scansioni sia possibile ricostruire tridimensionalmente con grande accuratezza l'architettura dell'albero (immagine: Nicola Puletti)

Negli ultimi anni sono stati sviluppati molti algoritmi che, con un alto livello di automazione, sono in grado di estrarre dai dati *TLS* attributi dell'albero quali la posizione, il diametro a petto d'uomo, l'altezza e il volume legnoso. Alcuni di questi algoritmi sono inclusi in *App* gratuite, quali ad

esempio *SimpleTree* (Hackenberg et al. 2015), *3D Forest* (Trochta et al. 2017) come pure pacchetti a codice aperto (Roussel 2020) del linguaggio *R* (*CRAN Development Team*), come è possibile visualizzare al seguente link: <https://atkinsjeff.shinyapps.io/ForestAnalysisInR> (Atkins et al. 2022). Tuttavia, esistono ancora oggi alcuni svantaggi nell'utilizzo di queste *App* negli inventari forestali come, ad esempio, il fatto che gli approcci sviluppati sono più dedicati al singolo albero anziché all'intero popolamento e che l'elaborazione dati è complessa, e pertanto non alla portata di una utenza di base.

Oltre a raccogliere dati collegati ai tratti architettonici dei singoli alberi, il valore aggiunto del *TLS* risiede nella capacità di ottenere informazioni di dettaglio sulla struttura dei popolamenti misurati (Fig. 4.8) che possono essere agevolmente riprese in tempi successivi per la quantificazione di attributi strutturali anche inizialmente non considerati (cosiddetta “monumentalizzazione dell'ADS”). Questa metodologia di lavoro può consentire di creare modelli tridimensionali in cui sono raccolte le informazioni necessarie per estrarre metriche e fare misurazioni utili al tempo zero, ma anche di immagazzinare immagini su cui successivamente tornare per comparazioni o nuove misure di parametri non considerati in precedenza. La possibilità, inoltre, di ottenere misure georiferite dei singoli alberi permette una più semplice connessione con i dati telerilevati ottenuti dai sensori remoti, facilitando le procedure di integrazione e scalarità tra le varie fonti di informazione.

I dati *TLS* possono essere utilizzati, per esempio, per valutazioni dendrometriche e della qualità dei fusti: si possono valutare i profili dei fusti in continuità degli alberi in piedi (Liang et al. 2014) e quantificare il diametro del fusto a diverse altezze (Sun et al. 2016). I primi esempi in Italia hanno dimostrato come i dati acquisiti con il *TLS* possono essere utilizzati per valutare l'influenza del sesto di impianto sulla forma del fusto in pioppi allevati a diverse distanze (Puletti et al. 2019) o per la formulazione di profili in fusti di faggio del Monte Amiata in Toscana (Torresan et al. 2021). Inoltre, i *TLS* possono essere utilizzati anche per valutare diversi tipi di assortimento di legname anche provenienti da foreste mediterranee miste (Alvites et al. 2021) attraverso una procedura di elaborazione dei dati *TLS* che si compone di 5 fasi: 1- pretrattamento del dato *TLS*; 2- discriminazione delle foglie degli alberi; 3- rilevamento dei fusti; 4- ricostruzione 3D dei fusti; 5- valutazione degli assortimenti di legno ritraibili (Fig. 4.9).

In una visione di filiera foresta-legno, il monitoraggio e la quantificazione degli assortimenti forestali ritraibili da una foresta sono utili per la programmazione della quantità e qualità del materiale che arriva in segheria per la prima trasformazione. Data la complessità dell'informazione che il *TLS* è in grado di collezionare è necessario disporre di manodopera qualificata sia per la fase di rilievo in bosco che per quanto riguarda l'elaborazione *software*. Gli sviluppi di queste tecnologie hanno proposto l'uso dei dispositivi *LiDAR* portatili quali ad esempio *hand-held mobile laser scanner* (*HMLS*) e *backpack laser scanner* (Hyypä et al. 2020).

4.1.3. Foto digitali

La fotografia digitale è una tecnologia che può essere utilizzata per ottenere informazioni sulle caratteristiche della copertura arborea e la fenologia dei popolamenti. Chianucci et al. (2021a) hanno, per esempio, sviluppato un sistema di monitoraggio economico e veloce per ricavare informazioni giornaliere e sub-giornaliere della struttura della chioma attraverso dalle camere *time-lapse* digitali (Fig. 4.10). Queste fototrappole sono caratterizzate da un basso costo e resistono a condizioni esterne; hanno un basso consumo delle batterie e consentono di essere impostate per l'acquisizione

ripetuta (più foto al giorno a cadenza temporale prestabilita) e spesso dispongono di protocolli di trasferimento dati remoti. Inoltre, per tali tipologie di informazioni è stato sviluppato un pacchetto R che ne permette l'elaborazione (Chianucci et al. 2022).

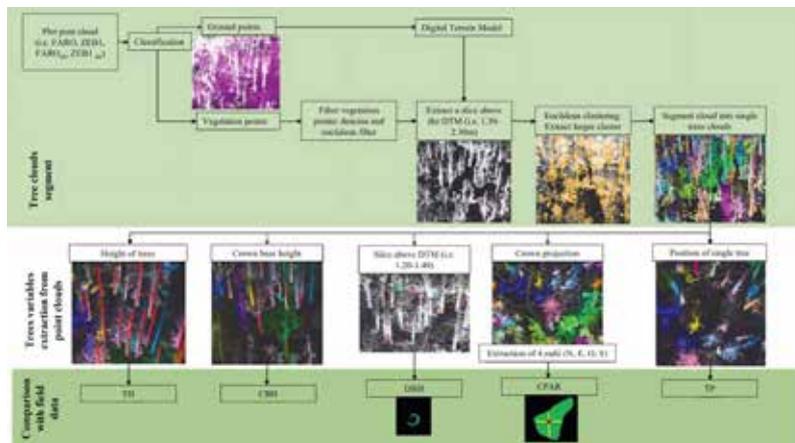


Figura 4.8. Procedura per estrarre automaticamente i dati collegati ai tratti architettonici dei singoli alberi dalle nuvole di punti di laser scanner terrestre (immagine: Giannetti et al. 2017a)

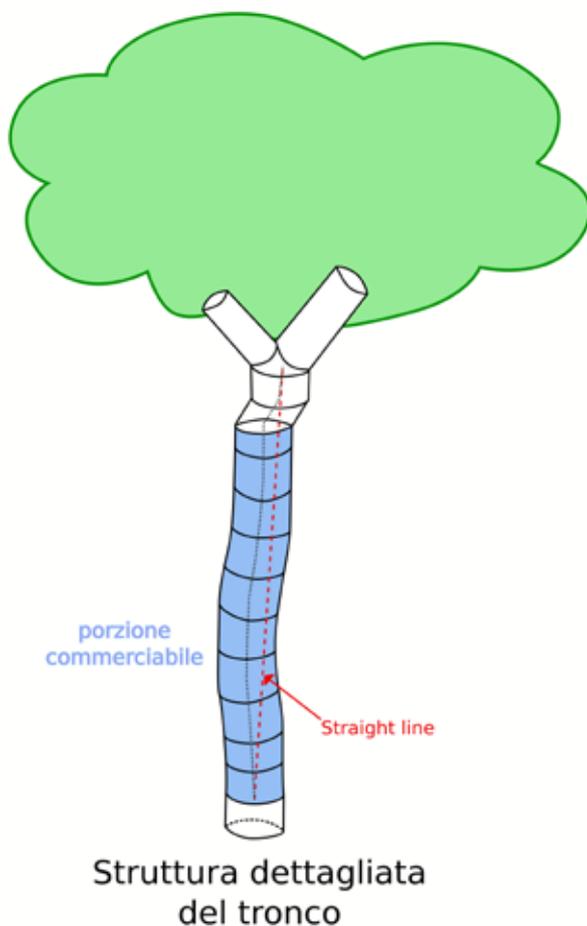


Figura 4.9. Rappresentazione grafica dell'architettura dell'albero e degli assortimenti legnosi ritraibili (immagine: Nicola Puletti)



Figura 4.10. Fototrappola per la quantificazione della chioma (foto: Chianucci et al. 2021a)

Le serie temporali giornaliere della copertura fogliare e dell'indice dell'area fogliare derivanti da fotografia digitale (Fig. 4.11) consentono di derivare informazioni di trasformazione fenologica dei soprassuoli. Queste informazioni possono essere confrontate con le osservazioni fenologiche da satellite (ad esempio, Sentinel-2, Landsat) per produrre sistemi di monitoraggio fenologico utili anche al monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici.

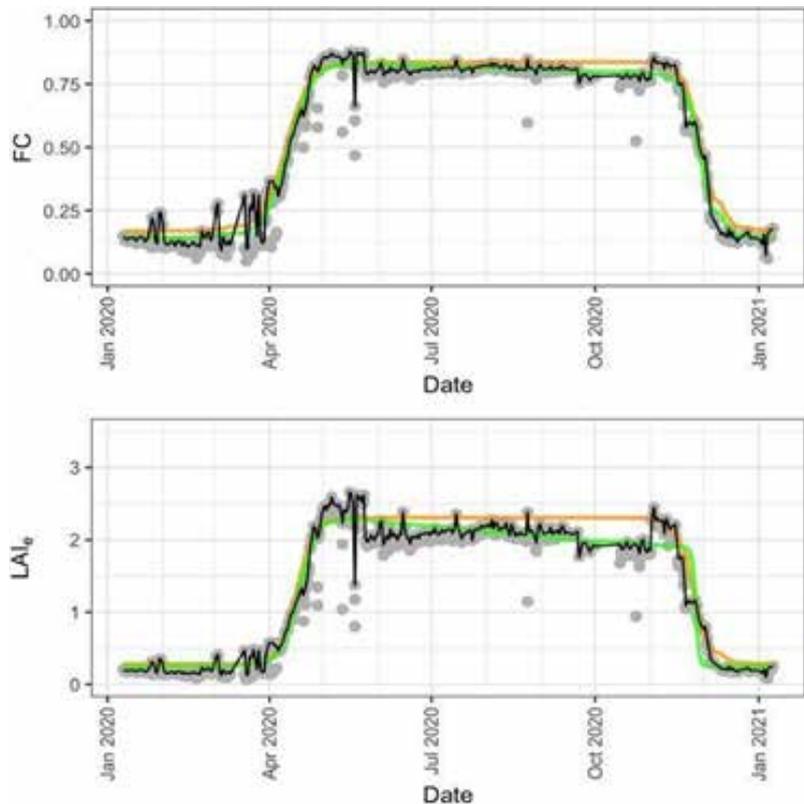


Figura 4.11. Indice di area fogliare (sopra) e copertura fogliare (sotto) stimati dalla fototrappola in continuo per il periodo di un anno (immagini: Chianucci et al. 2021a)

4.2. STIMA SPAZIALMENTE ESPLICITA DI VARIABILI FORESTALI

Negli inventari forestali effettuati su grandi superfici o a scala di azienda di molti Paesi del Centro e Nord Europa, del Canada e degli USA, i rilievi fatti a terra in ADS vengono integrati con dati telerilevati multiplatforma (da *LiDAR*, immagini ottiche e radar) per ottenere stime spazialmente esplicite (mappe) di variabili forestali. Anche in Italia, nell'ambito del progetto AGRIDIGIT, si è ottenuto lo stesso risultato su tutto il territorio nazionale sulla base dei dati dell'Inventario Forestale Nazionale (INFC2005) fornendo la stima spazialmente esplicita di volume legnoso, biomassa legnosa e incremento corrente di volume legnoso con approccio *area-based* (Fig. 4.12 e 4.13) ed utilizzando come variabili predittive le bande delle immagini Landsat, dati radar JAXA, dati ottici MODIS, e variabili ausiliarie orografiche, climatiche e di suolo (Vangi et al. 2021; Chirici et al. 2022).



Figura 4.12. Schema di approccio *Area-based* (immagine: Francesca Giannetti)

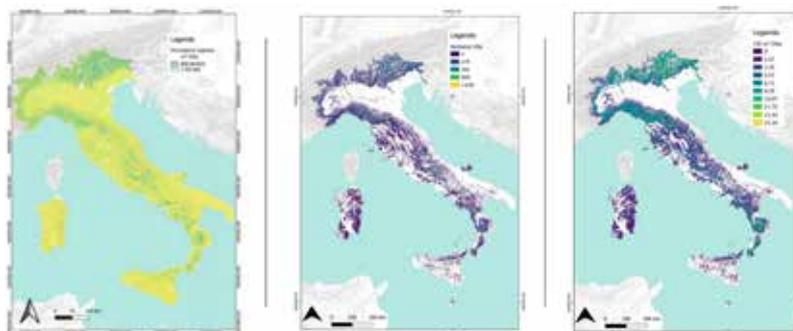


Figura 4.13. Mappe del volume legnoso, biomassa legnosa e incremento corrente di volume legnoso prodotte con approccio *area-based* (immagine: Francesca Giannetti e Nicola Puletti)

È auspicabile che venga eseguita un'acquisizione su scala nazionale di dati *ALS* coerente con i rilievi dell'inventario forestale nazionale in modo da ottenere CHM coerenti con i dati rilevati a terra, alla stessa risoluzione della dimensione dell'ADS dell'inventario (Chirici et al. 2020). La possibilità di utilizzare dati *LiDAR* a scala nazionale, rilevati coerentemente con i dati inventariali a terra, consentirebbe di ottenere stime più precise delle variabili

quali provvigione legnosa, biomassa e incremento.

È importante sottolineare che dove esiste già un rilievo *LiDAR* da aereo è possibile aggiornare i modelli CHM anche attraverso fotogrammetria aerea. Un disturbo forestale è tipicamente un singolo evento che ha un determinato impatto (Fig. 4.14), mentre si parla di degrado forestale quando uno o più eventi hanno un impatto che si prolunga nel tempo e che porta ad un decadimento funzionale e/o strutturale dell'ecosistema.



Figura 4.14. Esempi di disturbi negli ecosistemi forestali (immagine: Francesca Giannetti)

Le immagini multispettrali satellitari e i dati radar consentono di mappare i disturbi ed il degrado forestale con accuratezza. Per esempio, gli algoritmi sviluppati da Giannetti et al. (2020a) consentono di segmentare una serie storica di immagini telerilevate e di mappare, grazie agli indici di vegetazione (vedi § 3.7.1), le aree tagliate o disturbate da eventi naturali (incendi, infestazioni di patogeni, tempeste di vento).

Francini et al. (2021, 2022) hanno rilasciato un *App* che consente di utilizzare l'algoritmo 3I3D per la mappatura dei disturbi forestali; l'*App* è sviluppata sulla piattaforma di *cloud computing* Google Earth Engine e, integrata con un pacchetto di R, consente non soltanto di produrre la mappa dei disturbi, ma, attraverso punti fotointerpretati, di associare a questa gli errori della stima (Fig. 4.15 - 4.16 - 4.17).

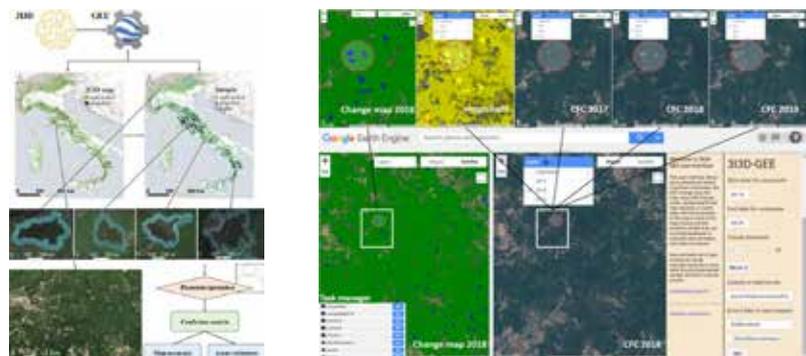


Figura 4.15. *App* 3I3D sviluppata per la mappatura annuale dei disturbi forestali in Italia, implementata sulla piattaforma Google Earth Engine (fonte: Francini et al. 2022)

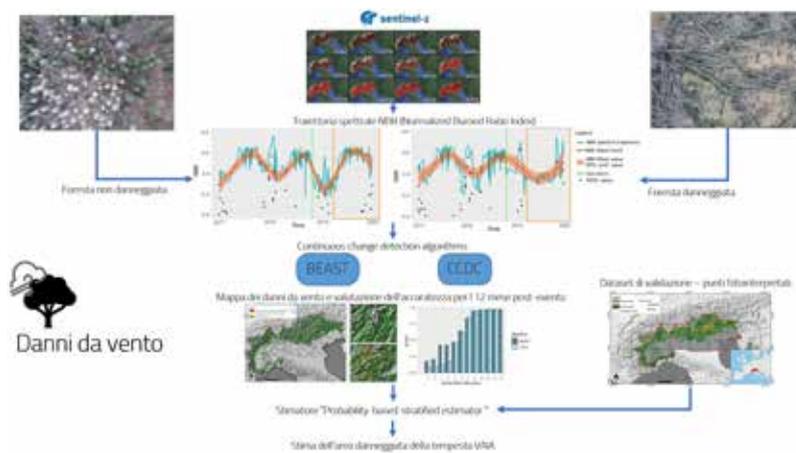


Figura 4.16. Mappatura dell'area colpita dalla tempesta Vaia e analisi dell'accuratezza della stima utilizzando algoritmi di analisi di cambiamento continuo (immagine: Francesca Giannetti)



Figura 4.17. Mappatura di un'area percorsa da incendio, e analisi della ripresa vegetativa post-incendio (fonte: Bonannella et al. 2022)

4.3. MONITORAGGIO DEI PROCESSI

FISIOLOGICI

La misura della crescita dendrometrica del fusto di un albero è utile sia per comprendere i cicli giornalieri di espansione e contrazione del fusto in seguito ai fenomeni di assorbimento idrico dalle radici, sia per valutare la crescita dell'albero durante la stagione vegetativa in relazione alla variabilità dei parametri ambientali. Un'altra osservazione fondamentale è la misura del flusso xilematico, cioè la misura della velocità con cui la linfa si muove nei canali xilematici all'interno del fusto per trasportare acqua e nutrienti all'apparato fogliare. Tale misura consente, attraverso una serie di algoritmi, di stimare i flussi traspirativi a scala di singolo albero e di analizzare le dinamiche di deficit idrico.

Un esempio di sensore smart in grado di registrare queste misure è la sonda multiparametrica conosciuta col nome di *tree talker* (Fig. 3.1). Il *tree talker* è un dispositivo con sensori di tipo *IoT* che viene installato su un singolo albero e riceve dati in modo continuo consentendo di analizzare le dinamiche fisiologiche delle piante e la loro risposta fisiologica agli stress ambientali

(Zorzi et al. 2021). In particolare, il *tree talker* misura la crescita radiale (dendrometrica) del fusto tramite un sensore a infrarosso, i flussi xilematici tramite il metodo della dissipazione di calore (Granier 1985), il contenuto idrico all'interno del fusto, lo scostamento dalla deviazione verticale, nonché la temperatura e l'umidità dell'aria nei pressi di ogni singolo albero con risoluzione temporale di 30 minuti. Ogni sensore invia informazioni tramite ponte radio ad un cloud che li registra e li invia online tramite rete GSM (Valentini et al. 2019; Tognetti et al. 2022).

4.4. MONITORAGGIO DEI PROCESSI IDROLOGICI E ANALISI DELLA STABILITÀ DEI VERSANTI

L'analisi dei processi idrogeologici e della stabilità dei versanti in ambiente forestale può beneficiare di sensori smart dotati di connettività che trasmettono i dati acquisiti in campo tramite segnale *GSM* (*Global System for Mobile communications* - indica il sistema di seconda generazione per le comunicazioni telefoniche mobili) rendendo immediatamente controllabile e utilizzabile la misura raccolta.

I principali processi idrologici che coinvolgono gli scambi idrici nel continuum suolo-pianta e che possono essere monitorati in campo sono: intercettazione fogliare, deflusso lungo il tronco, infiltrazione della precipitazione nel suolo, variazione del contenuto idrico del suolo e dell'altezza della falda freatica. Per il monitoraggio di questi processi esistono strumenti, come ad esempio i pluviometri a bascula, collegabili a centraline che trasmettono i dati tramite rete *GSM* per il trasferimento in tempo reale.

Mediante l'utilizzo di modelli idrologico-idraulici e geotecnici è possibile stimare l'effetto del bosco sui deflussi di piena (es. Vazken 2004, Preti et al. 2011, Hofmann e Preti 2019, Bathurst et al. 2020) e sulla probabilità di rischio da frana considerando il contributo della vegetazione alla stabilità dei pendii (es. Arnone et al. 2016, Schwarz et al. 2013). Per l'analisi di stabilità dei versanti un valido strumento ad uso libero è il *SSAP - Slope Stability Analysis Program* (<https://www.ssap.eu>; Borselli et al. 2021) (Fig. 4.18).

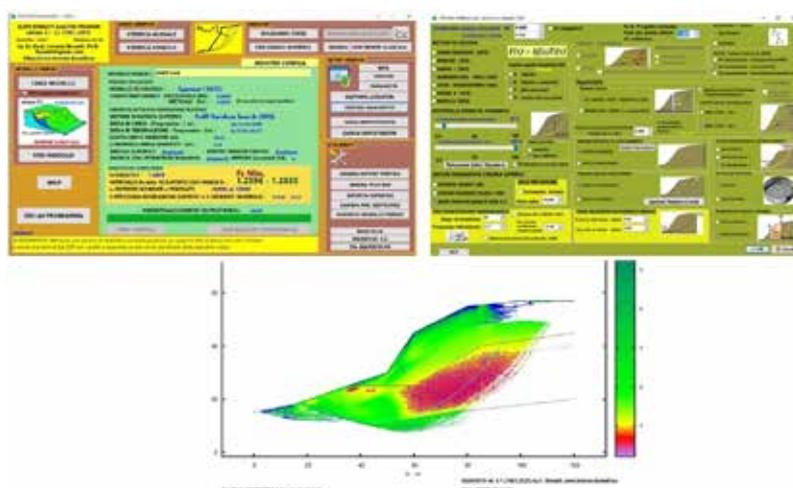


Figura 4.18. *Slope Stability Analysis Program*, interfacce di gestione (fonte: <https://www.ssap.eu/manualessap2010.pdf>)

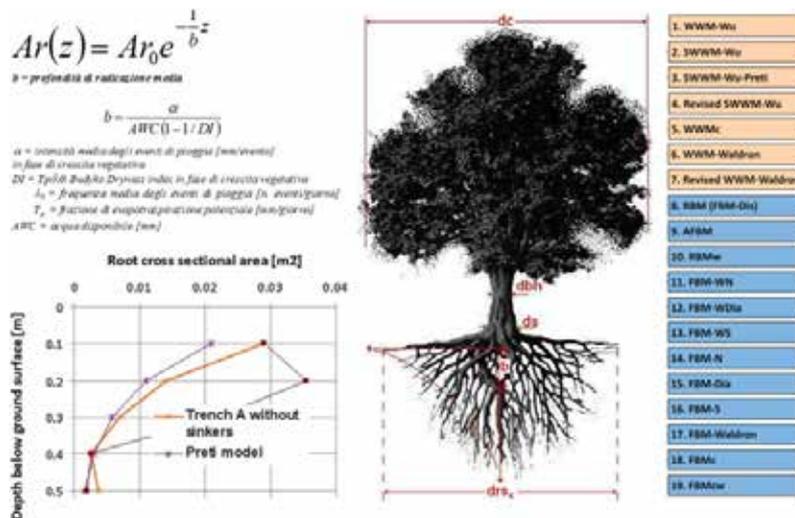


Figura 4.19. A sinistra e al centro: schemi e parametri eco-idrologici e validazione dei modelli per la stima del profilo delle radici ($Ar(z)$ è l'area radicata alla profondità z , proporzionale alla coesione aggiuntiva offerta dalle radici) (fonte: Preti et al. 2010, Gonzalez-Ollauri et al. 2021); a destra: evoluzione dei modelli di rinforzo radicale (fonte: Preti 2006, Mao 2022)

Modelli per la stima del rinforzo radicale sono stati sviluppati sempre di più a partire dagli anni 2000 migliorando i primi lavori pionieristici di Wu and Waldron (WWM) fino a quelli tipo *Fiber Bundle Model* (Preti 2006), anche su base eco-idrologica (Preti et al. 2010, Gonzalez-Ollauri et al. 2021) e con metodi indiretti non-invasivi (Giambastiani et al. 2022). In Fig. 4.19 si può osservare come viene stimato l'andamento dell'area radicata alla profondità z , proporzionale alla coesione aggiuntiva offerta dalle radici. In tal modo è possibile valutare la stabilità dei versanti vegetati, nelle diverse condizioni gestionali (Dani e Preti 2015) o sistemati con tecniche di ingegneria naturalistica (Preti 2006).

Attraverso modelli digitali del terreno e modelli della superficie forestale, è inoltre possibile determinare l'efficacia protettiva della foresta e analizzare ipotesi gestionali di lungo periodo (Preti 2013; Dani e Preti 2015; Cohen e Schwarz 2017; van Zadelhoff et al. 2021), con strumenti come SOSlope (<https://www.ecorisq.org/ecorisq-tools> - Fig. 4.20).

In ambiente montano la sistemazione ed utilizzazione dei terreni o la viabilità silvo-pastorale producono effetti significativi sugli assetti idro-morfologici del territorio con conseguenze sui processi erosivi e franosi (Borga et al. 2004; Borga et al. 2005). L'alterazione dei deflussi idrici da parte delle strade forestali, ad esempio, può avere come conseguenza l'innescio di erosioni superficiali e di fenomeni di dissesto, sia alla scala del singolo segmento stradale sia a quella di versante e di bacino idrografico, con conseguente incremento del livello di pericolosità a cui vengono esposti eventuali insediamenti, infrastrutture ed attività antropiche (Tarolli et al. 2011) (Fig. 4.21).



Figura 4.20. Schema dello strumento modellistico SOSlope (fonte: Ecorisq - <https://www.ecorisq.org/ecorisq-tools>)

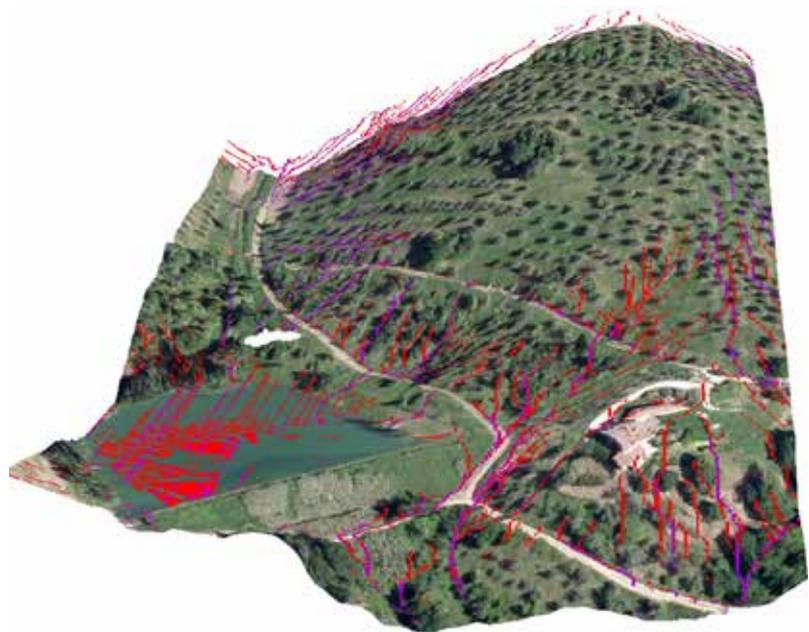


Figura 4.21. Individuazione delle linee di deflusso superficiale delle acque lungo un versante (immagine: Francesca Giannetti)

Con metodi di analisi basati sulla determinazione di indicatori della concentrazione del deflusso (*flow accumulation*) o di alterazione del deflusso mediante la comparazione dell'area drenata post e pre-alterazione antropica (*relative path impact index - RPII*), a partire da DTM ad alta risoluzione, è possibile analizzare gli effetti di gradonamento, fossi di guardia, strade forestali e compattazione del suolo dovuta alle utilizzazioni (Borga et al. 2004; Preti 2020; Cambi et al. 2015; Cambi et al. 2021; Calvani 2019; Pijil et al, 2020), come rappresentato in Fig. 4.22 e 4.23.



Figura 4.22. In alto - fossi di guardia realizzati sui Monti Pisani dalla Regione Toscana per regimare le acque e ridurre l'erosione dopo l'incendio del settembre 2018. In basso - elaborazione del DTM da Lidar per l'analisi modellistica della loro efficacia (fonte: Calvani 2019)

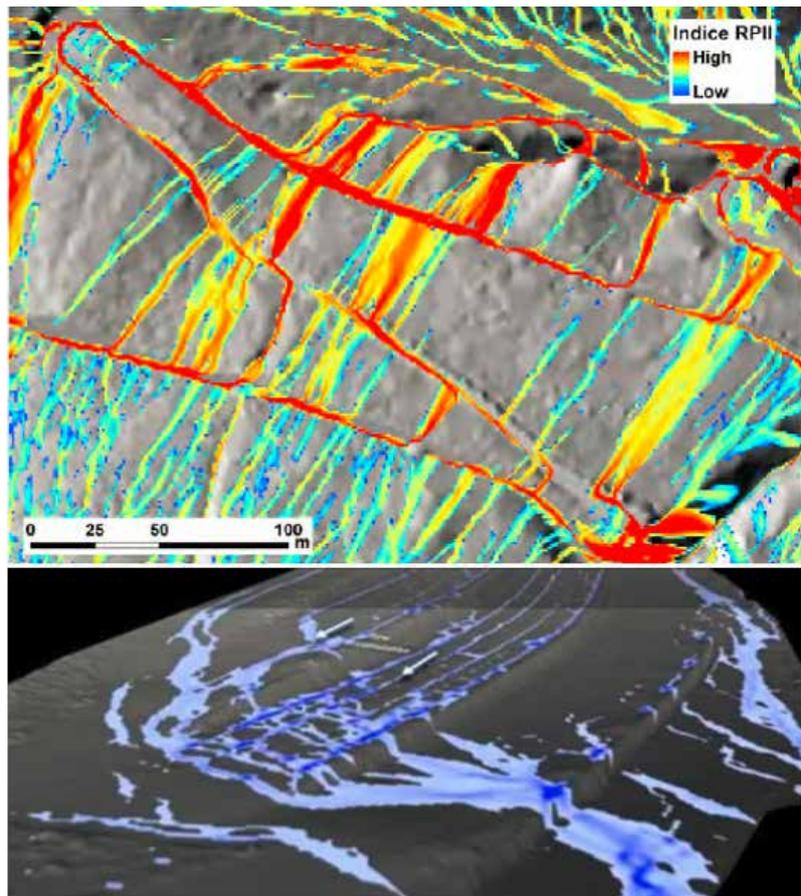


Figura 4.23. Elaborazioni del DTM per l'analisi modellistica degli effetti della presenza di sentieri o strade forestali (in alto) e simulazione delle concentrazioni di deflusso ed erosione determinati da gradonamenti o terrazzamenti (in basso) (fonte: modificato da Tarolli et al. 2011 e da Pijil et al. 2020)

4.5. SISTEMI INTEGRATI DI MONITORAGGIO *REAL-TIME* ED *EARLY WARNING*

I sistemi di allertamento precoce ad avversità biotiche e deperimenti (*early warning systems, EWS*) sono progettati in modo da poter identificare in modo rapido i punti di una foresta dove si registra un cambiamento, di solito su base settimanale o mensile. La possibilità di analisi di serie storiche telerilevate di immagini multispettrali satellitari (*big-data*) ha permesso lo sviluppo di metodi ed algoritmi in grado di analizzare la fenologia dei soprassuoli e monitorare in continuo l'attività fotosintetica e gli effetti dovuti a stress biotici e abiotici. A tale scopo, in particolare, sono state sviluppate *App* per mappare tali effetti utilizzando serie storiche derivanti da satelliti ottici multispettrali come Landsat (30 m risoluzione), MODIS (250 m risoluzione) e Sentinel-2 (10-20 m risoluzione).

Gli algoritmi che risultano maggiormente efficaci nel creare sistemi di *EWS* per l'analisi di danni provocati da insetti/patogeni o stress idrico sono quelli in grado di rilevare i cambiamenti interannuali (*Continuous Change Detection Algorithm - CCDA*). Approcci CCDA promettenti sono il *Continuous Change Detection and Classification (CCDC)*, *Exponentially*

Weighted Moving Average Change Detection (EWMACD) e lo stimatore bayesiano di cambiamenti improvvisi, cambiamenti stagionali e tendenze (*Bayesian estimator of abrupt change, seasonal change, and trend - BE-AST*). Questi algoritmi e metodi di analisi sono applicati con successo per monitorare i processi di declino forestale, i cambiamenti nella crescita della vegetazione (Bayr et al. 2016), i cambiamenti fenologici stagionali delle foreste (Devries et al. 2015), le dinamiche spazio-temporali delle foreste interannuali e in Italia anche per la mappatura dei danni provocati dalla tempesta Vaia (Giannetti et al. 2021). Per la costruzione di sistemi *EWS* possono essere utilizzate anche immagini ad alta risoluzione a pagamento acquisite da nano-satelliti come *Planet Scope*, *Worldview*, *Pleiades*. Questi servizi mettono a disposizione immagini satellitari multispettrali ad alta risoluzione temporale (quasi giornaliera) e spaziale (<3 m). Un recente studio di Francini et al. (2020) in ambiente appenninico ha dimostrato, per esempio, che l'utilizzo di immagini *Planet Scope*, anche con parziale copertura nuvolosa, può essere utilizzato per mappare *real-time* l'avanzamento delle operazioni di taglio nei cedui grazie all'alta risoluzione temporale e spaziale delle immagini (Fig. 4.24).

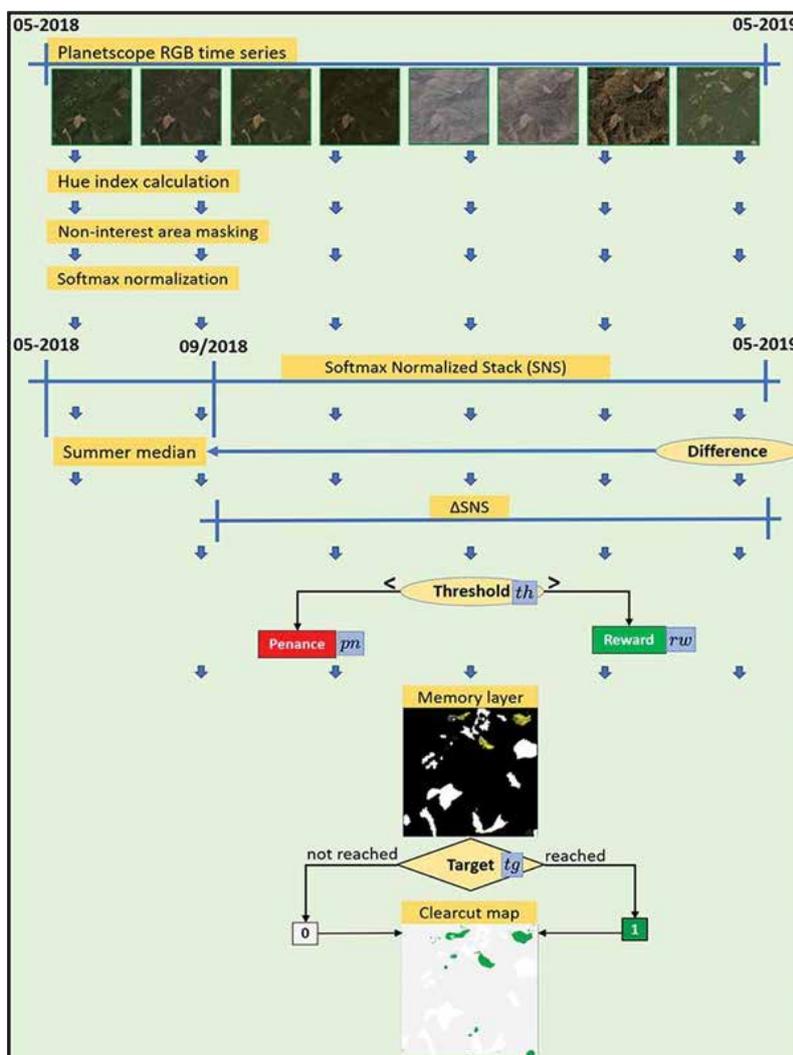


Figura 4.24. Individuazione delle tagliate a raso nei cedui su immagini *Planet Scope* (fonte: Francini et al. 2020)

4.6. INTEGRAZIONE DELLE INFORMAZIONI IN SISTEMI INFORMATIVI FORESTALI

I Sistemi Informativi Forestali hanno lo scopo di mettere a disposizione dei gestori forestali il maggior numero possibile di informazioni georeferenziate, permettendo di interrogare le banche dati create dagli inventari nazionali a diversa scala e in funzione delle diverse variabili forestali d'interesse. Le informazioni tematiche possono essere messe a disposizione per singola tessera del territorio (pixel), oppure aggregati per unità gestionale (particella forestale e/o catastale) o di unità amministrativa (Comune, Regione). La possibilità di accedere e interrogare le fonti informative all'interno del medesimo ambiente, anche se provenienti da ambiti informativi diversi, è particolarmente utile. Questi sistemi sono dotati di una visualizzazione della cartografia dinamica attraverso uno strumento WEBGIS (visualizzatore geografico) e uno strumento atto a poter scaricare la documentazione disponibile nei vari formati disponibili.

Il progetto AGRIDIGIT (<https://www.progettoagridigit.it>) ha permesso di sviluppare il primo sistema informativo forestale a livello nazionale, rendendo possibile la consultazione dei seguenti strati informativi: carta del volume legnoso, carta della biomassa legnosa, carta dell'incremento corrente del volume legnoso.

Sistemi informativi sviluppati a livello regionale sono quelli della Sicilia (<https://sif.regione.sicilia.it/ilportale/progetto-sif>) e del Piemonte (<https://servizi.regione.piemonte.it/catalogo/sistema-informativo-forestale-regionale-sifor#:~:text=Il%20Sistema%20Informativo%20Forestale%20Regionale,ricadenza%20delle%20> - Fig.4.25).

Peraltro, nella maggior parte delle regioni italiane, la cartografia e le informazioni utili al settore forestale sono integrate nei portali cartografici regionali, anche se spesso in sola consultazione e senza possibilità di scaricamento dei dati sotto forma di report.

A livello italiano sono stati sviluppati anche altri sistemi informativi come, per esempio, *Foliage* (Fig. 4.25) che ha l'obiettivo di migliorare la governance forestale ed è composto da: Piattaforma Amministrativa delle Foreste (PAF), destinata alle pubbliche amministrazioni, alle forze dell'ordine, ai liberi professionisti, ai proprietari forestali, è l'hub dei procedimenti amministrativi degli interventi di taglio boschivo: sono gestite dalla PAF tutte le istanze forestali (Fig. 4.26); Piattaforma di Monitoraggio delle Foreste (PMF), indirizzata alle pubbliche amministrazioni, mette a sistema i dati della PAF con immagini satellitari per identificare, per esempio, i tagli illegali e gli incendi tramite il telerilevamento; Piattaforma di Rilievo e Informazione Forestale (PRIF), per supportare con un'*App* mobile le indagini sul campo; Piattaforma di Supporto alla Governance (PSG), è il portale in cui confluiscono tutti i dati e le statistiche aggregate sulle operazioni forestali.

Le piattaforme sono progettate per essere modulari e facilmente scalabili in termini di funzionalità, e realizzate con tecnologie Open Source, integrate al sistema unico di accesso con identità digitale SPID.



Figura 4.25. Screenshot della pagina principale SDF Foliage

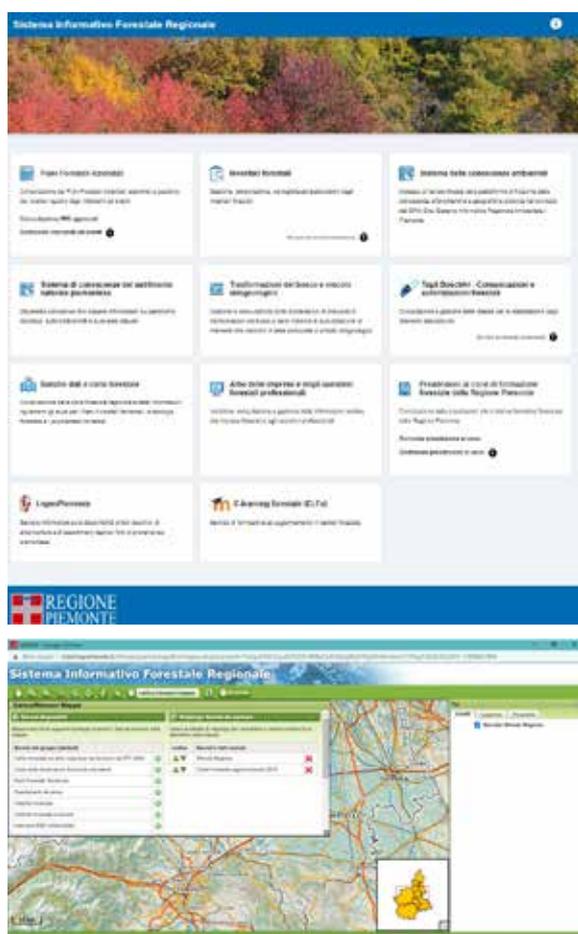


Figura 4.26. Screenshot del Sistema Informativo Forestale Regione Piemonte

4.7. CITIZEN SCIENCE

La *citizen science* coinvolge cittadini, non professionisti nella ricerca scientifica e nell’acquisizione di dati, offrendo interessanti opportunità per ampliare la gamma e la quantità dei dati raccolti grazie alla possibilità di coinvolgere gruppi numerosi di rilevatori ed osservatori “non esperti” (Crocker et al. 2020, Pocock et al. 2017). La crescente ubiquità dell’accesso alla rete e il crescente sviluppo di applicazioni per telefoni cellulari hanno rapidamente ampliato la portata e il potenziale coinvolgimento di cittadini non-esperti nell’acquisizione di dati anche forestali (Bonney et al. 2009, Land-Zandstra et al. 2016).

Solitamente i cittadini vengono coinvolti attraverso *App* scaricabili sul telefono e/o tablet che permettono, mediante interfacce semplici, la geolocalizzazione del punto di rilievo e la raccolta di immagini e di informazioni anche complesse attraverso guide semplici con definizioni, esempi, figure e/o supporti grafici esplicativi.

Un esempio di *App* di rilievo *citizen science* è sviluppato nell'ambito del progetto INTERREG MED-Star, coinvolgendo studenti, professionisti, tecnici e dipendenti delle Unioni dei Comuni nell'acquisizione di informazioni relative ai combustibili forestali utilizzate per produrre la mappa del rischio di incendi in Toscana (Fig. 4.27). L'*App* ha permesso la rilevazione dei combustibili forestali su oltre 16.000 punti nelle Province costiere della Toscana fornendo agli utenti la possibilità di scegliere tra diverse immagini di riferimento, calibrate per ciascun tipo di combustibile, di modo da "nutrire" la banca dati con informazioni quantitative utili per la realizzazione della mappa dei combustibili e della connessa cartografia del rischio di incendi boschivi. Un altro esempio di *App citizen science* sviluppata a livello italiano è quella di Silva Cuore (silvacuore.web.app/menu/home) che ha l'obiettivo di poter capire quali siano le cause del declino delle foreste e identificarne sia la vulnerabilità che la capacità di recuperare dopo eventi climatici estremi. Una volta effettuato l'accesso, l'utente viene guidato nella segnalazione passo dopo passo, grazie ad un'interfaccia user-friendly pensata per garantire una funzionalità semplice e intuitiva. L'*App* Silva Cuore (Fig. 4.28) è utilizzabile da smartphone, tablet e pc ed il suo uso è limitato a pochi semplici passaggi. Include due funzionalità per l'inserimento delle informazioni necessarie alla segnalazione: Step base: pensato per l'utente non-esperto, richiede poche semplici informazioni; Step avanzato: concepito per l'utente esperto del settore, richiede un maggior grado di dettaglio delle informazioni fornite. Le segnalazioni raccolte e validate dal *team* SilvaCuore (Castellaneta et al. 2021) sono visibili sulla *homepage* dell'*App* e consentono ad altri utenti di conoscere lo stato di salute degli ambienti forestali italiani.

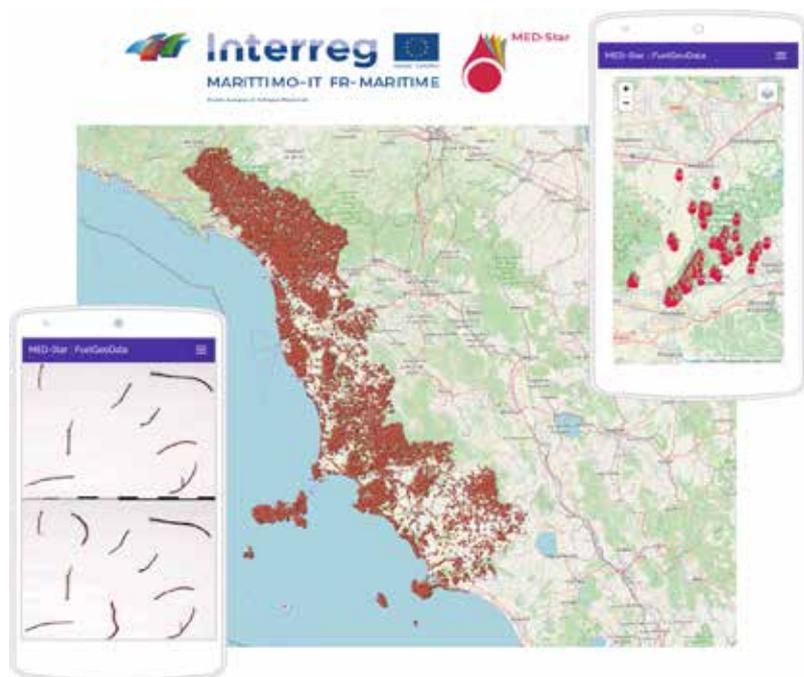


Figura 4.27. FuelGeoData è un *App* realizzata da Vanzotech s.r.l. nell'ambito del progetto Interreg MED-Star per la rilevazione delle caratteristiche quali-quantitative dei combustibili forestali (fonte: www.fuelgeodata.dagri.unifi.it)

Ci sono alcune criticità nello sviluppo degli applicativi per la *citizen science* che devono essere ben considerate per garantire che la qualità dei dati raccolti sia sufficientemente rigorosa. Infatti, i progetti che coinvolgono cittadini non esperti corrono il rischio di raccogliere dati che non possono essere utilizzati quando le guide proposte non sono di facile lettura e/o quando le *App* non abbiano la funzionalità di poter lavorare in assenza di copertura di rete (*off-line*), come non di rado accade quando si lavora in bosco.

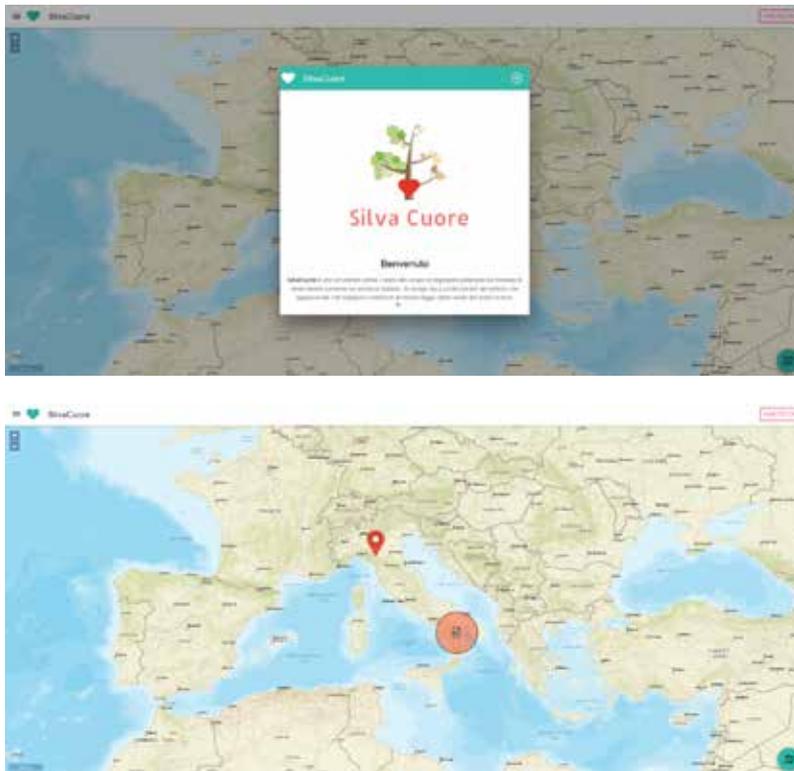


Figura 4.28. Interfaccia dell'*App* Silva Cuore

Gestione *selvicolturale*

La gestione selvicolturale prevede una conoscenza approfondita del comprensorio boscato, dal clima locale, ai suoli, alla topografia, alla composizione delle specie presenti, ai tipi colturali e alla struttura orizzontale e verticale della foresta.

L'integrazione degli obiettivi di gestione forestale con i fattori ambientali caratterizzanti il sito è determinante per una strategia sostenibile di lungo termine, in cui, attraverso l'uso di dati accurati e di analisi avanzate, le decisioni di gestione possono essere ottimizzate per adattarle alle condizioni del sito, in una ottica multifunzionale atta a favorire: la rinnovazione, la sostenibilità economica, sociale e ambientale degli interventi, lo stato di salute e la vigoria dei soprassuoli, la protezione della biodiversità, la tracciabilità dei prodotti legnosi.

5.1. APP PER LA MARTELLATA FORESTALE

Gli esempi di gestione forestale digitale si riferiscono prevalentemente a contesti nei quali la filiera legno è ben strutturata. Nel contesto italiano, l'approccio selvicolturale dominante, almeno quello applicato nelle fustie, è spesso operato con tagli a scelta (per piede d'albero o a piccoli gruppi): in queste condizioni la scelta degli alberi da abbattere (*martellata*) richiede un'attenta selezione per orientare lo sviluppo futuro del bosco. Con l'approccio tradizionale queste operazioni prevedono la raccolta di dati sulle piante martellate su supporto cartaceo, le informazioni non sono quasi mai georiferite e, quindi, risultano difficilmente integrabili con dati in formato digitale, come, ad esempio, quelli derivati da telerilevamento. L'assenza di georeferenziazione sottrae importanti informazioni per le fasi di gestione, quali ad esempio la progettazione delle operazioni di taglio, e, nel lungo termine, riduce le informazioni a disposizione per i piani forestali successivi.

Anche nel nostro Paese sono state avviate sperimentazioni operative di sistemi che permettano di integrare le banche dati raccolte nelle fasi preliminari di monitoraggio della foresta a fini assestamentali con la registrazione digitale e georiferita delle operazioni realizzate.

Per esempio, nell'ambito del progetto AGRIDIGIT è stata sviluppata una *web-App* che consente di integrare vari strati informativi raccolti con sistemi digitali basati su radiofrequenza o *QRcode*, permettendo quindi una tracciabilità completa dei singoli prodotti legnosi: dalla martellata alle successive fasi di taglio, esbosco, trasporto, e trasformazione (vedi § 9). La *web-App* è stata progettata per fornire funzioni di ricerca, ricostruzione del percorso di filiera di un prodotto e analisi della filiera generata da una risorsa forestale ed è predisposta per l'inserimento dati tramite dettatura vocale, anche in associazione a un cavalletto elettronico che registra i dati e li trasmette tramite connessione *bluetooth*. Lo sviluppo della *web-App* è basato sul *framework Ionic*, un *toolkit* per sviluppare *App* multipiattaforma web, iOS e Android in JavaScript, in grado di far interagire l'*App* a basso livello con la sensoristica *bluetooth* e le interfacce di posizionamento GNSS dello smartphone (Fig. 5.1) e di offrire la possibilità di un utilizzo della *web-App* in assenza di connessione dati mediante la configurazione di una modalità off-line *Progressive Web App*.

La *web-App* sviluppata è stata pensata per un utilizzo nell'ambito delle operazioni di martellata forestale, ovvero di censimento degli alberi da selezionare per il taglio. L'utente può gestire più operazioni di martellata, chiamate genericamente rilievi, ed in ciascuna di esse può inserire una lista di piante specificando le caratteristiche principali quali specie e diametro. L'utente è facilitato nelle sue operazioni tramite diversi automatismi (Fig. 5.2):

- la posizione di ogni singolo albero, a bassa precisione derivata da *single fix*, è memorizzata in automatico e può essere usata per elaborazioni GIS (Geographical Information System) successive;
- l'utente può inserire i dati della pianta con un tastierino numerico virtuale ed è facilitato dal riconoscimento vocale della dettatura della specie;
- l'utente può effettuare l'inserimento del diametro di una pianta tramite lettura automatica da cavalletto elettronico collegato via *bluetooth*;
- le statistiche forestali rilevanti sugli alberi inseriti vengono calcolate automaticamente in tempo reale grazie alla possibilità di inserire modelli per la stima dell'altezza e del volume in funzione del diametro della pianta;
- i dati rilevati vengono trasmessi e archiviati in automatico in uno spazio riservato all'utente su piattaforma *cloud* e possono essere letti e scaricati da altri dispositivi.

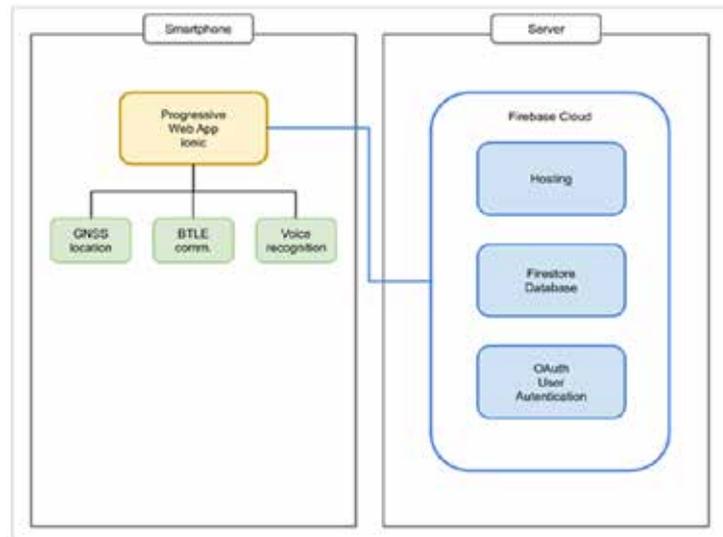
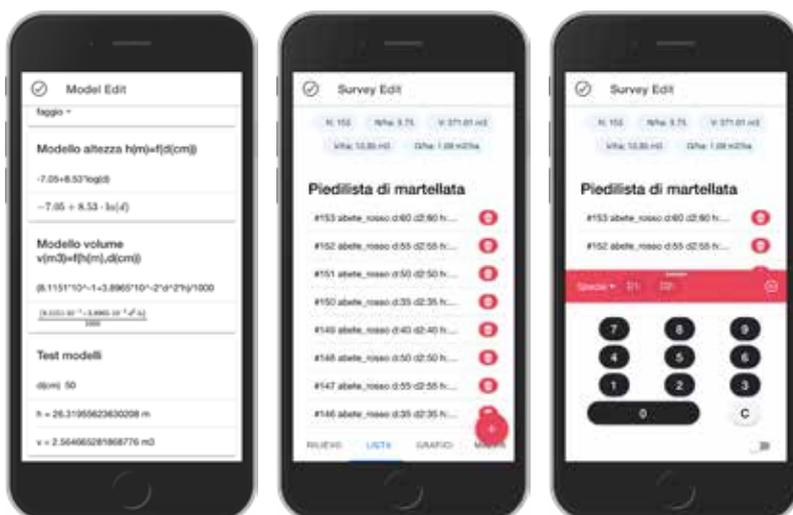


Figura 5.1. Struttura schematica della *web-App* per le operazioni di martellata forestale (immagine: Corrado Costa)

Il *web-gis* è implementato attraverso le funzionalità di gestione del dato di posizionamento proprie del *framework Ionic* e la localizzazione geografica delle piante inserite avviene mediante *single fix* GNSS del ricevitore presente sul dispositivo. La gestione delle mappe e della visualizzazione dei dati geografici avviene mediante libreria open-source *Openlayers*.

L'applicativo permette la dettatura vocale dei nomi delle specie selezionate per il rilievo. Il riconoscimento avviene mediante l'utilizzo della libreria *TensorFlow-JS* in grado di eseguire i modelli sviluppati nel progetto (Ortenzi et al. 2021). Il riconoscimento non si avvale di librerie o elaborazioni su server esterni ed avviene completamente off-line lato *client* sul dispositivo dell'utente.

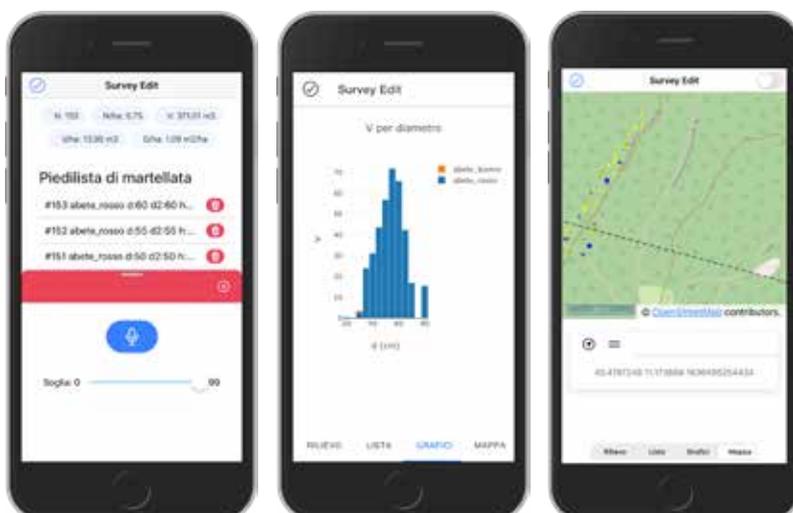
L'applicativo è in grado di ricevere dati da dispositivi connessi secondo protocollo BLE (*Bluetooth Low Emission*). In particolare, è implementata la lettura attraverso protocollo BLE del diametro mediante il cavalletto elettronico *open-source* sviluppato dal CREA (Fig. 5.3).



Definizione di modelli personalizzati per la stima dell'altezza e del volume

Lista delle piante martellate con stime di area basimetrica e volume cavallettato

Interfaccia per l'inserimento manuale dei dati: specie e singolo o doppio diametro



Interfaccia per la dettatura con riconoscimento vocale della specie e lettura diametro da cavalletto elettronico

Visualizzazione automatica della distribuzione del volume per classe diametrica e specie

Mappa con localizzazione GNSS delle piante rilevate

Figura 5.2. Web-App per le operazioni di martellata forestale: alcuni esempi di interfaccia visualizzabili su *smartphone* o *tablet* (immagini: Corrado Costa)

Il cavalletto elettronico forestale sfrutta il principio di misurazione attraverso un sensore laser di tipo *TOF* da 940 nm. L'elettronica di controllo è costituita da *Arduino BLE 33 sense* che ha la caratteristica di esser dotata di BLE e sensoristica varia, tra cui un accelerometro a 3 assi, che è impiegato come livella per aiutare, laddove è necessario, a migliorare la misura del diametro della pianta. Il dispositivo è dotato di un display per il controllo della misura rilevata e di una livella. Per comunicare con l'*App* mobile viene utilizzato un profilo *GATT* (*Bluetooth Generic Attribute Profile*) attraverso cui vengono inviate le misure e altri attributi necessari al dialogo tra cavalletto e *smartphone*.



Figura 5.3. Particolare del cavalletto elettronico *open-source* sviluppato dal CREA (foto: Corrado Costa)

5.2. MAPPATURA DI VARIABILI FORESTALI A SCALA DI AZIENDA E A LIVELLO DI PARTICELLA FORESTALE

La redazione dei piani di gestione forestale richiede informazioni ad alta risoluzione delle caratteristiche dei soprassuoli forestali, come ad esempio l'altezza degli alberi, la struttura verticale, il volume legnoso, la biomassa o il monitoraggio di microhabitat come gli alberi di grandi dimensioni.

Le tecnologie di telerilevamento (*RS*) (vedi § 3.7), che forniscono informazioni geospaziali ad alta risoluzione, sono sempre più cruciali per migliorare misure, azioni e processi altamente ripetibili nella gestione forestale sostenibile (Chirici et al. 2012). Tra tutti i sensori disponibili, quelli ottici, in grado di ricavare immagini della superficie terrestre, sia in colori visibili (*RGB*), sia utilizzando la porzione dell'infrarosso (*NIR*), sono considerati essenziali per monitorare diversi indicatori di gestione forestale sostenibile come lo stato di salute dei soprassuoli e se le immagini vengono acquisite per via fotogrammetrica (vedi § 3.7.1)

possono fornire informazioni tridimensionali.

Per la derivazione di mappe delle principali variabili (ad esempio, volume legnoso e biomassa) a scala di azienda le metodologie descritte nel paragrafo § 4.1 sono applicabili utilizzando come dato di partenza le ADS rilevate nell'area di interesse. In questo paragrafo si approfondiranno soprattutto tematiche riguardanti l'utilizzo di dati ad alta risoluzione acquisiti da drone (detto anche *UAV*, *Unmanned Aerial Vehicles* o *SAPR*, Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto) di tipo fotogrammetrico (vedi § 5.2.2) e *LiDAR* (vedi § 5.2.3), che consentono di aggiornare le mappe di indicatori di gestione forestale sostenibile in modo accurato e ad una scala di dettaglio spaziale almeno pari a quella dell'ADS o per singolo albero.

5.2.1. Acquisizione delle aree di saggio

Nel caso di *App* a scala di azienda è possibile effettuare un campionamento nell'area di interesse secondo disegni campionari, simili a quelli utilizzati per gli inventari forestali, ad esempio il “*tessellation stratified sampling scheme*” (Barabesi et al. 2012). Questo schema di campionamento prevede di dividere l'area forestale di interesse secondo una griglia, a maglia quadrata o esagonale, in cui le maglie della griglia hanno area uguale e di localizzare una ADS in maniera casuale all'interno di ciascuna maglia della griglia (Fig. 5.4). L'area di saggio dovrà poi essere raggiunta e materializzata a terra: i rilevatori devono aver cura di acquisire con un ricevitore GNSS ad alta precisione il centro della ADS, in modo tale da poter permettere di applicare un approccio *area-based* correlando i dati rilevati a terra con i dati telerilevati (vedi § 4).

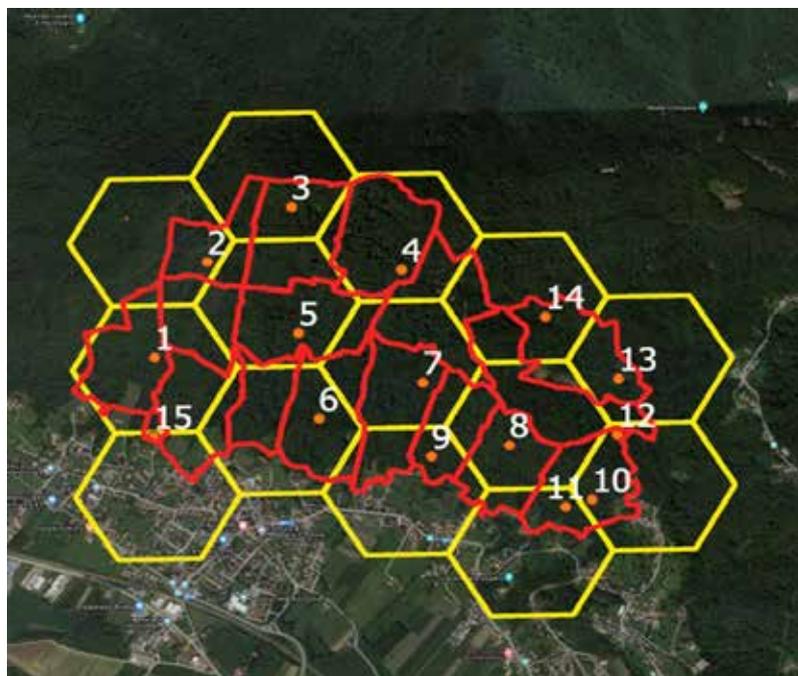


Figura 5.4. Esempio di disegno campionario: in rosso, le particelle forestali; in giallo, la griglia esagonale in cui ogni esagono ha lato di 500 m; in giallo, il centro, localizzato in modo casuale, delle aree di saggio da raggiungere in campo dalle squadre di rilievo (immagine: Francesca Giannetti)

5.2.2. Dati fotogrammetrici da drone

I droni dotati di fotocamere sono in grado di acquisire immagini aeree con risoluzione a terra centimetrica (3-10 cm) ed eseguire voli automatici, grazie ai sistemi di navigazione satellitari e all'intelligenza artificiale. Con l'avvento della fotogrammetria *SfM* (vedi § 3.6.3), è anche possibile elaborare immagini acquisite da SAPR in maniera semi-automatica e derivare informazioni sulla superficie forestale 2D (ortofoto) e 3D (nuvole di punti fotogrammetriche e DSM) utili per stimare, predire e mappare molti indicatori di gestione forestale. Peraltro, le limitazioni imposte dal Regolamento di volo *UAV* non consentono di sfruttare appieno le potenzialità tecniche di questi strumenti. Infatti, è usualmente consentito operare solo in modalità di volo *VLOS* (*Visual Line Of Sight*) mantenendo il contatto visivo con il drone da parte del pilota. Questa modalità di volo in campo forestale a volte risulta difficilmente da mantenere. Tuttavia, tramite permessi autorizzativi richiesti all'autorità nazionale per l'aviazione civile (ENAC), il nuovo regolamento UE sul pilotaggio degli *UAV* ha finalmente aperto la possibilità di pilotare gli *UAV* anche in modalità *BVLOS* (*Beyond Line Of Sight*) (la capacità di guidare un *UAV* oltre la linea di vista del pilota) aumentandone così la possibilità di utilizzo. Gli *UAV* ad ala fissa hanno una maggior efficienza nell'acquisizione di grandi superfici (15 ha min⁻¹) rispetto ai rotori, ma hanno un costo elevato. Gli *UAV* rotori possono decollare facilmente anche da una strada forestale, ma l'efficienza del rilievo è più bassa. Gli *UAV* più utili per l'impiego in campo forestale sono quelli ibridi (decollo come rotore e volo come un drone ad ala fissa) che consentono di poter decollare ovunque come i rotori, mantenendo l'efficienza del rilievo di un *UAV* ad ala fissa su grandi superfici (Fig. 5.5).



Figura 5.5. Esempi di UAV. A: drone multicottero con sensore multispettrale e RGB a basso costo, B: drone multicottero con sensore multispettrale, C: drone multicottero con sensore *LiDAR* a terra, D: drone ad ala fissa con sensore RGB e multispettrale, E: drone multicottero con sensore *LiDAR* in volo, F: drone ad ala fissa con decollo verticale con sensore RGB e multispettrale (immagini: Francesca Giannetti)

I dati derivanti dai SAPR fotogrammetrici dotati di camere RGB o multi-spettrali sono ortofoto ad altissima risoluzione (<10 cm), nuvole di punti della superficie (40/100 punti m²) e DSM (10-50 cm) che possono essere utilizzati per molte applicazioni (Fig. 5.6 e 5.7), quali:

- mappatura dei tipi forestali;
- aggiornamento e/o realizzazione del particellare;
- aggiornamento dei dati aziendali, su tagli e/o eventi perturbativi: i SAPR possono essere utilizzati secondo le esigenze; quindi, possono eseguire voli su determinate aree al fine di aggiornare gli interventi attraverso la delimitazione delle tagliate e/o individuare aree danneggiate da insetti, vento ecc.;
- rilevazione di incendi boschivi: in questo ambito i SAPR possono essere utilizzati per delimitare le aree percorse da incendio e per aggiornare il catasto degli incendi; questo consente di misurare soltanto alcuni punti *GCP* (*Ground Control Points*) da parte degli operatori a terra e di ricavare informazioni geografiche precise dell'area incendiata; le ortofoto ad infrarosso, derivate dalla camera *NIR* possono essere utilizzate anche per mappare la severità degli incendi attraverso indici di vegetazione;
- stima e mappatura di variabili forestali come volume legnoso, biomassa ed indici strutturali: le nuvole di punti fotogrammetriche normalizzate con rilievi *LiDAR* preesistenti e/o CHM ibridi possono essere utilizzate con approccio *area-based* (correlando variabili misurate a terra in ADS con quelle derivate dai rilievi *LiDAR*) per derivare le mappe su tutta la superficie di interesse;
- monitoraggio di restrizioni legali ed eventuali violazioni/infrazioni; in caso di violazioni e infrazioni sui diradamenti e/o altri tipi di interventi selvicolturali possono essere impiegate ortofoto e nuvole di punti derivanti da rilievi SAPR fotogrammetrici;
- individuazione di imposti per le operazioni forestali e piazzali di deposito e stoccaggio del legname;
- individuazione di percorsi naturalistici;
- mappatura di indici di biodiversità, attraverso approcci di segmentazione delle ortofoto 2D e mappatura con approccio *area-based* di indicatori strutturali (Fig 5.7);
- mappatura dello stato della chioma, attraverso acquisizioni ripetute che consentono di mappare gli indici di vegetazione a grande scala (Fig. 5.8).

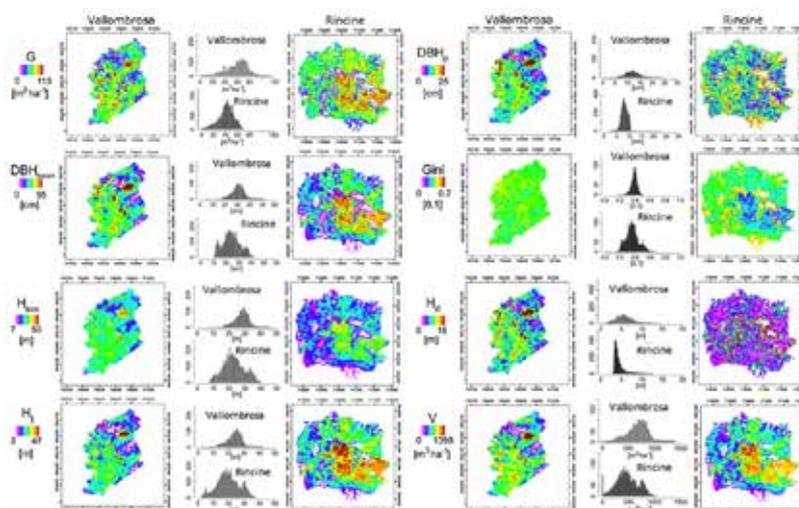


Figura 5.6. Esempio di mappatura di indici strutturali con dati da drone sulla foresta di Rincine e di Vallombrosa. G: area basimetrica, $DBH\sigma$: deviazione standard dei diametri, DBH_{mean} : diametro medio di area basimetrica, GINI: indice di diversità diametrica, H_{dom} : altezza dominante, $H\sigma$: deviazione standard delle altezze, HL = altezza di Lorey, V: provvigione legnosa (fonte: Giannetti et al. 2020b)

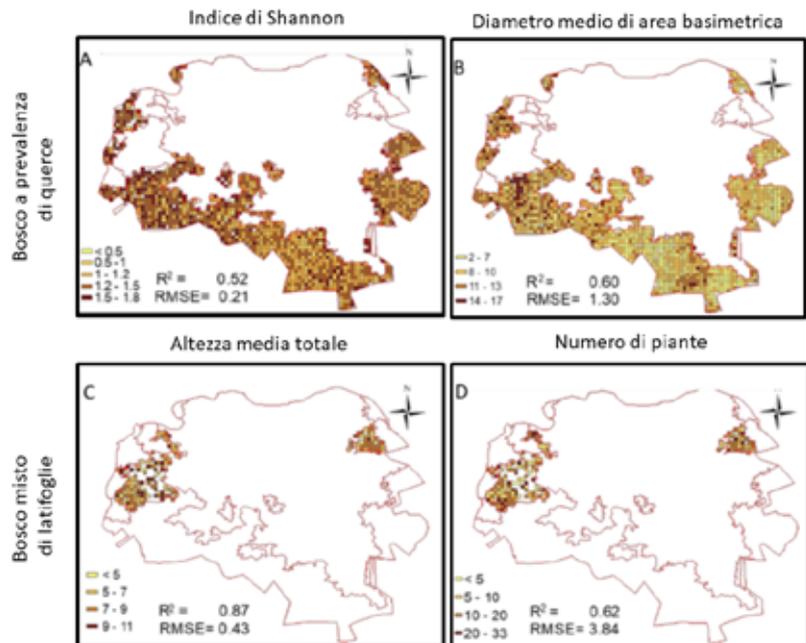


Figura 5.7. Esempio di mappatura di indici di biodiversità con dati da drone per una porzione dell'aera SIC e ZPS di Monte Venere (fonte: Bagaram et al. 2018)



Figura 5.8. Esempio di area defogliata mappata da drone con camera RGB (immagine: Francesca Giannetti)

5.2.3. Dati da drone con laser scanner

I dati acquisiti da drone *LiDAR* possono essere utilizzati come quelli acquisiti da aereo (vedi § 3.7). Nella figura 5.9 viene riportato il dettaglio del *workflow* utile a generare la mappa del volume legnoso e della biomassa a scala di azienda estraendo utilizzando i dati da drone dotato di sensore *LiDAR*.

Una limitazione all'utilizzo degli *UAV* dotati di micro-*LiDAR* è il costo della strumentazione: tuttavia, esistono aziende di consulenza topografica e forestale dotate di questi strumenti che eseguono voli conto-terzi (con il prezzo che varia in funzione delle giornate di lavoro necessarie per eseguire il rilievo e l'accidentalità dell'area).

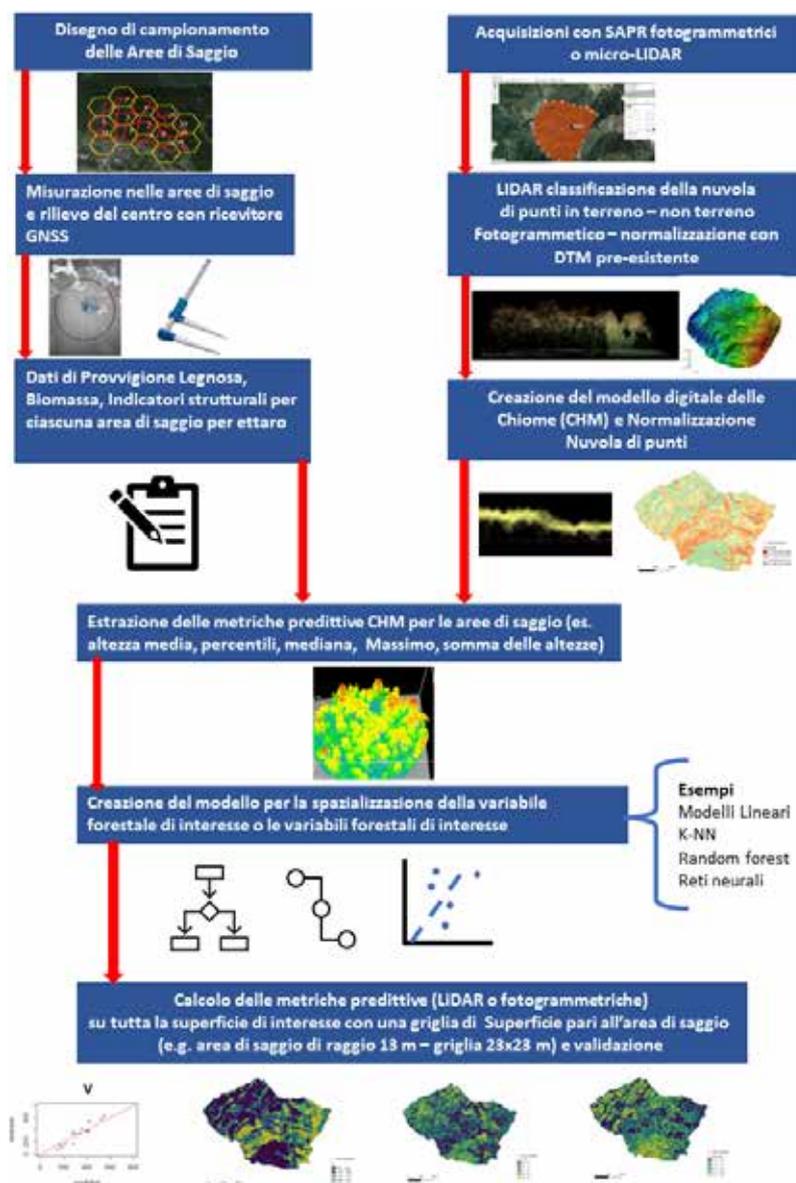


Figura 5.9. Schema dell'approccio *area-based* applicato a scala aziendale con dati *LiDAR* acquisiti da drone (immagine: Francesca Giannetti)

5.2.4. Singolo albero - Individual Tree Detection

Il rilevamento individuale degli alberi (*Individual Tree Detection - ITD*) consente di determinare le variabili di interesse a scala di singolo albero (come il volume, area basimetrica, copertura della chioma e biomassa). Solitamente, è possibile applicare un approccio *ITD* quando la nuvola di punti *LiDAR* di cui si dispone è ad altissima densità (>10 punti m^{-2}), acquisita da *LiDAR* portato su aereo/drone e/o da *LiDAR TLS* o *PLS* (vedi § 3.7.2).

La procedura *ITD* prevede di segmentare la nuvola di punti in singoli alberi (Fig. 5.10 - Fig. 5.11) e derivare, sulla base della nuvola di punti, le grandezze di interesse (diametro, altezza, parametri della chioma, sezioni del fusto e dei rami grossi). Sulla base della segmentazione della nuvola in singoli alberi e sulla base dei valori delle grandezze automaticamente estraibili è possibile anche calcolare indici di biodiversità e strutturali.

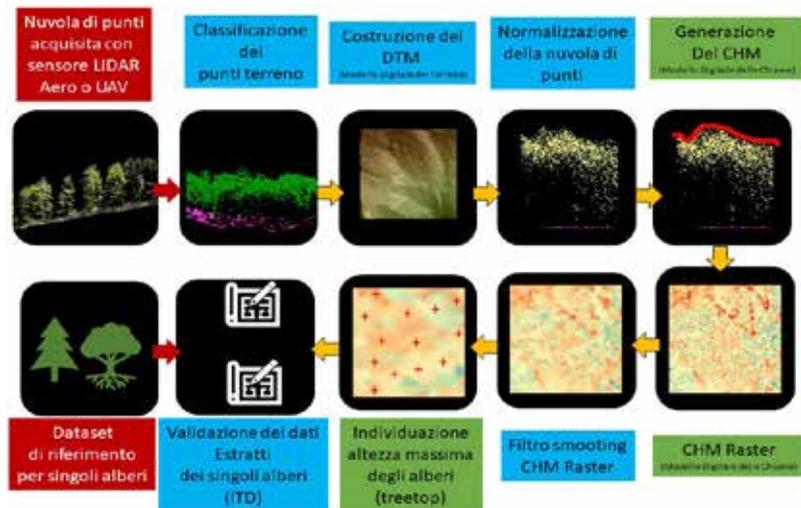


Figura 5.10. Flusso di lavoro nell’approccio *ITD* (fonte: Mohan et al. 2021, modificato)

L’approccio *ITD* funziona meglio in boschi di conifere, perchè nel caso di boschi di latifoglie o boschi misti l’approccio di segmentazione può risultare difficile. Esistono vari pacchetti di analisi, soprattutto sviluppati sulla base dei linguaggi di programmazione R e Python, che consentono l’accesso agli algoritmi di segmentazione e a funzioni di elaborazione.

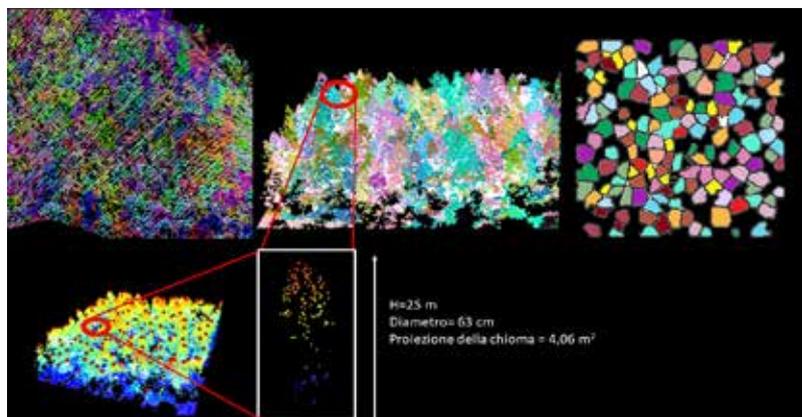


Figura 5.11. Segmentazione della nuvola di punti *LiDAR* acquisita da aereo per la quantificazione dei parametri dendrometrici (ampiezza della chioma, diametro del fusto a petto d’uomo, altezza del fusto) dei singoli alberi in un soprassuolo forestale (immagine: Francesca Giannetti)

5.3. PIANIFICAZIONE E PROGETTAZIONE DELLE INFRASTRUTTURE FORESTALI

L'applicazione di tecnologie digitali e di sistemi di supporto alle decisioni favorisce le azioni di monitoraggio, pianificazione e gestione della viabilità forestale, consentendone l'ottimizzazione, con conseguenti effetti positivi sulle diverse funzioni svolte dalla rete di strade forestali, e la riduzione della superficie forestale perturbata durante le operazioni di raccolta del legno.

5.3.1. Rilievo della viabilità

I sistemi tradizionali di rilievo della viabilità forestale, onerosi, con un grado di precisione limitato e generalmente caratterizzati da un livello informativo ridotto, possono essere sostituiti da sistemi più efficienti che utilizzano database collegati a cartografia digitale. In particolare, l'introduzione di dati *LiDAR* ha stimolato l'interesse per la mappatura dei tracciati e delle strade forestali (Ferraz et al. 2016). I modelli digitali del terreno a risoluzioni elevate (ad esempio 0,5x0,5m) possono essere impiegati per identificare in modo semi-automatico la presenza di viabilità sotto copertura. Questa opportunità risolve le difficoltà, e in alcuni casi l'impossibilità, di digitalizzare le strade sotto copertura con la tecnica della fotointerpretazione. Il principale limite è che non sempre la risoluzione è adatta a rappresentare in modo corretto la geometria della strada e, in alcuni casi, la bassa densità dei punti a terra del dato *LiDAR* non permette una accurata restituzione del modello digitale (Craven et al. 2014) (Fig. 5.12).

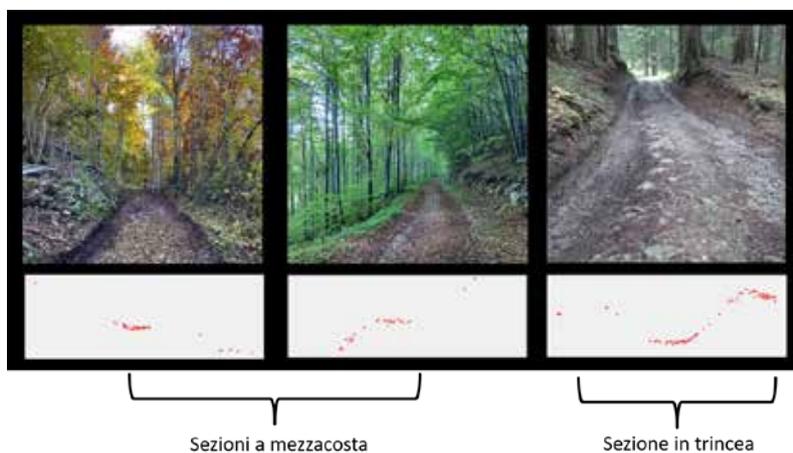


Figura 5.12. Distribuzione punti *LiDAR* (in rosso) a terra utilizzati per la ricostruzione del DTM. La distribuzione è influenzata da vari fattori, tra cui la densità della chioma degli alberi che filtra l'arrivo dell'impulso laser al suolo (immagine: Stefano Grigolato)

La comparazione tra rilievo classico con strumentazione topografica e l'estrazione dal DTM evidenzia in genere una certa accuratezza di questa ultima opzione, sebbene non sempre sufficiente per l'impiego ai fini della progettazione di interventi di manutenzione straordinaria come allargamenti e profilazione delle scarpate (Fig. 5.13).

Considerando il livello descrittivo degli attributi della viabilità, il sistema

di rilievo tradizionale a terra può essere migliorato e facilitato da rilievo con GNSS, che permette la rapida organizzazione e archiviazione dei dati prima, e la consultazione e visualizzazione dei dati di interesse poi, anche sotto forma di sistemi di navigazione su *smartphone* e *tablet*, oltre a garantire il facile e rapido aggiornamento degli stessi. I dati rilevati permettono la classificazione delle strade, a seconda delle caratteristiche costruttive riscontrate, ad esempio secondo quanto riportato dall'art. 3 del D. Intern. n. 563734 del 28/10/2021 che definisce i parametri e le categorie per la classificazione della viabilità forestale. Le strade possono essere catalogate anche a seconda della tipologia di servizio che offrono, ad esempio se sono ad esclusivo servizio del bosco, o pastorali, o miste, oppure possono essere classificate a seconda della funzionalità in ottica di difesa dagli incendi boschivi.

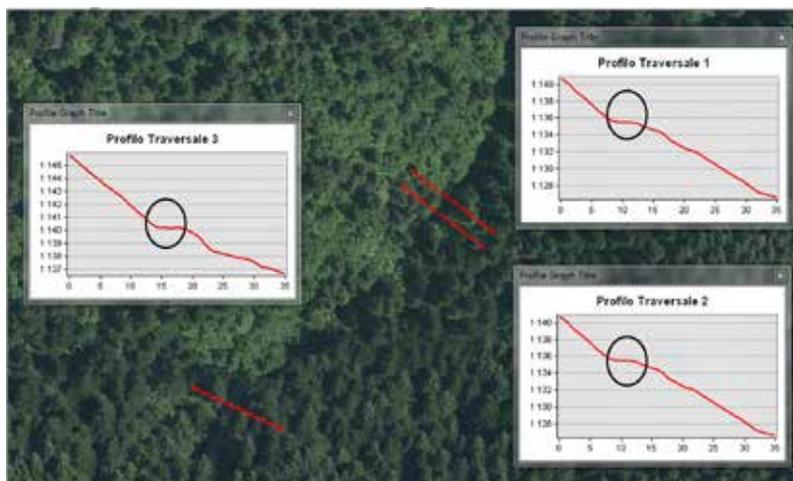


Figura 5.13. L'estrazione dei profili trasversali della viabilità sotto copertura da DTM ad alta risoluzione evidenzia come sia fattibile la ricostruzione di massima, sebbene con un dettaglio non sempre sufficiente per la progettazione di interventi di manutenzione straordinaria, come allargamenti e profilazione delle scarpate (immagine: Stefano Grigolato)

Nell'ambito del progetto europeo FORCIP+ (www.forcip.eu) è stato messo a punto un sistema di rilievo, archiviazione e navigazione della rete di viabilità forestale. A livello di rilevazione della viabilità esistente è stato sviluppato, sulla base di GeoODK (una *App* per dispositivi Android), un sistema integrato di rilievo della traccia e di archiviazione dei dati, mediante una scheda di rilievo editabile e integrata nella stessa *App*, che permette l'archiviazione di informazioni non solo delle caratteristiche del tracciato (lunghezza, pendenza, raggi di curvatura, ecc.) ma anche delle opere connesse (piazzole, imposti, opere d'arte, ecc.) (Fig. 5.14). Questa *App* rende più veloce il processo di rilievo e la successiva archiviazione del dato, che viene automaticamente inserito in un geodatabase dedicato, reso disponibile su *web-gis* precedentemente predisposto (Fig. 5.15). Inoltre, è stato predisposto un sistema di navigazione dedicato una sorta di Google Maps per la viabilità forestale - utilizzabile su *smartphone* e *tablet* in dotazione alle squadre antincendio boschivo. La struttura può essere facilmente replicata e modificata secondo le esigenze dei contesti in cui si opera. Questo sistema facilita il rilievo, richiedendo comunque la presenza di un operatore che fisicamente percorra tutte le strade, rilevando la traccia e prendendo nota delle caratteristiche della stessa.

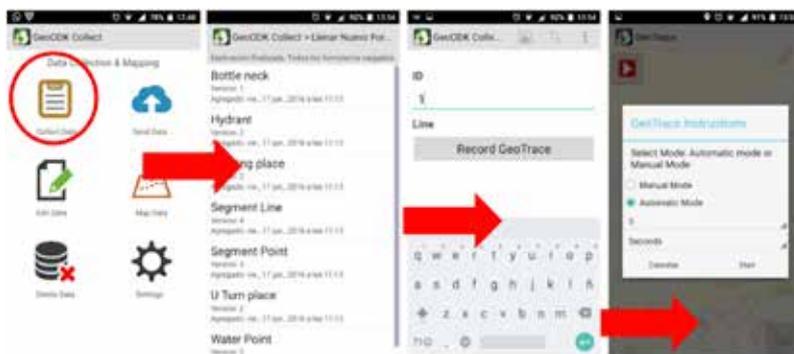


Figura 5.14. Struttura della *App* per il rilievo della viabilità forestale, con le relative infrastrutture complementari (piazzole, punti di inversione, ostacoli) e altri punti di interesse (idranti, punti per il rifornimento idrico dei mezzi antincendio, etc.) (immagine: Andrea Laschi)

5.3.2. Accessibilità

La valutazione del grado di accessibilità di un comprensorio forestale in relazione alla viabilità presente (spesso tradotto col termine inglese *openness*) influenza direttamente le fasi successive di pianificazione e progettazione degli interventi di miglioramento e potenziamento della rete viabile. Per questo tipo di analisi è fondamentale che si adottino criteri oggettivi che stabiliscano in modo preciso e funzionale la definizione di “area servita”; in questo modo, si ottiene una suddivisione del territorio che permette di pianificare correttamente lo sviluppo della viabilità. I fattori più utilizzati ai fini dell’analisi della accessibilità sono la pendenza, l’accidentalità e la distanza dalla strada (Hippoliti 1976), che possono poi essere tradotti nella valutazione del tempo di accesso per gli operatori forestali, oppure nella effettiva capacità di un dato mezzo di poter raggiungere ed esboscare il materiale legnoso nelle aree limitrofe alla strada. Peraltro, esistono attività diverse dalle utilizzazioni forestali, come ad esempio la lotta antincendio o il soccorso a persone in difficoltà, per le quali il grado di accessibilità viene valutato considerando esigenze diverse e quindi sulla base di criteri differenti (Laschi et al. 2019, Ciesa et al. 2014).

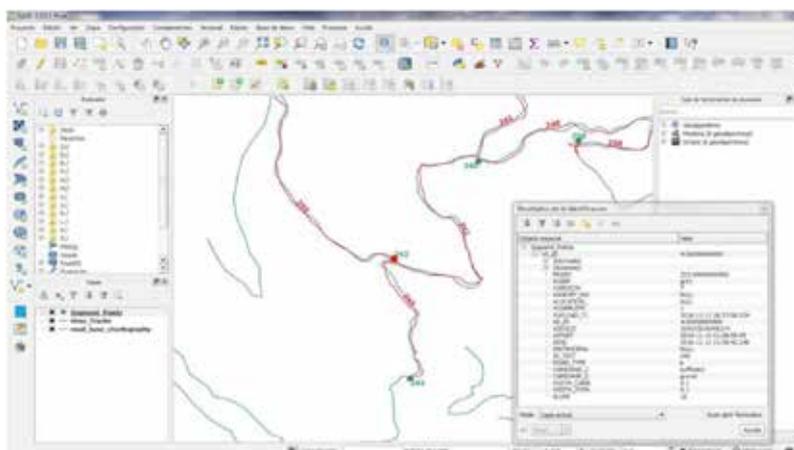


Figura 5.15. Rappresentazione *GIS* della viabilità forestale rilevata con GeoODK attraverso il quale è possibile visualizzare gli attributi delle strade forestali, delle opere accessorie (piazzole, punti di inversione, ostacoli) e degli altri punti di interesse (idranti, punti per il rifornimento idrico dei mezzi antincendio, etc.) (immagine: Andrea Laschi)

La disponibilità di dati telerilevati e la possibilità di gestirli con software *GIS* ha permesso di automatizzare le analisi di accessibilità, che una volta erano realizzate manualmente su cartografia cartacea. Tra i metodi sviluppati si segnalano quello della “*Frazione di distanza massima*” (Laschi et al. 2016) e l’*RDBM (Real Distance Buffer Method)* (Picchio et al. 2018, Picchio et al. 2019a): questi metodi utilizzano procedure leggermente diverse, partendo però dagli stessi strati informativi, per giungere sostanzialmente allo stesso risultato. Nel primo caso i parametri utilizzati per valutare l’accessibilità garantita dalla rete viabile fanno riferimento a distanza e dislivello dalle strade (tempo di accesso dell’operatore in bosco), nel secondo caso il grado di accessibilità è legato alla distanza reale (non quella topografica) dalla strada entro la quale determinati mezzi per l’esbosco riescono ad operare.

Entrambi i metodi hanno come dati in input il DTM e la *raster* della rete viabile forestale dell’area in esame, rilevata secondo quanto riportato nel paragrafo 5.3.1. A partire da questi due strati, vengono create la carta delle pendenze e, mediante l’approccio della mappa di costo (*cost distance* e *r.cost* nei due casi in esame), si ottengono le aree accessibili secondo le definizioni applicate.

L’output che si ottiene è riportato in Fig. 5.16 e in Fig. 5.17: nel primo caso si nota che è presente una classificazione intermedia di aree “scarsamente servite”, ottenuta nello stesso modo descritto ma utilizzando come limite distanze dalla strada più ampie; nel secondo caso le diverse aree accessibili sono riferibili a sistemi di esbosco diversi. Sulla base di queste informazioni è quindi possibile avere una visione chiara del grado di accessibilità del comprensorio in esame, e utilizzandole per una pianificazione forestale razionale ed efficiente.

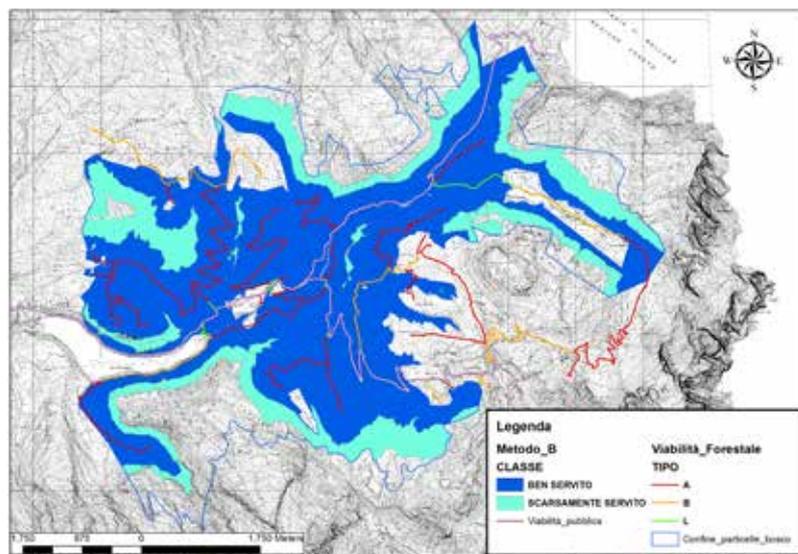


Figura 5.16. Valutazione dell’accessibilità col metodo “frazione di distanza massima” (immagine: Andrea Laschi)

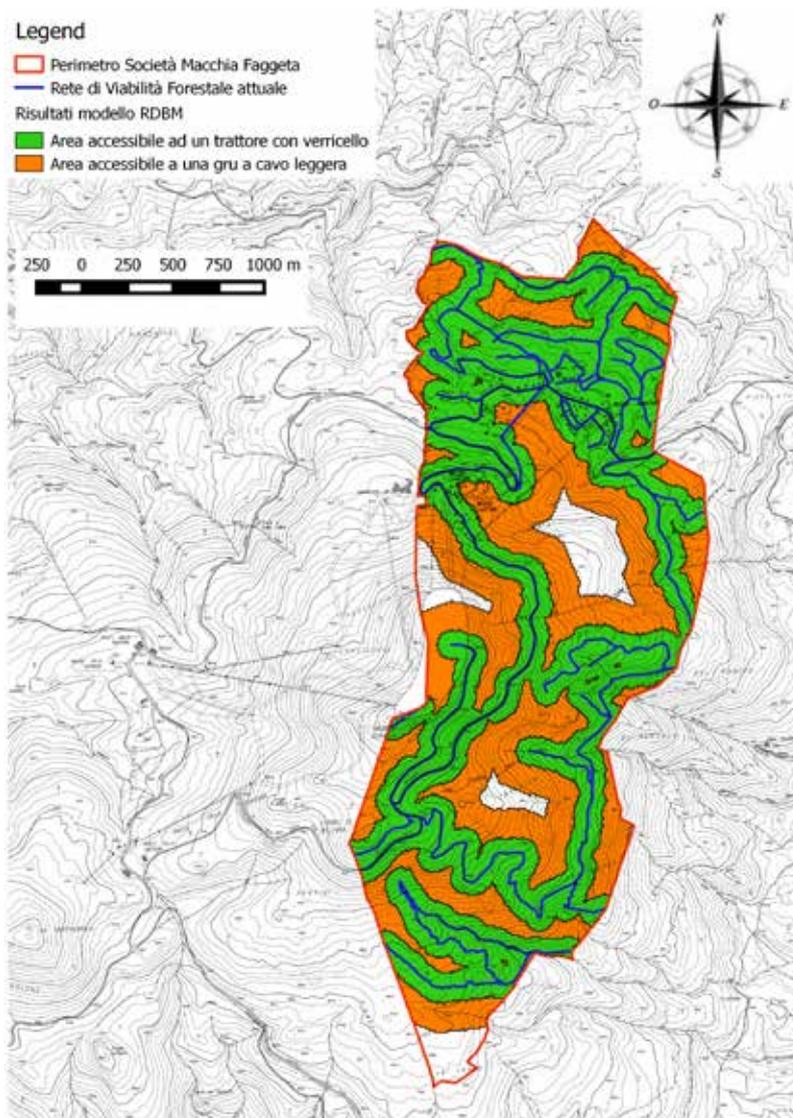


Figura 5.17. Aree accessibili al verricello (in verde) e alla gru a cavo leggera (in arancione) applicando il metodo *Real Distance Buffer Method* (immagine: Andrea Laschi)

5.3.3. Pianificazione dei tracciati di esbosco

Per aiutare il tecnico nella valutazione delle necessità di adeguamento della rete viabile, nella definizione della tipologia di strada da realizzare, nonché nella definizione delle sue dimensioni e caratteristiche, sono stati sviluppati vari sistemi di DSS (vedi § 5.7). Nel percorso di pianificazione è importante identificare, ad esempio tra le zone definite come non accessibili, quelle nelle quali vi sia effettivamente l'esigenza di migliorare la rete viabile. Un supporto a tale valutazione è l'indicatore "valutazione di esigenza" sviluppato dalla Provincia Autonoma di Trento che, sulla base di dati digitalizzati provenienti dai diversi piani di gestione forestale e sull'applicazione di Analisi Multi-criterio (MCDM) e *Analytic Hierarchy Process (AHP)* (Saaty 1977), fornisce un'indicazione a livello di singola particella forestale delle esigenze di viabilità (Laschi et al. 2016) (Fig. 5.18). L'*AHP* è una tecnica di analisi multicriteriale utile nell'effettuazione di una scelta quando questa è determinata da più criteri che non hanno la stessa importanza relativa: l'approccio *AHP*, basandosi sulle opinioni di esperti del settore, general-

mente scaturite da appositi questionari sulla tematica di interesse, consente di attribuire un peso relativo ad ogni criterio influenzante la scelta mediante regole matematico-statistiche (Blagojević et al. 2019, Marčeta et al. 2020).

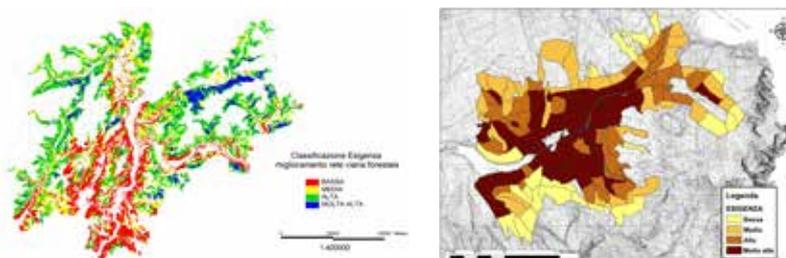


Figura 5.18. Esempio della restituzione cartografica della valutazione delle esigenze di viabilità nella Provincia Autonoma di Trento (sinistra), con dettaglio per il comprensorio di Paneveggio (destra) (immagine: Andrea Laschi)

Questo approccio tiene conto di fattori prevalentemente legati alla produzione di legno, come la classe di fertilità, la vocazione produttiva e il volume legnoso, ponderati tra loro mediante *AHP* secondo interviste a esperti del settore.

Altro indicatore utile per la pianificazione della viabilità, soprattutto nella fase di valutazione di miglioramenti della viabilità esistente, sono i flussi di legname che, in un arco temporale definito (come, ad esempio, la durata del piano di gestione forestale, vengono trasportati su ogni singolo tratto di strada). Anche questa è un'analisi implementabile su *GIS*, utilizzando algoritmi nati per il calcolo delle portate delle aste nei bacini idrografici e adattandoli ai flussi di legname. In questo caso, partendo da strati informativi legati alla viabilità esistente, al DTM e al particellare forestale, si ottiene uno strato informativo che permette di stimare quanti passaggi di mezzi pesanti (autocarri, autotreni o autoarticolati) sono effettuati su una determinata strada in un dato periodo di tempo (Fig. 5.19).

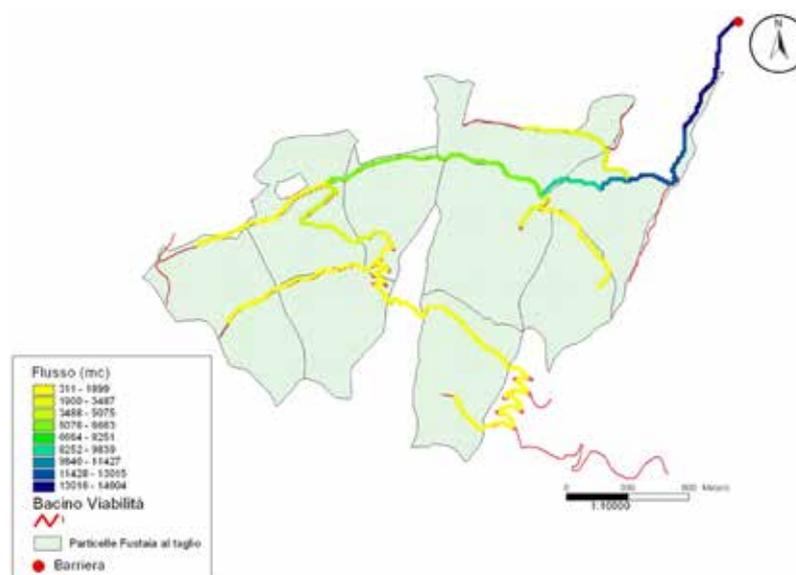


Figura 5.19. Esempio della valutazione dei flussi di legname nel comprensorio della Val di Sella (Trento), utile per pianificare interventi di miglioramento e di manutenzione mirati a superare e/o limitare le criticità emerse (immagine: Niccolò Brachetti Montorselli)

Una volta identificati i miglioramenti da fare, è necessario individuare i nuovi tracciati da realizzare. Con dati telerilevati di qualità e DTM affidabili, è possibile identificare possibili tracciati idonei che faciliteranno e velocizzeranno la fase di progettazione vera e propria. Un esempio è un apposito *plugin* chiamato *Forest Road Designer*, che ha come dato di partenza il DTM e uno *shapefile* riportante i punti che devono essere uniti dal tracciato ipotizzato: i due punti che devono essere uniti sono la fine di un segmento di viabilità esistente ed un punto interno all'area non servita che deve essere raggiunto dal nuovo ipotetico tracciato; *Forest Road Designer* restituisce il tracciato più breve tra i due punti evitando le zone con pendenza eccessiva (la pendenza massima affrontabile dal mezzo per il quale la strada/pista viene progettata e che deve essere inserita come parametro del modello di calcolo del tracciato); si possono inoltre indicare, mediante appositi *shapefile*, le aree da escludere dai nuovi tracciati, ad esempio isole di biodiversità o aree sensibili al compattamento.

Altri esempi simili, basati su algoritmi diversi ma sempre implementati su piattaforma *GIS*, sono utilizzati anche per scopi legati al miglioramento della fruizione turistica. Con l'aggiunta delle ipotesi di nuovi tracciati si arriva a coprire la totalità della superficie forestale dell'area studiata; sulla base di questo, il decisore può valutare se e quali interventi realizzare procedendo quindi con la fase di progettazione. Per supportare ulteriormente questa valutazione e quindi la scelta da operare, sempre su *GIS* si segnala il *plugin* "r.green.biomass" (vedi § 5.8, Garegnani et al. 2015) per *GRASS GIS*, che permette di stimare, utilizzando vari strati informativi, il valore di macchiatico di una particella forestale, considerando la viabilità e le tipologie di esbosco possibili. In particolare, partendo dal DTM e dalla viabilità presente, aggiungendo strati informativi relativa alla ripresa annuale, al tipo di governo e trattamento del bosco, all'accidentalità del terreno, alla presenza di ostacoli come fiumi e laghi e alle dimensioni medie dei fusti si ottiene il valore di macchiatico per ogni particella forestale, basato su un'ipotesi di esbosco calibrata sulla base dei dati inseriti. Sulla base di queste informazioni, è possibile creare scenari in cui, modificando la viabilità esistente, si valuta come varia il rendimento economico degli interventi previsti in un comprensorio, permettendo così di valutare comparativamente la sostenibilità economica di un dato intervento di miglioramento viario.

5.3.4. Progettazione della viabilità

La progettazione della viabilità forestale, ma anche della rete sentieristica, può avvantaggiarsi dell'impiego di DTM con risoluzione geometrica inferiore al metro (Grigolato et al. 2017). Questa risoluzione permette di ottenere una descrizione delle sezioni trasversali del terreno (intervallo tra una sezione e quella successiva anche di un metro) e impostare un progetto con elevata precisione nella determinazione dei volumi di scavo e riporto (Aruga et al. 2005, Contreras et al. 2012). Ciò consente di avere già nella fase di progettazione preliminare informazioni dettagliate sulla morfologia del terreno che possono aiutare nella scelta del tracciato e nella localizzazione dei punti obbligati, in particolare in contesti di elevata complessità del terreno (Yoshida et al. 2019). Questo dettaglio di informazione può essere di supporto anche nella redazione delle relazioni per le autorizzazioni relative al vincolo idrogeologico e paesaggistico con l'utilizzo anche dei CHM (vedi § 3.7.2.1).

Già nella fase di progettazione preliminare, con l'impiego di software di progettazione CAD o dedicati per la progettazione di strade è possibile avere una stima relativa dei volumi di scavo e riporto e il loro bilanciamento, aspetto di importanza rilevante nel caso di viabilità forestale in aree a rischio idrogeologico e con terreni instabili (Saito et al. 2013) (Fig. 5.20).

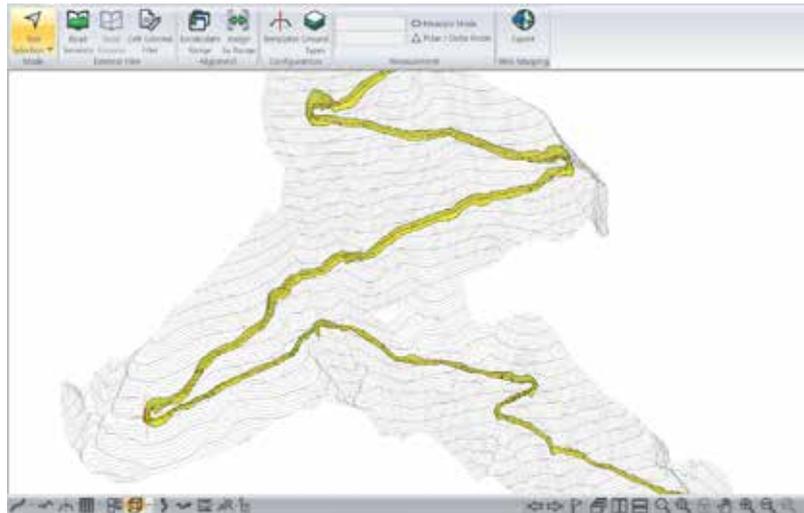


Figura 5.20. Progetto di strada forestale basato sull'impiego di software specifici (immagine: Stefano Grigolato)

Nella fase di progettazione esecutiva, che si avvale della verifica sul terreno con il tracciamento del tracciolino (che consiste in una linea guida spezzata che unisce punti appartenenti a curve di livello) e del riscontro sito-specifico sugli aspetti geologico-pedologici e, dove richiesto, per gli aspetti di conservazione e protezione degli habitat, l'impiego di modelli ad alta risoluzione permette di progettare in modo dettagliato le opere di sostegno e le opere per lo sgrondo delle acque.

Il vantaggio dell'impiego di DTM ad alta risoluzione può essere riassunto in tre aspetti:

- riduzione dei tempi per i sopralluoghi - l'elevata risoluzione digitale comporta un minor tempo da dedicare al rilievo del dettaglio del piano quotato e delle sezioni trasversali; il tecnico può quindi dedicare maggior tempo allo sviluppo di ipotesi alternative su base GIS;
- efficienza dei calcoli - l'elevata risoluzione comporta inoltre una accurata stima dei volumi di movimento terra e la possibilità di sviluppare tracciati ottimali in termini di bilancio dei volumi di scavo e riporto e quindi di ottimizzazione dei costi e migliore progettazione in termini idrogeologici;
- accuratezza degli elaborati di progetto - miglioramento del dettaglio degli elaborati tecnici, in particolare per sezioni trasversali, profilo longitudinale e planimetria; questo comporta inoltre un supporto valido per il collaudo di fine progetto.

Ulteriori applicazioni delle tecnologie ICT (vedi § 3.1) riguardano, ad esempio, l'impiego di escavatori dotati di dispositivi di posizionamento e sistemi di visualizzazione degli elaborati progettuali georeferenziati (Fig. 5.21): ciò permette all'operatore della macchina di conoscere con precisione (in funzione del sistema di posizionamento, della tipologia di correzione differenziale o non-differenziale e dall'ambiente operativo) la posizione e di verificare lo stato di avanzamento della costruzione, nonché di avere riscontro dell'attività da svolgere senza l'ausilio di allegati di progetto stampati. Lo stesso sistema gestionale integrato può permettere di tenere informato in tempo reale il direttore dei lavori dell'avanzamento del cantiere e consente di rendere più funzionale e chiara la comunicazione tra gli operatori.



Figura 5.21. Escavatore equipaggiato di sistema di posizionamento e sistemi di visualizzazione degli elaborati georeferenziati (immagine: Stefano Grigolato)

5.4. OTTIMIZZAZIONE DELLA PIANIFICAZIONE DELLE OPERAZIONI FORESTALI

5.4.1. Piano delle utilizzazioni

Il piano delle utilizzazioni (PU) è un elaborato che definisce il sistema (o i possibili sistemi) di utilizzazione forestale da applicare caso per caso. Esistono molteplici criteri da tenere in considerazione nella scelta di un dato sistema: la definizione rientra nel campo di applicazione dell'*MCDA* (*Multi-Criteria Decision Analysis*) (Zopounidis e Pardalos 2010). Aumentare il grado di oggettività delle scelte nelle utilizzazioni forestali è un tema tanto importante quanto complesso, ma le tecnologie ICT sono in grado di offrire un supporto efficace all'uso (Blagojević et al. 2019, Picchio et al. 2019b). La procedura *GIS-MCDA* per la scelta del sistema di utilizzazione forestale più idoneo si focalizza sulla scelta del sistema di esbosco, dal momento che nel contesto italiano le operazioni di abbattimento ed allestimento avvengono per la stragrande maggioranza in maniera semi-meccanica mediante l'utilizzo della motosega. D'altra parte, i vari passaggi sono ripetibili includendo anche come possibili soluzioni le applicazioni di *harvester* o *feller-buncher* per le operazioni di abbattimento ed allestimento.

La metodologia si basa sull'integrazione fra l'ambiente *GIS* e la teoria dell'*AHP*. Il primo passo consiste nella selezione delle possibili alternative tra i sistemi di esbosco applicati ed applicabili nel contesto operativo di riferimento. Il passo successivo prevede l'individuazione delle variabili da considerare nell'analisi, che riguardano aspetti topografici (ad esempio, pendenza, capacità portante del suolo, accidentalità etc.) e logistici (densità di viabilità, volume legnoso ritraibile, distanza di esbosco etc.). Questi criteri non sono legati solamente alle prestazioni produttive del cantiere di utilizzazione, ma fanno riferimento anche alle sfere ambientale e sociale della sostenibilità, come mostrato in Tabella 5.1.

Criterio	economia	ambiente	società
Pendenza (%)	✓	✓	✓
Distanza di esbosco (m)	✓	✓	✓
Capacità portante del suolo (kPa)	✓	✓	✓
Ripresa (m ³ ha ⁻¹)	✓		
Densità di viabilità (m ha ⁻¹)	✓	✓	✓
Accidentalità (%)	✓		✓

Tabella 5.1. Esempio di criteri per la scelta del sistema di esbosco in riferimento ai temi della sostenibilità

Il passo seguente consiste nell'applicazione della metodologia *AHP*, che va a stabilire un *ranking* di importanza fra i vari criteri influenzanti la scelta (Saaty 1980). La base dell'*AHP* è il confronto a coppie fra i criteri sulla base di una scala da 1 (stessa importanza) a 9 (dominanza assoluta). Gli algoritmi *AHP* convertono queste coppie di preferenze reciproche in valori numerici restituendo in output un peso relativo per ogni criterio insieme ad un coefficiente di consistenza. I dati di input per la metodologia *AHP* sono ottenuti sottoponendo appositi questionari ad esperti del settore. Più è alto il peso relativo di un criterio più questo riveste una maggiore importanza nella scelta del sistema di esbosco. Nelle applicazioni recenti, ad esempio, i risultati ottenuti per il *forwarder* evidenziano come a tutti i criteri sia stato attribuito lo stesso peso, eccezion fatta per la capacità portante del suolo che mostra un peso relativo prossimo al 29%. Ciò testimonia come gli esperti che hanno risposto al questionario pongano particolare attenzione alla limitazione dei danni al suolo, per sostenere un mezzo terrestre e pesante come il *forwarder*. Il passo successivo della procedura consiste nell'ottenere, in ambiente *GIS*, dati geospaziali per ognuno dei criteri applicati (un esempio in Fig. 5.22). I *raster* per ognuno dei criteri sono poi riclassificati, per ognuno dei possibili sistemi di esbosco, applicando classi di idoneità (ad esempio, valori da 1 a 5 con 1 bassa idoneità del sistema X per quel valore del criterio Y e 5 alta idoneità del sistema X per quel valore del criterio Y).

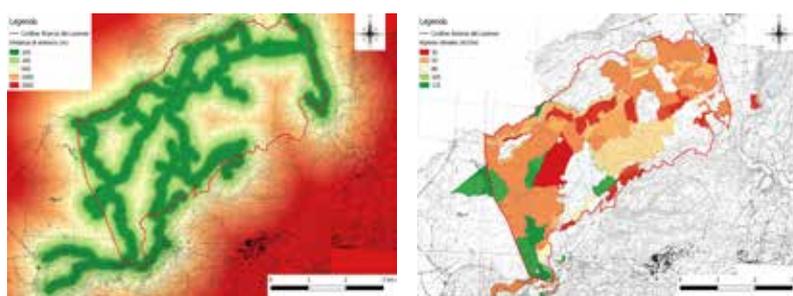


Figura 5.22. Sulla sinistra la mappa della distanza di esbosco, sulla destra la mappa del volume legnoso asportabile stimata per un'area di studio (immagini: Rodolfo Picchio)

Si applica quindi un overlay per ognuno dei sistemi di esbosco considerati andando a calcolare l'idoneità complessiva di ciascun sistema per ogni pixel del territorio sommando il valore di idoneità per ciascun criterio pesato per il proprio peso relativo scaturito dall'*AHP*. Si ottiene in questo modo una mappa di idoneità per ciascun sistema di utilizzazione che indica, in ogni pixel dell'area di interesse, quanto quel sistema è idoneo (Fig. 5.23).

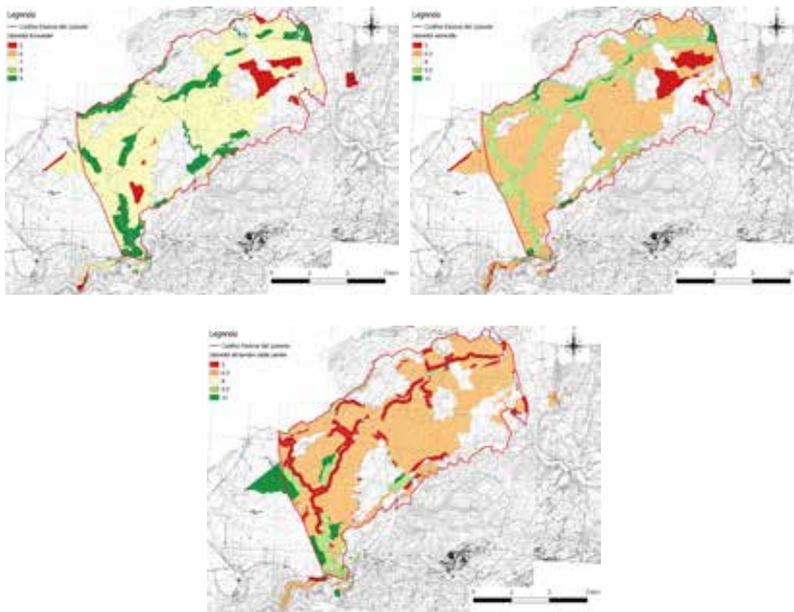


Figura 5.23. Mappe di idoneità per *forwarder* (alto a sinistra), verricello (alto a destra) e gru a cavo (basso centrale) (immagini: Rodolfo Picchio)

La procedura permette quindi di definire in maniera oggettiva il miglior sistema di esbosco per ciascuna particella forestale, estraendo le statistiche zonali (valore mediano di idoneità) per ognuno dei sistemi di esbosco considerati. Il sistema con il valore più alto in una data particella è il sistema più idoneo per quella particella. L'output che si ottiene è la mappa dei sistemi di esbosco del PU (Fig. 5.24).

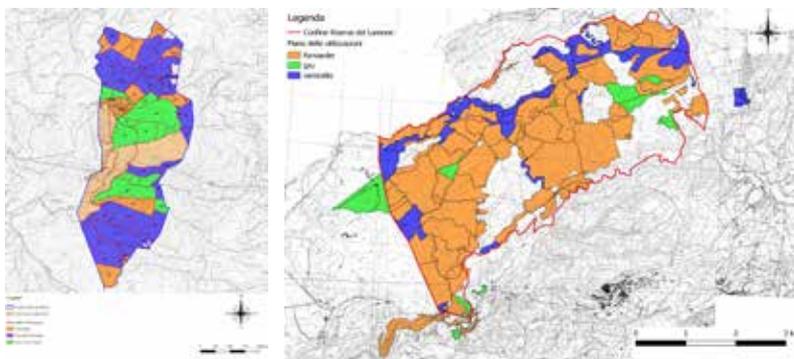


Figura 5.24. Esempio di piano delle utilizzazioni sviluppato con metodologia *GIS-AHP* (immagini: Rodolfo Picchio)

5.4.2. Pianificazione dei tracciati di esbosco

La pianificazione dei tracciati di esbosco è spesso effettuata lasciando all'operatore forestale la decisione su dove e come guidare il mezzo, con ovvie conseguenze sia sugli impatti che sulle condizioni di sicurezza per gli operatori (Picchio et al. 2020). D'altro canto, la realizzazione di questi tracciati ha costi relativamente elevati e comporta un impatto sull'ambiente, motivi per cui deve essere predisposta in modo razionale nel contesto in cui essi vengono realizzati. Dal DTM è possibile derivare informazioni dettagliate sulla morfologia del terreno, funzionali alla valutazione sia della mobilità sia dei percorsi delle macchine forestali (Sterenczak e Moskalik 2015), sia del profilo delle linee

di gru a cavo (Bont e Heinimann 2017). I CHM contribuiscono alla conoscenza sulla distribuzione spaziale delle altezze di chioma del popolamento forestale e della loro occupazione nello spazio, da cui è possibile determinare la posizione del singolo albero (almeno di quelli di massima dimensione) e stimare approssimativamente il diametro del fusto e l'altezza.

Il quadro concettuale della modellizzazione su base GIS può essere suddiviso in due parti. Nella prima, sono considerati parametri come la posizione degli alberi, l'accidentalità del terreno e la presenza di aree dove il traffico deve essere evitato (ad esempio, per la presenza di aree sensibili in termini di protezione e conservazione degli habitat o bassa capacità portante del suolo) per creare una mappa della transitabilità dell'area mediante un processo di riclassificazione *raster*. Nella seconda parte, si ricorre all'impiego del metodo del percorso a costo minimo (*least-cost path*) per individuare il miglior percorso in termini di tempo, tenuto comunque conto dei fattori tecnici limitanti come la massima inclinazione laterale e pendenza longitudinale fissati per una specifica configurazione delle macchine forestali impiegate.

Tramite supporto GIS e l'impiego di dati ad alta risoluzione è possibile analizzare e definire con precisione le ipotesi di lunghezza e orientamento delle linee di gru a cavo considerando il dettaglio del profilo del terreno e il dettaglio spaziale dell'altezza delle chiome ed eventualmente quello della distribuzione spaziale, se disponibile, dei singoli alberi e del loro volume legnoso. Questo approccio (Rizzi, 2012) permette di individuare l'orientamento ideale delle linee di gru a cavo, basandosi sulla predeterminazione di elementi come la localizzazione del punto di imposto e/o del punto di stazionamento della stazione motrice e l'area di intervento.

In ambito di pianificazione delle linee di gru a cavo, l'Istituto federale svizzero di ricerca forestale (WSL) ha sviluppato un plug-in per il software QGIS denominato SEILAPLAN (<https://seilaplan.wsl.ch/it/index.html>) che permette, avendo a disposizione un DTM o un profilo del terreno, di individuare in maniera automatica la posizione dei cavalletti in sistemi di gru a cavo a due o più funi. L'operatore deve inserire le coordinate o indicare graficamente la posizione dell'inizio e della fine del tracciato e il plug-in procede al calcolo della posizione ottimale dei cavalletti; numerosi sono i parametri che possono essere considerati per migliorare il tracciamento, fra questi: l'altezza della torretta, lo spazio minimale tra portante e suolo, l'altezza minima e massima dei cavalletti. Il *plug-in* opera il calcolo della traiettoria del carico con parametri della fune portante standard (peso medio del carico carrello compreso, peso per metro della fune portante e diametro di questa, carico di rottura e coefficiente di utilizzazione) (Fig. 5.25); è comunque possibile inserire e salvare anche i parametri specifici del sistema di gru a cavo che si vuole verificare.

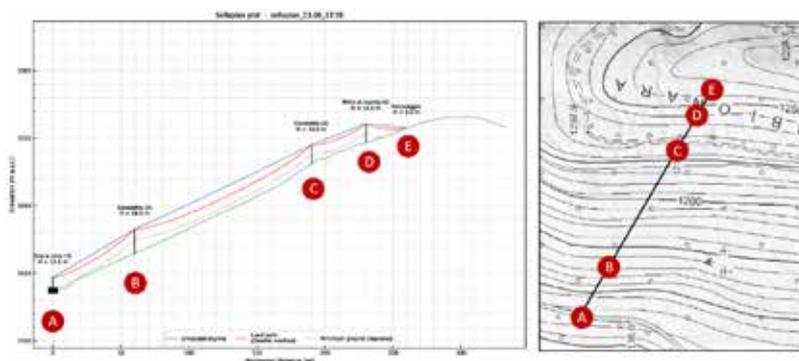


Figura 5.25. Esempio di tracciamento di una linea di teleferica. A destra, la traccia indicata su carta topografica, in blu, l'indicazione della posizione della gru a cavo, del cavalletto terminale e del cavalletto intermedio; a sinistra, il profilo del terreno (immagini: Stefano Grigolato)

5.5. QUANTIFICAZIONE DELLE UTILITÀ ECOSISTEMICHE

L'offerta di utilità ecosistemiche può essere quantificata con rilievi in campo o indirettamente attraverso telerilevamento, con misura di variabili correlate con le utilità stesse o attraverso modelli di stima e software di supporto alle decisioni (Wood et al. 2018) (Fig. 5.26)

Tra i vari modelli l'*Artificial Intelligence for Environment & Sustainability* – ARIES (Villa et al. 2014) e l'*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* - InVEST (Nelson et al. 2009) si distinguono per la capacità di modellare e mappare la maggior parte delle utilità ecosistemiche. ARIES adotta un approccio di *machine learning* e contiene un ampio database di dati spaziali e modelli su scala locale e globale. Anche InVEST, creato dal *Natural Capital Project* (<https://naturalcapitalproject.org>), è una suite open source di modelli. Un esempio applicativo per la valutazione delle utilità ecosistemiche offerte dai sistemi agroforestali è il progetto LIFE+ *Making Good Natura* (<http://www.lifemgn-serviziecosistemici.eu/>) che ne ha valutato la fornitura in diversi siti pilota italiani, anche con la realizzazione di un apposito *web-gis* (<http://lifemgn.eurac.edu/map/index.php?mapset=mgn&lang=it>).

Categoria Utilità Ecosistemiche	Servizi di Approvvigionamento			Servizi di Regolazione							Servizi di Supporto	Servizi Culturali			Facilità d'Uso
	Alimento	Alimento	Acqua	Sequestro e Stoccaggio del carbonio	Mitigazione Inondazioni	Ritorno Idrico	Qualità dell'Acqua	Qualità dell'Acqua	Regolazione Malattie e Parassiti	Qualità dell'aria	Impollinazione	Habitat & Biodiversità	Valori Culturali & Recreativi	Recreazione & Turismo	
Modelli di stima delle utilità ecosistemiche															
ARIES															Bassa
BLDMS															Media
ClimSAVE															Alta
CoInsg Natura V2															Media
InVest															Media
LandcapMAGES															Media
OPAL															Media
RICS															Media
SERVES															Alta
SabES															Alta
UFORER-Tree															Alta
WHBET*															Alta
Modelli di processo per la stima delle utilità ecosistemiche															
AnnAGNP															Media
APEX															Bassa
CENTURY															Bassa
Kineros2															Media
SWAT															Bassa
TEM															Media
VIC															Media
WaterWorld															Alta
Modelli integrati di valutazione															
GLOBION															Bassa
IMAGE															Bassa
MILMES															Bassa
Somma dei modelli	16	10	19	17	5	11	14	14	4	2	3	11	5	8	8

*Inventario di stima dell'habitat della fauna selvatica

**Approvvigionamento alimentare comprende le colture triestri e la produzione di bestiame, la pesca e l'acquacoltura

***la fornitura di acqua comprende sia la fornitura di acque superficiali che sotterranee

Figura 5.26. Esempio di modelli per la quantificazione delle utilità ecosistemiche (immagine: Mauro Maesano)

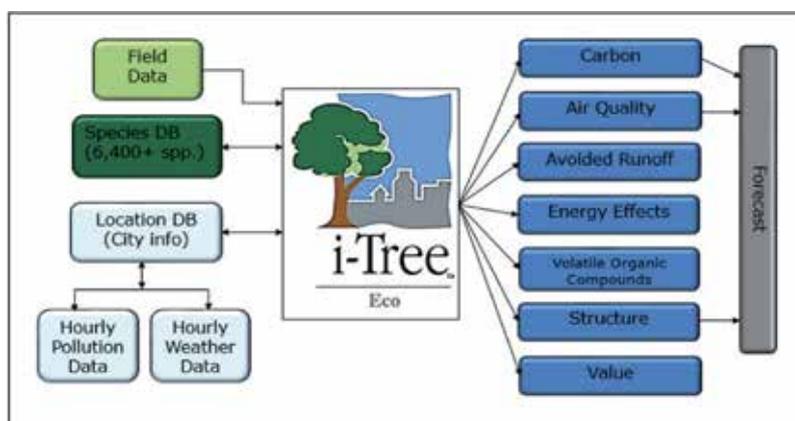
5.6. URBAN FORESTRY

I *GIS* aiutano le città a gestire le foreste urbane in modo efficiente e a ridurre i costi di gestione. All'uopo è necessario dotarsi di un inventario urbano che raccolga le informazioni accurate su condizione, diversità e distribuzione spaziale degli alberi nelle aree urbane per la pianificazione degli interventi, il monitoraggio arboreo e la quantificazione delle utilità

ecosistemiche in ambito urbano. Il database degli alberi di una città comprende i parametri dendrometrici ma può includere altre caratteristiche rilevanti come presenza di parassiti e/o malattie o altri *layer* di mappa utili alla gestione e pianificazione delle attività.

Nell'ambito del progetto TECNOVERDE (<https://www.facebook.com/ProgettoTecnoverde>), è stato sviluppato un portale *web-gis*, che implementa un modello per la stima della quantità di inquinanti atmosferici (ad esempio, particolato, ossidi di azoto e ozono) rimossi da alberi e da arbusti; la progettazione viene eseguita online, costruendo un progetto in cui gli alberi sono individuati con punti, i filari tramite linee e i boschi con poligoni. A questi elementi sono associate le informazioni strutturali ed ecofisiologiche della vegetazione: specie, diametro a petto d'uomo, altezza totale, altezza di inserzione della chioma, raggi delle chiome, indice di area fogliare. Il portale si basa sul modello AIRTREE che stima la rimozione di carbonio e di inquinanti atmosferici a scala semioraria. Queste stime sono poi aggregate su base annuale (o poliennale) a livello di singolo albero o di area di interesse (ad esempio, parco urbano).

Un esempio applicativo è la valutazione dei servizi ecosistemici nel Parco Regionale Urbano di Aguzzano nella periferia nord-est di Roma (Petrella et al. 2017). In questo contesto è stato utilizzato lo strumento I-Tree (www.itreetools.org/) (Fig. 5.27). I-Tree è una suite di strumenti web e desktop ad accesso libero per l'analisi della struttura delle foreste urbane: esso fornisce utili indicazioni su come un'area verde all'interno della città possa costituire un efficace filtro per rimuovere gli inquinanti atmosferici, catturare e trattenere la CO₂ e ridurre il *run-off*; di queste utilità è stato stimato il valore finanziario come misura indicativa di quanto convenga economicamente alla comunità cittadina conservare la funzionalità ecosistemica delle aree verdi urbane.



Servizio ecosistemico		Quantità	CO ₂ eq.	Stima economica
Fissazione		1.991,60 t	4.309,50 t	199.200,00 €
Sequestro lordo	C	69,57 t/anno	256,59 t/anno	
Sequestro netto		62,36 t/anno	224,28 t/anno	6.196,00 €/anno
Rimozione	O ₃	1.073,895 kg/anno		5.302,43 €/anno
	NO _x	842,28 kg/anno		75.591,00 €/anno
	SO ₂	15,22 kg/anno		53,34 €/anno
	CO	73,53 kg/anno		95,40 €/anno
	PM ₁₀	81,85 kg/anno		499,36 €/anno
Produzione	O ₂	363,30 t/anno		
Riduzione deflusso superficiale	H ₂ O	3.295,00 m ³ /anno		36.529,00 €/anno
TOT				174.961,49 €/anno

Figura 5.27. Quantificazione del valore delle utilità ecosistemiche dei boschi nel Parco Regionale Urbano di Aguzzano tramite l'utilizzo del modello I-Tree (Petrella et al. 2018)

5.7. SISTEMI DI SUPPORTO ALLE DECISIONI

Per supportare i gestori dei boschi e piantagioni da legno, sono stati sviluppati sistemi in grado di supportare le decisioni operative (DSS), anche sulla base di sistemi di archiviazione e condivisione delle informazioni (*Forest Information System, FIS*).

I sistemi DSS e *FIS* hanno la caratteristica di mettere a disposizione dell'utente una vasta gamma di dati, mappe delle variabili forestali, dati climatici, dati degli interventi e sistemi *EWS* e di elaborare, grazie ad algoritmi informazioni complesse, che consentono al gestore forestale di avere un supporto e di aggiornare in continuo i propri dati. I DSS e *FIS* si basano su sistemi esperti e basati sulla conoscenza, tecniche multicriterio, nonché strumenti di comunicazione e visualizzazione, e consentono attraverso semplici interfacce di estrarre informazioni di dettaglio a scala di azienda e di singola particella (catastale e/o forestale). I report generati possono essere di tipo geografico (informazioni geografiche con annessa tabella degli attributi) o file PDF.

Alcuni dei sistemi sviluppati in Italia, come B-FOREST (Fig. 5.28) e PRI.FOR.MAN (Fig. 5.29), consentono il monitoraggio degli interventi selvicolturali e l'aggiornamento delle utilità ecosistemiche in automatico attraverso l'applicazione di modelli di crescita dei soprassuoli. Il DSS *r.green* (Fig. 5.30), attraverso analisi geografiche e dati di input forniti dall'utente, permette l'analisi all'interno di un'area forestale degli impianti di energia idroelettrica ed il calcolo della biomassa estraibile dai popolamenti utile per fini energetici.

La struttura comune dei DSS si basa su tre segmenti principali:

- **sistema di gestione di database** (DBMS), che contiene i dati e ne permette la elaborazione;
- **libreria di tool/strumenti** che permettono di interrogare i dati (anche attraverso query di tipo geografico);
- **interfaccia grafica** per supportare gli utenti nelle fasi di interrogazione dei dati e di interpretazione dei risultati.

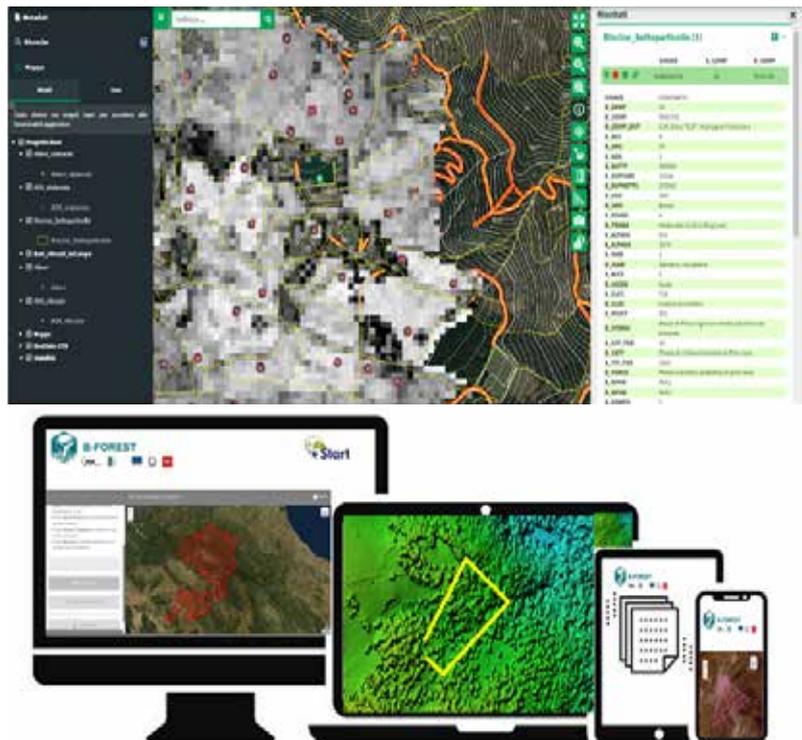


Figura 5.28. Interfaccia del DSS B-FOREST (<https://www.bforest.it/>). In alto, l'interfaccia per gestire i piani di gestione forestale e aggiornare i dati a livello di particella forestale. Il sistema permette di importare e/o disegnare gli interventi selvicolturali e in automatico aggiornare le mappe degli indicatori di gestione forestale sostenibile e i dati sulla singola particella. In basso, l'interfaccia B-FOREST che consente di ricavare sulla base delle mappe sviluppate con i dati dell'inventario forestale nazionale i valori di volume legnoso, i vincoli e i parametri orografici disegnando un poligono nell'area di interesse (immagini: Francesca Giannetti)

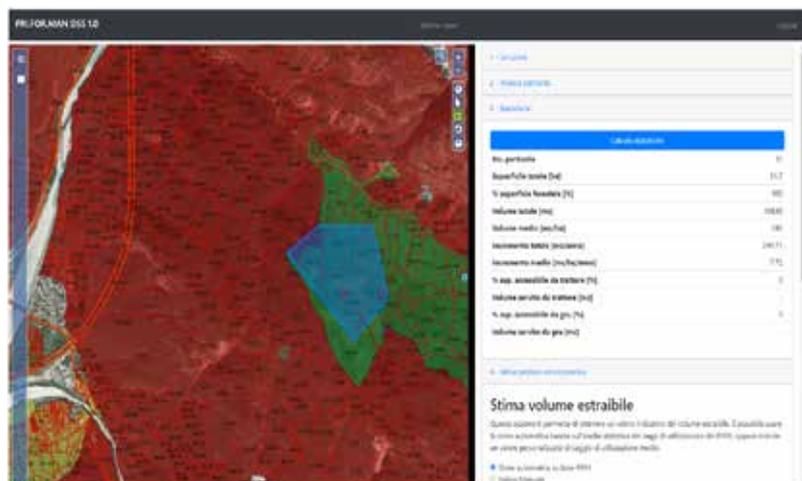


Figura 5.29. Interfaccia del DSS PRI.FOR.MAN (<https://www.legnoservizi.it/pri-for-man-dss-un-sistema-di-supporto-delle-decisioni-forestali-a-scala-locale/>), sviluppato per le zone montane del Friuli-Venezia Giulia. Il sistema consente di estrarre, attraverso la ricerca per particella catastale e/o disegnando un poligono, informazioni relative a volume legnoso, incremento corrente di volume legnoso e accessibilità. I dati sono calibrati sulla base dei dati dell'inventario forestale nazionale e dei progetti di riqualificazione forestale e ambientale (immagine: Giorgio Alberti, Francesca Giannetti e Luca Cadez)

Nell'esperienza del progetto FreshLIFE (<https://freshlifeproject.net>) è stato sviluppato un FIS/DSS a scala di azienda per le foreste di Rincine (FI), Bosco Pennataro (IS) e Monte Venere-Caprarola (VT), che integra mappe derivate da dati a terra e dati acquisiti da drone fotogrammetrico e drone *LiDAR*, con i seguenti vantaggi: possibilità di valutazione della copertura residua dopo vari tipi di interventi selvicolturali; misurazione accurata delle superfici tagliate; identificazione della struttura del soprassuolo; stima speditiva per la vendita del legname; ausilio tecnico per la tracciatura di piste temporanee di esbosco; gestione dei percorsi naturalistici e degli interventi di miglioramento da effettuare; individuazione dei microhabitat e zone di interesse naturalistico e monitoraggio.

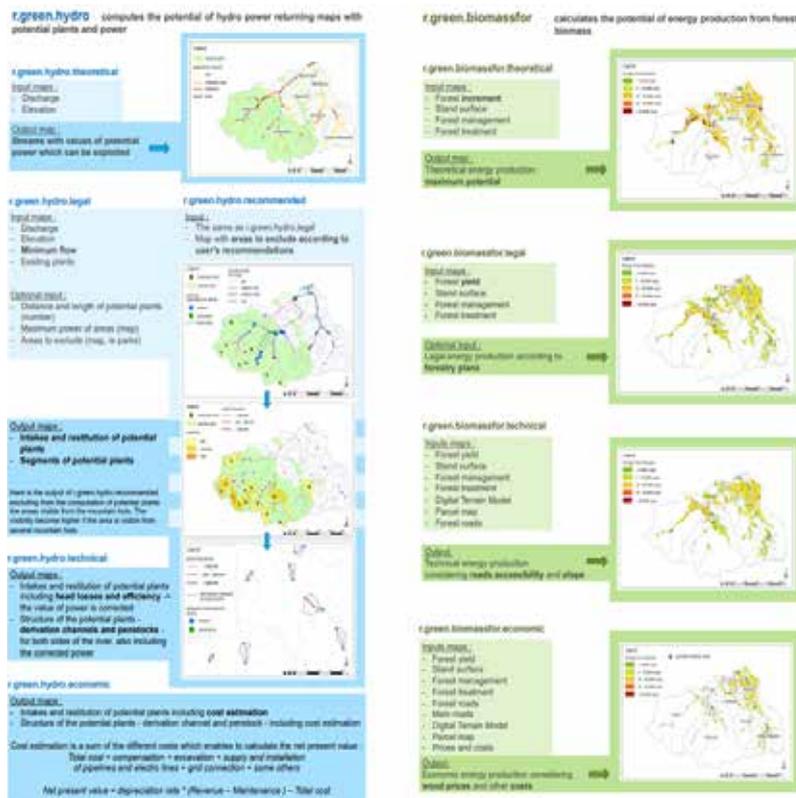


Figura 5.30. Interfacce grafiche del DSS r.green, che gestisce attraverso una serie di tools implementati nel software GRASS e QGIS. Le funzionalità *hydro* consentono di calcolare il potenziale dell'energia idroelettrica e restituisce una mappa con i potenziali impianti ed energia anche sulla base di informazioni legali e tecniche. Il modulo *biomass* calcola il potenziale di biomassa estraibile dal bosco, anche considerando la viabilità presente (vedi § 5.3) (fonte: Garegnani et al. 2015)

Nel progetto FOR.CIRCULAR "Sistema di Supporto alle Decisioni per il miglioramento della performance della filiera foresta-legno in una prospettiva di bioeconomia circolare" (<https://www.dendronatura.net/progetti-1/progetto-for-circular/>) è stato sviluppato un DSS (r.forcircular) per l'analisi e la misura del livello di sostenibilità della filiera foresta-legno in un contesto di bioeconomia circolare. In particolare, r.forcircular è implementato come componente aggiuntivo (*add-on*) del software GIS GRASS ed è fruibile sia attraverso la tipica interfaccia grafica degli *add-on* di GRASS sia come script, per un controllo totale del flusso operativo (Fig. 5.31). Il DSS permette di inserire variabili e parametri di input relativi alla geomorfologia del territorio, alle caratteristiche vegetazionali e dendrometriche dei boschi, ai processi produttivi adottati e al livello di meccanizzazione, nonché ai parametri inerenti agli aspetti economico-finanziari della filiera foresta-legno. Il DSS consente il confronto di diversi scenari attraverso la produzione di mappe e risultati numerici riferiti a indicatori ambientali e socioeconomici al fine di valutare il livello di circolarità della filiera produttiva.



Figura 5.31. Esempio di layout del DSS r.forcircular (foto: Alessandro Paletto)

Gestione delle *piantagioni da legno*

L'arboricoltura da legno di precisione rappresenta una attività utile per favorire un incremento della redditività agricola e della sostenibilità nell'ambito del sistema legno italiano.

6.1. TECNICHE DI IMPIANTO E DI COLTIVAZIONE

6.1.1. *Impianto*

6.1.1.1. *Identificazione dei tipi di suolo mediante soil proximal sensing*

La misura e l'interpretazione della variabilità spazio-temporale dei suoli è fondamentale per l'applicazione di interventi sito-specifici (Priori et al. 2016). In tale prospettiva, sono disponibili numerosi sensori utili ad ottenere "mappe di suolo ad alta risoluzione", alternativa economicamente valida al classico metodo di rilevamento del suolo ad alta intensità. La tecnica tradizionale si basa sul prelievo di campioni seguendo uno schema a griglia regolare oppure seguendo un disegno a W o X all'interno dell'area di studio. Le singole proprietà del terreno vengono poi spazializzate con interpolazione geostatistica tipo *kriging*. La crescente disponibilità ed economicità con cui vengono impiegati gli strumenti di *soil proximal sensing* può offrire nuove opportunità per supportare le applicazioni agricole rispetto alla variabilità dei suoli (Blackford et al. 2021).

I sensori prossimali più utilizzati sono di tipo geofisico. Tra questi, i sensori ad induzione elettromagnetica e geoelettrici generano mappe di resistività e/o conducibilità elettrica apparente del terreno a varie profondità (Fig. 6.1). Studi di tomografia elettrica sono stati applicati con successo per mappare e modellizzare la radice del pioppo (Zenone et al. 2008). Efficace anche l'utilizzo di spettrometri a raggi gamma che misurano le emissioni naturali dei raggi gamma dei suoli. Mentre i primi sono efficaci principalmente per le proprietà fisiche come la tessitura e idrologia dei suoli, quelli legati alla spettrometria sono funzionali sia per le proprietà chimiche che per quelle fisiche del *topsoil* (0-30 cm circa). Ulteriore tecnica è quella che utilizza spettrometri per raccogliere in modo rapido misure di riflettanza nello spettro della radiazione elettromagnetica solare (Fig. 6.1); l'andamento dell'intensità, in funzione della lunghezza d'onda, fornisce lo spettro di riflettanza caratteristico del materiale (firma spettrale). Particolarmente indicata è inoltre la tecnologia *GPR* (vedi § 3.7.2.2) che, in seguito al contrasto dovuto alla presenza di anomalie geofisiche, rileva cambiamenti nelle proprietà elettromagnetiche del suolo, risorse idriche, contaminanti, nonché presenza di cavità e mappatura di apparati radicali (Ferrara et al. 2013, 2017).



Figura 6.1. Strumenti *proximal sensing*: a sinistra, strumento per indagine elettromagnetica dei suoli EM38 (fonte: CREA - <https://soilmaps.wordpress.com/dscn0490/>); a destra, spettroradiometro da laboratorio e da campo ASD Fieldspec; il rilevamento nell'immagine di destra rientra nel campo del *digital soil morphometrics* continuo delle proprietà dei diversi orizzonti di suolo (foto: Roberto Barbetti)

La Figura 6.2 illustra un possibile flusso di lavoro per ottenere una carta di suoli di dettaglio. La fase 1 di indagine preliminare si basa sulla raccolta dei dati esistenti a partire dai sistemi informativi pedologici regionali, se presenti, e/o tramite consultazione della banca dati nazionale dei suoli del CREA (<https://www.crea.gov.it/en/web/agricoltura-e-ambiente/banche-dati>). La fase 2 prevede l'integrazione di dati telerilevati come il *LiDAR* e sensori di *soil proximal sensing* descritti sopra. I dati di elevazione derivati da *LiDAR* (vedi § 3.6) possono essere integrati con i dati dei sensori prossimali tramite tecniche di *DSM* e modelli di apprendimento automatico (MLM) per prevedere gli attributi chiave del suolo. Il vantaggio di applicare il *DSM* in aree naturali o seminaturali è che, in assenza di interventi antropici, i modelli di distribuzione dei suoli seguono più coerentemente i fattori della pedogenesi. La fase 3 riguarda l'osservazione pedologica in base alle zone omogenee di resistività, l'analisi chimica di laboratorio anche con *VIS-NIR* sui campioni prelevati e, infine, l'integrazione di tutti i dati con sistemi *GIS* per l'elaborazione della carta dei suoli. La fase 4 illustra i possibili sviluppi che prevedono l'applicazione del *VIS-NIR* in situ e l'applicazione di altri strumenti prossimali più costosi come, ad esempio, gli spettrofotometri *XRF* (*X-ray fluorescence spectroscopy*). Nella fase 4 il significato di "*Digital Soil Morphometrics*" è di quantificare i caratteri del suolo *in situ* per i diversi orizzonti in maniera dettagliata.

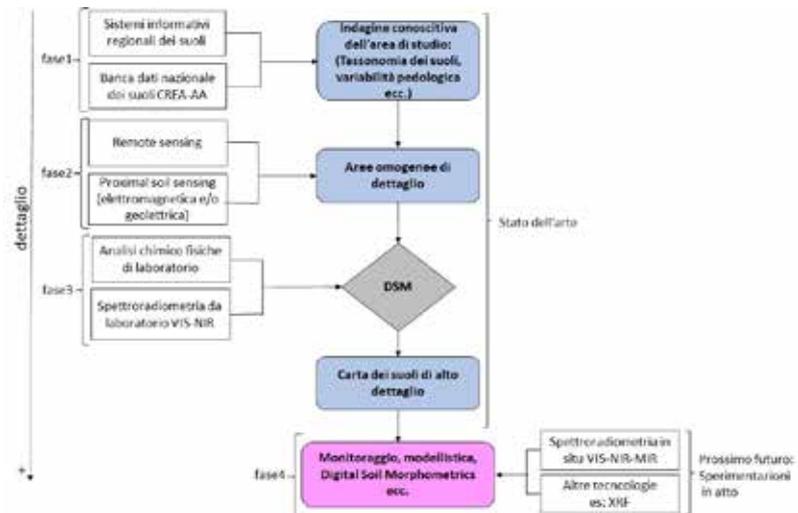


Figura 6.2. Flusso di lavoro per la caratterizzazione pedologica ai fini di *precision forestry* (immagine: Roberto Barbetti)

6.1.1.2. Tecnologie per il livellamento del terreno

L'impianto di una piantagione da legno richiede una corretta preparazione del terreno tramite discissura (in caso di terreni asfittici e argillosi, se necessario), aratura e affinamento. Eventuali erbe infestanti sono eliminate tramite controllo meccanico o chimico e può essere utile rallentarne la ricrescita tramite diserbo in pre-emergenza. Un livellamento corretto della superficie di impianto evita ristagni idrici, limita fenomeni di erosione legati al ruscellamento e permette di gestire più efficientemente l'acqua di irrigazione. Per eseguire un livellamento corretto delle superfici sono a disposizione tecnologie di precisione messe a punto in particolare in risicoltura che richiede un livellamento ottimale delle camere di coltivazione. Il livellamento avviene impiegando generalmente attrezzature con larghezze di lavoro da 1,5 a 8 m e masse fino a 9 tonnellate che richiedono trattrici di elevata potenza (anche oltre 250 kW). Tramite una lama di adeguata robustezza asportano il terreno in eccesso e lo depositano dove manca rispetto ad un piano di riferimento. Sono disponibili modelli a controllo manuale, portati all'attacco a 3 punti, e altri sistemi a controllo elettronico che utilizzano impianti idraulici sulla base di segnali provenienti da emettitori e ricevitori *laser*. Il *laser* è la parte tecnologicamente più innovativa dell'attrezzatura: si compone di emettitore, ricevitore e *control box* che gestisce l'impianto idraulico della lama. L'emettitore è installato in modo fisso generalmente a bordo campo ad altezza superiore a 2 metri per superare la cabina della trattrice per essere rilevabile senza ostacoli. Alcuni emettitori possono lavorare in pendenza. La potenza di emissione è variabile in base al modello e può raggiungere 900 m. Il ricevitore viene fissato sulla lama della livella tramite un'asta telescopica a comando idraulico. Di solito è montato un solo ricevitore.

6.1.1.3. Tecnologie per lo schema di impianto e l'apertura delle buche

La tracciatura dello schema di impianto (identificazione della posizione delle buche che ospiteranno gli alberi) è per lo più eseguita manualmente. Tuttavia, si sta diffondendo l'utilizzo di sistemi a controllo elettronico tramite sistemi satellitari di posizionamento applicati a trattrice e trivella (Fig. 6.3). Questi sistemi, oltre a rendere più agevoli e veloci le operazioni di posizionamento e apertura delle buche, aumentano la precisione di posizionamento degli alberi e permettono di ottimizzare lo sfruttamento della superficie di impianto, soprattutto se è di forma irregolare. Risulta, infatti, possibile progettare lo schema di impianto e il riferimento ottimale per il posizionamento delle buche, in seguito ad un rilievo iniziale di campo, e grazie all'inserimento dei dati in *software* appositamente studiati. Il rilievo consiste nell'acquisizione delle coordinate del perimetro dell'area d'impianto tramite un palmare; nel caso di superfici non in piano è necessario rilevare anche un certo numero di punti interni all'apezzamento, tanto maggiore quanto maggiori sono le variazioni di pendenza, in modo da individuare le curve di livello. Dopo il rilievo si procede, tramite specifico *software*, a creare un progetto d'impianto, definendo l'orientamento delle file, la larghezza interfilare, l'ampiezza della capezzagna e la distanza tra le piante. Il *software* elabora una planimetria dell'impianto, che viene riportata anche sulla foto aerea dell'area, nonché un report che definisce gli elementi dell'impianto, ovvero numero di filari, numero di testate, lunghezza di ogni singolo filare, numero di alberi. Il progetto definitivo dell'impianto viene quindi caricato su un computer a bordo della trattrice. La realizzazione dell'impianto si concretizza tramite il controllo idraulico della direzione della trattrice (Fig. 6.4) rispetto ai filari previsti dal progetto e l'indicazione della posizione di apertura della buca conformemente a quanto previsto dal

progetto (è possibile anche con tecnologie più avanzate il comando diretto alla trivella). L'utilizzo di questa tecnologia offre all'operatore la possibilità di controllare in tempo reale vari parametri, come la posizione planimetrica del trattore nell'appezzamento, il numero di filari realizzati, il numero di alberi piantati e quello relativo al materiale ancora da mettere a dimora, il tempo di lavoro nonché la stima di quello necessario per ultimare l'impianto. I sistemi satellitari di posizionamento permettono inoltre di risolvere agevolmente una serie di problematiche che possono presentarsi, come ad esempio ottenere un allineamento a un impianto preesistente o definire angoli d'impianto con allineamenti trasversali diversi da 90°. L'impiego di queste metodologie consente una riduzione di costi, in quanto sostituisce il tracciamento manuale e permette di realizzare fino a 1.000 buche al giorno in terreni di medio impasto. Uno schema regolare agevola, infine, le operazioni di raccolta, sia effettuate manualmente (da operatore con motosega) sia eseguite con sistemi meccanizzati (*feller, harvester* - Fig. 6.5).



Figura 6.3. Trivella portata da trattore con dispositivo per il posizionamento satellitare (foto: Pier Mario Chiarabaglio)



Figura 6.4. Dispositivo di supporto alla guida della trattore per il corretto posizionamento della trivella per l'apertura buche (fonte: per gentile concessione della ditta Conterno & Ocelli s.r.l.)



Figura 6.5. Testa *harvester* in grado di abbattere, sramare, misurare e sezionare i fusti arborei e accatastare i topi (foto: Pier Mario Chiarabaglio)

6.1.2. Coltivazione

6.1.2.1. Irrigazione

L'irrigazione rappresenta un'operazione fondamentale per la gestione degli impianti di arboricoltura da legno, in particolare per il pioppo, favorendone la sopravvivenza e la crescita. Nel nostro Paese, sono relativamente limitate le aree dove la piovosità annua è sufficiente per garantire una adeguata resa produttiva del pioppo e le proiezioni indicano che i cambiamenti climatici ridurranno ulteriormente tali aree. L'irrigazione può essere effettuata con modalità differenti e, tranne i casi in cui è possibile irrigare per sommersione in presenza di adeguati sistemi di canalizzazione, l'approvvigionamento idrico avviene tramite pompe, il cui consumo energetico è correlato con la facilità e la profondità di captazione, profondità che tende ad aumentare a causa dei cambiamenti climatici. Le irrigazioni vengono eseguite per sommersione, per aspersione a pioggia e con irrigazione a goccia. Nella grande maggioranza dei casi l'intervento irriguo è deciso grazie all'esperienza del pioppicoltore o in seguito all'osservazione di primi sintomi legati alla siccità (ingiallimento fogliare) o al monitoraggio puntuale condotto con strumenti specifici (vedi § 6.2.2). Su base estensiva, si vanno comunque diffondendo le applicazioni basate su approcci a rateo variabile (*Variable Rate Treatments, VRT*) che, tramite telerilevamento, consentono di quantificare con precisione la risposta agli input esterni in termini di acque di irrigazione, così come di fertilizzanti o erbicidi.

I sistemi di irrigazione a goccia permettono di eseguire una bagnatura di precisione, grazie al controllo delle quantità fornite e alla fornitura localizzata dell'acqua che permette di evitare perdite per infiltrazione, ruscellamento ed evaporazione. In particolare, i sistemi di subirrigazione, con posizionamento sotterraneo delle ali gocciolanti, permettono di superare alcuni problemi pratici legati all'irrigazione con impianti superficiali: si evita il danneggiamento delle ali dovuto al passaggio delle macchine, si escludono fenomeni di evaporazione e soprattutto si permette uno sviluppo migliore dell'apparato radicale. I sistemi di irrigazione a goccia comandati da elettrovalvole costituiscono un sistema ottimizzato di irrigazione se connessi a sensori applicati alle piante per l'analisi del loro fabbisogno idrico (vedi § 6.2.2).

6.1.2.2. Trattamenti fitosanitari

I trattamenti fitosanitari sono codificati per i pioppeti di coltura intensiva. Nei primi 4-5 anni dall'impianto, si procede a irrorazioni insetticide sul fusto contro Saperda maggiore e Punteruolo, mentre sulle chiome i trattamenti sono estesi a tutto il ciclo produttivo, ma programmati a calendario contro la bronzatura fogliare (primo intervento a maggio, secondo dopo circa 40 giorni) mentre contro le ruggini fogliari sono praticati in caso di superamento di una certa soglia di incidenza.

Migliorie in senso di coltivazione di precisione possono essere adottate con accorgimenti in uso in altre colture, come l'irrorazione con ausilio di fotocellule per confinare il principio attivo ai soli fusti senza sprechi negli spazi interfila o la somministrazione di principi attivi sistemici disciolti nell'acqua avvalendosi di impianti di irrigazione a goccia, questi ultimi in via di diffusione in alcuni distretti avanzati della pioppicoltura. Vi è poi la possibilità di difesa biologica mediante aspersione di batteri entomopatogenici con droni (ad esempio *Bacillus thuringiensis*) contro le ricorrenti infestazioni di *Ifantria americana*.

Un avanzamento significativo per una difesa di precisione può, inoltre, essere ottenuto con l'applicazione degli strumenti di EWS (vedi § 4.4 e § 6.2.2).

6.1.2.3. Utilizzazione

Le operazioni di utilizzazione dei pioppeti a fine ciclo colturale possono essere meccanizzate integralmente grazie all'impiego di *harvester* in grado di abbattere, sramare, misurare e sezionare i fusti e accatastare gli assortimenti legnosi ottenuti. I controlli presenti nella cabina dell'operatore sono di tipo elettronico e gestibile mediante bottoni e *joystick*. L'abbattimento e allestimento meccanizzato nelle piantagioni da legno mediante *harvester* determina perdite di lavoro minime (3%) o assenti rispetto al cantiere tradizionale con motosega (Spinelli et al. 2011): per ulteriori informazioni sul tema si rimanda al § 8.

6.2. MONITORAGGIO

6.2.1. Monitoraggio delle produzioni su larga scala

Per la mappatura e il monitoraggio della superficie coltivata a pioppo a scala geografica, fin dagli anni '70, sono stati utilizzati dati dei primi satelliti dedicati all'osservazione della Terra (Landsat TM). Successivamente, sono stati realizzati inventari per punti per la pioppicoltura tramite fotointerpretazione di ortofoto aeree (Lapietra et al. 1980). Allo stesso scopo sono stati messi a punto sistemi di classificazione di immagini disponibili *on line* (Chiarabaglio et al. 2018) e attualmente vengono utilizzate immagini ad alta risoluzione provenienti dal satellite Sentinel-2 con tecniche di classificazione semi-automatica delle piantagioni di pioppo (Fig. 6.6) (Corona et al. 2018). Attraverso queste indagini, rilievi a terra e modelli di crescita è possibile ricavare informazioni sulla produttività delle piantagioni e predire le produzioni per gli anni successivi con vantaggi per il settore industriale e per gli enti che si occupano di pianificazione territoriale.

Per quanto riguarda le applicazioni sito-specifiche, l'utilizzo del laser scanning terrestre permette la misurazione non distruttiva della struttura di alberi con elevata precisione e basso costo. La capacità di TLS di misurare il volume non solo del fusto, ma anche della chioma dell'albero in maniera non distruttiva può essere efficace per valutare schemi di impianto innova-

tivi come le piantagioni di pioppo miste, policicliche o di agroforestazione (Chianucci et al. 2020) (vedi § 3.6).

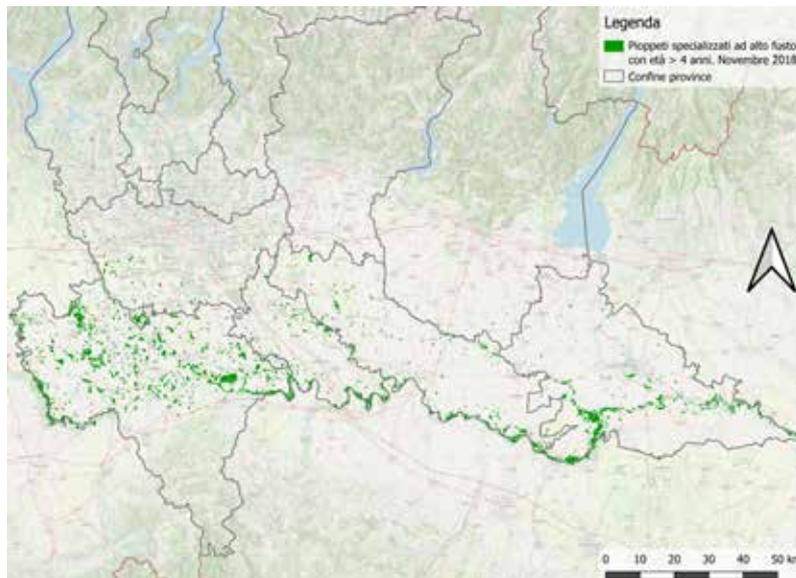


Figura 6.6. Esempio di mappatura della pioppicoltura in Lombardia (fonte: www.precisionpop.net)

6.2.2. Monitoraggio dello stato di salute

Tra le innovazioni auspicabili nell'arboricoltura da legno, e segnatamente nella pioppicoltura intensiva, va annoverata la progressiva introduzione della pratica dell'*EWS* (ovvero il monitoraggio e l'identificazione tempestiva di *stress*) (vedi § 4.4). Obiettivo è la riduzione del rischio di danno economico, ovvero della perdita di incremento legnoso o di legno già formato; detta riduzione si può perseguire attraverso l'allontanamento dell'avversità biotica o abiotica o, nel caso in cui ciò non sia possibile, attraverso la limitazione della sua incidenza. Ad esempio, un modello di irrigazione efficiente può venire in soccorso delle piante a seguito di rilievo di stati iniziali di stress idrico, pur macroscopicamente non evidenziabili; oppure si può procedere a un trattamento insetticida preventivo, tempestivo e puntuale a seguito dell'ottenimento di informazioni sul probabile avvento di un dato infestante in un distretto pioppicolo. In altri termini, l'operatore interviene laddove e quando sia necessario fronteggiare un'avversità, e prima che essa abbia modo di provocare un danno significativo, così da aumentare la sostenibilità della coltivazione stessa.

Applicazioni concrete di *EWS* in ambito di pioppicoltura intensiva sono in larga misura possibili, considerato che:

- il clone 'I-214', ancora prevalente nelle colture, è esposto a malattie fungine e infestanti specifiche, il che pone la necessità di contrastare attacchi fogliari molto incidenti (ruggini, bronzatura da *Marssonina*) possibilmente prima della loro manifestazione; attualmente per le ruggini si conducono trattamenti facoltativi dopo l'osservazione delle prime pustole sulla pagina fogliare, mentre per la bronzatura si procede a trattamenti pianificati secondo calendario; tuttavia, esigenze di sostenibilità della coltivazione e di scarsità dei principi attivi utilizzabili determinano l'opportunità di una loro riduzione attraverso somministrazione precoce e mirata;
- i cloni a Maggior Sostenibilità Ambientale (MSA), pur resistenti alle principali malattie fogliari e all'afide lanigero, sono esposti a insetti infestanti

di bassa specificità ed elevata imprevedibilità di danno (ad esempio, ifantria americana, cimice asiatica, *Popillia japonica*, etc.): l'introduzione di *EWS* può rendere i loro attacchi più prevedibili e, di conseguenza, meno incidenti;

- essenziale per tutti i cloni in coltivazione è la prevenzione della defoliazione estiva da stress idrico, con riduzione del rischio di danno economico (perdita di incremento legnoso), riduzione dei costi di irrigazione e contenimento dei danni da stress dovuti ad attacchi di parassiti secondari;
- anche la prevenzione dagli attacchi da parte di parassiti fungini opportunisti può trarne giovamento, dal momento che strumentazione ICT di campo è in grado di rilevare la presenza di tessuti estranei all'ospite molto prima della manifestazione dei sintomi;
- le caratteristiche di regolarità spaziale e di uniformità specifica di un pioppeto a conduzione intensiva si prestano particolarmente ad analisi per *EWS*, in quanto semplificano le compensazioni e calibrature a carico dei segnali strumentali; il carattere di modularità di un pioppeto fa anche sì che sia agevole il rilevamento di piante con anomalie spettrali o fisiologiche, alla base dell'*EWS*, rispetto a quelle di controllo.

6.2.2.1 Sistemi di early warning in pioppicoltura

Si possono classificare quattro metodologie utili in riferimento all'*EWS*: *satellite-remote sensing* (telerilevamento satellitare), *aerial-remote sensing* (con mezzi aerei recanti sensori), *proximal-remote sensing* (con droni, vedi § 3) e *proximal sensing* (con strumentazione che rileva parametri in campo, sotto chioma). Dette metodologie si distinguono non solo per la distanza da cui viene compiuto il rilievo e per il mezzo impiegato recante sensori, ma anche per il costo, il tipo di parametro rilevato e la specificità di destinazione: una campagna di rilievi apposta con un mezzo aereo può avere un costo elevato così da essere per lo più proibitiva se non supportata a livello associativo e da *stakeholder* della filiera; mentre lo strumento satellitare è economico e versatile, ma va utilizzato quello che fornisce il dato spettrometrico richiesto e va considerato se la copertura e la frequenza di passaggio sono adeguate. Una campagna di rilievi con droni garantisce potenzialmente grande versatilità, specificità e dettaglio di segnale a costi relativamente contenuti, ma può essere limitante per il tipo di sensore portato, che non deve risultare troppo pesante (Hernández-Clemente et al. 2019). In termini di tempestività diagnostica anche in assenza di sintomi evidenti, il *proximal sensing* è quello più idoneo al rilievo di avversità biotiche, ma richiede tempi estesi di presenza in campo, un cospicuo processo di calibrazione a monte e, spesso, l'intervento di operatori con competenza specifica (Baldi e La Porta 2020).

In sintesi:

- gli elementi utilizzati per individuare prodromi di stress idrico, o anche stadi iniziali di marciumi radicali, sono dati dalla temperatura della vegetazione e dalla fluorescenza della clorofilla (*Sun Induced Fluorescence*, *SIF*), entrambe espressioni dell'energia riemessa dai sistemi fotosintetici quando vengono colpiti dalla luce solare, energia le cui variazioni segnalano riduzioni del tasso fotosintetico e della conduttività stomatica;
- a stadi più avanzati di stress, ma sempre non macroscopici, corrispondono modifiche in contenuto di pigmenti fotoprotettivi associate a variazioni spettrali di riflettanza nel campo del blu e del verde; da rilievo remoto, esse vengono in genere quantificate tramite l'indice di riflettanza fotochimica (*Photochemical Reflectance Index*, *PRI*) o altri indici di analoga concezione;
- queste ed altre informazioni spettrali vengono ricavate, tal quali o per successive elaborazioni modellistiche, dai rilievi di diversi satelliti artificiali, fra i quali MODIS, Landsat e Sentinel-2 sono i più utilizzati, quest'ultimo

dotato di maggiore risoluzione spaziale; molto ci si aspetta dalla *FLuorescence EXplorer (FLEX) Mission*, coordinata dall' Agenzia Spaziale Europea, consistente in un satellite triassiale stabilizzato che orbiterà in tandem con Sentinel-3, al fine di implementare le capacità di osservazione del parametro *SIF* a una risoluzione di 300 m; *FLEX* dovrebbe essere lanciato nel 2025; lo sviluppo di nuovi agili sensori iperspettrali, adatti a essere montati su droni, permette di impostare campagne mirate di rilievo della *SIF* su fasce territoriali ristrette ma con elevata risoluzione spaziale;

- passando a qualche esempio di *EWS* da *proximal sensing*, e restando nell'ambito del rilievo di risposte spettrali emesse dalle piante monitorate, grandi prospettive sono offerte dalla spettroscopia *Raman (Raman Spectroscopy, RaS)*, basata sul rilievo strumentale di una componente anelastica di luce emessa da molecole sollecitate a stati rotazionali o vibrazionali più elevati dopo essere state colpite da una luce laser; nelle applicazioni biologiche, la sorgente laser utilizzata ricade generalmente nel campo del vicino infrarosso (785-830 nm) consentendo una profonda penetrazione nei tessuti da analizzare; l'elevata specificità della *Ras* è data dal fatto che ciascuna specie molecolare presente nei tessuti biologici (carboidrati, carotenoidi, acidi grassi ecc.) origina una o più caratteristiche bande vibrazionali (vibrazioni per cm), cosicché ciascun tessuto od organo di un dato fenotipo vegetale risulta associato a una specifica curva di risposta *Ras*, una sorta di «impronta spettrale» (Fig. 6.7) (Payne e Kurouski 2021); gli scostamenti da detta curva, opportunamente registrati, rispecchiano alterazioni tissutali anche solo incipienti causate da stress abiotici e biotici, anche infezioni batteriche, fungine e infestazioni di insetti dannosi, per via delle alterazioni biochimiche indotte (Gan et al. 2017). Spettrometri *Ras* portatili per l'uso in campo sono di crescente diffusione, sebbene il loro costo sia ancora abbastanza elevato (Fig. 6.8);

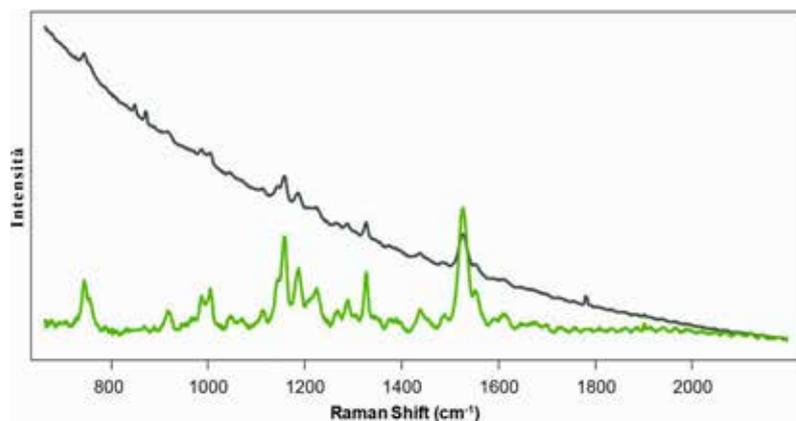


Figura 6.7. Esempio di impronta spettrale Raman: in verde scuro, segnale non filtrato; in verde chiaro, segnale filtrato per l'emissione anelastica (fonte: Payne e Kurouski 2021 - modificato)



Figura 6.8. Esempio di spettrometro Raman portatile (fonte: per gentile concessione della ditta Anton Paar Italia s.r.l.)

• sempre a fini di *proximal sensing*, grande interesse stanno suscitando alcuni strumenti portatili che condividono il principio dell'amplificazione di materiale genetico di patogeni, la quale non prevede alternanza di differenti temperature durante il processo e consente dunque di prescindere dal passaggio in termociclatori di laboratorio come invece richiesto dalle note reazioni *Polymerase chain reaction (PCR)*; tali metodologie di amplificazione isoterma (*Loop-mediated isothermal AMPlification, LAMP*; *Recombinase Polymerase Amplification, RPA*; *Helicase-Dependent Amplification, HDA*; e altre) differiscono fra loro per alcuni aspetti tecnici che ne determinano specifiche limitazioni: ad esempio, la *LAMP* è altamente sensibile ma richiede la costruzione di primer specifici (Fig. 6.9), la *RPA* è più veloce ma non offre le stesse garanzie in termini di specificità e sensibilità, e così via (Baldi e La Porta 2020); queste metodiche possono risultare particolarmente utili in arboricoltura da legno per l'individuazione precoce di patogeni che solo a stadi di infezione avanzati si palesano con sintomi, come i parassiti corticali di debolezza o gli agenti di marciumi radicali, o di insetti infestanti la cui presenza può essere subdola ai primi stadi larvali all'interno del fusto, come avviene per la saperda maggiore del pioppo.

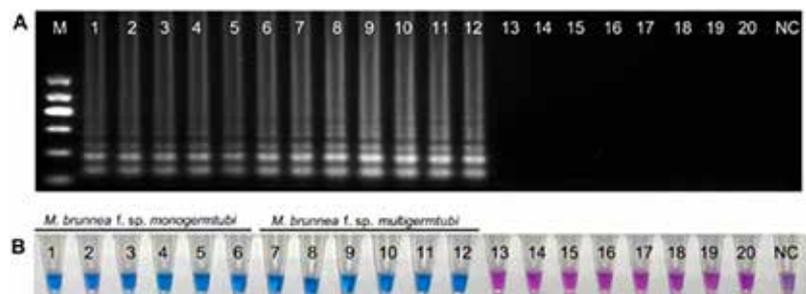


Figura 6.9. Rilievo precoce di *Marssonina brunnea* con amplificazione *LAMP*: A) ampliconi da *LAMP* visualizzati con elettroforesi in gel di agarosio; B) gli stessi visualizzati con reazione in blu-idrossinaftolo, direttamente in campo (fonte: Xiong et al. 2021 modificato)

L'applicazione dei presidi di *EWS* va considerata in modo integrato, ad esempio individuando in via preliminare le piantagioni ove si ravvisi qualche anomalia di emissione spettrale, attraverso *remote sensing*, e procedendo in queste a rilievi più mirati con lo strumento di *proximal sensing* più idoneo. In una prospettiva di *EWS* in senso lato rientrano anche le metodologie che si basano su un'approfondita conoscenza dell'avversità temuta, come le trappole a feromoni di monitoraggio precoce per la presenza di insetti infestanti o l'analisi a campione, nella stagione invernale, dei primi strati di terreno limitrofo alle piantagioni per individuare larve quiescenti di un dato insetto (ad esempio, per *Popillia japonica*).

6.2.2.2. Individuazione dello stress idrico

L'analisi degli stomi fogliari consente di ottenere informazioni sullo stato idrico degli alberi. In condizione di buona idratazione gli stomi di giorno sono aperti, per consentire la traspirazione (vapore acqueo) e cattura della CO_2 . Attraverso l'uso di porometri e analizzatori di gas (*Infrared gas analyzers - IRGA*) è possibile valutare il flusso di vapore acqueo e CO_2 della foglia, ottenendo informazioni sullo stato idrico (Fig. 6.10). Valori bassi di scambio sono associati a una ridotta apertura degli stomi e a uno stress idrico in atto. Ciò determina un aumento della temperatura fogliare - la traspirazione è necessaria per ridurre il calore della radiazione solare e dei processi fotosintetici - rilevabile con termometri ad infrarosso portatili (Fig. 6.11) o tramite l'ausilio di droni multi-rotore professionali (Fig. 6.12 e 6.13).



Figura 6.10. Analizzatore infrarosso per gli scambi gassosi degli stomi (foto: Simone Cantamessa)



Figura 6.11. Termometro a infrarossi portatile per analizzare la temperatura fogliare (foto: Simone Cantamessa)



Figura 6.12. Aereomobile a pilotaggio remoto (drone) con sensore per rilevare l'indice NDVI (foto: Pier Mario Chiarabaglio)

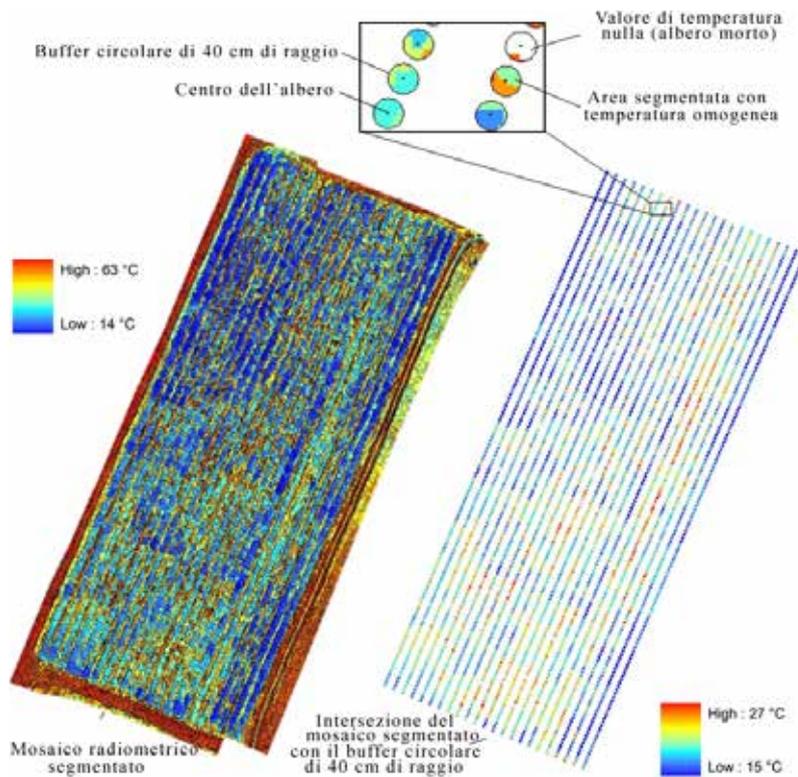


Figura 6.13. Analisi termica di un pioppeto effettuato con aereo mobile a pilotaggio remoto dotato di camera termica (fonte: Ludovisi et al. 2017 - modificato)

Un parametro di sintesi delle necessità idriche di una piantagione forestale è il coefficiente culturale (K_c), dato dal rapporto tra Evapotraspirazione della coltura (ET_c), che rappresenta il consumo idrico della coltura in condizioni reali, e ET_0 , l'evapotraspirazione di riferimento del sito specifico, che è il consumo idrico di un prato di festuca alto 12 cm e cresciuto senza fattori limitanti ($K_c = ET_c / ET_0$). L' ET_c di una coltura in un sito specifico deve essere individuato sperimentalmente; l' ET_0 è reso disponibile da vari servizi agro-climatici locali; in alternativa può essere calcolato partendo dai dati meteorologici (alcune stazioni meteo commerciali, da installare in azienda, sono in grado di calcolarlo automaticamente). Un esempio di stazione meteo è la "MeteoSense 4.0" (Fig 6.14) per la rilevazione meteorologica e climatica e per tutte le applicazioni in agricoltura di precisione. Permette di effettuare un monitoraggio a 360°, dalla difesa sostenibile e lotta ai patogeni, al risparmio idrico e misura dell'umidità del suolo. Ai fini di una corretta gestione delle risorse idriche può essere configurata con sensori e con i modelli di DSS. Il sensore "E-leaf" (Fig. 6.15) permette di valutare il grado di bagnatura della foglia discriminando tra pioggia e umidità; in associazione ai sensori per evapotraspirazione del suolo è possibile creare modelli *ad hoc* per irrigazioni di emergenza durante condizioni di siccità perdurante.



Figura 6.14. Stazione meteo per la rilevazione meteorologica e climatica (fonte: per gentile concessione della ditta Netsens S.r.l.)



Figura 6.15. Sensore di bagnatura fogliare (fonte: per gentile concessione della ditta Netsens S.r.l.)

Vivaistica *forestale*

Alla luce delle crescenti richieste di mercato, legate ai programmi di piantagione su grande scala per contrastare la crisi climatica e alle necessità di materiale di propagazione per programmi di recupero e ripristino ambientale a seguito anche di eventi meteorici catastrofici, è urgente l'introduzione nel settore vivaistico forestale di tecniche e modalità di controllo e monitoraggio innovative sostenute da ICT.

7.1. RACCOLTA, CONSERVAZIONE E SELEZIONE DEL SEME E DEI MATERIALI PER LA PROPAGAZIONE VEGETATIVA

Alla base di una buona pianificazione della produzione in vivaio vi è, tra le altre, la necessità di poter conoscere i quantitativi di seme disponibile per le diverse specie e, quindi, di poter prevedere le annate di pasciona. Esperienze recenti hanno correlato valori di indici vegetazionali (*VI - Vegetation Index*), espressione della vitalità e dello sviluppo delle chiome verdi e calcolati a partire da immagini da satellite, con la produzione annuale di seme e parametri ottenuti da serie storiche di dati climatici (Camarero et al. 2010, Bajocco et al. 2021, Bisi et al. 2018); ad esempio, in leccete e faggete è stato evidenziato che la pasciona è accompagnata da un declino del valore di *NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)* dopo una costante crescita negli anni immediatamente precedenti. Per il leccio, inoltre, si è tentato di definire valori minimi di *EVI (Enhanced Vegetation Index)* sotto i quali non si verifica produzione di seme (Fernández-Martinez et al. 2015); in foreste canadesi di *Picea glauca* è stata sperimentata la combinazione di alcuni VI, espressione di vigore vegetativo (*EVI, KTTC_GRN - Greenness Component Kauth-Thomas Tasseled Cap -, GRVI - Green-Red Vegetation Index*), con indici in grado di stimare il contenuto idrico delle chiome (*SWIR1* e *SWIR2*), verificando con successo l'ipotesi che questi ultimi - o la combinazione di entrambi i tipi di indici - possano intercettare il massiccio contenuto idrico dei conifere nella fase di maturazione per poi evidenziare il declino nel momento della senescenza (Garcia et al. 2021). In questo tipo di studi è importante ponderare i risultati ottenuti con la fenologia fiorale e del frutto delle singole specie, perché questi ultimi possono essere influenzati più o meno marcatamente dalle condizioni meteorologiche locali come evidenziato in popolazioni di rovere e faggio che hanno comportamento opposto nella fioritura e nella fruttificazione (Bogdziewicz et al. 2019). Allo stato attuale, l'unica *App* operativa è *ShinyForeMast* per soprassuoli di faggio (Chiavetta e Manzini 2021 - https://sebastianmarzini.shinyapps.io/test_pasciona/).

Relativamente alla quantificazione della produzione di seme, in soprassuoli di castagno, faggio e roverella è stato testato, con buoni risultati, un metodo basato sul posizionamento schematico di griglie sul terreno utilizzando un metodo fotogrammetrico per la valutazione della quantità di seme a terra (Fig. 7.1 - Chianucci et al. 2021b, Tattoni et al. 2021).



Figura 7.1. Applicazione di un metodo fotogrammetrico per la valutazione della quantità di seme a terra in soprassuoli di faggio, castagno e cerro (fonte: Tattoni et al. 2021, modificato)

Le tecnologie ICT sono da tempo impiegate per valutare la qualità del seme, dato l'interesse del settore agricolo per tecniche non distruttive in grado di testare velocemente grandi quantità di semi. Le principali tecnologie impiegabili sono *machine vision*, spettroscopia, immagini iperspettrali, termografia, naso elettronico e raggi X. Gli aspetti che si possono valutare con queste tecnologie riguardano principalmente la vitalità, ma anche la presenza di patogeni (funghi, insetti), i contenuti chimici, i difetti interni e i semi vani. Per il settore forestale, sono disponibili esperienze per *Picea abies* (Dumont et al. 2015), *Ulmus pumila* e *Quercus variabilis* (Liu et al. 2020): le tecniche utilizzate sono principalmente immagini iperspettrali e termografia.

7.2. PRODUZIONE DI MATERIALE FORESTALE DI MOLTIPLICAZIONE

7.2.1. Ricerca e innovazione tecnologica

L'innovazione introdotta attraverso l'uso di piattaforme di fenotipizzazione "*high throughput*" ha permesso la raccolta sempre maggiore di dati per caratteri specifici delle piante (Pieruschka e Schurr 2019). La rilevazione non distruttiva di caratteri fenotipici ha beneficiato fortemente dello sviluppo di analisi e classificazione di immagini (Danilevicz et al. 2021) nello spettro visibile e multispettrale (*imaging & vision*) per lo studio di accrescimento, morfologia e stati di stress.

Nel caso delle piantagioni da legno le tecniche ICT sono state principalmente impiegate al fine di fenotipizzare un grande numero di soggetti con alta precisione. L'applicazione del telerilevamento, infatti, può fornire misurazioni affidabili e non distruttive dei tratti fenotipici di interesse, come ad esempio la rastremazione del fusto valutabile con strumenti laser (Pulletti et al. 2019), oppure informazioni relativamente alla resistenza a varie malattie, rilevabile su ampie superfici e con cadenze temporali definite.

Le tecniche di telerilevamento prossimale hanno trovato applicazione nel settore del miglioramento genetico del pioppo. La raccolta di informazioni è principalmente affidata a droni, che possono integrare le osservazioni satellitari che hanno in genere risoluzione spaziale più bassa, ma cadenza temporale più frequente. Droni equipaggiati con termocamere sono stati utilizzati per valutare la risposta alla siccità di progenie F_2 di *Populus nigra* sfruttando la stretta correlazione tra temperatura fogliare e conduttanza stomatica (Ludovisi et al. 2017). Le informazioni ritraibili sono utilizzate al fine di individuare genotipi superiori per poi avviare programmi di selezione. È prevedibile che l'integrazione di multisensori prossimali e remoti migliorerà enormemente la loro funzionalità nella fenomica degli alberi forestali. Un recente studio di Tauro et al. (2022) ha esplorato diversi guadagni genetici analizzati alla scala dell'ecosistema e alle scale individuali. Si desume che sia necessario una maggiore attenzione all'integrazione dei dati multisensoriali grazie all'avvento dell'intelligenza artificiale per migliorare l'accuratezza della stima dei tratti fenotipici degli alberi forestali e svelare la mappa genotipo-fenotipo (Harfouche et al. 2019).

Il settore della produzione orto-floro-vivaistica e delle piante ornamentali impiega tecnologie completamente automatizzate “*user friendly*” (*smart nurseries*) utilizzando sensori avanzati (Oren et al. 2017), immagini multispettrali a realtà aumentata (<https://plantvision.org/>), sistemi robotici (<http://octinion.com/products>; <https://www.ecoation.com>; <https://hol-spraying-systems.com>; <https://pats-drones.com>), algoritmi per l'elaborazione dati e modelli a supporto delle decisioni (<https://www.biobestgroup.com/en/crop-scanner>), sia in ambiente protetto che in pieno campo. La piattaforma Nurset® (<https://nurset.it/>), ad esempio, consente un monitoraggio continuo del vivaio attraverso il controllo digitale in tempo reale dei consumi idrici della coltura sulla base di informazioni rilevate da sensori per l'umidità del suolo e di altri parametri ambientali. Un portale semplice e intuitivo, consultabile da qualsiasi dispositivo (*desktop, tablet e smartphone*) è fornito di un sistema di allarmi che avverte, tramite mail o sms, la presenza di anomalie.

7.2.2. Valutazione e monitoraggio delle condizioni di crescita e degli stati di stress delle piante in vivaio

In vivaio le tecniche di *remote sensing* possono avere un'applicazione importante relativamente allo stato di salute delle piantine nel corso dell'allevamento. Le applicazioni riguardano il monitoraggio degli stati di *stress* abiotici (in particolare, lo stress idrico) e la presenza e le attività di patogeni. Le tecniche di telerilevamento delle problematiche delle piante in vivaio richiedono uno specifico adattamento all'impiego in condizioni di vivaio (serre e aiuole/aree con contenitori) con requisiti relativi alla necessità di una scala di dettaglio (piante piccole e rilevamento a distanza molto ridotta) e di risoluzioni d'oggetto elevate. Tecniche potenzialmente utilizzabili sono i sensori del naso elettronico, impiegati per monitorare la presenza di patogeni sulle piante (Cui et al. 2018). Di grande interesse, anche in vivaio, sono le tecniche di termografia per rilevare gli stress (Jones e Schofield 2008) o la presenza di patogeni (Mahlein et al. 2018) e le tecniche iperspettrali per rilevare la carenza nutritiva. Le esperienze di vivaio più rappresentative su specie forestali si basano soprattutto sullo studio di VI come *proxy* di stati vegetativi da associare a rilevazioni di stati fisiologici correlati agli stress abiotici (principalmente stress idrico). Uno dei tentativi in cui i sensori sono stati testati applicandoli sulle strutture in dotazione al vivaio è di Eithel et al. (2010), che hanno associato, in corrispondenza dei punti di irrigazione, sensori AGORS (*Active Ground Optical Remote*

Sensing): questa tecnologia è stata sperimentata sul pino silvestre ed ha migliorato le stime dello stato di stress idrico combinando alcuni *VI* (*NDVI*, *Normalized Difference Red Edge - NDRE*, *NDRE/NDVI* o *Canopy Chlorophyll Content Index - CCCI*) e la misura della clorofilla nelle piantine. Un approccio innovativo è proposto da Raddi et al. (2020 - Fig. 7.2) su tre specie quercine, in cui è stato sperimentato l'uso di una comune macchina fotografica digitale modificata per rilevare bande del *NIR*. *NDVI* e *GNDVI*: i risultati sono comparabili a quelli prodotti da uno spettrometro ad alta risoluzione e sono in grado di distinguere differenti stati di stress idrico. Altri tipi di telerilevamento applicabili in vivaio sono basati su approcci *VRT* (vedi § 6.1.2.2) attraverso l'uso di robot o droni, che consentono di quantificare con precisione la somministrazione di fertilizzanti, trattamenti con erbicidi ed antiparassitari su tutta la superficie del vivaio e valutare la risposta agli input esterni.

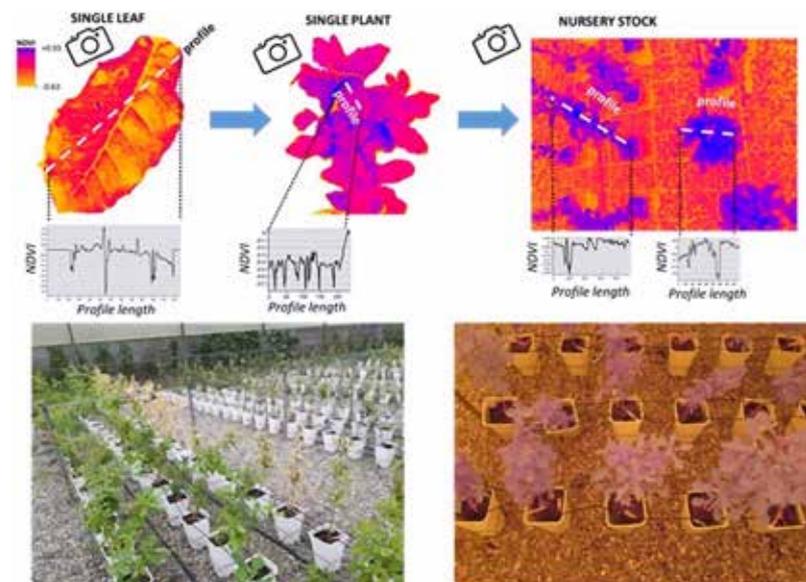


Figura 7.2. In basso, immagine da comune fotocamera (a sinistra) e da fotocamera *NIR* (a destra) di semenzali di specie quercine allevate in serra. In alto, immagini utilizzate per il calcolo dei valori di *NDVI* per singola foglia, per intera pianta e su linee di produzione (immagine: Francesca Giannetti)

7.3. TRACCIABILITÀ DEL MATERIALE VIVAISTICO

7.3.1. Piantine forestali

Immagini telerilevate da drone possono essere impiegate per inventariare la produzione vivaistica, mutuando le metodologie impiegate per la stima della copertura forestale. È stata testata sia la possibilità di contare le piantine in produzione che la capacità dei VI di distinguere le diverse specie, sebbene in questo secondo caso con risultati non soddisfacenti.

Un'App sperimentale che implementa un semplice sistema di tracciabilità basato sulle tecnologie *blockchain* nei vivai forestali è denominata "Vivaio Forestale" (Figorilli et al. 2021), sviluppata in ambiente Android (disponibile su richiesta il file .apk) utilizzando il sensore *near field communication* (NFC) e il GPS dei dispositivi dello *smartphone*. La lettura dei tag NFC avviene a contatto (prossimità) dell'antenna NFC dello *smartphone* al tag (Fig. 7.3). Il punto GPS viene registrato automaticamente se la soglia di precisione del segnale è inferiore a 10 m. L'applicazione è composta dalle seguenti sezioni:

- **nuova pianta** - vengono inserite le informazioni relative alla prima lettura del tag NFC sulla pianta e all'inserimento dei dati di propagazione;
- **nuova attività** - vengono inserite le informazioni relative agli interventi di miglioramento;
- **gestione dati** - l'operatore può accedere a due funzionalità, la prima per leggere le informazioni sull'impianto inserite nel database locale, la seconda per sincronizzare il database dell'App con un database remoto.

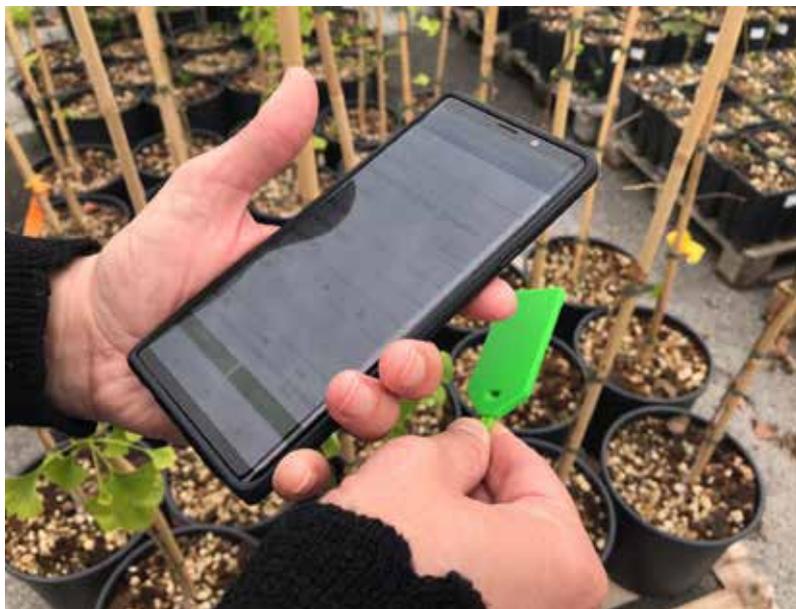


Figura 7.3. App «Vivaio forestale»: inserimento e lettura del tag (in verde) dei dati relativi alla piantina grazie all'uso di uno *smartphone* e di tecnologia NFC (fonte: Figorilli et al. 2021)

7.3.2. Pioppelle

I pioppeti specializzati per la produzione di legno per industria sono costituiti normalmente con il trapianto di pioppelle di cloni ibridi allevate in vivaio per uno o due anni. La produzione vivaistica, svolta quasi esclusivamente da imprese agricole private specializzate, è regolamentata dal D.Lgs. 386/2003 “Attuazione della direttiva 1999/105/CE relativa alla commercializzazione dei materiali forestali di moltiplicazione”, al rispetto della cui applicazione provvedono gli Organismi Ufficiali come da Art. 2 comma 1(n). Secondo la definizione e classificazione riportate nel D.Lgs. 386/2003 art. 2 comma 2 (d), le piante appartenenti ai cloni di pioppo fanno riferimento alla categoria dei materiali di moltiplicazione “controllati”.

Nell’ambito dell’Osservatorio Nazionale del Pioppo è proposta la realizzazione di un sistema informativo on line per coinvolgere i soggetti della filiera interessati ad adempiere alle prescrizioni del D.Lgs. 386/2003 (vivaisti, organismi ufficiali, pioppicoltori) secondo la seguente procedura:

- i vivaisti utilizzano il portale per comunicare la consistenza dei propri vivai al 31 dicembre di ogni anno, richiedere le certificazioni agli organismi ufficiali previsti dal D.Lgs. 386/2003, compilare il registro di carico e scarico (art. 5, D.Lgs. 386/2003) e ricevere e soddisfare la domanda di materiale vivaistico da parte dei pioppicoltori;
- gli organismi ufficiali ricevono le richieste e provvedono a rilasciare i certificati attraverso il portale dopo i necessari controlli;
- i pioppicoltori prenotano i quantitativi necessari di pioppelle per i nuovi impianti sul portale e dispongono della tracciabilità dell’acquisto (ricevute e identità clonale del materiale) per una eventuale certificazione della gestione forestale sostenibile che prevede di tracciare la provenienza del materiale di impianto.

La banca dati ha un accesso riservato per categorie di utenti (vivaisti, Organismi Ufficiali, aziende agricole). Dal portale è possibile ricavare per ogni anno i quantitativi di pioppelle vendute, e quindi le superfici piantate a pioppo annualmente.

Utilizzazioni forestali (*precision harvesting*)

8.1. INDUSTRIA 4.0 (*FORESTRY 4.0*)

Il termine Industria 4.0 definisce una tendenza all'automazione industriale che integra nuove tecnologie produttive al fine di migliorare le condizioni di lavoro, aumentando la produttività, la qualità dei prodotti, la sicurezza del lavoro e il benessere degli operatori, attraverso uno scambio di dati in tempo reale per la gestione puntuale dei processi.

In Italia, il concetto di "Industria 4.0" è stato inserito nel piano nazionale, definito nella legge 11 dicembre 2016 n. 232 (commi 8-13 dell'art.1 ed allegati A e B) per incentivare la transizione e l'innovazione per le aziende con l'introduzione di agevolazioni fiscali.

A partire dalla sua introduzione, l'Industria 4.0 ha coinvolto diversi processi produttivi, tra cui quello agricolo e quello forestale; in quest'ultimo si è sviluppato il concetto di *Forestry 4.0* (Fig. 8.1), definito come l'insieme delle innovazioni tecnologiche nel campo forestale che mirano a valorizzare appieno le potenzialità della nuova rivoluzione industriale da applicare ai sistemi di lavoro in foresta (Sahal et al. 2021).

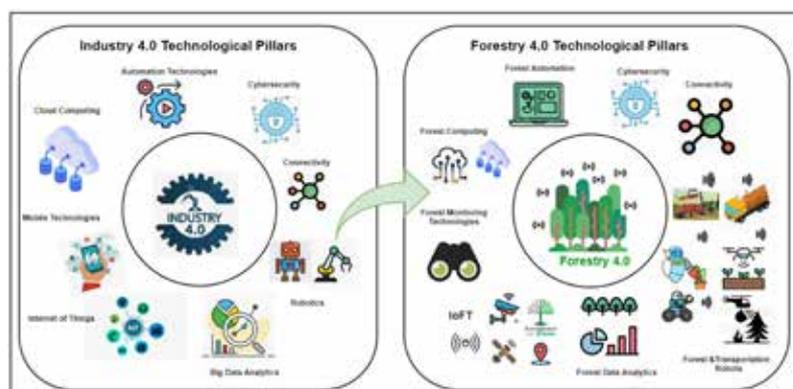


Figura 8.1. Da *Industry 4.0* a *Forestry 4.0* (fonte: Sahal et al. 2021)

Le tecnologie digitali su cui si basa la *Forestry 4.0* possono essere classificate nei seguenti ambiti di sviluppo:

- l'applicazione di *IoT* (vedi § 3.3) per la gestione dei dati e delle informazioni in tempo reale durante le diverse fasi di lavoro in bosco, tramite la costituzione di sistemi di comunicazione tra macchina-macchina, macchina-attrezzatura o macchina-operatori sia dislocati nello stesso cantiere in bosco sia lavorando a distanza;
- l'ottimizzazione dei processi produttivi e decisionali tramite l'analisi e l'elaborazione dell'elevata quantità di dati (*big-data* - Fig. 8.2) generati dalle macchine e attrezzature più recenti; questi dati possono essere utilizzati in tempo reale anche tramite il ricorso a tecniche di analisi avanzate come il *ML*;
- lo sviluppo dell'interazione uomo-macchina con particolare riferimento alla realtà aumentata (*augmented reality*) per la formazione di operatori e studenti forestali al fine di migliorare la percezione della realtà circostante fondendo elementi reali e virtuali;

- l'implementazione del passaggio da digitale a reale, che comprende la robotica e l'utilizzo dell'energia in modo preciso, razionalizzando i costi e ottimizzando le prestazioni.

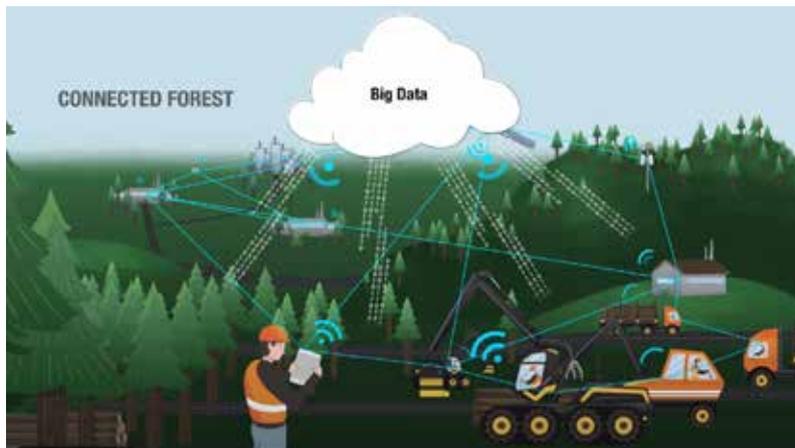


Figura 8.2. L'ausilio di tecnologie *Forestry 4.0* permettono la gestione di dati e di informazioni in grande quantità (*big-data*) in tempo reale, detta anche comunicazione decentralizzata (immagine: per gentile concessione di FFPInnovation)

8.2. APPLICAZIONI ICT ALLE UTILIZZAZIONI FORESTALI

La digitalizzazione basata sul concetto di *Forestry 4.0* sta comportando un cambiamento nella richiesta di mezzi tecnologicamente avanzati che sfruttano le tecnologie dell'ICT, il *cloud computing*, i *big-data* e il *ML*. Questo cambiamento si rispecchia nella strategia di sviluppo delle macchine e attrezzature forestali con lo sviluppo e immissione nel mercato di prodotti con avanzati sistemi di comunicazione e dotazione sensoristica per lo scambio di dati ed informazioni tra macchina-macchina, macchina-attrezzatura e/o macchina-operatori (Fig. 8.3) o direttamente con il costruttore o centro assistenza per l'assistenza a distanza o la raccolta di informazioni per migliorare le prestazioni delle macchine.

L'applicazione e l'integrazione dei sistemi ICT nelle macchine e attrezzature forestali coadiuvati dalle tecnologie *CPS* (vedi § 3.2) costituiscono un passo verso le teleoperazioni ed il lavoro con mezzi semiautomatici o sistemi ad assistenza continua (vedi § 8.8).



Figura 8.3. Informazioni in tempo reale su dispositivo *smartphone* sullo

stato di avanzamento dei lavori di utilizzazione forestale e indicatori di produzione (nei cerchi colorati i valori di volume dei prodotti legnosi divisi per specie) per *harvester* e *forwarder* ottenuto con il sistema proprietario *TimberMaps* di John Deere (fonte: John Deere)

8.2.1. Sistemi di comunicazione

Le macchine forestali possono utilizzare diversi livelli di comunicazione e scambio di informazioni: i) comunicazioni interne alla macchina (tra le varie componenti elettriche ed elettroniche e i dispositivi interconnessi, ii) comunicazioni tra la macchina ed un'entità esterna (esempio macchina-macchina, macchina-attrezzatura, macchina-operatore).

La prima tipologia di comunicazione segue lo standard *CAN bus* (da “*CAN*” - *Controller Area Network* e “bus” - canale di raccolta dati) che è un protocollo di rete di bordo che consente la comunicazione tra i componenti della macchina in grado di rilevare o condividere informazioni (come sensori o unità di elaborazione centrali). Il sistema *CAN bus* viene utilizzato dalle macchine forestali per far interagire la macchina e le attrezzature (sensori e attuatori). In Fig. 8.4 si riporta un esempio di sistema integrato di controllo di un escavatore equipaggiato con processore basato su una serie di componenti comunicanti tra loro con rete *CAN bus*.



Figura 8.4. Esempio grafico di connessioni *CAN bus* di un escavatore cingolato equipaggiato con processore (fonte: Spencer et al. 2021)

La comunicazione macchina-macchina, invece, consente di far dialogare e interagire tra loro più apparecchiature, anche di diversa tipologia, a distanza, attraverso sensori che scambiano dati (inviano o ricevono) tramite un server centrale e reti wireless pubbliche o private. I protocolli di comunicazione devono essere comuni tra le macchine e devono essere progettati in modo da poter non solo recepire l'informazione ma anche essere in grado di interpretare i dati tramite *software* di calcolo autonomi. Esistono vari standard per la comunicazione macchina-macchina sviluppati in modo specifico nel settore delle utilizzazioni forestali per trasferire i dati raccolti durante le operazioni. Un progetto svedese avviato nel 2006 ha portato alla creazione del protocollo StandForD (*Standard for Forest Machine Data and Communication* - StandForD 2010) per la registrazione dei dati e il successivo trasferimento all'interno della macchina e/o verso servizi *cloud*. Questo permette agli operatori che lavorano nel cantiere di interagire con le informazioni raccolte. Ad esempio, è possibile avere dati sull'area di intervento, sul quantitativo di legname abbattuto suddiviso per specie,

su volume e qualità degli assortimenti legnosi e sul percorso seguito dalle macchine, e quindi dai singoli fusti (vedi § 8.3.2). Queste informazioni consentono di agevolare e ottimizzare il lavoro combinato di macchine forestali, ad esempio abbattitrice/allestitrice (*harvester*) e trattore forestali portante (*forwarder*), nelle fasi di abbattimento ed esbosco di un cantiere (Fig. 8.5).



Figura 8.5. Rappresentazione schematica delle possibili comunicazioni tra macchine combinate e responsabile dei cantieri (immagine: Elena Marra)

I sistemi di comunicazione esterni permettono di verificare il funzionamento di una macchina e di intervenire sul settaggio della stessa in modalità da remoto. A livello nazionale, alcune ditte costruttrici stanno sviluppando sistemi di monitoraggio in tempo reale per gru a cavo che permettono di visualizzare su *tablet* o *smartphone* il *display* di comando della macchina ottenendo informazioni sul suo funzionamento (Fig. 8.6).

In molti casi è anche possibile per il costruttore intervenire sulla macchina da remoto per verificarne il corretto funzionamento, resettare impostazioni dei dispositivi elettronici o modificarne il settaggio, in accordo con il proprietario.



Figura 8.6. Gru a cavo con possibilità di monitorare l'impianto tramite App per *smartphone* o *tablet* (fonte: Greifenberg)

8.2.2. Mezzi forestali equipaggiati con multisensori

I moderni mezzi forestali vengono equipaggiati con sensori che sfruttano le tecnologie ICT e permettono di raccogliere dati riferiti al funzionamento e alle prestazioni delle macchine e attrezzature al fine di monitorare e ottimizzare le operazioni (Fig. 8.7). Le informazioni raccolte dai sensori sono visualizzate in tempo reale dall'operatore tramite il *display* di un *computer* di bordo (Fig. 8.8). Le stesse informazioni possono essere condivise (inviata o ricevute - vedi § 8.2.1) ed utilizzate in post-elaborazione per la valutazione delle prestazioni delle macchine e dell'efficienza del cantiere, nonché per avere un quadro dettagliato dei costi e disporre di una raccolta automatica di informazioni utili al tracciamento delle operazioni e alla tracciabilità del legname. L'operatore ha la possibilità di sovrapporre ed integrare queste informazioni con mappe dell'area (ortofoto), carte della viabilità (per stimare i percorsi più brevi), mappe di trafficabilità e mappe di siti suscettibili (vedi § 8.7.2) o mappe del volume legnoso.

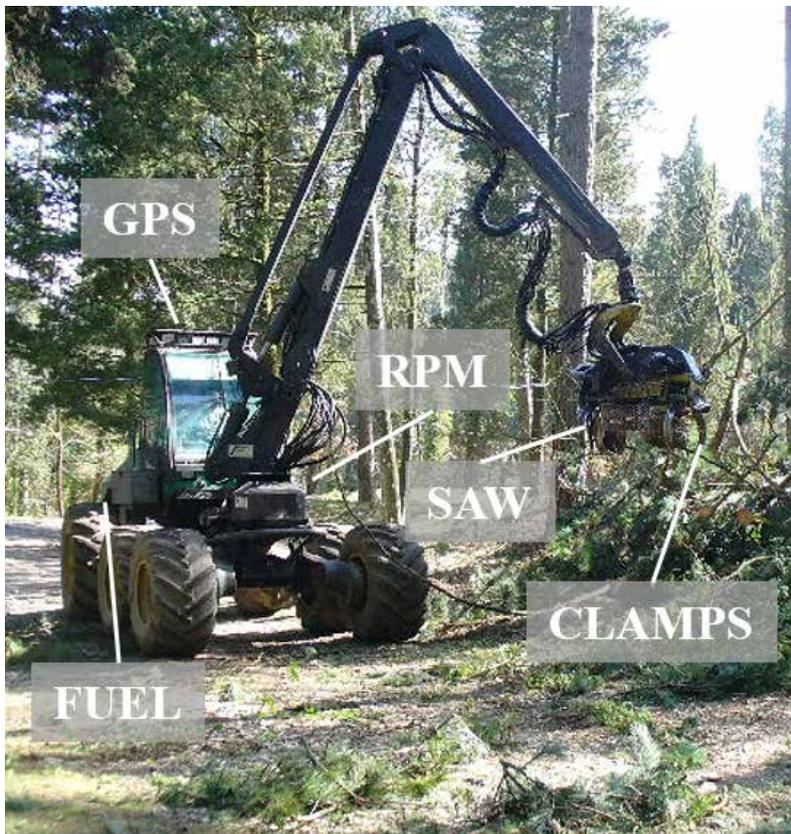


Figura 8.7. Esempi di sensori applicati ad un mezzo forestale. Il computer di bordo permette all'operatore di ricevere una gran quantità di informazioni (sia sul funzionamento della macchina sia sulle prestazioni produttive, sensori presenti: *SAW* - sega, *CLAMPS* - pinze, *FUEL* - carburante, *RPM* - giri al minuto, *GPS* *global positioning system*) (immagine: Elena Marra)



Figura 8.8. Schermata *display* di una macchina operatrice combinata per la visualizzazione in tempo reale di informazioni raccolte dai sensori installati (fonte: <https://www.komatsuforest.co.uk/forest-machines>)

8.3. PIATTAFORME E SOFTWARE PER LA GESTIONE DEI DATI

Le informazioni e i dati raccolti prima, durante e dopo i lavori di utilizzazione possono essere elaborati attraverso piattaforme dedicate. Le piattaforme disponibili consentono in alcuni casi di partire da dati relativi alle attività da svolgere nell'ambito di un determinato cantiere forestale (ad esempio, volumi da utilizzare, suddivisi per specie, ottenuti da inventari e progetti di taglio) per poi aggiornarli in corso d'opera sul lavoro effettivamente svolto durante le varie operazioni. In questo modo è possibile sapere via via quanto materiale è stato tagliato rispetto a quanto stimato oppure conoscere quanto materiale è stato esboscato rispetto a quello già abbattuto. Queste informazioni possono essere elaborate associandole ad un determinato sito di lavoro grazie alla creazione di cartelle su *cloud* o su *hardware* con codice identificativo univoco.

Alcune informazioni vengono raccolte in modo automatico dalle macchine e altre possono essere inserite dall'operatore o dal tecnico prima dell'inizio del lavoro. Le prime riguardano dati relativi a:

- parametri quantitativi e qualitativi del legname - diametro e lunghezza di ogni fusto, curvatura del fusto, numero di alberi abbattuti, volume legnoso totale e sua ripartizione in classi diametriche;
- produzione-tempi di utilizzo della macchina, volume stimato in metri cubi (totale e ripartito per assortimenti legnosi), riepiloghi periodici sulla produttività del parco macchine (Fig. 8.9);
- parametri riferiti al funzionamento del motore – consumo istantaneo carburante, carico motore, rotazioni per minuto, numero di giri e anomalie;
- georeferenziazione dei fusti e localizzazione a terra e/o in catasta.

I dati raccolti vengono elaborati e resi disponibili all'operatore in forma aggregata in modo da fornire, ad esempio: i dati volumetrici di ogni singola pianta abbattuta nell'area di lavoro (Fig. 8.10); la ripartizione degli assortimenti a seconda dell'utilizzo finale e il diametro medio dei diversi assortimenti.

Le informazioni inserite in tempo reale dall'operatore alla macchina riguardano aspetti particolari, quali aree con pendenza elevata (rischio di

ribaltamento) o con limiti di transito per scarsa portanza del terreno; queste informazioni vengono trasmesse a tutte le altre macchine che lavorano nello stesso cantiere (Fig. 8.11). All'interno di ogni area è possibile creare sotto-aree a cui collegare informazioni di dettaglio relative a condizioni specifiche.



Figura 8.9. Rapporti periodici di produttività e di funzionamento (*current week* - settimana in corso, *previous week* - settimana precedente, *current month* - mese in corso, *previous month* - mese precedente) del parco macchine a disposizione, elaborati dal sistema TimberManager di John Deere (fonte: John Deere)



Figura 8.10. Dati volumetrici di ogni singola pianta abbattuta nell'area di lavoro (immagine a destra, area sottoposta ad utilizzazione forestale delimitata in verde con alberi abbattuti indicati con cerchio rosso, colorazione crescente all'aumentare del volume legnoso misurato con i sensori presenti sulla macchina abbattitrice/allestitrice). L'operatore può visualizzare in tempo reale la ripartizione degli assortimenti a seconda dell'utilizzo finale e del volume (immagine a sinistra, legname classificato in legname da: *green log* - paleria, *bars* - tavole, *pulp* - cartiera, *other* - altro) (fonte: Tre-emetrics - FORESTHQ)



Figura 8.11. Visualizzazione sul *display* della macchina delle aree a rischio per pendenza eccessiva del terreno (sinistra) o per scarsa portanza del suolo (destra) (fonte: TimberMatic Maps)

Esistono *software* specifici per la gestione dei dati forniti dai costruttori di macchine e attrezzature forestali (es. TimberMatic Maps e TimberManager di John Deere e FORESTHQ di Treemetrics).

Un esempio di portale per la gestione dei dati è Silvismart (<https://www.silvismart.eu/>). Questa piattaforma è in grado di fornire informazioni strategiche all'imprenditore attraverso la digitalizzazione e analisi dei dati derivanti dai macchinari impiegati nelle utilizzazioni forestali. Al fine di poter utilizzare questo servizio, ogni macchina (es. *harvester* e *forwarder*) deve essere abbinata ad un ID univoco e all'account dell'imprenditore boschivo. L'utilizzo di Silvismart è, per ora, limitato allo standard di comunicazione comune StanForD (vedi § 8.2.1) e permette di visualizzare, analizzare e scaricare le informazioni selvicolturali provenienti da un singolo lotto e consultare indicatori di produzione come metri cubi lavorati all'ora.

Nella maggior parte dei casi i dati raccolti dai mezzi forestali sono impiegati per: ottimizzare le produttività, fornire informazioni per l'inventario dei prodotti abbattuti in bosco o a bordo strada e scegliere il percorso migliore da effettuare con i mezzi forestali al fine di ottimizzare il tracciato seguito nelle fasi di esbosco.

8.3.1. Ottimizzazione delle rese

L'impiego di *harvester* permette di ottimizzare la produzione legnosa tramite l'impiego di elenchi di priorità inseriti dall'operatore e un sistema di DSS automatico della macchina. Prima di ogni operazione l'operatore imposta gli assortimenti legnosi ammissibili e ritraibili per ogni specie forestale tramite l'attribuzione di diverse priorità (per ogni assortimento vengono impostati i parametri dimensionali e qualitativi richiesti dal mercato - Fig. 8.12), la macchina produce un profilo grafico del fusto per ogni albero abbattuto e sramato (Fig. 8.12) con cui determina l'ottimizzazione dell'assortimentazione: in questo modo l'operatore può visualizzare i dettagli del fusto rapidamente ed in modo continuo e in automatico la macchina ottimizza gli schemi di allestimento.

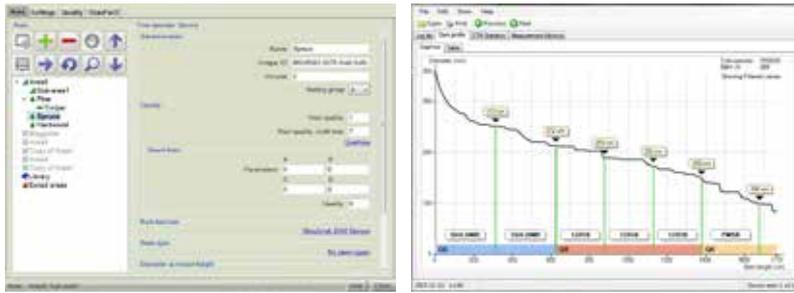


Figura 8.12. Schermate visibili su *display* di macchine combinate (*harvester*). L'operatore imposta parametri dimensionali e qualitativi per ogni specie forestale e le relative priorità a seconda della richiesta del mercato (sinistra). Tramite i multisensori della macchina viene riprodotto il profilo grafico di ogni fusto durante la sramatura (destra) con cui viene stimata, tramite DSS, l'allestimento ottimale (fonte: MaxiXT - Komatsu)

8.3.2. Ottimizzazione dei tracciati

Il fusto allestito viene georeferenziato ed è quindi possibile conoscerne la posizione (Fig. 8.13). Queste informazioni possono essere utilizzate per costruire una rete di punti di interesse formata dai singoli fusti (*Points of Interest - POI*) o da aree di interesse formate da un'intera area con legname a terra o una catasta (*Area of Interest - AOI*). Sia i *POI* che *AOI* sono visualizzabili sulla mappa del *computer* di bordo delle macchine forestali e possono essere utilizzati dall'operatore per ottimizzare il tracciato durante le fasi di esbosco (Fig. 8.14). Un esempio può essere l'abbattimento tramite *harvester* che geolocalizza tutti gli assortimenti abbattuti in una determinata area del cantiere; successivamente il *forwarder* che deve recuperare il legname ha la possibilità di visualizzare le aree già utilizzate e caricare il legname (Fig. 8.14). Inoltre, possono essere rintracciati rapidamente anche determinati assortimenti: ad esempio, se dopo l'abbattimento di un sito si vuole procedere ad esboscare paleria di castagno è possibile selezionare il tipo di assortimento e le cataste vengono visualizzate sulla mappa. La pianificazione del lavoro e l'ottimizzazione dei tracciati sono dunque realizzati semplicemente disponendo dell'esatta ubicazione e del volume di ogni tipo di assortimento visibile sulla mappa.



Figura 8.13. Schermata di visualizzazione delle aree utilizzate da una macchina forestale: è possibile avere un inventario del legname e dei singoli assortimenti (fonte: Treemetrics - FORESTHQ)

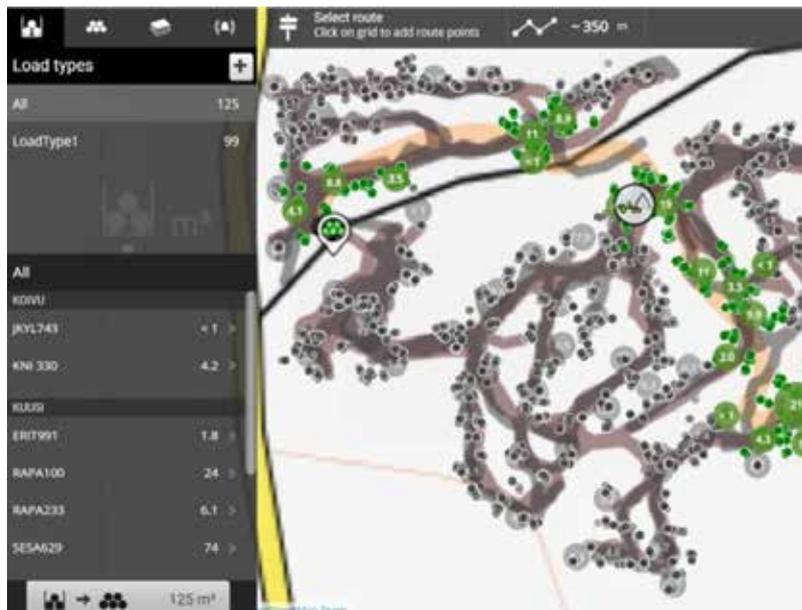


Figura 8.14. Display di bordo di un *forwarder*, l'operatore può visualizzare le singole piante abbattute dal *harvester* e il volume legnoso in ogni area per procedere ad esboscare. L'utilizzo di Timbermatic permette di ottimizzare i tracciati dei macchinari visualizzando il percorso più breve o migliore per raggiungere l'area di lavoro successiva (fonte: John Deere)

8.4. PIANIFICAZIONE E PROGRAMMAZIONE DEI CANTIERI

8.4.1. Ettaro-coltura forestale

Una stima corretta dei costi e del consumo di carburante può aiutare a calibrare le misure di sostegno destinate agli imprenditori. Ad esempio, gli agricoltori e i proprietari di foreste beneficiano generalmente del rimborso delle accise o delle quote di carburante esenti da imposta, ma l'importo del sostegno di cui possono beneficiare è spesso calcolato su modelli obsoleti, costruito quando le operazioni manuali erano semplificate e il consumo di carburante non era così prevalente come lo è oggi (Dreher e Krieger 2010). In quest'ottica è stato sviluppato dal CREA un sistema predittivo globale in grado di stimare i consumi, i costi e le emissioni per una serie di tecnologie di utilizzazione forestale in funzione delle condizioni del sito e delle prescrizioni selvicolturali. All'uso è disponibile una *web App* (<https://agroener.crea.gov.it/modello/formEF.html> - Fig. 8.15) per l'esecuzione *on-line* dei modelli predittivi sull'ettaro-coltura. Il *software* è costituito da un programma Java che implementa l'algoritmo per l'esecuzione del modello, prende in input le variabili e restituisce in output il risultato.

8.4.2. Progettazione esecutiva degli interventi

Con riferimento alla selvicoltura applicata in Italia è necessario tener conto di due aspetti fondamentali: il primo consiste nel fatto che il governo a ceduo è ampiamente diffuso e spesso predominante; il secondo è che le imprese forestali sono spesso ditte locali medio-piccole che applicano un livello di meccanizzazione basso o intermedio, ricadendo molto spesso nell'ambito applicativo della *small-scale forestry*, situazione ulteriormen-

te accentuata anche dalla complessa orografia della maggior parte del territorio nazionale che rende complessa l'applicazione estensiva di elevati livelli di meccanizzazione per quanto concerne i mezzi terrestri. Peraltro, la *PF* non è applicabile esclusivamente a grandi ditte di utilizzazione, che si avvalgono di macchinari moderni e performanti, ma può portare indubbi benefici anche in ambito di *small-scale forestry* (Picchio et al. 2019b). Una delle principali problematiche riscontrabili è la densità arborea ed arbustiva elevata, fattore che può limitare la visibilità e la percorribilità del popolamento forestale da parte di mezzi ed operatori e la facile individuazione dei confini del lotto boschivo (Li et al. 2021) (Fig. 8.16).

Progetto AGROENER

Modello previsionale per la stima dei consumi, dei costi e delle emissioni per le attività di lavoro in ettaro coltura forestale.

The screenshot displays the AGROENER web application interface, which is a green-themed form for estimating consumption, costs, and emissions for forest work. It is divided into four main steps:

- Step 1: Dataset**: Includes a dropdown menu for 'Tipologia' (Type) with the selected value 'abbattimento, abbattimento e allestimento, allestimento'.
- Step 2: Dati Agronomici**: Contains three sections:
 - OPERAZIONE**: Radio buttons for 'Abbattimento', 'Abbattimento e allestimento', and 'Abbatimento'.
 - GOVERNO**: Radio buttons for 'Ceduo', 'Furta di transizione', and 'Furta'.
 - SPECIE**: Radio buttons for 'Castano', 'Misto', and 'Lattuglie'.
 - TRATTAMENTO**: Radio buttons for 'Avvicinamento all'alto fusto', 'Diradamento', 'Taglio a raso', 'Diradamento selettivo', and 'Cespeziatura a furta'.
 - Input fields for 'DBH medio (cm)' (0.00) and 'Volume Pianta (m³)' (0.00).
- Step 3: Dati Meccanici**: Contains a 'Macchina' section with radio buttons for 'Forwarder', 'Skidder', 'Gru a cavo', and 'Trattore, ringhiera, escavatore, trattoria, gabio, pila'. It includes an input field for 'Potenza del motore (kW)' (100.000).
- Step 4: Dati Economici**: Includes an input field for 'Costo d'acquisto della macchina (€)' (100.000).

Both the left and right panels feature a blue 'CALCOLA' button at the bottom.

Figura 8.15. Schermata della *web app* sviluppata per la previsione di stima dei consumi, dei costi e delle emissioni per le attività di ettaro coltura forestale (immagine: Corrado Costa)

In caso di interventi in particelle forestali i cui confini non siano facilmente identificabili e coincidenti con strade, recinzioni o precedenti utilizzazioni, i tecnici provvedono alla loro individuazione e materializzazione in campo, generalmente identificando e marcando gli alberi di confine (Fig. 8.17). L'individuazione ed evidenza di confini riguarda non solo i limiti delle particelle forestali, ma anche altre situazioni nelle quali una particolare area venga esclusa dal taglio, ad esempio nel caso di rilascio di tare improduttive o di isole di biodiversità (vedi § 8.7.2), quando ci si trova all'interno di aree protette e zone della Rete Natura 2000.

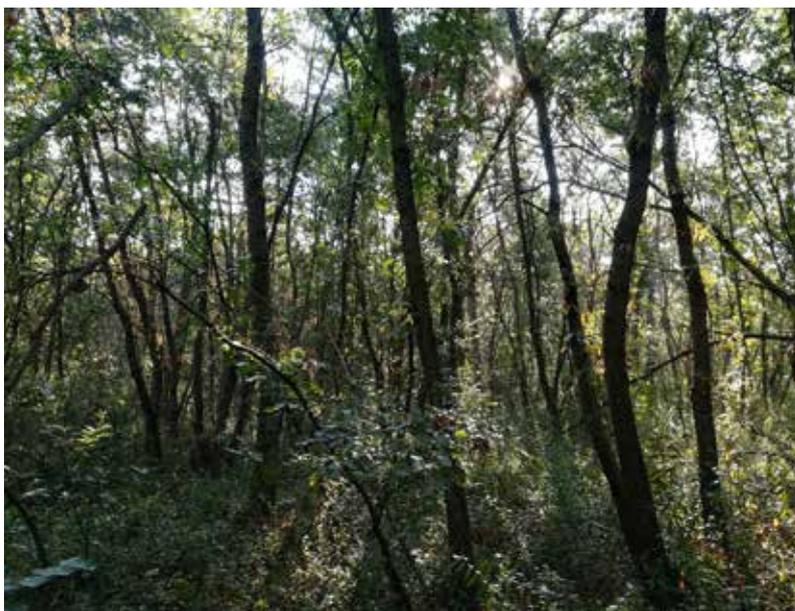


Figura 8.16. Ceduo quercino in area mediterranea; da notare l'elevata presenza di sottobosco (foto: Rodolfo Picchio)

Abbastanza frequenti possono essere sconfinamenti per errata visualizzazione del confine, calo della produttività di lavoro per identificare gli alberi marcati e richieste di chiarimento ai tecnici progettisti da parte della ditta di utilizzazione.

Una possibile soluzione a queste problematiche consiste nell'utilizzo degli *smartphone*, tecnologia disponibile su larga scala e collocabile perfettamente anche nell'ambito della *small-scale forestry* (Picchio et al. 2019b, Zimelman e Keefe 2021). Gli *smartphone* sono equipaggiati con tecnologia GPS/GNSS (Kangas et al. 2015, Kennedy et al. 2014, Olyazadeh et al. 2017) e in grado di raggiungere una precisione sotto copertura forestale tra 5 e 11 m (Tomaščík et al. 2017). Le applicazioni dei sistemi di posizionamento negli *smartphone* nel contesto delle utilizzazioni forestali spaziano dall'analisi delle produttività di lavoro (Keefe et al. 2019a, Zimelman e Keefe 2021), alla tracciabilità dei prodotti forestali (Figorilli et al. 2018), alla gestione dei dati sui prelievi legnosi (Kennedy et al. 2014) ma anche alla raccolta di informazioni su possibili problematiche di carattere fitosanitario (Maclauchlan 2016).



Figura 8.17. Marcatura di un albero perimetrale in ceduo quercino (foto: Rodolfo Picchio)

Una delle applicazioni più immediate nella progettazione esecutiva ed in cantiere consiste nell'uso semplificato dell'approccio del *geofencing* (o recinzione virtuale) (Fig. 8.18), con un *focus* particolare diretto alla salvaguardia della sicurezza sul lavoro per gli operatori forestali (utilizzato anche per condividere la posizione degli operatori in cantiere, vedi § 8.6 - Grayson et al. 2016, Wempe e Keefe 2017, Zimbelman et al. 2017): esso consiste nell'emettere un segnale di avviso o un altro tipo di stimolo quando un segnalatore installato su un dispositivo mobile oltrepassa il confine di un'area specificata (Bareth et al. 2010, Reclus e Drouard 2009). È un approccio già applicato in campo zootecnico in sostituzione delle classiche recinzioni in pali e filo spinato equipaggiando il bestiame con un collare *GPS* che emette una leggera scarica elettrica quando l'animale oltrepassa un dato confine (Butler et al. 2006, Umstatter 2011).

Esistono varie *App smartphone* (solo per citarne alcune: Avenza Maps, LocusMap, OruxMaps, Google Earth) che consentono di localizzare la

posizione dello *smartphone* (e quindi dell'operatore) e visualizzarla sullo schermo. Queste *App* possono funzionare come semplici *GIS* portatili, visualizzando sotto forma di *geofence* il confine della tagliata (sviluppato in formato *shapefile* dal tecnico progettista e convertito in formato *.kml* o *.gpx*); alternativamente, si può caricare sullo *smartphone* la mappa dell'intervento (allegata al progetto di utilizzazione forestale) in formato *GEOpdf*. In questo modo l'operatore riesce a visualizzare contemporaneamente la sua posizione e la localizzazione del confine della tagliata (o dell'isola di biodiversità) evitando così sconfinamenti o aumento dei tempi di lavoro dovuti a scarso orientamento all'interno della tagliata. Si procede in questo modo:

1. in fase di redazione della cartografia informativa il tecnico progettista converte lo *shapefile* dell'area di intervento in formato *.kml* (la maggior parte delle *App* non riconosce i sistemi di riferimento locali, quindi si raccomanda la conversione in *WGS84* dello *shapefile* del confine particellare prima della conversione in *.kml*);
2. il file *.kml* viene inviato via e-mail o *App* di messaggistica all'operatore;
3. l'operatore può salvare il file del perimetro della tagliata all'interno della memoria del proprio *smartphone* e cliccare sul file ricevuto per visualizzarlo nell'*App* selezionata;
4. con la localizzazione attivata sul proprio *smartphone* l'operatore visualizza nell'*App* sia la propria posizione che la localizzazione del confine;
5. procedura simile si applica caricando nell'*App* non il confine della tagliata in formato *.kml* ma il *GEOpdf* dell'intervento; in questo caso è necessario selezionare questa mappa come "sfondo" per la navigazione (procedura che varia da *App* ad *App* ma comunque molto semplice).

Ovviamente questo approccio non esclude la materializzazione da parte del tecnico forestale del perimetro dell'area forestale oggetto di intervento. La marcatura del confine da parte del tecnico forestale rimane infatti necessaria, ma con questo approccio lo stesso operatore può visualizzarla in maniera più rapida e precisa. Conoscendo la sua posizione e la relativa distanza dal confine l'operatore può integrare questa informazione con la propria vista, cosicché l'individuazione della marcatura degli alberi di confine del lotto boschivo risulta facile e veloce.

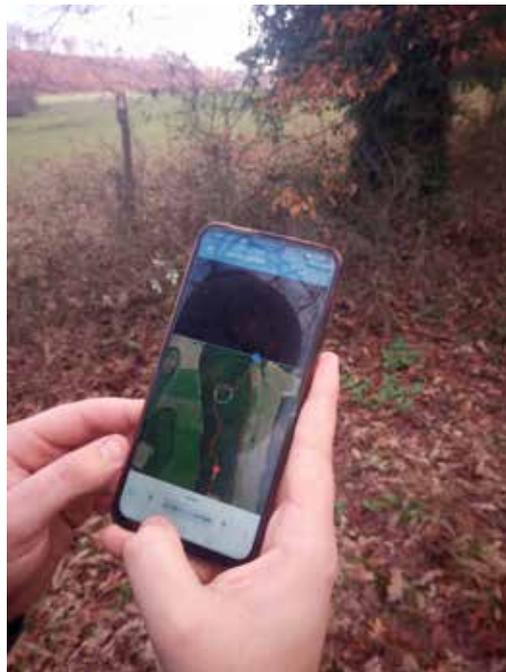


Figura 8.18. *Smartphone* con *App* attiva per *geofencing* (foto: Rodolfo Picchio)

La procedura si basa sul segnale GNSS ricevuto dallo *smartphone* e le mappe dell'area e i relativi perimetri delle tagliate sono disponibili offline in quanto salvate sulla memoria interna del telefono. La connessione internet del cellulare non è perciò necessaria, né per il posizionamento dell'operatore, né per la visualizzazione dei confini dell'area di intervento (o delle aree escluse dall'utilizzazione). Mediante una tecnologia che gli operatori forestali utilizzano tutti i giorni per diversi scopi è pertanto possibile mettere in pratica un approccio semplice ed immediato, ma in grado di portare benefici sotto tanti punti di vista; un breve periodo di *training* iniziale è necessario per rendere familiare la procedura agli operatori.

8.5. ASSORTIMENTAZIONE E MISURAZIONE DEI PRODOTTI LEGNOSI

Gli interventi di utilizzazione forestale, oltre che a mettere in pratica le decisioni del selvicoltore, dovrebbero avere lo scopo di ottimizzare l'attività produttiva indirizzando l'assortimentazione sulla base di principi che portino a massimizzare la qualità e il valore del materiale legnoso raccolto (Berti et al. 2003, Pollini 2006). Le scelte devono essere scrupolose e operate in relazione all'andamento dei mercati tenendo conto anche della sostenibilità delle produzioni. L'impiego di DSS nella definizione degli assortimenti legnosi può essere un valido strumento per raggiungere gli obiettivi sopra menzionati.

Generalmente è il singolo operatore che, nelle fasi di abbattimento e concentramento del materiale legnoso, determina quali e quanti assortimenti produrre da un determinato fusto: normalmente, l'operatore che effettua l'abbattimento e allestimento manuale con motosega sceglie gli assortimenti sulla base della propria esperienza e valutazione puntuale, spesso applicando esclusivamente un approccio dimensionale come la lunghezza dell'assortimento (Hippoliti e Piegai 2000).

Anche nelle operazioni di raccolta meccanizzata si applicano usualmente approcci dimensionali e gli operatori sono guidati da computer di bordo per la sezionatura a lunghezze predefinite del fusto. Talvolta la lunghezza dell'assortimento varia in base al diametro medio del fusto interessato dalla sezionatura.

Nell'allestimento del legname può essere più facile valutare qualitativamente l'assortimento tramite un'analisi visiva supportata anche da apposite *App* che mirano all'identificazione di alcuni requisiti, quali: lunghezza minima del toppe, velocità di crescita stimata sulla base della distanza tra gli anelli di accrescimento, presenza e misurazione dei difetti come nodi e cretti. Tali caratteristiche qualitative sono riportate dalle norme di riferimento (UNI EN 14081-1, UNI EN 338, UNI EN 1912). Recentemente è stata sviluppata una *App* per *smartphone* (es. T4E Bucking *App* - Fig. 8.5) che consente di individuare le misure ottimali degli assortimenti in relazione alla morfologia del fusto ed alla presenza di alcune tipologie di difetti. Si procede in questo modo:

1. prima di ogni operazione, l'operatore definisce i tipi di assortimenti legnosi richiesti; questa operazione viene effettuata utilizzando un foglio di calcolo che viene esportato dal computer e importato nel proprio *smartphone*; ogni assortimento deve essere definito dimensionalmente e qualitativamente tramite combinazioni di alcuni parametri come: i) specie, ii) lunghezza dell'assortimento, iii) classe di diametro (in base al diametro medio dell'assortimento), iv) qualità dell'assortimento (in base alla normativa di classificazione del legno es. UNI EN 1316-1, costituito da 4 classi principali A - eccezionale, B - corrente, C - di minor valore, D - non ammissibile nelle classi superiori, suddivise a loro volta in 4 sottoclassi sulla base

della presenza e dimensione di nodi e difetti), e v) prezzo al m³; un esempio completo di definizione di assortimento può essere: toppe di Abete rosso di 4 m di lunghezza, con diametro in 3^a classe (classe con diametro medio 35 cm), con qualità B e un prezzo di 90 euro m⁻³.

2. dopo aver definito gli assortimenti ammissibili è possibile aprire una nuova sezione di lavoro, con codice identificativo univoco per distinguere il singolo lotto di legname; le sezioni di lavoro sono numerate progressivamente; dettagli inerenti al periodo di lavoro (data di inizio e fine rilievo), la posizione geografica e altre note identificative, come la denominazione della località, possono essere aggiunte per distinguere il lotto.

3. la prima fase di valutazione da parte dell'operatore consiste nell'inserire la specie arborea e la dimensione del diametro a petto d'uomo misurata con cavalletto dendrometrico oppure con l'ausilio di *App* dedicate per *smartphone*; dopo l'abbattimento dell'albero è possibile inserire ulteriori informazioni specifiche come l'altezza della ceppaia, la lunghezza del fusto, la lunghezza della chioma, la lunghezza del cimale e la lunghezza totale dell'albero; l'utente deve inoltre determinare la qualità del fusto, annotando la distanza dalla ceppaia dove inizia e termina ogni tipologia qualitativa e la posizione di ogni difetto; il calcolo del volume del fusto (in m³, al netto della ramaglia) avviene in automatico tramite i parametri precedentemente inseriti;

4. dopo aver inserito i dati richiesti, vengono individuate le misure ottimali degli assortimenti ritraibili; l'utente visualizza una schermata dove sono riportati i dettagli degli assortimenti e lo schema di taglio dove si riportano le lunghezze a cui sezionare il fusto, tenendo conto anche del possibile scarto di lavorazione; la schermata (Fig. 8.19) mostra la rappresentazione del fusto da sezionare, riportando la qualità dell'assortimento e le misure di dettaglio di ogni singolo assortimento (misura a inizio e fine taglio) con il relativo valore di mercato; avendo un dettaglio del prezzo ricavabile da ogni singolo assortimento, è possibile eventualmente personalizzare l'ottimizzazione e osservare le variazioni del valore finale; i dati possono essere esportati per costituire un database utile per conoscere gli assortimenti disponibili in un determinato lotto.

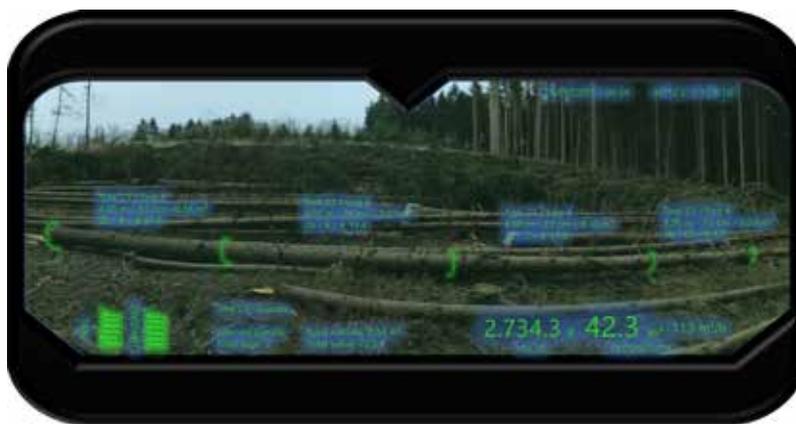


Figura 8.19. T4E Bucking *App* per individuare le misure ottimali degli assortimenti in relazione alla morfologia del fusto ed alla presenza di difetti. I dettagli dimensionali, qualitativi ed economici di ogni sezione di fusto sono riportati nella schermata (fonte: T4E Bucking *App*)

Nell'ambito del progetto europeo SLOPE è stato sviluppato un prototipo di processore forestale sensorizzato. Oltre ai comuni sensori di lunghezza e diametro, la macchina utilizza i seguenti sensori e attrezzature:

- sensore di pressione idraulico per misurare la resistenza al taglio (da mettere in relazione alla densità del legno);
- sensore di pressione idraulico per misurare la resistenza alla sramatura (da associare al seguente);
- celle di carico applicate ai coltelli mobili di sramatura (integrato con il precedente forniscono un indice di ramosità del tronco e la posizione approssimativa dei rami sul fusto);
- sensore laser per la misurazione delle vibrazioni libere (unito a un martello eccitatore, per la stima della densità del legno);
- sensore di misurazione del *Time of Flight (TOF)* per la stima della densità del legno (il sistema si basa sul martello eccitatore e due sensori cuneiformi inseriti automaticamente sotto corteccia nel tronco);
- allineamento di sensori ottici operanti in banda *NIR* (per l'individuazione di difetti superficiali);
- lettore e applicatore di etichette elettroniche UHF RFID (identificazione a radio frequenze, vedi § 9.2.3).

Il processore può essere utilizzato indipendentemente o in combinazione con altre macchine intelligenti e a supporto di un inventario forestale digitale. Infatti, il processore può essere utilizzato per classificare il tondame prodotto con una procedura simile alla valutazione visiva attualmente in uso (UNI ENV 1027). L'identificazione di ogni tronco con una etichetta RFID consente di conoscere in tempo reale la quantità e qualità di assortimenti prodotti dal cantiere e di ottimizzare la logistica nonché di popolare una piattaforma elettronica per aste "virtuali" del tondame a bordo strada. Se utilizzato nel contesto di un sistema di lavoro digitalizzato il processore può lavorare a bordo strada alberi interi esboscati con gru a cavo. In questo caso, per ogni albero identificato da etichetta RFID, possono essere trasmesse le istruzioni di allestimento calcolate sulla base della forma del tronco misurato con *TLS* (vedi § 4.1.2).

8.6. ERGONOMIA, SICUREZZA E STATO DI SALUTE DEGLI OPERATORI

L'attività forestale richiede un'elevata capacità ed esperienza nel riconoscere e prevenire possibili rischi. La disponibilità di applicazioni specifiche o dispositivi indossabili connessi al proprio *smartphone* può aiutare gli operatori a migliorare la propria salute e sicurezza sul lavoro.

8.6.1. Monitoraggio del benessere e dello stato di salute

Nel settore della *digital health* sono stati fatti notevoli passi in avanti (Lupton 2017): l'obiettivo principale è considerare un nuovo approccio alla prevenzione con l'integrazione di innovazioni tecnologiche e digitali. Per "benessere sul luogo di lavoro" si indicano tutti gli elementi fisici e mentali che, essendo direttamente correlati alla sicurezza e igiene sul lavoro, possono influenzare la salute degli operatori (D.lgs. n° 81/2008). Questo approccio integra gli aspetti fisici, psicologici e sociali ed individua nel contesto organizzativo la principale fonte di rischi per il benessere psicofisico dei lavoratori. Il concetto di salute organizzativa è definito dalle condizioni in presenza delle quali un'organizzazione è capace, nel suo complesso, di esprimere salute e di mantenere condizioni di benessere e qualità della vita

elevate per la propria comunità lavorativa (Avallone e Bonaretti 2003). Tali condizioni sono riconducibili a molti aspetti, tra cui la sicurezza lavorativa, la percezione dello stress, la collaborazione tra colleghi e l'efficienza organizzativa.

La valutazione dello stato di benessere personale è possibile tramite questionari specifici disponibili sotto forma di *app* per *smartphone*. Queste *App*, utilizzate dagli operatori forestali in vari Paesi (es. KYND, <https://www.kyndwellness.com>), permettono di segnalare lo stato di salute degli operatori in tempo reale e possono essere impiegate sia dalle singole persone (per migliorare e tenere sotto controllo il proprio stato di salute) sia in un contesto lavorativo per migliorare l'efficienza organizzativa; inoltre, rendono disponibili raccomandazioni e consigli, sotto forma di video, grafici ed articoli per migliorare l'eventuale situazione di malessere. È fondamentale un monitoraggio pressoché costante dei principali parametri vitali e, nell'ambito della prevenzione, inerenti allo stato di salute fisica e psicologica. Dispositivi indossabili come *smartphone* e *smartwatch* sono dotati di una varietà di sensori (*GPS*, giroscopi, magnetometri, sensori ottici) che permettono di visualizzare alcuni parametri vitali. Molti *smartwatch* permettono di misurare parametri utili come il battito cardiaco e la distanza percorsa quotidianamente; altri più sofisticati forniscono valori di pressione sanguigna, di saturazione o sono anche in grado di eseguire l'elettrocardiogramma. Le *smart-shirt* (Fig. 8.20) con tecnologia *IoT* utilizzano sensori dinamici per monitorare la frequenza cardiaca, la sua variabilità e dei sensori di risposta galvanica della pelle, chiamata anche conduttanza cutanea. Le fasce toraciche, per esempio, sono utilizzate per monitorare l'attività fisica ed il sonno dei lavoratori forestali al fine di capire come questi fattori possano contribuire ai rischi sul posto di lavoro (Bowen et al. 2019) e per prevedere l'affaticamento confrontando la frequenza cardiaca e i dati del conteggio dei passi con i tempi di reazione e di decisione (Bowen et al. 2019). Il monitoraggio di questi parametri consente di prevenire, possibilmente evitare, situazioni pericolose a causa dell'affaticamento fisico. Inoltre, i dati ottenuti possono essere utilizzati per monitorare lo stato di salute nelle singole fasi di lavoro. Utilizzando modelli di riconoscimento delle attività e monitorando i parametri vitali è possibile identificare le fasi di lavoro e quantificare le ore di lavoro svolte per migliorare la produttività, ridurre i costi e migliorare la sicurezza dei lavoratori.

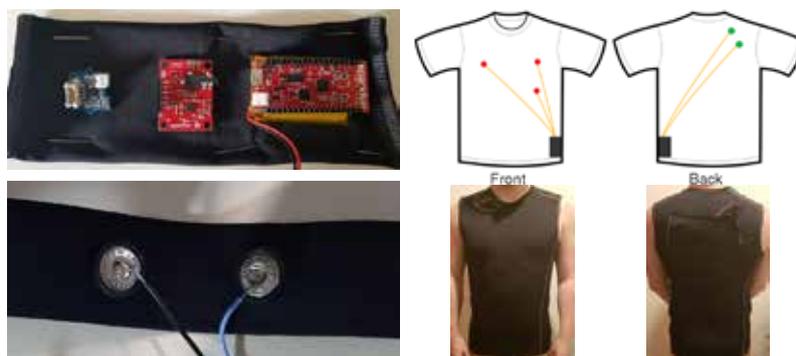


Figura 8.20. Prototipo di *Smart-shirt*. Dettaglio dei sensori (sinistra) utilizzati per il monitoraggio di parametri vitali e la loro collocazione (destra) (fonte: Hinze et al. 2022)

8.6.2. Valutazione del rischio degli operatori

A livello normativo spetta al datore di lavoro effettuare la valutazione del rischio tramite il DVR (Documento per la Valutazione del Rischio), documento che individua e categorizza i potenziali rischi nel luogo di lavoro (D.lgs. n° 81/2008). Il DVR ha l'obiettivo di analizzare, valutare e prevenire le situazioni di pericolo per i lavoratori. La disponibilità sul proprio *smartphone* di una guida semplice ma efficace sulla valutazione del rischio permette agli operatori di avere sempre con sé la possibilità di consultare la documentazione di riferimento, anche se in forma sintetica. Un'iniziativa della Regione del Piemonte ha portato allo sviluppo di un'*App* "Cantieri forestali sicuri" (<https://www.cantieriforestalisicuri.it/default110.aspx>) che permette agli operatori di consultare la documentazione sulla valutazione del rischio e di fornire altre utilità. L'attuale versione presenta quattro sezioni incentrate su aspetti generali della sicurezza nei cantieri forestali e su aspetti dettagliati della valutazione del rischio relativa a diverse fasi di lavoro. Inoltre, è presente una sezione che richiama la Scheda Minimo Etico in selvicoltura utilizzata per i controlli alle ditte da parte delle autorità e che rappresenta un utile supporto per condurre un'autovalutazione da parte dei datori di lavoro sugli adempimenti di sicurezza relativi al cantiere ed alle attrezzature. Inoltre, è presente una modalità di avvio della chiamata di emergenza al 112.

8.6.3. Sistemi di localizzazione e condivisione della posizione degli operatori

La meccanizzazione nelle utilizzazioni forestali ha portato ad una riduzione dei tassi d'infortunio; tuttavia, i membri delle squadre di terra che lavorano a fianco delle macchine rimangono ad alto rischio (Bordas et al. 2001, Roberts et al. 2005, Lagerstrom et al. 2017): negli USA, il contatto con oggetti e attrezzature rappresenta l'82% degli infortuni mortali tra i lavoratori forestali (Statistics 2018). La pericolosità data dalla distanza ravvicinata tra più operatori è aggravata dalla difficoltà di effettuare interventi tempestivi che non sono facilmente attuabili in aree remote come quelle forestali (come raggiungere in breve tempo un ospedale). Al fine di migliorare la sicurezza e ridurre gli incidenti nei cantieri forestali (in termini di numerosità e gravità) è possibile usufruire di tecnologie basate su sistemi di localizzazione e condivisione della posizione applicati su dispositivi indossabili (Zimelman e Keefe 2021), come *smartphone* e *smartwatch* dotati di una varietà di sensori (Keefe et al. 2019b) (vedi anche vedi § 8.4.2). Utilizzare tali sensori e sviluppare modelli di riconoscimento delle attività lavorative forestali e dei rischi connessi a tali attività è un passo verso la previsione di infortuni. Lo sviluppo di questi modelli si compone di differenti fasi mostrate in Fig. 8.21; la loro accuratezza è influenzata da una varietà di fattori, come il tipo e la qualità dei sensori nei dispositivi, la frequenza di campionamento, la posizione del dispositivo sul corpo, gli algoritmi di apprendimento.

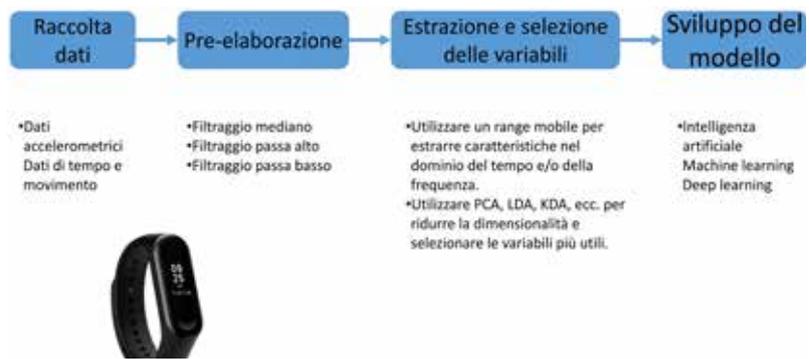


Figura 8.21. Schema del processo generale di sviluppo di un modello di riconoscimento delle attività. I passi coinvolti includono, tipicamente, (1) la raccolta di dati di studio del tempo da accoppiare con le misurazioni dei sensori indossabili, (2) la pre-elaborazione dei dati attraverso il filtraggio, (3) l'estrazione delle caratteristiche con cui costruire i modelli e (4) lo sviluppo di modelli di riconoscimento delle attività utilizzando *machine learning* e *deep learning*. I modelli possono essere programmati in *App* su *smartphone* e *smartwatch* e successivamente utilizzati per caratterizzare il lavoro attività in tempo reale per informare con notifiche per salute e sicurezza (fonte: Rodolfo Picchio)

Si sta infine diffondendo l'uso di un sistema che permette agli operatori che lavorano sulla macchina di vedere le posizioni di tutti gli operatori, sia a terra sia su altre macchine, in tempo reale sul *display* digitale utilizzando dispositivi di condivisione della posizione (Keefe et al. 2014). Questo sistema, basato sul concetto del *geofencing* (vedi § 8.4.2), aumenta la sicurezza durante le operazioni in bosco, riducendo l'incidenza degli infortuni mortali e quasi mortali. Il *geofencing* è stato proposto per delimitare aree con particolare rischio, ad esempio l'area che può essere interessata dalla caduta di un albero durante l'operazione di abbattimento (Becker et al. 2017 - Fig. 8.22) (vedi § 8.4.3). È possibile utilizzare il *GPS-VHF* per monitorare e registrare ogni volta che un trasmettitore di posizione di una macchina o di un lavoratore di terra attraversa il *geofence* in qualunque momento del ciclo produttivo. Questo rende il monitoraggio in tempo reale del ciclo produttivo disponibile per altri operatori (ad esempio *processor*, caricatore, o *skidders*) (Keefe et al. 2014).

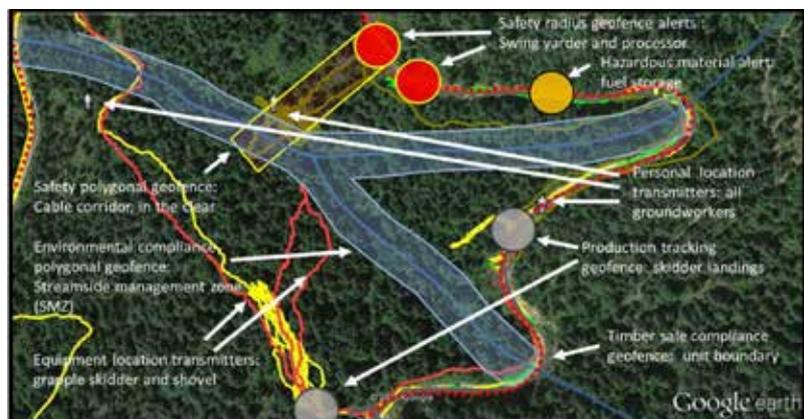


Figura 8.22. Esempio di un'unità di raccolta definita digitalmente accoppiando varie applicazioni di *geofence* con trasmettitori di posizione in tempo reale sulle attrezzature e i lavoratori a terra (fonte: Keefe et al. 2014)

L'App di sistemi GNSS alle macchine forestali può mitigare alcuni problemi di sicurezza degli operatori, fornendo dettagli sulla pendenza del terreno e lo stato della macchina in tempo reale (Marshall 2012). Uno dei pericoli maggiormente presenti nelle operazioni di utilizzazioni forestali su pendii ripidi è il ribaltamento della macchina (Garland et al. 2019). In fase di pianificazione e progettazione è possibile fornire all'operatore, in aggiunta alle varie mappe che vengono prodotte, mappe di rischio basate sul DEM, per fornire indicazioni sulla pendenza del suolo. In questo modo è possibile individuare aree di maggiore rischio e aree interdette al passaggio di macchine forestali. Tali mappe possono essere direttamente caricate sul computer di bordo della macchina e, grazie al sistema di navigazione integrato nella macchina, possono fornire informazioni sull'avvicinamento del mezzo ad un punto critico. Possono essere attivati sistemi di allerta, con l'invio di un messaggio visivo e/o sonoro all'operatore con differenti gradi d'intensità in base al livello di rischio dell'area in questione, attivati da apposito DSS (Marshall 2012). Un livello di dettaglio con maggior risoluzione, e di conseguenza anche di accuratezza (Fig. 8.23 - Marshall 2012), delle mappe di rischio può essere ottenuta utilizzando DTM derivati da *LiDAR*.

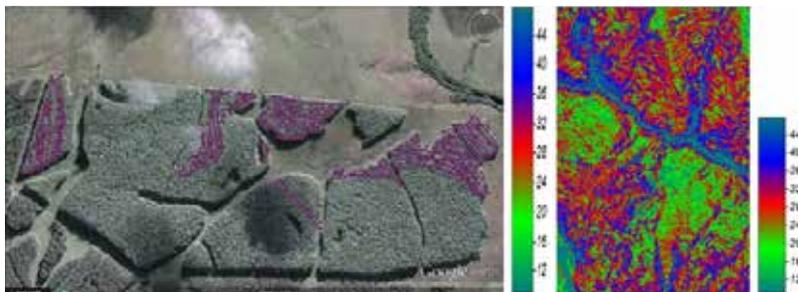


Figura 8.23. Indicazione visiva del progresso nell'abbattimento effettuato con un *harvester* in un cantiere - ogni punto viola rappresenta un albero abbattuto (sinistra - Fonte: Olivera e Visser 2016). Esempio di una griglia di pendenza generata da LiDAR (unità in gradi di pendenza) (destra - Fonte: Marshall 2012)

L'utilizzo di laser bidimensionali applicati sulla parte frontale della macchina è stato sperimentato per verificare l'approfondimento dei solchi sul suolo generati dal passaggio delle macchine (vedi §8.7.1). L'applicazione di questo sistema può essere utile anche per l'individuazione di ostacoli e accidentalità presenti sulla superficie (Fig. 8.24 - Salmivaara et al. 2018). Tuttavia, va ricordato che l'osservazione da parte dell'operatore non può essere sostituita dato che in caso di presenza di ostacoli, come ad esempio alberi caduti, il profilo del DTM sarà falsato (Marshall 2012).

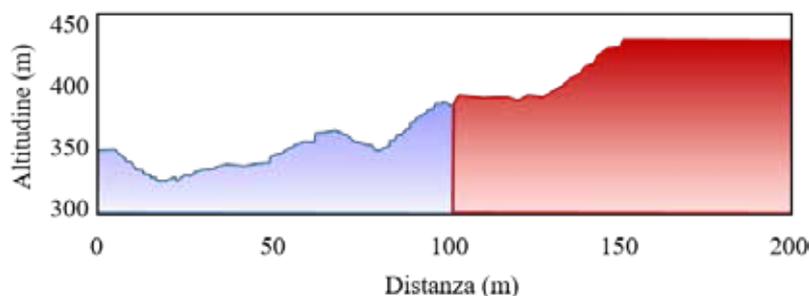


Figura 8.24. Il grafico del profilo del terreno mostra gli ultimi 100 metri che la macchina ha percorso (area blu), nonché una proiezione dei successivi 100 metri (area rossa) utilizzando il rilevamento in tempo reale della macchina (fonte: Marshall 2012, modificato)

8.7. MONITORAGGIO E

MITIGAZIONE DEGLI IMPATTI

8.7.1. Monitoraggio degli impatti al suolo

Il monitoraggio dell'impatto al suolo dei mezzi utilizzati per la raccolta del legno è fondamentale per mitigare i possibili effetti negativi del passaggio dei macchinari e prevenire i danni correlati. Il monitoraggio viene effettuato tramite analisi di parametri fisici, per determinare la compattazione, e la misurazione dell'approfondimento dei solchi. Questi dati sono tradizionalmente collezionati in seguito all'utilizzazione (post-utilizzazione) e confrontati con dati relativi al suolo prima del passaggio dei mezzi forestali (pre-utilizzazione) con strumenti manuali (metro, profilometro, etc.). Questi metodi risultano dispendiosi in termini di tempo e di costi e non permettono una rappresentazione completa del profilo longitudinale delle piste forestali (Pierzchała et al. 2016). Al fine di acquisire ed analizzare con maggior precisione la distribuzione spaziale dei danni al suolo, sono state applicate tecnologie ICT per la ricostruzione di modelli tridimensionali del suolo (Marra et al. 2018). Le tecniche di rilievo *proximal sensing* consentono, infatti, di produrre DTM ad altissima risoluzione, a scala temporale differente, che permettono di studiare in maniera dettagliata e precisa i disturbi al suolo causati dalle operazioni di esbosco.

La fotogrammetria, grazie allo sviluppo di nuovi algoritmi di *computer vision* implementati nei sistemi *SfM* (vedi § 3.7.1), e l'avvento delle tecnologie "GeoSLAM" (*SLAM* è l'acronimo di *Simultaneous location and mapping*) per il riallineamento delle scansioni laser scanner terrestre consentono la generazione di modelli digitali ad alta precisione utilizzabili per la quantificazione dei danni al suolo. La stima delle dimensioni dei solchi (profondità e volume) può essere effettuata mediante foto acquisite tramite fotogrammetria di prossimità (*close-range photogrammetry*) o da aeromobile a pilotaggio remoto (*UAV photogrammetry*) oppure tramite tecnologia laser scanner applicata su dispositivi personali mobili (come *PLS* - vedi § 3.7.2.1) o collocati direttamente sulla macchina forestale (*TLS* mobile - vedi § 3.7.2.1).

La fotogrammetria di precisione è stata la prima tecnologia utilizzata per la stima dei danni al suolo causati da mezzi forestali in grado di restituire una ricostruzione 3D del terreno in modo continuo (Pierzchała et al. 2016). Il rilievo viene effettuato con una macchina fotografica digitale standard posizionata su un cavalletto o treppiede ad un'altezza da terra che varia tra 1 e 4 m (Marra et al. 2018, Haas et al. 2016). Le foto scattate in sequenza con una adeguata sovrapposizione (solitamente 80%) vengono processate utilizzando programmi specifici per la modellizzazione (Marra et al. 2021a). I modelli 3D derivanti dalla fotogrammetria, generati tramite la tecnica del *SfM*, corrispondono ai conosciuti DSM (vedi § 3.7.1). Agisoft Photoscan® è il programma più utilizzato per ottenere i DSM ad alta risoluzione per la stima degli impatti al suolo. Meno utilizzati, ma gratuiti, i programmi PhotoModeller Scanner 7® e Multi-View Stereopsis. Le variazioni della profondità del solco dopo passaggi dei mezzi forestali sono generalmente calcolate mediante differenza DSM (Fig. 8.25), calcolando la variazione di profondità del solco tra il modello di riferimento (pre-utilizzazione) ed il modello di confronto (post-utilizzazione), sovrapposti e co-registrati tramite programmi come Cloud Compare®. La fotogrammetria ravvicinata permette un'altissima risoluzione (sub centimetrica) ma solitamente viene utilizzata in area ad estensione limitata (20-40 m² per ogni scansione).

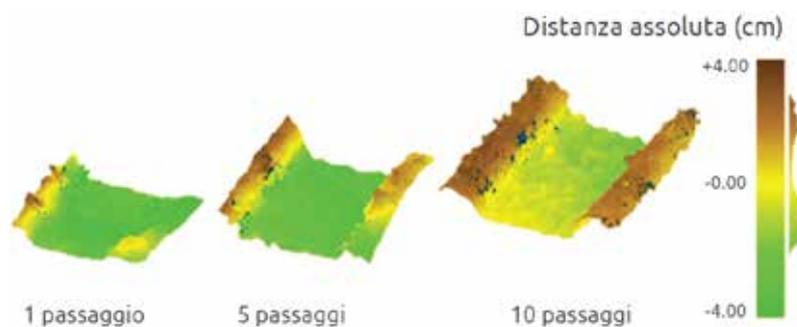


Figura 8.25. Ricostruzione 3D di solchi causati dal passaggio di un *forwarder*. L'aumentare dei passaggi provoca un maggior approfondimento (sezione in verde) ed accumulo di suolo laterale al solco (sezione marrone) (immagine: Elena Marra)

La fotogrammetria da *UAV* permette di ottenere ottimi risultati in termini di precisione nella stima dei solchi e un'ampia copertura di area analizzata (Marra et al. 2021b). L'utilizzo del *UAV*, solitamente ad una velocità (5-6 m/s) ed altitudine di volo media (120 m), permette di coprire aree molto ampie con una singola batteria carica (8-10 ha). Un vantaggio di questa tecnica è la velocità di applicazione in campo, sia nella programmazione sia nel vero e proprio rilievo. L'operatore può programmare il piano di volo utilizzando un'*App* gratuita da *smartphone* (es. PIX4Dcapture® - Fig. 8.26), seguendo i suggerimenti prestabiliti dell'*App* oppure inserendo parametri personalizzati. La scelta di parametri differenti da quelli preimpostati, come l'altezza di ripresa, la sovrapposizione tra i fotogrammi e l'ampiezza dell'area da analizzare, influenzano il tempo necessario al drone per effettuare il rilievo: quest'ultimo viene automaticamente aggiornato dall'*App* quando i parametri vengono modificati. La possibilità di pre-impostare e decidere il grado di sovrapposizione e l'altezza di ripresa permette di ridurre al minimo il numero di foto da raccogliere, riducendo così il tempo di elaborazione. La dimensione dell'area da sorvolare incide molto sul tempo di volo, che però può essere facilmente impostata e modificata manualmente visualizzando ortofoto e mappe scaricabili dall'*App* come sfondo del piano di volo. Le foto raccolte durante il volo del drone possono essere elaborate con programmi gratuiti (Cloud Compare®, Autodesk 123D Catch ecc.) che permettono di ottenere profili 3D dell'area analizzata. L'impiego di tempo per l'elaborazione dei dati è solitamente alto per la grande mole di dati, ma un primo passo verso la completa automazione della stima da remoto dei solchi è stata fatta grazie ad algoritmi specifici. Infatti, seppur in modo ancora sperimentale (Nevalainen et al. 2017), partendo da ricostruzioni del suolo ottenuti con fotogrammetria da *UAV* ed essendo a conoscenza di alcuni parametri del mezzo forestale che ha effettuato i lavori in bosco (dimensioni pneumatici, larghezza totale della macchina ecc.) è possibile ottenere una stima automatizzata di approfondimento dei solchi. La fotogrammetria da *UAV* ha una risoluzione inferiore rispetto a quella ravvicinata ma permette di coprire un'ampia area utilizzando anche applicazioni per il volo programmato che semplificano le operazioni di raccolta dei dati.



Figura 8.26. Immagine raffigurante l'applicazione PIX4Dcapture® con cui è possibile pianificare il volo del drone per stimare i danni presenti dopo il passaggio dei mezzi forestali (fonte: PIX4Dcapture®)

L'utilizzo di *PLS* (vedi § 3.7.2.1) per la stima dei danni al suolo è un metodo accurato e di facile utilizzo in campo. Lo strumento è, solitamente, composto da 1 o più sensori 2D che catturano nuvole di punti dimensionali accurate in tempo reale e utilizza la tecnologia *SLAM* per riallineare i dati nello spazio. L'operatore definisce lo schema di acquisizione in base al range (solitamente 15 m) e la velocità (solitamente 30 cm/s) di scansione dello strumento, percorrendo l'area interessata (Giannetti et al. 2017b). Un esempio è il *PLS ZEB 1* con cui è possibile raccogliere i dati necessari semplicemente camminando ai lati della pista forestale (Marra et al. 2021a), anche su lunghe distanze (110 m con una sola scansione). I dati raccolti devono essere processati tramite un servizio on line a pagamento (Geo-SLAMs). La visione delle scansioni in tempo reale non è quindi possibile, non garantendo l'integrità della scansione o la corretta esecuzione.

Possono anche essere applicati dei sensori direttamente sul mezzo forestale (Salmivaara et al. 2018 - Fig. 8.27): due sensori laser scanner 2D sono posizionati su macchine specializzate (*harvester* e *forwarder*) durante le operazioni di esbosco, sia sulla parte frontale del mezzo (per rilevare i dati morfologici del suolo prima del passaggio del mezzo, pre-utilizzazione) che sulla parte posteriore del mezzo (per rilevare il cambiamento nel profilo del suolo subito dopo il passaggio del mezzo, post-utilizzazione). L'applicazione sui mezzi di esbosco permette di valutare in tempo reale l'impatto al suolo, consentendo di realizzare immediatamente, ove necessario, interventi di mitigazione o, nei casi più complessi, di prevedere la sospensione temporanea dei lavori di utilizzazione.



Figura 8.27. Sensori laser applicati nella parte anteriore di un *harvester* (per rilevare il profilo del suolo prima del passaggio del mezzo) e posteriore di un *forwarder* (per rilevare il profilo del suolo subito dopo il passaggio) (fonte: © Luke/Jari Ala-Ilomäki)

8.7.2. Mappe di trafficabilità

Al fine di ridurre gli impatti al suolo causati dai mezzi forestali sono stati sviluppati sistemi per agevolare le decisioni di tecnici e operatori durante le scelte di periodi e modalità di esecuzione dei lavori in bosco. Rientrano tra questi le cosiddette mappe di trafficabilità (*trafficability maps*), che permettono di pianificare i tracciati ed i periodi migliori per operare tramite la stima della capacità portante del terreno.

Il portale “meteoblue®” fornisce un meteogramma sulla trafficabilità del suolo, basato sulla capacità portante dello stesso e sulle previsioni meteorologiche. La capacità del suolo di sostenere i veicoli in movimento viene stimata sulla base di caratteristiche sito-specifiche dell’area di intervento, come le caratteristiche fisiche (la tessitura, la capacità di trattenere l’acqua e l’umidità del terreno) e morfologiche (la pendenza e la presenza di falde) del suolo. In aggiunta a questi dati “Meteoblue®” incorpora le informazioni riguardanti le previsioni meteorologiche (precipitazioni, ore di sole, vento, ecc.) aggiornate alle medie stagionali degli anni precedenti e basate su sette giorni successivi. Questo sistema è sviluppato per fornire informazioni dinamiche, cioè variabili nel tempo, a seconda delle condizioni meteorologiche, della tipologia e sulla probabile umidità del terreno, fornendo indicazioni sulla transitabilità e sugli impatti attesi in caso di passaggio di mezzi pesanti. Il servizio restituisce la portanza del terreno, che viene stimata e classificata in tre classi: buona trafficabilità, trafficabilità ridotta, non trafficabile (Fig. 8.28).

L’*App T4E Mapping App* (Fig. 8.29) è stata sviluppata per fornire informazioni all’utente sulla percorribilità dell’area con mezzi forestali in tempo reale, combinando l’utilizzo di *GPS* alle mappe generate con l’algoritmo *Depth-To-Water (DTW)*. Il metodo *DTW*, sviluppato da Murphy et al. (2009), è l’approccio che richiede il minor numero di parametri per identificare le aree ad alta umidità e con una bassa capacità portante del suolo e quindi può essere applicato su ampia scala (es. europea). Gli indici di *DTW* sono calcolati sulla base delle carte delle pendenze (derivate dal *DEM*) e sulla previsione delle dinamiche di scorrimento e accumulo dell’acqua. Valori bassi dell’indice *DTW* indicano una bassa capacità di drenaggio dell’acqua in un determinato punto, e quindi una maggiore probabilità di ristagno ed alta umidità, che si traduce in area ad alta suscettibilità a danni al suolo. L’operatore forestale può utilizzare l’*App T4E Mapping* direttamente in campo sul proprio *smartphone* per visualizzare il percorso in base alla capacità portante del suolo: i) aprendo l’*App* è possibile scegliere una mappa di base (a scelta tra Google Street/Satellite/Hybrid maps, Open Street Map) a cui sovrapporre la mappa *DTW*, ii) l’operatore può visualizzare in tempo reale le zone più sensibili ad un eventuale impatto al suolo e quelle invece più adatte al transito, permettendo così all’operatore di scegliere piste efficienti e a basso impatto (per un maggior dettaglio è

possibile ingrandire la mappa e spostarsi sulla cartografia stessa), iii) una volta pianificato il percorso l'operatore può iniziare a svolgere le operazioni forestali attivando l'inizio del tracciamento, in questo modo sia il responsabile dei lavori che lo stesso operatore possono avere informazioni sul percorso e sulle eventuali aree suscettibili attraversate in ogni fase del lavoro (in fase di progettazione e di esecuzione dei lavori), iv) nel caso di prossimità o attraversamento di un'area suscettibile un messaggio di allerta viene emesso dallo *smartphone* per avvisare l'operatore (in modalità vibrazione o allarme acustico, entrambi opzionali), v) eventuali aree suscettibili (ad esempio, presenza di aree palustri) o ulteriori note possono essere segnalate manualmente sulla mappa, oppure scattando una foto. Un utilizzo secondario di questa *App*, ma non di minor importanza, è la possibilità di segnalare e/o evidenziare l'ubicazione di altre aree suscettibili come aree ad alta rilevanza naturale (alta biodiversità), siti ad alto valore culturale o paesaggistico (sentieri o percorsi ad alta importanza ricreativa), al fine di evitare il transito e l'accesso ai mezzi forestali in queste aree. L'uso delle mappe di trafficabilità in campo forestale è in rapida espansione: la sempre più elevata quantità di dati e informazioni disponibili, oltre alla crescente capacità di accedervi e di utilizzarli, rende plausibile una crescente diffusione di questi sistemi nel breve-medio periodo, con un elevato potenziale di miglioramento in termini di riduzione degli impatti e di aumento dell'efficienza delle lavorazioni.

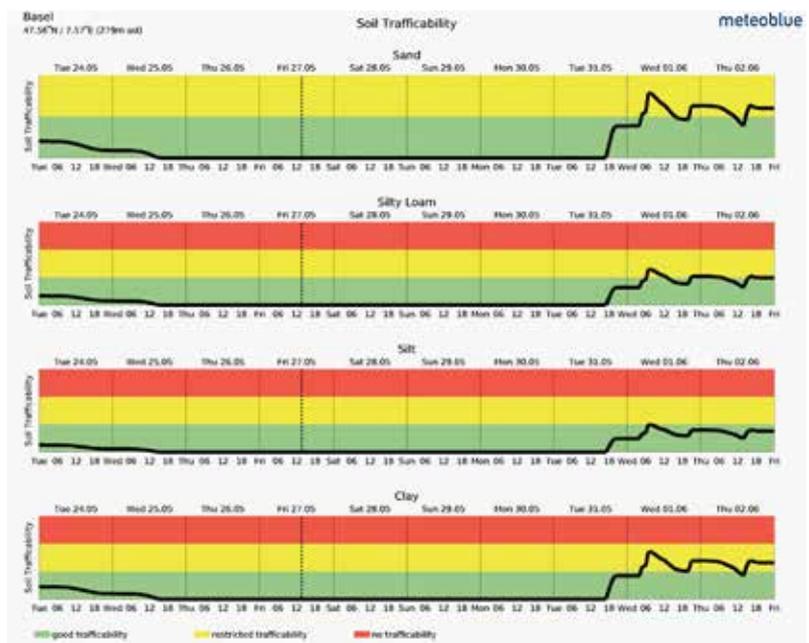


Figura 8.28. Esempio delle informazioni sulla transitabilità dei suoli fornite dal sistema “meteoblue®”. La portanza del terreno viene stimata e classificata in tre classi: buona trafficabilità, trafficabilità ridotta e non trafficabile (fonte: meteoblue - https://www.meteoblue.com/en/blog/article/show/34885_Soil+Trafficability++)



Figura 8.29. T4E Mapping App che fornisce un avviso visivo e sonoro all'operatore che con il proprio mezzo (rappresentato dall'indicatore blu) si trova in una zona soggetta a rischio (intensità maggiore di blu rappresenta un maggior rischio) (fonte: Latschbacher GmbH - www.latschbacher.com)

8.8. FORMAZIONE DEGLI OPERATORI FORESTALI

8.8.1. Realtà immersiva

Il lavoro in bosco è riconosciuto come uno dei settori produttivi più pericolosi (Albizu-Urionabarrenetxea et al. 2013, Lindroos e Burström 2010, Rhee et al. 2013, Tsioras et al. 2011) e, come tale, è inserito nella *hard work category* dalla ILO (*International Labour Organization*). I rischi legati alle utilizzazioni forestali sono dovuti sia alle macchine sia alle attrezzature utilizzate, ma anche alla complessità dell'ambiente in cui queste si collocano. Un'adeguata formazione sui comportamenti da seguire e su come condurre il lavoro, le macchine e le attrezzature, sia a livello individuale che di gruppo, comporta di fatto una riduzione dello stress da parte degli operatori e una riduzione del rischio di incidenti e infortuni. La formazione degli operatori può avvenire tramite approcci più o meno interattivi. Tra i meno interattivi rientrano le lezioni con esposizione frontale da parte del docente, che può essere integrata con la visione di video e di materiale didattico su manuali e schede di apprendimento. Tra i metodi più interattivi rientrano i corsi che presentano attività pratica; ne sono un esempio i corsi che prevedono l'apprendimento direttamente in bosco con approccio dell'imparare facendo (*learning by doing*).

A seguito delle sempre più elevate prestazioni *hardware* e *software* dei computer e della riduzione dei costi delle tecnologie digitali, l'apprendimento e la formazione professionale tramite giochi digitali (*digital game*) sta riscuotendo un certo interesse rappresentando potenzialmente un approccio innovativo ed efficace. Questo metodo pone le basi ideali per la formazione macchina-specifica tramite l'uso di simulatori e della realtà aumentata. I *digital game* consentono agli operatori non esperti di apprendere l'utilizzo di una attrezzatura o di un mezzo in un ambiente a realtà virtuale, più o meno complesso e con scenari specifici, garantendo un alto livello di sicurezza. Infatti, gli operatori possono prendere confidenza con le attrezzature e gli eventuali errori, che in condizioni reali sarebbero ad alto rischio, non influenzano la sicurezza dell'operatore e del formatore.

Nell'ambito della formazione sono applicate due tipi di realtà virtuale: non-immersiva ed immersiva. Nel primo caso, l'operatore in formazione si confronta con l'ambiente virtuale davanti ad uno o più schermi, che riproducono un ambiente tridimensionale con cui andrà ad interagire tramite *joystick* (Fig. 8.30). Questo approccio di formazione è quello attualmente più diffuso, applicato in particolare alla formazione degli operatori di macchine per movimento terra, ma adottato anche per le macchine forestali quali *harvester*, *forwarder* e *skidder*, sviluppati sia dalle case costruttrici di macchine forestali, sia da terzi (Fig. 8.31). Nel secondo caso, quello della realtà immersiva, l'operatore in formazione si trova isolato all'interno dell'ambiente virtuale ricreato e quindi completamente assorbito dalla realtà parallela (*digital-twin*) riprodotta. Questo approccio è quello più innovativo e si basa sull'utilizzo di visori che offrono la possibilità di immergersi letteralmente in un ambiente lavorativo e consentono di prendere decisioni su cosa fare, come agire, quali scelte operare. Alla base di questa condizione immersiva data dai visori, ci sono video, fotografie a 360°, modelli digitali rappresentanti la realtà in 3D. La simulazione immersiva permette di interagire durante la sezione di formazione in modo attivo grazie alla presenza del controllo oculare dei visori e può consentire la presenza contemporanea nello stesso ambiente virtuale del discente o dei discenti e del docente, così da avere un confronto diretto in tempo reale. Inoltre, per aumentare l'aderenza a una situazione reale, può essere ricreato l'ambiente sonoro di lavoro che rappresenta un elemento di disturbo che può condizionare la scelta di un'azione anziché un'altra.



Figura 8.30. Tipologie di postazioni utilizzate per la simulazione di macchine forestali (fonte: per gentile concessione di CM Labs Simulations, Inc. - <https://www.cm-labs.com/immersive-simulation-products/forestry-equipment-training-simulators/harvester/>)



Figura 8.31. Postazione mobile composta da *joystick* e visori progettata e commercializzata dalla ditta Komatsu, per simulare la guida di *harvester* e *forwarder* (foto: Elena Marra)

L'approccio della realtà immersiva sposa il principio del *learning by doing*, anche se in modalità virtuale. Essa, infatti, permette di condizionare la sessione di formazione simulando condizioni di lavoro anche molto complesse e rischiose. Ne consegue che la multi-sensorialità dell'esperienza, che coinvolge vista, udito, movimento corporeo, rende l'esperienza vissuta dal fruitore fortemente e a lungo impressa, così da garantire un'elevata efficacia dal punto di vista dell'apprendimento. A titolo di esempio, STIHL *Training* ha realizzato un ambiente virtuale in cui è possibile acquisire e simulare le operazioni di manutenzione degli attrezzi o anche l'impiego dell'attrezzatura in ambiente (virtuale). Si tratta di un sistema composto da un visore immersivo 3D che permette l'immersione nella realtà virtuale sia davanti ad un banco officina, sia per le attrezzature forestali, in bosco (Fig. 8.32).



Figura 8.32. Utilizzando gli occhiali per la realtà virtuale, gli utenti sono in grado di osservare in 3D gli attrezzi, come motoseghe (fonte: <https://stihl.smartvr.de/smartvr.html>)

A livello di macchine operatrici forestali è interessante un esempio implementato in Germania, basato su particelle forestali reali e ricostruite in 3D a partire da rilievi *laser scanner* da terra e aeromobile ad altissima risoluzione (Rossmann et al. 2016; Weiser et al. 2022). Questi ambienti virtuali

riproducono in modo dettagliato sia la componente arborea, sia quella del terreno e potenzialmente permettono simulazioni quasi reali dell'impiego di macchine forestali.

Il vantaggio di utilizzare simulatori di realtà virtuale per la formazione degli operatori di macchine forestali, in particolare nelle fasi iniziali della formazione, risiede nella possibilità di agevolare una veloce acquisizione minima di competenze per gestire la macchina in condizioni simili a quelle in foresta, in totale sicurezza. Inoltre, i simulatori di realtà virtuale promuovono la ripetizione, la possibilità di controllo da parte dell'addestratore e l'implementazione di un piano logico e di situazioni flessibili, mirando a garantire che la combinazione uomo-macchina possa raggiungere i massimi livelli di efficienza.

8.8.2. Sistemi digitali a supporto della formazione al lavoro in condizioni complesse

Un evento meteorico di forte intensità può portare gli operatori forestali, impegnati nell'attività di recupero del legname danneggiato, a lavorare in condizioni particolarmente complesse con la presenza di alberi sradicati, stroncati e piegati. Gli alberi sradicati e stroncati, generalmente sovrapposti caoticamente, così come i fusti inarcati per perdita di rigidità, rappresentano la condizione di lavoro più difficoltosa e pericolosa per gli operatori forestali addetti alle operazioni di recupero. La particolare complessità dell'operare in queste condizioni è testimoniata anche dall'*European Chainsaw Standard (ECS)*, che pone l'utilizzazione forestale del legname danneggiato da tempesta al livello di professionalità/complessità più elevato (livello 4).

Un esempio di tecnologie ICT di supporto è quello del rilevamento dei movimenti oculari degli operatori per analizzare il livello di attenzione e di osservazione nella fase di abbattimento, allestimento di legname in condizioni complesse. Si può quindi ricorrere all'impiego di occhiali intelligenti (Tobii® Glasses Pro 3 - Fig. 8.33) in grado di riconoscere la direzione e l'intensità dei movimenti della pupilla tramite il riflesso corneale di un fascio di luce vicina all'infrarosso utilizzata per illuminare l'occhio. Gli occhiali sono in grado di registrare quindi i movimenti della pupilla registrando tramite tecnica fotografica il riflesso della fonte di luce nella pupilla.



Figura 8.33. Posizione operatore (a sinistra) e fermo immagine del campo visivo con punto di attenzione registrato (a destra) tramite oculometria con l'impiego di occhiali intelligenti (immagine: Stefano Grigolato)

Un recente esempio di questa applicazione a livello nazionale è stato effettuato dagli Istruttori Forestali Lombardi e dall'Università degli Studi di Padova nell'ambito del progetto *SafetyForRescue* (<https://www.safetyforrescue.it>). Si è fatto ricorso all'impiego di occhiali intelligenti con tecnologia *eye-tracking* per verificare se esiste un diverso approccio e livello di attenzione adottato in fase di abbattimento in terreni a forte acclività tra operatori in fase di formazione, istruttori forestali e operatori con elevata esperienza e formazione.

Sempre nell'ambito dello stesso progetto si è ricorso allo sviluppo di una rete di monitoraggio per la misurazione in contemporanea delle tensioni delle diverse funi che compongono un sistema di gru a cavo (Fig. 8.34). Il sistema di monitoraggio impiegato si basa sull'impiego di più celle di carico collegate tramite rete *wifi* ad un unico ricevitore in grado di trasmettere ad un computer di campo le misure di quattro celle di carico. Queste misure vengono quindi visualizzate e registrate nel *computer* di campo. Questo sistema permette di vedere in tempo reale l'effetto del peso di un carico sull'incremento di tensione durante il trasporto e contemporaneamente osservare l'effetto sulla tensione delle controventature dei ritti e dei cavalletti. L'applicazione di un simile sistema di monitoraggio, in grado di monitorare in contemporanea più funi e trasmettere fino ad una distanza di alcune centinaia di metri ad un computer di campo per la registrazione e la visualizzazione delle misure, rappresenta un approccio innovativo in fase di formazione degli operatori forestali addetti al trasporto a fune: esso, infatti, agevola la consapevolezza negli operatori in fase di formazione degli effetti delle decisioni sui carichi scelti (volumi trasportati, ma anche forma e dimensioni del carico, ad esempio albero intero, fusto intero o legname a misura) sul sistema di trasporto a fune, ma anche sugli effetti della posizione dei carichi e degli attriti e ostacoli che si riscontrano nella fase di concentramento.

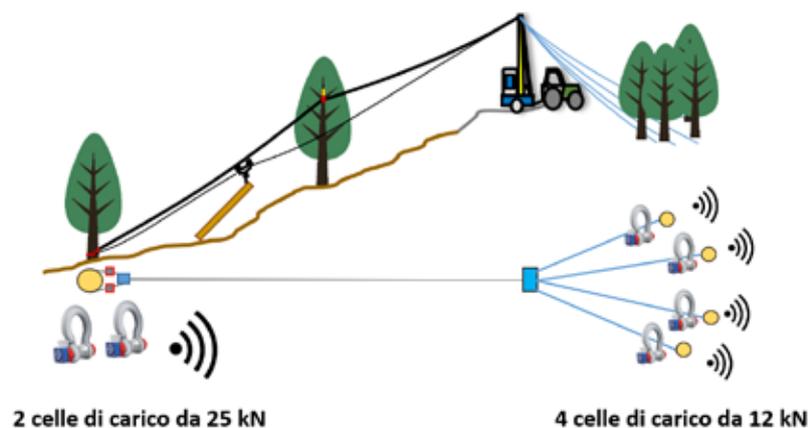


Figura 8.34. Schema di posizionamento delle celle di carico per il monitoraggio in continuo delle sollecitazioni delle funi che compongono un sistema di gru a cavo (immagine: Stefano Grigolato)

8.9. CENNI SULL'AUTOMAZIONE

I vantaggi apportati dall'uso di mezzi automatici o semiautomatici sono legati alla riduzione dei costi per il personale, considerando l'alta incidenza della manodopera (circa 35% in Europa) nel costo totale delle operazioni meccanizzate e ai lunghi tempi e costi legati alla formazione di operatori competenti (Hellström 2009). Inoltre, le macchine hanno prestazioni migliori, in termini di velocità, di precisione nella misurazione e di forza, rispetto agli esseri umani, permettendo così un minor spreco e una maggiore qualità degli assortimenti (McEwan 2017). Le macchine non subiscono un calo delle prestazioni nel corso di un turno di lavoro a causa della fatica (Stentz et al. 2002), sono più durevoli ed affidabili rispetto ad un operatore. L'automazione viene introdotta anche per migliorare le condizioni lavorative degli operatori, sostituendo il lavoro umano in caso di compiti pericolosi o estenuanti, come nel caso di lavori in miniera (Larsson 2011) o veicoli subacquei (Bingham et al. 2010). In questo senso, l'automazione permette di dedicare l'operato delle macchine a processi di lavoro ripetitivi e logoranti ed al contempo coinvolgere le risorse umane nei processi decisionali dove è importante la programmazione e la progettazione date dall'intelletto umano. Sistemi semi-automatizzati sono già presenti e applicati alle utilizzazioni forestali. Ad esempio, nelle fasi di esbosco con gru a cavo il sistema di comunicazione tra carrello e stazione motrice mobile e le tecnologie presenti sulla macchina possono agevolare notevolmente le operazioni. Le gru a cavo sono sistemi di concentramento ed esbosco caratterizzati dalla ripetizione ciclica di una serie di operazioni che sono effettuate, solitamente, da due operatori. L'applicazione delle tecnologie ICT ha reso possibile il sistema di lavoro con ciclo automatico del carrello (Fig. 8.35). Durante il primo viaggio del carrello vengono registrati i punti critici (cavalletti, punti estremi della linea) e i punti di carico e scarico. Il percorso memorizzato dalla macchina si ripete successivamente in modo automatico, variando la velocità del carrello durante i suoi movimenti tra il punto di carico e di scarico; il carrello rallenta nei punti critici della linea garantendo la massima sicurezza senza la necessità di intervento da parte degli operatori. In questo modo l'operatore alla gru cavo può svolgere altre mansioni durante i viaggi del carrello. Per motivi di sicurezza durante il funzionamento in ciclo automatico sono attivi dei sistemi di allarme che prevedono l'arresto automatico in caso di sovraccarichi o di situazioni di pericolo.



Figura 8.35. Gru a cavo con carrello Greifenberg per il concentramento e l'esbosco del legname con sistema di lavoro a ciclo automatico (fonte: Greifenberg)

Le limitazioni allo sviluppo di attrezzature automatiche nel settore forestale sono sia di natura economica sia logistica. La mancanza di una domanda di mercato su larga scala di mezzi forestali (Visser and Obi 2021) limita l'investimento economico da parte delle aziende produttrici. Inoltre, le caratteristiche dell'ambiente in cui devono operare le macchine limitano la velocità di sviluppo delle stesse (Westerberg 2014): il bosco ha un'eterogeneità intrinseca e, non avendo una struttura definita, è difficile prevedere in anticipo il comportamento in ogni singolo ambiente; ciò aumenta la difficoltà di sviluppo di mezzi automatizzati. L'ambiente forestale è spesso caratterizzato da percorsi complessi con presenza di ostacoli fisici (come ceppaie, residui di lavorazione e massi) da superare o evitare per non ribaltare il carico. Negli ultimi anni sono iniziate le ricerche per sviluppare dei sistemi di riconoscimento automatico degli ostacoli (Li e Lideskog 2021) e prototipi di macchine forestali automatiche (AORO - Fig. 8.36). Molteplici informazioni devono essere recepite dal mezzo in tempo reale (posizione esatta della macchina, coordinate del carico, rilevare gli ostacoli, identificare i tronchi ecc.), anche per questo motivo lo sviluppo di mezzi forestali si è incentrato prevalentemente su mezzi semiautomatici o sistemi ad assistenza continua.



Figura 8.36. Prototipo di *forwarder* autonomo sviluppato dall'*Arctic Off-Road Robotics Lab* (AORO) in collaborazione con Luleå University of Technology, Swedish University of Agricultural Sciences e The Cluster of Forest Technology (fonte: AORO)

Il primo passo verso la semiautonomia è stato lo sviluppo di macchine forestali manovrate a distanza (teleoperazione). Mezzi forestali, quali macchine abbattitrici, possono essere comandate tramite radiocomandi da lunghe distanze (*harvester* Harveri o eBeaver - Fig. 8.37), permettendo di ridurre la massa totale del veicolo (limitando l'impatto al suolo della macchina) e allontanando l'operatore dalla zona di rischio prossima alla zona di caduta dell'albero (eliminando l'abitacolo dell'operatore). Esistono sistemi forestali semi automatici, come il carrello Pully, che può svolgere un lavoro combinato con altri mezzi forestali. Il carrello semiautomatico viene guidato da una fune che connette due macchine forestali: dopo essere stato caricato con i fusti appena abbattuti da una macchina abbattitrice/allestitrice (*harvester*) trasporta il materiale verso un trattore articolato portante (*forwarder*).



Figura 8.37. Macchina abbattitrice controllata a distanza utilizzata in diradamenti (fonte: Jelavic et al. 2021)

Tracciabilità dei *prodotti forestali*

9.1. GESTIONE DELLE INFORMAZIONI NELLA FILIERA LEGNO

La tracciabilità è definita come la capacità di seguire il movimento di un prodotto attraverso specifiche fasi: produzione, lavorazione e distribuzione, tracciandone la storia, l'origine dei materiali, la lavorazione, la distribuzione e la posizione del prodotto (Abad et al. 2009). La rintracciabilità (*tracing*) è definita come il processo che permette di risalire alla origine e provenienza di un prodotto e alle sue trasformazioni nelle fasi cruciali della sua filiera produttiva, al fine di identificare un evento o un'azione specifica (Hsu et al. 2008). Uno dei principali problemi presenti sul mercato è definire gli strumenti per identificare l'origine delle materie prime dei prodotti finiti, al fine di garantirne la loro tracciabilità e rintracciabilità (Galtier et al. 2007). È essenziale fornire trasparenza e sicurezza ai consumatori che chiedono prodotti più sicuri e di origine certa. Ma la tracciabilità è anche importante per i produttori, perché garantisce la qualità della materia prima che viene introdotta nella filiera produttiva, permettendo la certificazione e l'accreditamento dei loro prodotti, localizzando rapidamente gli articoli problematici e implementando sistemi di controllo, prevenendo frodi e concorrenza sleale tra i produttori (Espiñeira e Santaclara 2016).

La legislazione e l'implementazione di regolamenti specifici sulla tracciabilità hanno stabilito sistemi di controllo, sia di qualità che di sicurezza, della filiera produttiva, garantendo la qualità dei prodotti che sono disponibili sul mercato. Questo, insieme all'implementazione dei sistemi di tracciabilità nei vari settori, ha aumentato la trasparenza del mercato, facilitandone l'apertura, l'internazionalizzazione di molti prodotti e la crescita generale delle industrie (Espiñeira e Santaclara 2016).

La digitalizzazione può favorire un miglioramento, una riduzione degli errori e dei costi e una maggior trasparenza nella filiera foresta-legno. Gli aspetti in cui è maggiormente evidente il potenziale contributo di una maggiore informatizzazione sono:

- cubatura degli alberi;
- richiesta di permessi di taglio e delimitazione dell'area interessata;
- martellata degli alberi da abbattere;
- gestione e controllo del cantiere forestale (inclusi gli aspetti di sicurezza del personale);
- verifica post-operazioni della corretta conduzione del cantiere forestale;
- cubatura e assortimentazione del tondame;
- gestione dello stoccaggio e della logistica degli assortimenti legnosi prodotti;
- appropriata allocazione del prodotto in base alle caratteristiche qualitative.

La disponibilità di dati sui boschi, sulle operazioni forestali e sugli assortimenti legnosi che vengono prodotti rende particolarmente utile l'adozione di sistemi di tracciabilità, ovvero strumenti che consentano di collegare queste informazioni ai prodotti e di trasmetterle lungo la filiera foresta-legno. A seconda del tipo di prodotto o delle specifiche esigenze operative è possibile tracciare singoli elementi (assortimento legnoso) oppure unità funzionali (ad esempio, il carico di un autocarro).

In particolare, un servizio di tracciamento accurato ed efficace può portare significativi benefici economici agli attori della filiera, garantendo la sua adozione e il suo impiego anche per finalità ambientali e sociali:

- con la tracciabilità dei prodotti legnosi le aziende sono capaci di gestire meglio le utilizzazioni forestali e le operazioni logistiche e di stoccaggio (ivi comprese le variazioni qualitative sul legname dovute all'esposizione agli agenti atmosferici);
- adottando un sistema di cubatura automatica, fusto per fusto, si evita la misurazione manuale (e spesso ripetuta da venditore e acquirente), consentendo fra l'altro di conoscere i quantitativi esatti disponibili, la suddivisione in assortimenti e classi di qualità nei diversi punti chiave della filiera (a bordo strada, in stoccaggi intermedi e nel piazzale della segheria) e di ottimizzare di conseguenza la logistica e il "piazzale" degli impianti di trasformazione;
- conoscendo in dettaglio le proprietà degli alberi in piedi e/o degli assortimenti legnosi ottenuti si può gestire la fornitura di tondame su base qualitativa sulla base delle standard di classificazione del tondame UNI EN 1316 per latifoglie e UNI EN 1927 per conifere; questo consente di inviare a ogni impianto di trasformazione direttamente dal bosco il tipo di materiale specifico per l'utilizzo previsto, ad esempio smistando i tronchi migliori per travature, Cross Laminated Timber o sfogliatura, quelli di qualità intermedia per la produzione di pallet e quelli di classe inferiore per la triturazione; ciò riduce i costi di trasporto nonché le emissioni di gas serra dovute a un inutile movimento di legname tra segherie.

Ai servizi offerti dalla tracciabilità si somma il potenziale della rintracciabilità:

- rintracciando a ritroso i prodotti legnosi fino all'albero di origine (o la particella forestale di origine) è possibile semplificare la certificazione dei prodotti (ad esempio, PEFC o FSC) e al contempo incrementarne il livello di dettaglio, aumentando il valore aggiunto del legname e contribuendo a combattere il taglio e il commercio illegale del legname;
- grazie a un sistema accurato di cubatura del legname effettivamente utilizzato è possibile migliorare i sistemi di inventariazione, nonché contabilizzare in maniera accurata il carbonio immagazzinato nel sistema forestale e i prodotti legnosi;
- la possibilità di collegare le condizioni di crescita degli alberi con le caratteristiche degli assortimenti legnosi, ad esempio misurate con tomografia 3D in segheria (vedi § 10.2.1), consente di approfondire la conoscenza della reazione degli alberi agli stress ambientali e il loro adattamento al cambiamento climatico.

9.2. TECNOLOGIE PER LA TRACCIABILITÀ

9.2.1. Sistemi per la marcatura del legno

I sistemi di marcatura e tracciabilità sono comuni nelle applicazioni industriali e di logistica. Essi si basano sull'applicazione di un codice univoco su ogni parte da identificare e sull'impiego di sistemi di lettura automatici installati in punti prefissati del processo produttivo. In alternativa, o in combinazione, possono essere impiegati sistemi di lettura manuali, ma capaci di fornire una risposta digitale che viene automaticamente riportata nel database generale.

L'identificazione di alberi e assortimenti legnosi nella filiera forestale comporta difficoltà tecniche legate all'ambiente esterno (pioggia, fango, alte e basse temperature, etc.), alla eterogeneità di prodotti e sistemi di lavoro e alle condizioni operative (con frequenti impatti e attriti tra assortimenti). Il sistema di marcatura deve essere tale da rimanere intatto e leggibile in tutti

i passaggi operativi, possibilmente consentendo l'identificazione anche a distanza (Korten e Kaul 2008). Inoltre, dato il basso valore unitario della maggior parte degli assortimenti legnosi, deve avere un costo ridotto e/o essere riutilizzabile. Infine, considerate le peculiarità del settore forestale, il sistema deve essere robusto e facile da utilizzare, rendendolo applicabile da tutti gli operatori della filiera foresta-legno.

Possono essere identificati due tipo di sistemi di marcatura e identificazione adatti al settore forestale: i sistemi ottici, basati sulla lettura con sensori ottici di codici o direttamente delle caratteristiche degli assortimenti legnosi, e i sistemi elettronici, basati sulla trasmissione di dati tramite onde elettromagnetiche.

9.2.2. Sistemi di identificazione ottici

Il sistema più diffuso si basa su etichette in plastica che vengono conficcate nel legno con appositi martelli. Sull'etichetta si possono stampare codici alfanumerici, a barre o QR, intestazioni o perfino un logo (Fig. 9.1). Normalmente vengono utilizzati per una lettura visiva dei codici su tronchi con alto valore commerciale, ma la presenza di un codice a barre consente anche la lettura automatizzata, ad esempio con *smartphone*. Quest'ultima accelera le operazioni ed evita gli errori di lettura e trascrizione, inevitabili se fatti manualmente.



Figura 9.1. Etichette plastiche professionali “plaquette” con codice a barre e alfanumerico utilizzate per la marcatura dei singoli tronchi (immagini: Gianni Picchi)

Il livello di automazione di questo sistema è relativamente ridotto dato che la lettura dei codici a barre richiede una corretta illuminazione e un posizionamento preciso del lettore rispetto al codice.

Un'alternativa ampiamente utilizzata sui segati è di stampare il codice a barre direttamente sul legno, evitando il costo dell'etichetta e la presenza di plastica negli scarti di lavorazione. Questo sistema è stato sperimentato con successo anche nelle utilizzazioni forestali, installando un sistema di spray sulla barra di motosega di un *harvester* (Möller et al. 2011). Questa soluzione consente di marcare ogni tronco prodotto senza ridurre significativamente la produttività delle macchine operatrici, e quindi senza incrementi di costo.

Un ulteriore sviluppo del sistema ottico è dato dalla ditta svedese Otmekka che ha creato un sistema di marcatura visiva basato su un codice unico impresso direttamente nel legno di ogni tronco con un gruppo di 12 martelletti mobili. La posizione reciproca dei segni consente di identificare un codice alfanumerico con un lettore ottico dedicato (Fig. 9.2). Anche questo sistema può essere installato direttamente sugli *harvester*, consentendo una rapida ed efficace marcatura del tondame.



Figura 9.2. Marcatura con codice a incisione nella fibra legnosa (fonte: Otmetka)

Un'ulteriore tecnologia ottica per l'identificazione e il tracciamento dei tronchi è il *fingerprinting* (Murphy et al. 2012). Questa soluzione crea una vera e propria impronta digitale e si basa sull'identificazione delle caratteristiche uniche di ogni tronco, come la forma, la distribuzione degli anelli e la posizione del centro. Richiede immagini con un alto livello di dettaglio, e al momento può essere applicato con efficacia in ambienti con illuminazione e angoli di lettura controllati (ad esempio, in segheria). Sono in corso studi per applicare sensori ottici direttamente sulle macchine forestali, rendendole capaci di acquisire immagini con qualità sufficiente a identificare ogni singolo tronco (Schraml et al. 2015). Come ulteriore beneficio, questo sistema sarebbe anche in grado di fornire informazioni qualitative del tronco, che potrebbero essere direttamente associate al suo identificativo univoco (ID) nel database di gestione degli assortimenti prodotti (Schraml et al. 2020) (Fig. 9.3).

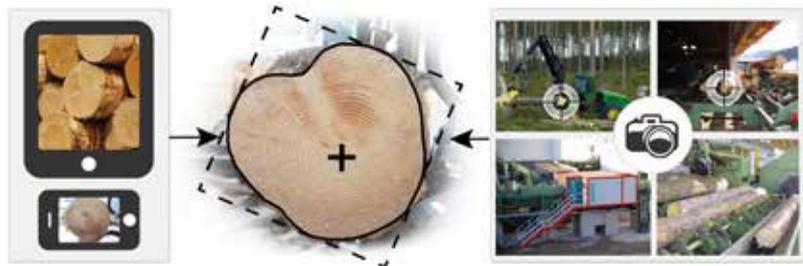


Figura 9.3. Concetto del sistema di identificazione dei tronchi per elaborazione di immagine e *fingerprinting* (fonte: Rudolph Schraml)

In ognuno dei casi riportati, l'acquisizione dell'ID avviene con videocamere mobili o fisse. Questo implica che il supporto del codice (o il tronco stesso nel caso del *fingerprinting*) deve essere ben illuminato, in una posizione corretta e privo di impurità come polvere o fango. Quest'ultimo aspetto può essere critico in un settore che svolge la maggior parte delle sue operazioni all'aperto. Un ulteriore limite dei sistemi ottici è dato dal fatto che non è possibile acquisire l'ID a distanza (ad esempio, di alcuni metri) né di effettuare acquisizioni di gruppo, per esempio del carico su un autocarro.

9.2.3 Sistemi di identificazione elettronici

I sistemi di identificazione elettronici utilizzano tecnologie a RFID combinano *tag* con *chip* specifici e antenne (Costa et al. 2013). Questa si basa sulla trasmissione di informazione con onde elettromagnetiche. Tipicamen-

te, un sistema RFID è composto da etichette elettroniche, che identificano gli oggetti, e un lettore a sua volta dotato di una o più antenne collegate al lettore vero e proprio.

Esistono diversi tipi di etichette RFID, ma nel settore forestale le più promettenti sono quelle passive *UHF* usa e getta (Björk et al. 2011) che lavorano anche ad una certa distanza di lettura tra etichetta e antenna (Fig. 9.4). Le etichette passive sono semplici ed economiche, e ottengono l'energia di attivazione per trasmettere il loro ID dall'onda interrogante emessa dall'antenna del lettore, per cui entrano in funzione soltanto nel momento in cui vengono lette. Con *UHF* invece si intende la frequenza in cui operano. Tra tutte le opzioni, questo sistema garantisce la massima distanza operativa di acquisizione, che in condizioni ideali può arrivare a qualche metro. La lettura dei *tag UHF* necessita di antenne dedicate e dispositivi industriali per la loro lettura. Il CREA ha sviluppato un prototipo *open-source* portatile e facilmente utilizzabile che integra un'antenna *UHF* e trasmette via *bluetooth* l'informazione ad uno *smartphone* (Figorilli et al. 2018).

Una tecnologia ancora poco esplorata nel settore forestale è quella *NFC*. Il vantaggio nel suo utilizzo risiede nel fatto che l'antenna per la lettura dei *tag* è spesso presente negli *smartphone* più diffusi e non c'è quindi la necessità di utilizzare antenne esterne per la lettura. La durabilità dei *tag* è la medesima ma i costi complessivi (singolo *tag* e assenza di lettore esterno) sono decisamente inferiori. Lo svantaggio è che la lettura deve essere effettuata per contatto tra antenna e *tag* e non si presta quindi a letture a distanze per operazioni industriali. In alcuni casi questo non è un problema come, ad esempio, per i prodotti lavorati. Sono in corso sperimentazioni per l'utilizzo delle tecnologie *NFC* sulle piantagioni di pioppo.

Data la facilità d'uso, le etichette RFID possono essere impiegate per marcare alberi in piedi, rimanendo operative per oltre 24 mesi (Picchi 2020).



Figura 9.4. Esempio di lettore RFID a basso costo, basato su Arduino (sinistra - foto: Costa Corrado) e di etichette elettroniche applicate su tronchi esboscati (nell'immagine a destra, l'etichetta bianca è una comune etichetta commerciale adattata, mentre l'etichetta con antenne rosse è un prototipo specifico per la filiera foresta-legno) (foto: Gianni Picchi)

Esse, inoltre, consentono di acquisire l'ID in modo totalmente automatico, grazie alla maggior flessibilità in termini di distanze e angoli di lettura rispetto ai sistemi ottici. Le forme più idonee per i *tag* sono quelle a barretta che si possono inserire con applicatori appositi o semplici etichette piane e plastificate, applicabili manualmente con spillatrici o con sistemi automatici. Lettori RFID sono stati installati su gru a cavo e processori forestali identificando con successo le etichette applicate agli alberi esboscati e ai tronchi che venivano prodotti da questi (Fig. 9.5). Il sistema di lettura è minimamente influenzato da polvere e fango, per cui anche nei casi in cui l'etichetta non risulti visibile ad occhio nudo, l'ID può essere comunque acquisito dal sistema di lettura.



Figura 9.5. Il progetto europeo SLOPE ha sviluppato prototipi di macchine intelligenti per la tracciabilità dei prodotti legnosi: a sinistra, gru a cavo equipaggiata con antenna *UHF* RFID; a destra, processore sensorizzato (notare l'antenna bianca in alto e l'etichetta RFID appena affissa sul tronco dal sistema automatico) (foto: Gianni Picchi)

La capacità di acquisizione a distanza consente anche di identificare gruppi di oggetti, come i tronchi caricati su un autocarro: questo può essere il caso di un portale elettronico all'ingresso di una segheria, che consente di gestire con dettaglio ingressi e uscite dal piazzale di stoccaggio, nonché automatizzare la fatturazione dei fornitori.

Per quanto le etichette elettroniche si siano dimostrate capaci di superare indenni le operazioni forestali (Picchi et al. 2015), la lettura delle RFID lungo la filiera foresta-legno non garantisce sempre l'identificazione della totalità delle etichette. Inoltre, il costo unitario delle etichette, che si attesta attorno alle 0,27-0,6 € per i *tag UHF (Ultra High Frequency)* e 0,1-0,5 € per i *tag NFC*, può risultare elevato, soprattutto per marcare assortimenti legnosi di basso valore unitario.

Per quanto riguarda la tracciabilità dei prodotti a monte della segheria, la soluzione più promettente per l'identificazione individuale dei prodotti forestali è attualmente un sistema ibrido ottico/elettronico che consenta di selezionare la modalità di marcatura a seconda delle condizioni di lavoro, degli assortimenti prodotti e delle specifiche esigenze degli operatori.

In segheria e nelle fasi successive di trasformazione le soluzioni più idonee ed economiche sono quelle a *tag* con codici a barre o *QR-code*: le informazioni sono stampate su etichette cartacee o plastiche ed incollate sui singoli prodotti, possono essere lette e scritte da semplici *smartphone* o da *devices* dedicati ed anche il consumatore è in grado di leggerli; sono adatti ad essere applicati in ambienti interni dove è molto alta la possibilità che possano rimanere integri.

9.2.4. Architetture di infotracing e blockchain

Le tecnologie *smart* disponibili a basso costo consentono l'ampliamento del concetto di tracciabilità nella realtà applicativa permettendo di associare al prodotto l'intera storia inerente il flusso informativo, l'origine delle materie prime, le tecniche di produzione ecc. La piattaforma ICT che integra le informazioni acquisite lungo la filiera e ne consente la fruizione ad ogni fase e ad ogni livello strutturato è definita *infotracing* (Papetti et al. 2012). L'*infotracing* è la procedura che integra le informazioni legate al prodotto e alle eventuali fasi di trasformazione con quelle legate alla tracciabilità (fisica e documentale) all'interno di un sistema informativo online. I sistemi di *infotracing* possono fornire un'interfaccia *web* di riferimento per accedere alla scheda informativa del prodotto che visualizza le informazioni e i dati rilasciati come *feedback* dal produttore, grossista, rivenditore e consumatore (Figorilli et al. 2018) (Fig. 9.6).

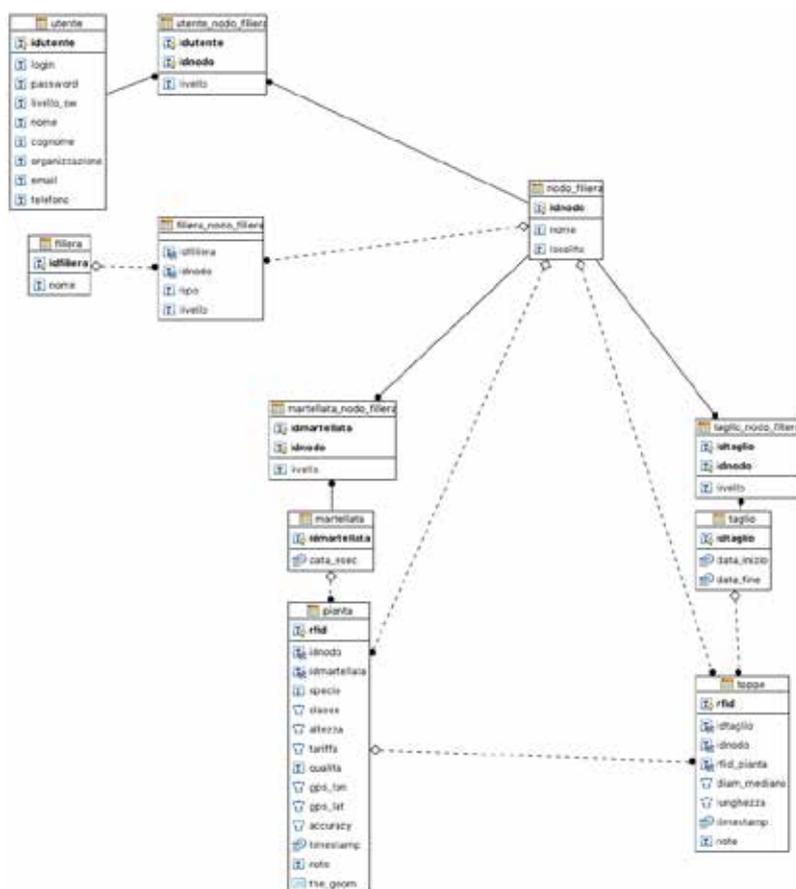


Figura 9.6. Piattaforma di *infotracing*: esempio di schema relazionale del database limitato ai processi della filiera legno (immagine: Corrado Costa)

Una delle tecnologie più sicure per garantire la tracciabilità informativa è la *blockchain*. Un sistema *blockchain* è un database distribuito di registrazioni, costituito da “blocchi” criptati di tutte le transazioni o eventi digitali che sono stati eseguiti e condivisi tra le parti partecipanti, e possono essere verificati in qualsiasi momento nel futuro. Una volta inserite, le informazioni all’interno dei blocchi non possono essere cancellate o modificate. La tecnologia *blockchain* contiene una registrazione certa e verificabile di ogni singola transazione effettuata e i suoi blocchi possono essere usati per coordinare un’azione o verificare un evento. Questo viene fatto senza compromettere la *privacy* delle parti coinvolte. Per evitare che fonti di terze parti come banche, governi o social network siano violate, manipolate o compromesse, questa tecnologia utilizza algoritmi matematici che richiedono una notevole potenza di calcolo per essere risolti (Nakamoto 2009). Questa misura di protezione rende difficile per i potenziali aggressori corrompere un database condiviso con informazioni false, a meno che l’aggressore non possieda la maggior parte della potenza di calcolo dell’intera rete. Le *blockchain* permettono la tracciabilità *end-to-end*, consentendo ai consumatori di accedere alla storia dei prodotti, tramite l’etichetta e i loro *smartphone*. Tutti i partecipanti alla rete commerciale sono d’accordo sulle informazioni acquisite in ogni transazione. Una volta raggiunto il consenso, non è possibile alterare nessun dato permanente. Ogni informazione fornisce dati critici che possono potenzialmente rivelare problemi di sicurezza con il prodotto in questione. Questo sistema di *blockchain* può anche aiutare i rivenditori a gestire la durata di conservazione dei prodotti, e rafforzare ulteriormente le garanzie relative all’autenticità degli stessi. In questo modo,

tutti i soggetti coinvolti nella filiera produttiva sono stimolati a dimostrare ai clienti la qualità superiore dei loro metodi e prodotti (Smith 2008).

9.2.5. Esempi applicativi

Nell'ambito del progetto PON AlforLab (<https://foresta.sisef.org/archive/?action=browse&by=coll&arg=ALFORLAB&lang=it>) e del progetto AGRIDIGIT (<https://www.progettoagridigit.it>) è stato messo a punto dal CREA-IT un prototipo operativo per la tracciabilità elettronica dall'albero in piedi fino al prodotto finito. Il sistema di *infotracing* integra le informazioni relative alla qualità del prodotto con quelle relative alla tracciabilità (documenti fisici e digitali su architettura RFID-*UHF*) all'interno di un sistema di informazione *online* le cui fasi (transazioni) sono rese sicure per la prova di alterazione attraverso la *blockchain*. Sono utilizzati vari tipi di dispositivi e *tag open source Iot* (vedi §9.2.3), e un'*App* specifica per le operazioni forestali è stata progettata per raccogliere e memorizzare in un database centralizzato informazioni (ad esempio, specie, data, posizione, dendrometrica e informazioni commerciali). Il legno è tracciato dall'albero in piedi tramite *tag* RFID *UHF* a chiodo all'atto della martellata ed in prossimità del "timbro"; le informazioni vengono lette da un'antenna portatile *open-source* collegata in *bluetooth* ad uno *smartphone* e registrate tramite un'*App* specifica in *cloud* su una piattaforma di *infotracing*. Nella fase di abbattimento e allestimento per ogni toppo sono registrate le informazioni legate alla martellata e trasferite tramite la stessa *App* ad ogni toppo dove sono inseriti altri *tag* RFID *UHF*. In questo modo le informazioni dei singoli topi possono essere gestite in maniera efficiente all'imposto. Una volta trasferiti in segheria, i topi sono letti in maniera automatizzata da una antenna *UHF* industriale e sul legname di pregio è inserita una etichetta con codice a barre o QR-code (Fig. 9.7) che mantiene le informazioni fino all'oggetto prodotto per il consumatore finale. Un video che illustra le attività è reperibile al sito: <https://www.youtube.com/watch?v=G6CyFO81yN0>.

Il progetto *Greenbee* (www.greenbee.it), svolto in collaborazione con la società *The Hub*, ha lo scopo di ridurre l'impronta di carbonio di una singola persona o di un'attività tramite la piantumazione di alberi registrati sulla *blockchain* attraverso *token TREE*. La piattaforma *Greenbee* avvia la tokenizzazione delle foreste e delle piantumazioni urbane e periurbane, utilizzando la *blockchain* della società *The Hub* per obiettivi di sostenibilità, collegando ad ogni singolo albero un codice ID digitale che serve ad assegnare univocamente l'albero. Il progetto è basato su obiettivi di protezione ambientale e sostenibilità raggiungibili grazie all'uso della *gamification* (ludicizzazione, cioè l'utilizzo di elementi e di tecniche che vengono mutuati dai giochi in contesti non ludici). Questi strumenti consentiranno a *Greenbee* di monitorare la piantagione, lo stato di avanzamento dei lavori e di misurare l'impatto ambientale e sociale positivo generato.

Nell'ambito del progetto "VigoForPoplar" (<https://www.innovaturale.it/it/pei-agri/gruppi-operativi/bancadati-go-pei/una-filiera-corta-nel-sistema-pioppo-valorizzare-le>) è stato recentemente realizzato un *software* gestionale (*WOOD GEST*) in grado di tracciare il prodotto dal campo al cliente finale a garanzia della qualità e della sostenibilità delle produzioni e del rispetto di requisiti ambientali, sociali e di lavoro sicuro a tutti i livelli della filiera (Regolamento (EU) 995/2010 EU *Timber Regulation*, certificazione di processo e di prodotto sostenibile, certificazioni ISO e formazione per la sicurezza nei cantieri e nei luoghi di lavoro). *WOOD GEST* lavora su un *database* denominato ARXIVAR che consente attraverso la creazione di profili utenti con accesso riservato (vivaista, aziende agricole, abbattitori, commercianti, trasportatori e industria di trasformazione) di gestire un flus-

so documentale collegato ai pioppeti e al legno che deriva dalle piantagioni fino all'utente finale. La documentazione registrata negli archivi comprende la locazione dei lotti georeferenziati, i titoli di possesso, i certificati di identità clonale del materiale vivaistico, le certificazioni di prodotto, le autorizzazioni a produrre a livello vivaistico e agricolo, la documentazione relativa alla sicurezza nei cantieri di lavoro (DVR) e tutta la documentazione contabile e fiscale per tracciare il trasferimento del prodotto dal campo all'industria e al cliente finale (documenti di trasporto, fatture, lettera di vettura internazionale). Questa documentazione è parte integrante di un sistema di requisiti con la finalità di garantire l'origine del prodotto e che questo non derivi da impianti forestali abbattuti illegalmente, ma consente anche di implementare le informazioni legate al sito produttivo e al prodotto legnoso utili, ad esempio, per una certificazione della gestione sostenibile delle piantagioni con informazioni sulle operazioni colturali eseguite secondo i disciplinari di produzione. Inoltre, il *software* offre la possibilità di condivisione di documenti fra un utente e l'altro permette di velocizzare e tracciare tutte le fasi di processo semplicemente autorizzando la consultazione di documenti a uno o più soggetti della filiera che sono all'interno di una dinamica commerciale o di certificazione volontaria. Il software *WOOD GEST* permette, infine, di generare delle utenze di "controllo" ove qualsiasi soggetto (ad esempio un ente predisposto alla certificazione) può verificare il flusso documentale dei soli documenti utili alla certificazione.

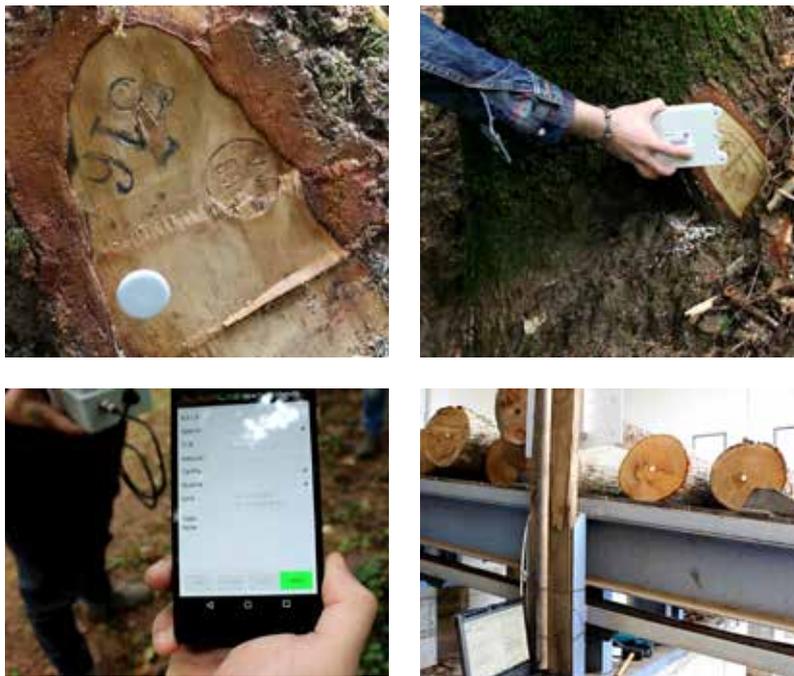


Figura 9.7. Tag RFID a chiodo (bianco) inserito vicino alla specchiatura con la martellata; lettura del tag tramite antenna; trasmissione delle informazioni del tag e inserimento dati tramite App specifica sulla piattaforma di *infotracing*; topi con tag RFID UHF letti dall'antenna industriale in segheria (foto: Corrado Costa)

9.3. VALUTAZIONE ECONOMICA DELL'IMPLEMENTAZIONE DELLE TECNOLOGIE DI TRACCIABILITÀ NELLA FILIERA LEGNO

Sperandio et al. (2017) hanno realizzato una valutazione economica delle tecnologie RFID e open source per la tracciabilità del legno in Calabria: è emerso che l'uso della tecnologia RFID lungo la catena di approvvigionamento può portare a un'efficiente semplificazione operativa e a un utilizzo più produttivo delle risorse. Riguardo la disponibilità a pagare (DAP) per l'acquisto di prodotti legnosi certificati il 40% delle imprese di seconda trasformazione del legno ha dichiarato di essere disposto a pagare un *pre-mium price* con una DAP media pari a 1,55%; inoltre, un'altra percentuale di imprese (sempre circa il 40%) si è dimostrata disposta a pagare un *pre-mium price* per l'acquisto di prodotti legnosi locali con una DAP media del 3,25% (Paletto et al. 2017). Si assiste via via a una drastica riduzione dei prezzi di mercato dei *tag* e dell'*hardware*, con possibili consistenti riduzioni dell'incidenza del costo dell'applicazione della tecnologia sul prezzo finale del legname.

L'utilizzo di *tag* RFID con un sistema di archiviazione passiva nel trasporto dei tronchi risulta economicamente più sostenibile rispetto a quello attivo. In un'ottica futura va spostata l'attenzione non tanto sulle prestazioni di *tag* e *reader*, quanto sulla funzionalità di sistemi di gestione e, soprattutto, sulla loro accessibilità da parte di tutti gli attori della filiera, considerando anche i costi/benefici. Ad esempio, in molte applicazioni nell'ambito della catena produttiva, l'integrazione di soluzioni tecnologicamente avanzate per la tracciabilità potrebbe risultare meno onerosa se posta a confronto con soluzioni alternative open-source o appoggiandosi a piattaforme sviluppate in altri ambiti (es. food chain). Attualmente, il mercato offre un prezzo medio di 0,05 € per *tag* se acquistati in gran numero, rendendo così possibile e sostenibile la sua implementazione nella filiera legno (Sperandio et al. 2017). L'ordine di grandezza del costo dei sistemi RFID, per grandi volumi d'acquisto e per *tag* passivi, è di circa 0,15 € per le etichette più semplici, di alcuni euro per quelle in contenitori plastici e di circa 0.001 € per un codice a barre stampato. Invece, per i *tag* attivi il prezzo aumenta, variando da circa 5 a 30 € o più in base alla dimensione delle batterie, alla quantità di memoria, al tipo di contenitore e all'eventuale presenza di sensori. I *reader* presentano costi elevati, che variano da 300 a 2.000 €. Perciò, integrando tecnologie *open-source* (ad esempio, Arduino), i costi sarebbero ridotti e l'utilizzo di sistemi RFID avrebbe vantaggi maggiori sui prodotti raggruppati piuttosto che sui prodotti singoli.

Tecnologie e sistemi per la valorizzazione dei *prodotti legnosi*

10.1. DETERMINAZIONE DELLA QUALITÀ E QUANTITÀ DEL LEGNAME ALL'IMPOSTO

La misurazione del legname allestito è una fase essenziale nella filiera foresta-legno perché consente di gestire in maniera ottimale il mercato e il trasporto dei prodotti legnosi. L'applicazione di tecnologie ICT (vedi § 3.1) ha interessato anche questo settore, allo scopo di rendere le attività di misurazione del legname più efficienti dal punto di vista economico, più veloci e soprattutto più sicure per gli operatori che solitamente si trovano ad operare in vicinanza di mezzi meccanici e di tronchi che possono essere soggetti a scivolamento (INAIL 2011).

Le tecnologie che vengono utilizzate all'imposto impiegano dispositivi e/o *App* che misurano le dimensioni del singolo tronco/toppo, fornendo quindi informazioni sul valore e le dimensioni dell'intera catasta. Un esempio è l'*App* Timberlog (Fig. 10.1), la quale, una volta inserito il diametro medio, la lunghezza, la specie, il tipo di assortimento, la classe qualitativa nonché il prezzo di vendita, restituisce il volume per pianta sotto corteccia, il piedilista, la somma dei volumi per assortimento, con attribuzione se necessario della classe di qualità, i prezzi di vendita totali e per singolo assortimento. L'*App* permette inoltre di generare fogli elettronici e report automatici oltre a poter gestire i dati attraverso cloud.

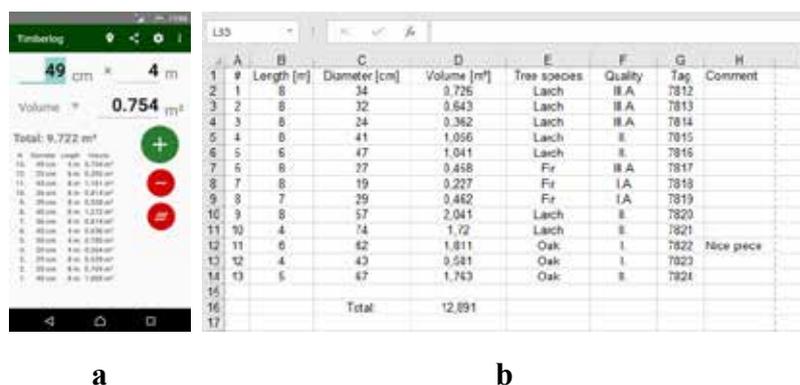


Figura 10.1 (a) Interfaccia dell'*App* Timberlog dove è possibile inserire il diametro e la lunghezza del toppe oltre che la classe qualitativa per il calcolo automatico del volume sotto corteccia; (b) un esempio del foglio di calcolo esportato dall'*App* con i dettagli del singolo toppe/tronco e il volume e la qualità (fonte: Timberlog)

Esistono *App* simili a quella appena citata in grado di identificare automaticamente le testate dei toppe da immagine digitali, attraverso l'impiego di reti neurali. Questi dispositivi o *App*, attraverso un riferimento metrico, sono in grado di determinare in automatico i diametri delle singole testate

e, una volta inserita la lunghezza, sono in grado di calcolare il volume legnoso dell'intera catasta. Tra i dati che queste *App*/dispositivi sono in grado di restituire, oltre al volume, ci sono: diametro medio, numero totale di fusti, distribuzione del numero di fusti in classi diametriche. Un esempio di questo tipo di applicazioni è fornito in Fig. 10.2 e Fig. 10.3.

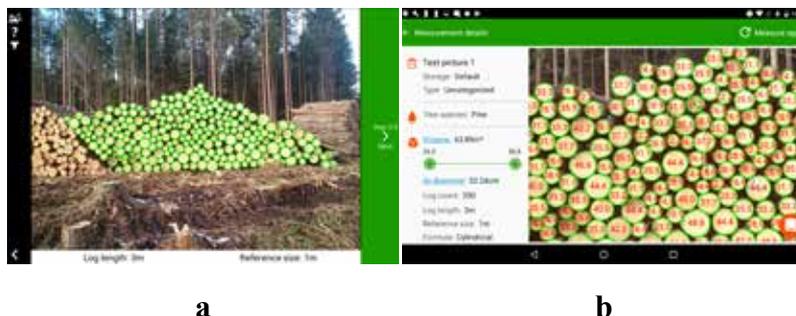


Figura 10.2 (a) Identificazione automatica da parte dell'*App* Timbeter delle testate dei tronchi della catasta fotografata attraverso uno smartphone; (b) analisi attraverso l'*App* Timbeter dei dati di una catasta riportante i diametri delle testate dei singoli topi, il volume totale e il numero di topi (fonte: <https://timbeter.com/>)

Per le grandi realtà di commercializzazione del legname, la stima automatica del volume di cataste e carichi su autocarri è realizzata anche tramite fotogrammetria (Fig. 10.4). La ricostruzione 3D, ottenuta con l'impiego di *software* specifici e di immagini scattate da un drone, permettono di stimare le reali dimensioni della catasta o del carico con una accuratezza di circa 0,5 m³ (Acuna e Sosa 2019).

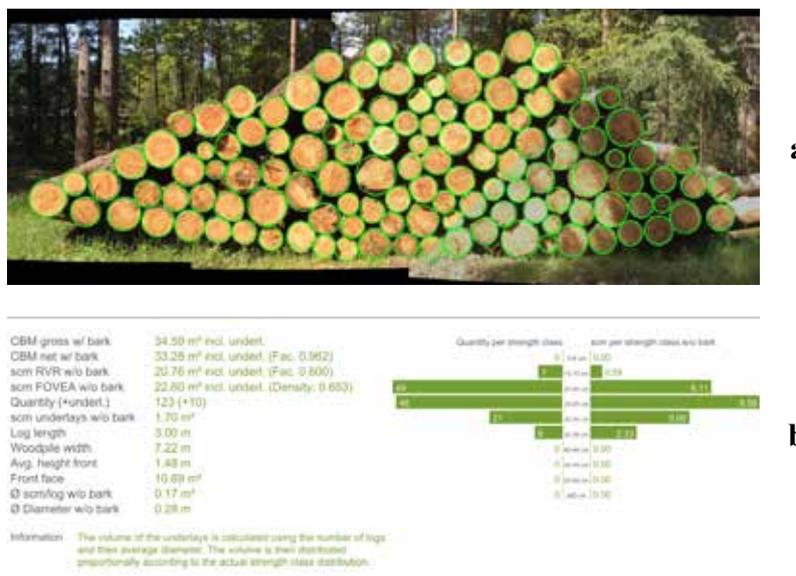


Figura 10.3 (a) Misurazione del legname in catasta utilizzando l'*App* per *smartphone* iFOVEA. Ripresa della catasta attraverso l'esecuzione di fotografie multiple e loro fusione in un'unica immagine con successiva applicazione di algoritmi AI per determinare i diametri delle testate; (b) report generato automaticamente dall'applicazione e riportante i principali parametri della catasta (fonte: <https://www.fovea.eu/>)



Figura 10.4. (a) Stima automatica del volume di legname tramite fotogrammetria su pianale di carico di un mezzo adibito al trasporto; (b) ricostruzione 3D del carico ottenuta partendo da immagini scattate da drone (fonte: Acuna e Sosa 2019)

Oltre alle *app*, sono stati sviluppati dispositivi che, integrandosi con uno *smartphone*, operano numerosi tipi di misure funzionando come distanziometri, relascopi, misuratori di diametro e del volume dei singoli tronchi (Fig. 10.5).

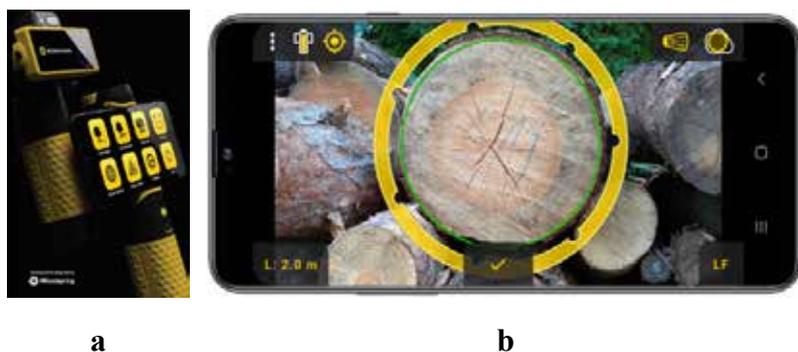


Figura 10.5. Strumento Mobileforester per la misura di dati dendrometrici e volumetrici attraverso un *mobile device* che integra un *hardware* di misura (a) a un cellulare (b) (fonte: <https://www.mobileforester.com/>)

Per quanto concerne la misura della qualità intrinseca del materiale: le tecnologie per l'analisi d'immagine possono quantificare le fessurazioni da ritiro o da rilascio delle tensioni interne già dalla superficie dei topi (Sepulveda et al. 2021); ulteriori informazioni possono provenire dall'impiego di camere iper-spetttrali, anche per determinare la difettosità dei tronchi.

Notevoli potenzialità sono offerte dalla spettrometria a infrarossi (*VIS-NIR*) che utilizza la porzione elettromagnetica relativa all'infrarosso vicino (780 nm a 2500 nm) per la stima di specifici attributi, quali ad esempio il contenuto di estrattivi nel legno da associare a classi di durabilità del materiale. Queste tecnologie possono essere utili nella determinazione delle provenienze di una determinata specie arborea.

Applicazioni interessanti sono quelle che hanno visto l'utilizzo del naso elettronico per la misura di composti volatili generati da degrado di funghi cariogeni nel materiale legnoso (Baietto et al. 2010); queste tecniche possono essere usate anche in associazione con altri consolidati sistemi non distruttivi, come i sistemi di tomografia portatile.

Una accurata caratterizzazione del materiale attraverso tecniche oggettive facilita la vendita del materiale attraverso canali digitali come quelli, ad esempio, del sistema FORDAQ (<https://legno.fordaq.com>).

Ampio sviluppo hanno i sistemi assistiti o automatici per il riconoscimento macroscopico delle specie legnose: queste applicazioni possono essere utili sia sul legno tondo che sul legno segato per determinare la specie anche in un'ottica della Convenzione di Washington sul commercio internazionale delle specie di fauna e flora minacciate di estinzione (CITES) o del Regolamento (UE) n. 995/2010, conosciuto come European Timber Regulation (EUTR) (Fig. 10.6).

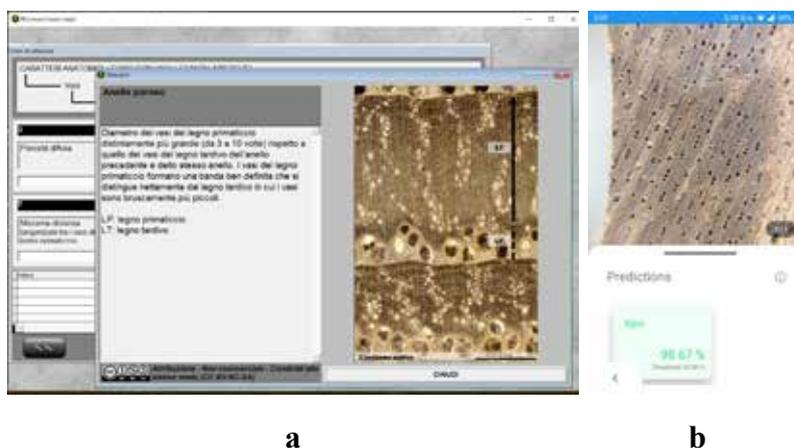


Figura 10.6. (a) L'applicativo SIR Legno (scaricabile gratuitamente on-line dal sito della Regione Piemonte <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/foreste/professioni-forestali-formazione/riconoscimento-legno-classificazioni-legname-gli-strumenti-didattici-corso>) che attraverso un'interfaccia conversazionale permette di identificare il legno delle principali specie arboree presenti in Italia (48 specie); (b) l'applicativo Xylorix che attraverso fotografie svolte sulla sezione trasversale del legno con una lente di ingrandimento applicata sulla fotocamera del cellulare e l'utilizzo di reti neurali permette di fare il match con una banca dati di specie associandosi un livello di somiglianza (fonte: <https://www.xylorix.com/>)

10.2. OTTIMIZZAZIONE NELLA PRIMA TRASFORMAZIONE

Il legno è un materiale variabile e disomogeneo dal punto di vista delle caratteristiche tecnologiche: al fine di ottenere prodotti di qualità con la minima produzione di scarti è essenziale conoscere la distribuzione e il tipo di difetti in esso presenti, nonché le sue caratteristiche fisico-meccaniche. Le tecnologie per l'ottimizzazione della prima trasformazione del legname sono molteplici e differenti in funzione della filiera di riferimento. Il legno tondo proveniente da foresta viene prevalentemente destinato alla segazione e al settore delle bioenergie. Mercati particolari che riguardano solo alcune specie legnose sono, per esempio, quelli della paleria in castagno e quello dell'estrazione del tannino. La filiera della sfogliatura, invece, utilizza prevalentemente pioppo oltre a faggio e legname tropicale importato. Alle piantagioni di pioppo si appoggiano anche la filiera dei pannelli a scaglie orientate e la filiera della pasta di cellulosa. La filiera della tranciatura è quasi completamente scomparsa in Italia a causa dell'imporsi del legno ricostruito e dei laminati o dei rivestimenti plastici con incisioni tridimensionali. La filiera italiana dei pannelli di particelle, pur essendo tra le più avanzate al mondo, produce pannelli quasi integralmente da legno

post-consumo. Le filiere nelle quali si è assistito a un rilevante progresso tecnologico, dove la qualità della materia prima è fondamentale, sono prevalentemente quelle dei segati e dei compensati.

10.2.1. Filiera dei segati

Le segherie italiane sono generalmente impianti a impostazione tradizionale estremamente versatili. Nella maggior parte dei casi, infatti, si parla di impianti basati su sega di testa (sega a nastro) con carrello che talvolta possono integrare un canter (macchina che, messa in linea con una sega di testa, attraverso una testa fresante trasforma gli sciaveri in cippato). La presenza del canter comporta due vantaggi: a) in segheria non è necessario gestire gli sciaveri, che vengono trasformati direttamente in cippato, b) con un unico passaggio si rimuove lo sciavero e contemporaneamente si taglia la prima tavola aumentando la produttività. Questa struttura, pur se limitata in termini di produttività, permette una rapida configurazione della macchina per il taglio di conifere e latifoglie, la gestione di diametri molto diversi e la possibilità di lavorare utilizzando diversi schemi di taglio. Questi impianti sono in grado di segare al massimo 30.000 m³ anno⁻¹. Esistono anche impianti per elevate produzioni, in grado di segare anche 1-2 Mm³ anno⁻¹, che basano il proprio funzionamento prevalentemente su sistemi a doppio canter con successiva rifinitura attraverso multilama o refendini doppi o tripli. In entrambi i casi sono stati sviluppati molti sistemi di supporto alla produzione e alla selezione (Thomas et al. 2007, Cooper et al. 2011, Stängle et al. 2015, Pan et al. 2021), collegati con *database* centralizzati che misurano, registrano e processano grandi quantità di informazioni inerenti alle proprietà geometriche, fisiche e meccaniche del legno. Le grandezze utili da misurare sono diverse a seconda che si stia lavorando su legno tondo, su segati freschi o essiccati.

All'arrivo dei tronchi in piazzale, può essere necessario implementare strategie per la tracciabilità, che può essere garantita attraverso i sistemi presentati nel § 9. Altri sistemi integrati relativi alla tracciabilità possono essere quelli presentati nel § 10.1., che possono anche essere utilizzati per la verifica delle quantità del materiale (collaudo). Il collaudo comunque può essere eseguito in maniera completamente automatica.

Legno tondo: nel caso del legno tondo, un elemento fondamentale in ingresso, per ogni sistema di segazione, è quello di determinarne la forma e la qualità. Per questo specifico scopo la soluzione più avanzata disponibile sul mercato oggi è quella della tomografia computerizzata. Tale tecnologia permette, attraverso una sorgente di raggi X e un rilevatore che ruotano attorno all'oggetto, di ricostruire tridimensionalmente l'oggetto stesso. Questo permette oggi, anche attraverso l'uso di algoritmi AI, di identificare le principali caratteristiche del toppe tra cui: midollo, nodi sani, nodi cadenti, fessurazioni, tasche di resina, degrado da funghi, inclinazione della fibratura, azzurramento, corpi estranei in metallo, sassi, corpi estranei in ceramica, durame, densità allo stato fresco, accrescimento medio, legno di compressione, inclusioni di corteccia e volume sotto corteccia. L'utilizzo di questi sistemi può favorire un aumento importante delle rese e della qualità degli output di segazione che, per realtà ad elevata produzione, può portare all'ammortamento dello strumento in tempi ragionevoli. Le informazioni acquisite in questa fase possono essere utilizzate in diverse modalità: per verificare con esattezza i volumi e la qualità dei materiali per il collaudo della fornitura, per valutare come depezzare il toppe, per determinare l'orientamento del pezzo nel taglio e lo schema di taglio in funzione dei difetti, per associare alle tavole virtuali informazioni sulla qualità visuale. Una schematizzazione di questo strumento e un'analisi di un toppe virtuale ricostruito attraverso queste tecnologie sono visibili in Figura 10.7.

Attraverso questi strumenti è inoltre possibile la determinazione di una identità univoca per ogni tavola virtuale da associare ad ogni tavola reale che sarà segata nei successivi processi di lavorazione. Questo permette, attraverso apposite strumentazioni, di ricavare a ritroso da ogni tavola realmente segata il toppe da cui questa proviene (vedi Fig. 10.8.). Questo si traduce in una completa tracciabilità del materiale che potrà poi servire nelle operazioni finali di marcatura in uscita dalla segheria.

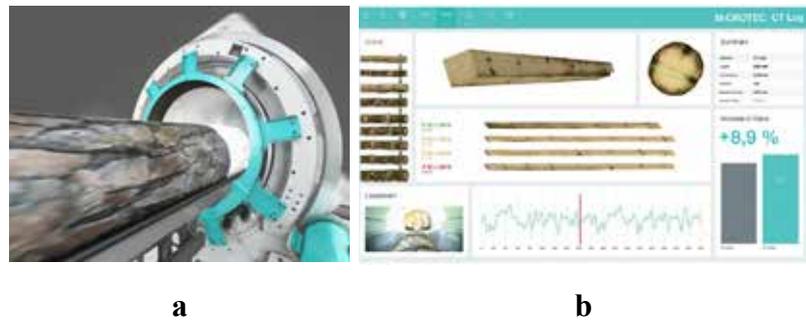


Figura 10.7. (a) Sistema di ricostruzione tridimensionale del tronco attraverso tomografia assiale computerizzata CT Log prodotto da MiCROTEC. Sorgente e ricevitore ruotano assieme all'anello esterno mentre il tronco sottoposto a scansione passa al centro; (b) ricostruzione tridimensionale del tronco, ottimizzazione del depezzamento e dello schema di taglio e rappresentazione delle tavole virtuali derivanti da una scansione del tronco attraverso CT Log (fonte: <https://microtec.eu/it/applicazioni/applicazioni/ctlog/>)

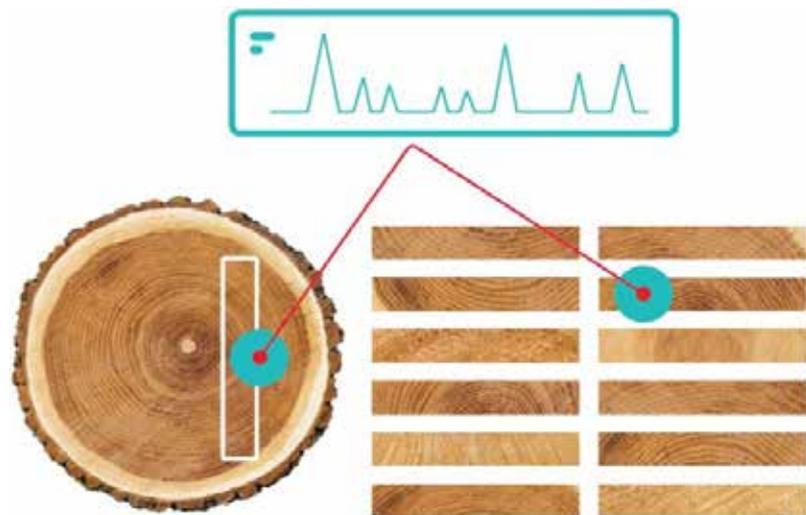


Figura 10.8. Sistema SMART Link – Digital Fingerprint di MiCROTEC per la determinazione di un ID univoco per ogni tavola virtuale e per la tracciabilità delle tavole nell'intero processo (fonte: <https://microtec.eu/en/applications/all/smart-link-digital-fingerprint/>)

Oltre a questi sistemi di scansione, che richiedono investimenti importanti e che sono sostenibili da segherie con altissime produzioni, esistono anche multi-sensore che, attraverso il passaggio del tronco al loro interno sono in grado di misurare: geometria, volume, difettosità, colore, e di stimare rigidità e resistenza meccanica. I trasduttori utilizzati per queste misure sono di diversa tipologia: triangolazione laser tridimensionale e stereofotografia per la determinazione della geometria; telecamere iperspettrali per la determinazione del colore del legno e per la determinazione della qualità mediante l'individuazione dei difetti attraverso algoritmi AI, raggi X 2D che, integrandosi con le informazioni delle telecamere permettono una più accurata identificazione dei difetti. Può essere integrato nello scanner anche un sistema di determinazione del modulo elastico dinamico, che nel legno fresco può già rappresentare un primo criterio di selezione per le caratteristiche meccaniche. L'insieme di queste informazioni permette di decidere con la massima accuratezza a quale impiego destinare il tronco e definire il piano di taglio. Questi sistemi possono funzionare fino ad una velocità massima di avanzamento del tronco di 300 m min^{-1} (Fig. 10.9).

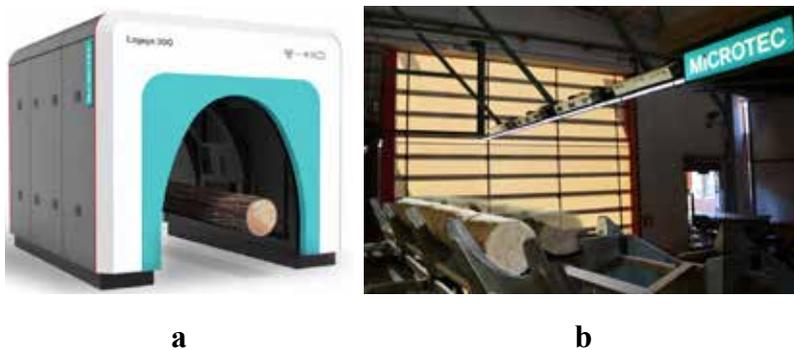


Figura 10.9 (a) Sistema multisensore Logeye 300 prodotto da MiCROTEC per la determinazione della geometria, della qualità e delle caratteristiche del legno tondo (fonte: <https://microtec.eu/it/applicazioni/applicazioni/logeye/>); (b) sistema Logeye 900 Stereo prodotto da MiCROTEC per la determinazione delle caratteristiche geometriche del legno tondo e l'ottimizzazione dello schema di taglio (fonte: <https://microtec.eu/en/applications/all/logeye-900/>)

Tavole: Sistemi simili a quelli descritti per il legno tondo possono essere applicati alle tavole, che tipicamente vengono sottoposte ad analisi una volta essiccate. Le principali caratteristiche misurate, attraverso i trasduttori già descritti per il legno tondo, sono: difetti, colore, densità, umidità, accrescimento medio, forma, rigidità e resistenza meccanica. Con l'impiego di laser, di cui si misura la diffrazione, è anche possibile determinare l'orientazione della fibratura; questi sistemi possono funzionare fino a velocità di movimentazione del materiale di 450 m min^{-1} (Fig. 10.10). Attraverso sistemi automatici di movimentazione questi impianti possono permettere di suddividere le tavole per classi di qualità in base all'aspetto, di raggruppare tavole di colore simile e di identificare le tavole con le migliori caratteristiche meccaniche, attribuendo loro una classe di resistenza per l'utilizzo come legno strutturale. Le tavole, infine, possono essere marcate singolarmente sia con le caratteristiche rilevate che con l'eventuale classe di resistenza, così come con ID per la tracciabilità.

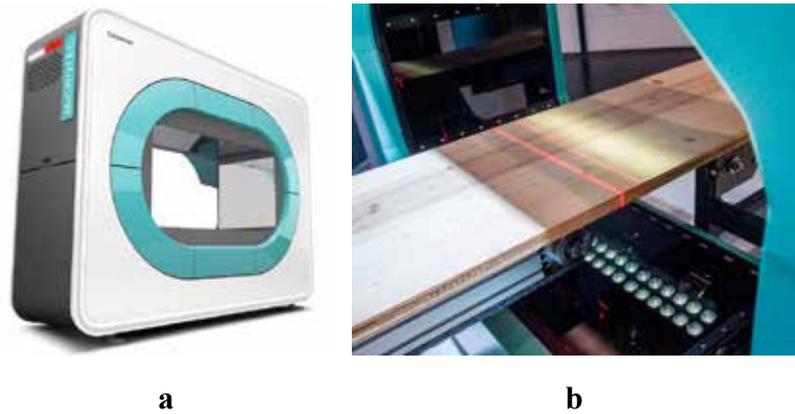


Figura 10.10 (a) Scanner longitudinale per tavole Goldeneye 600 prodotto da MiCROTEC e (b) particolare della sensoristica contenuta al suo interno. (fonte: <https://microtec.eu/it/applicazioni/applicazioni/goldeneye600/>)

Nel settore della tracciabilità delle tavole, oltre al sistema di cui alla Fig. 10.8 e ai sistemi basati su etichette o RFID (vedi § 9.2), sono in fase di sviluppo anche sistemi basati sul riconoscimento di immagini che vanno ad analizzare il disegno prodotto dagli anelli di accrescimento sulle testate (fonte: <https://www.taigatech.se/>).

10.2.2. Filiera degli sfogliati

In Italia, la materia prima utilizzata in sfogliatura è rappresentata in larga maggioranza da pioppo di piantagione e in parte da faggio, proveniente da foresta. Chi produce pannelli utilizza spesso anche specie tropicali quali ilomba, okoume, fromager che tipicamente sono esportate dal Paese di origine già sottoforma di sfogliati. Questo materiale viene selezionato con attenzione dal personale che si occupa della classificazione, ma, nella maggior parte dei casi, la provenienza da piantagione è indice di cure colturali che portano il materiale ad avere una qualità elevata, verificata tra i contraenti alla vendita del lotto. Permangono comunque una serie di elementi fondamentali da misurare per una corretta trasformazione del materiale.

Legno tondo: è necessario innanzitutto determinare la geometria del top-po per individuare l'asse di rotazione in grado di massimizzare la resa di lavorazione minimizzando il materiale di scarto durante la messa al tondo. Questa operazione richiede grande accuratezza e tipicamente viene svolta attraverso laser a triangolazione posizionati subito prima della messa in macchina. Il tronco viene bloccato tra due mandrini che compiendo una rotazione di 360° del top-po ne permettono il rilievo della forma. Una volta estratta la forma, l'asse di rotazione ideale viene determinato e il pezzo viene inserito nella sfogliatrice allineandolo su tale asse (Fig. 10.11a). L'utilizzo dei laser a triangolazione consente anche di stabilire il volume lavorato dall'azienda. Una volta eseguita la messa al tondo inizia il processo di sfogliatura e la produzione degli sfogliati.

Sfogliati: per gli sfogliati si utilizzano sistemi di telecamere che consentono l'individuazione dei principali difetti (Fig. 10.11b) e determinano la messa in funzione della taglierina per rimuovere le parti maggiormente danneggiate, secondo logiche programmate. In particolare, i fogli attraversano un insieme di trasduttori atti a misurarne la qualità visuale, lo spessore, l'umidità prima e dopo l'essiccazione e la forma dopo l'essiccazione. Questi sistemi, oltre ad agevolare la selezione del materiale, ren-

dono possibile anche la rilevazione di eventuali settaggi errati o problematiche degli impianti e di mettere a punto azioni correttive o interventi di manutenzione.



a

b

Figura 10.11 (a) Sistema di centratura del tronco durante la messa in macchina in una sfogliatrice Angelo Cremona attraverso la costruzione di un modello digitale acquisito prima della messa in macchina (a); sistema di selezione degli sfogliati basato su tecnologie vision e reti neurali (b) (fonte: cortesia di Angelo Cremona e Ventek)

Digitalizzazione e politiche europee per il settore forestale

Sotto il profilo della *policy*, l'UE intende rendere le **aree rurali in Europa digitalizzate e rafforzate** nell'ambito della strategia del **mercato unico digitale**, ponendo l'attenzione, in termini di sostegno, a una più ampia diffusione della digitalizzazione anche nel settore forestale. Da un punto di vista sociopolitico, il mercato unico digitale rappresenta un importante punto di svolta e di innovazione, ponendosi come *step* necessario alle transizioni non solo digitale ma anche ecologica che l'ordinamento europeo sta affrontando.

La nozione di mercato unico digitale rientra nella più ampia categoria del mercato unico comune e, nel settore agro-forestale, in particolare, indica, tra le altre cose, lo sviluppo e l'incentivazione delle tecnologie finalizzate alla valorizzazione dell'agricoltura e delle aree rurali. Su questa materia, il Parlamento europeo si è soffermato in più di un'occasione e, nello specifico, ha sottolineato l'importanza di sostenere le piccole-medie imprese nel corso della trasformazione digitale (Parlamento Europeo 2021). La digitalizzazione deve essere pienamente conforme ai diritti fondamentali dei cittadini, alla tutela dei consumatori, alla neutralità tecnologica e della rete, alle norme relative alla protezione dei dati, all'inclusività e alla non discriminazione. Il Parlamento europeo ha sottolineato che la digitalizzazione e le tecnologie emergenti devono contribuire al conseguimento degli obiettivi della strategia industriale dell'UE e del **Green Deal e delle esigenze delle regioni urbane, rurali e isolate dell'UE**.

Il Green Deal ha l'obiettivo di trasformare l'UE in un'economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva, garantendo che: entro il 2050 non siano più generate emissioni nette di gas ad effetto serra; la crescita economica sia dissociata dall'uso delle risorse; nessuna persona e nessun luogo siano trascurati; vengano incentivate tecnologie in grado di garantire un elevato livello di efficienza a fronte di un basso impatto ambientale (Di Stefano et al. 2022).

La Strategia europea **Farm to Fork** rappresenta un'elaborazione e specificazione del **Green Deal** per quanto riguarda il settore agricolo. La Strategia stabilisce espressamente che *“gli agricoltori devono trasformare più rapidamente i loro metodi di produzione e utilizzare al meglio nuove tecnologie, in particolare attraverso la digitalizzazione, per ottenere migliori risultati ambientali, aumentare la resilienza climatica e ridurre e ottimizzare l'uso dei fattori produttivi”*. Il progetto mira a sostenere attraverso contributi in conto capitale l'ammodernamento dei macchinari agricoli che permettano l'introduzione di tecniche di agricoltura di precisione (es. riduzione di utilizzo pesticidi del 25-40 per cento a seconda dei casi applicativi) e l'utilizzo di tecnologie di agricoltura e selvicoltura 4.0, nonché l'ammodernamento del parco automezzi al fine di ridurre le emissioni (-95% passando da Euro 1, circa 80 per cento del parco attuale, a Euro 5). In un'ottica di economia circolare, l'investimento include l'ammodernamento della lavorazione, lo stoccaggio e il confezionamento dei prodotti alimentari, con l'obiettivo di migliorare la sostenibilità del processo produttivo, ridurre/eliminare la generazione di rifiuti e favorire il riutilizzo a fini energetici.

Con lo scopo di dare attuazione alle strategie del Green Deal, l'UE ha adottato anche la nuova **Strategia per le foreste per il 2030**. Questa Strategia contribuisce al raggiungimento degli obiettivi dell'UE in materia di biodiversità, nonché dell'obiettivo di riduzione delle emissioni di gas serra

di almeno il 55% entro il 2030. Il documento riconosce il ruolo centrale e multifunzionale delle foreste e il contributo dei selvicoltori e dell'intera catena del valore basata sulle foreste per il raggiungimento di un'economia sostenibile e climaticamente neutra entro il 2050. La Strategia si concentra anche sul monitoraggio delle foreste, segnalazioni e raccolta dati, sullo sviluppo di una agenda di ricerca e innovazione per migliorare le conoscenze, sull'attuazione di un quadro amministrativo forestale dell'UE inclusivo e coerente e, infine, sul rafforzamento dell'attuazione e applicazione dell'*acquis* comunitario (complesso di diritti e obblighi condivisi dagli Stati membri dell'UE). Tra gli obiettivi c'è quello relativo alla **digitalizzazione e all'incentivazione dell'uso delle tecnologie ICT nel settore forestale**. Nella stessa prospettiva si pone la **Strategia forestale nazionale** recentemente emanata.

I riferimenti alla **PF** nella politica europea e nazionale evidenziano come i decisori stiano ponendo particolare attenzione a questa tematica. Di fatto, le innovazioni tecnologiche sono componenti cruciali anche nei piani strategici della **Politica Agricola Comune (PAC)**, per l'efficientamento dell'uso delle risorse, la mitigazione del cambiamento climatico, l'aumento della resilienza, la tutela della salute del suolo e la diminuzione dei costi per gli operatori. Tra le linee di indirizzo della PAC 2023-2027 c'è il **rafforzamento del contributo dell'agricoltura** agli obiettivi ambientali e climatici dell'UE, anche attraverso l'uso di **tecnologie con minore impatto ambientale**, meno invasive per l'ecosistema.

Si sottolinea, peraltro, il carattere critico delle nuove tecnologie applicate ai settori agricolo e forestale, ovvero quello **economico**. L'introduzione nelle aziende agricole e forestali genera **costi economici** che non sempre l'imprenditore è in grado autonomamente di sostenere per l'acquisto di strumenti e macchine a significativo contenuto di ICT, l'aggiornamento professionale e l'adeguamento dei metodi di lavoro. In questa prospettiva, sulla base delle proposte della strategia *Farm to Fork*, l'ordinamento italiano ha previsto nel **Piano Nazionale Ripresa e Resilienza** una Missione (la n. 2) interamente dedicata alla transizione ecologica e al sostegno economico-finanziario agli imprenditori per l'applicazione delle nuove tecnologie in campo agro-forestale. In particolare, la componente n. 1 di questa missione (Economia circolare e agricoltura sostenibile, il cui finanziamento è pari a 5,27 miliardi di euro) si prefigge l'obiettivo di una piena **sostenibilità ambientale**: tra le varie azioni, vengono promosse filiere agricole *smart*, riducendo l'impatto ambientale tramite *supply chain* "verdi" e favorendo **l'utilizzo della Agricoltura 4.0**.

Informazione e networking per le competenze digitali nel settore forestale

In Italia il settore forestale si trova ad affrontare problematiche in ampia misura connesse alla necessità di **valorizzare in maniera più efficace le potenzialità e le opportunità** in termini di salvaguardia ambientale, presidio del territorio e sviluppo socioeconomico e occupazionale, con particolare riferimento alle aree interne e montane. In questo quadro, la ricerca ha raccolto la sfida di tradurre i risultati degli avanzamenti metodologici e tecnologici in applicazioni operative e questo vale anche per la **PF**, sebbene il nostro Paese non sia ancora pienamente preparato per una diffusa ricettività di quanto proposto.

Di fatto, l'impiego delle tecnologie ICT può condurre a una significativa revisione delle modalità di **gestione dei boschi e delle piantagioni da legno**. Ad esempio, in condizioni idonee, i vantaggi economici riconducibili al *precision harvesting* si attestano su livelli non inferiori al 15% di incremento di produttività rispetto a interventi di tipo tradizionale (Corona et al. 2017). L'integrazione di tecnologie consolidate (ad esempio, telerilevamento, sistemi informativi geografici) con quelle di più recente sviluppo (ad esempio, sistemi aerei a pilotaggio remoto, *web-Gis*, *smartphone App*, realtà aumentata e virtuale) apre concrete prospettive di valorizzazione per la filiera foresta-legno. L'opportunità di definire ed inserire, in un ampio e completo processo organizzativo, parametri quali, ad esempio, la posizione, la quantità, la qualità e le dimensioni del legname permette di fornire un quadro più esaustivo rispetto alle richieste di mercato, favorendo la valorizzazione del prodotto, la tracciabilità e la certificazione, oltre a poter contribuire alla minimizzazione degli impatti e alla salvaguardia della funzionalità ecologica dei boschi e delle piantagioni da legno. Un **approccio integrato e connesso** offre anche il vantaggio di poter adattare in corso d'opera gli interventi programmati, attraverso comunicazioni dirette tra proprietario/acquirente e operatori in bosco, favorendo la riduzione dei tempi necessari per la raccolta, il trasporto e lo stoccaggio dei materiali. Le prospettive in questo contesto promuovono, infine, la **disponibilità distribuita e interattiva dell'informazione** (*web- e mobile-GIS*) e una caratterizzazione quali-quantitativa delle risorse forestali (*smart forestry*) che supera l'informazione testuale e cartografica su area minima rappresentata (approccio tradizionale della pianificazione forestale) e adottano quella più innovativa "in continuo" (ad alta risoluzione spaziale) su ogni singolo punto del dominio territoriale considerato.

Si evidenzia, peraltro, che l'avanzamento delle applicazioni ICT nel settore forestale ha finora fatto prevalentemente riferimento a **esperienze nord-americane e nord-europee**, spesso non direttamente trasferibili nella realtà italiana, caratterizzata da peculiari condizioni ambientali, colturali e socioeconomiche, le quali, nella gran parte dei casi, richiedono specificità di approcci, sia sotto il profilo metodologico che tecnologico.

In tal senso, risulta prioritaria la creazione di **knowledge hub** (centri di conoscenza: istituzioni e/o reti dedicate alla condivisione e allo scambio di esperienze di sviluppo) quali punti di riferimento per lo sviluppo della **PF** nel nostro Paese e la realizzazione di **studi pilota**, quali esempi idonei alla sensibilizzazione degli imprenditori, tecnici e proprietari forestali, dando particolare rilievo alla scalabilità e flessibilità delle applicazioni (tra le altre, di peculiare rilevanza come studi pilota quelle relative ai processi di **certificazione forestale**).

L'introduzione di tecnologie di precisione, auspicabilmente nell'ambito di veri e propri *knowledge and innovation systems* (<https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/tags/akis>), richiede un cambio di mentalità in un settore radicato nella tradizione come quello forestale. È, pertanto, necessario **mettere in rete le competenze**, favorendo il confronto tra i principali attori (ricerca, istituzioni pubbliche, proprietari forestali, professionisti, rappresentanze agricole, produttori degli strumenti e macchine, contoterzisti, ecc.), e promuovere una adeguata **formazione per il rafforzamento delle abilità digitali degli operatori attuali e futuri** (imprenditori, consulenti, studenti delle scuole professionali, secondarie e universitarie).

Sotto il profilo della *policy*, la Commissione Europea intende rendere il settore agricolo e le **aree rurali in Europa digitalizzate e rafforzate** nell'ambito della strategia del mercato unico digitale, ponendo l'attenzione in termini di sostegno alla più ampia diffusione della digitalizzazione anche nel settore forestale (vedi § 11). In particolare, gli sviluppi tecnologici sono componenti cruciali dei piani strategici della **PAC**, per l'efficientamento dell'uso delle risorse, la mitigazione del cambiamento climatico, l'aumento della resilienza, la tutela della salute del suolo e la diminuzione dei costi per gli operatori.

Nella prospettiva delineata, questa monografia ha cercato di sintetizzare, in un quadro propositivo e omogeneo, sia le **modalità** e le **interazioni** dei principali elementi tecnici connessi alla digitalizzazione del settore forestale italiano, sia i connessi aspetti di **criticità**. L'auspicio è che quanto prodotto possa rappresentare un riferimento utile per rafforzare l'interesse e le competenze digitali degli **imprenditori e proprietari forestali**, dei **tecnici professionisti** e dei **funzionari delle amministrazioni pubbliche** (in primo luogo quelle regionali). Analogamente si auspica che l'organizzazione concettuale e contenutistica di quanto esposto possa essere di supporto alla **formazione avanzata** degli operatori, nonché di stimolo per ulteriori **avanzamenti scientifici e culturali** in questo settore. Anche attraverso lo sviluppo della digitalizzazione del settore potrà essere significativamente agevolato il raggiungimento degli obiettivi fissati dal **Green Deal** e dalle **Strategie forestali europea e nazionale**.

EXTENDED ABSTRACT

Perspectives and Potential for Forestry Digitalization in Italy

Information and Communication Technologies (ICT) play a key role for improving the implementation of sustainable forest management at local, regional, and global level. The ICT potential to easily exploit a wider and more up-to-date set of information on the economic, environmental, and social value of forests is of relevant help for the daily work of technicians, land owners, and companies in boosting the efficiency and effectiveness of forest management.

The concept of “Precision Forestry” (PF) was developed from the early 2000s, as a branch of precision farming or precision agriculture. PF includes the use of ICT, remote and proximal sensing technologies, and other devices to coordinate and control several processes on a spatial scale (“Precision”) for monitoring, planning, and managing forest resources (“Forestry”).

The aim of this monography is to collect and describe some of the most important PF experiences applied or potentially useful for the Italian forestry sector. It may represent a reference guide for the stakeholders, such as forest owners, professional technicians, public administrators, and policy makers.

The book includes eleven chapters reviewing the main technological tools available in the Italian context and the most recent advances of ICT in forestry, also focusing on the strengths and weaknesses of their practical implementation. The opportunities and challenges of implementing PF methods, practices and technologies are also discussed.

In the first two chapters the precision forestry concept and its historical development are introduced. In the third chapter some basic elements of ICT, GIS, Global Navigation Satellite Systems (GNSS), remote/proximal sensing, and related technologies which are essential for a better comprehension of PF applications are recalled.

In chapter 4 recent advances in large scale forest inventories with a focus on mapping and on the spatial estimation of forest variables integrating field surveys and multisource remotely sensed data are described. Current advancements in the acquisition of field information including Terrestrial Laser Scanning (TLS), new digital dendrometers, tree-talkers, terrestrial cameras, and APP for portable devices such as smartphones or tablets for dendrometric tree measures and new citizen science applications to support quantitative and qualitative spatial estimation of forest variables over large areas (i.e., forest health, fuel types) are also presented. The chapter ends up with the description of some experiences in the implementation of Forest Information Systems in Italy to provide a simple open-access to such new generation of spatial forest information.

In chapter 5 PF tools, instruments, and technologies to support sustainable forest management are illustrated. APPs developed to acquire field plots data to simulate management operations, the application of photogrammetric technologies from Unmanned Aerial Vehicles and TLS data for monitoring with high-spatial scale forest monitoring and for acquiring indicators at single tree level are presented. A detailed description of new user-friendly tools for forest road

planning, design and construction, as well as forest operation planning is also included.

Precision forest tree farming (with particular reference to poplar cultivation), useful to promote and increase the profitability and sustainability of forest plantations within the Italian context is described in chapter 6. The innovation and enhancement within the supply chain of wood plantations (from planting to harvesting, including monitoring and identification of stress) by soil proximal sensing techniques, Early Warning Systems, and specific software are highlighted.

Considering the even higher market demands, promoted by the large-scale planting programs for climate changes mitigation and the demands for propagation material for environmental recovery, innovative techniques and methods supported by ICT in the forest nursery sector are described in chapter 7.

In chapter 8 available technologies related to precision harvesting are analyzed and described taking into consideration the wood chain efficiency, by means of improved communications between the owner/buyer and operators as well as among machineries used in forest operations, health and safety of forest operators, environmental impacts mitigation and recovery, and operators training. Advanced communication systems and sensors for the exchange of data and information between machines, machine-equipments and/or machine-operators, teleoperations and automation are also described.

Chapters 9 and 10 are related to wood products traceability, timber quality assessment as well as the technologies for the optimization of wood transformation processes. The concepts of wood product traceability and tracing, together with latest digital technologies for the identification and tracking of the logs (i.e., fingerprinting and RFID), are detailedly reported.

Chapter 11 is finally dedicated to the relationship between the EU policy framework and the digitalization process in both agricultural and forestry sectors.

The book summarizes, under a proactive and homogeneous framework, PF methods, tools and technologies in relation with the digital transition of the Italian forestry sectors. The authors hope this book will be useful for improving the implementation of sustainable forest management practices at all levels in Italy, providing a comprehensive review useful for policy makers, technicians, forestry owners and students.

Bibliografia

- Abad E., Palacio F., Nuin M., De Zarate A.G., Juarros A., Gómez J.M., Marco S. 2009. **RFID smart tag for traceability and cold chain monitoring of foods: Demonstration in an intercontinental fresh fish logistic chain.** Journal of food engineering, 93: 394-399.
- Acuna M., Sosa A. 2019. **Automated volumetric measurements of truckloads through multi-view photogrammetry and 3d reconstruction software.** Croatian Journal of Forest Engineering, 40:151-162.
- Albizu-Urionabarrenetxea P., Tolosana-Esteban E., Roman-Jordan E. 2013. **Safety and health in forest harvesting operations. Diagnosis and preventive actions: a review.** Forest System, 22: 392-400.
- Alvites C., Santopuoli G., Hollaus M., Pfeifer N., Maesano M., Moresi F.V., Marchetti M., Lasserre B. 2021. **Terrestrial laser scanning for quantifying timber assortments from standing trees in a mixed and multi-layered mediterranean forest.** Remote Sensing, 13: 4265. <https://doi.org/10.3390/rs13214265>.
- Arnone E., Caracciolo D., Noto L.V., Preti F., Bras R.L. 2016. **Modeling the hydrological and mechanical effect of roots on shallow landslides.** Water Resour. Res., 52 (11): 8590-8612. doi:10.1002/2015WR018227.
- Aruga K., Sessions J., Akay A.E. 2005. **Application of an airborne laser scanner to forest road design with accurate earthwork volumes.** Journal of Forest Research, 10: 113-123.
- Atkins J.W., Stovall A.E., Silva C.A. 2022. **Open-Source tools in R for forestry and forest ecology.** Forest Ecology and Management, 503: 119813.
- Avallone F., Bonaretti M. 2003. **Benessere organizzativo.** Dipartimento della funzione pubblica.
- Bagaram M., Giuliarelli D., Chirici G., Giannetti F., Barbati A., Bagaram M.B., Giuliarelli D., Chirici G., Giannetti F., Barbati A. 2018. **UAV Remote Sensing for Biodiversity Monitoring: Are Forest Canopy Gaps Good Covariates?** Remote Sensing, 10: 1397.
- Baietto M., Wilson A.D., Bassi D., Ferrini F. 2010. **Evaluation Of Three Electronic Noses For Detecting Incipient Wood Decay.** Sensors, 10: 1062-1092. <https://doi.org/10.3390/s100201062>.
- Bajocco S., Ferrara C., Bascietto M., Alivernini A., Chirichella R., Cutini A., Chianucci F. 2021. **Characterizing the climatic niche of mast seeding in beech: Evidences of trade-offs between vegetation growth and seed production.** Ecological Indicators, 121: 107139.
- Baldi P., La Porta N. 2020. **Molecular approaches for low-cost point-of-care pathogen detection in agriculture and forestry.** Frontiers in plant science 11: 570862. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.570862>.
- Barabesi L., Franceschi S., Marcheselli M. 2012. **Stratified Spatial Sampling With Application To Canopy Coverage Estimation.** Annals of applied statistics, 6: 210-228.
- Bare B., Dean A. 2001. **Opening Remarks and Welcome to the First International Precision Forestry Symposium.** In: Proceedings of the first international precision forestry cooperative symposium, Washington: 1.
- Bareth U., Kupper A., Ruppel P. 2010. **Geoxmart-a marketplace for geofence-based mobile services.** IEEE 34th Annual Computer Software and Applications Conference, 1: 101-106.
- Barone P.M., Ferrara C. 2019. **A posteriori GPR evaluation of tree stability: A case study in Rome (Italy).** Remote Sensing, 11 (11), art. no. 1301.
- Bathurst J.C., Fahey B., Iroumé A., Jones J. 2020. **Forests and floods: Using field evidence to reconcile analysis methods.** Hydrological Processing, 34: 3295-3310.
- Bayr C., Gallaun H., Kleb U., Kornberger B., Steinegger M., Winter M. 2016. **Satellite-based forest monitoring: Spatial and temporal forecast of growing index and short-wave infrared band.** Geospat. Health, 11: 31-42.
- Becker R.M., Keefe R.F., Anderson N.M. 2017. **Use of real-time GNSS-RF Data to characterize the swing movements of forestry equipment.** Forests, 8:44. <https://doi.org/10.3390/f8020044>.
- Berti S., Brunetti M., Rescic L. 2003. **Manuale sulla valutazione della qualità degli assortimenti legnosi ritraibili dalla specie pregiate.** Il Guado, 1:1-48.
- Bingham B., Foley B., Singh H., Camilli R., Delaporta K., Eustice R., Mallios A., Mindell D., Roman C., Sakellariou D. 2010. **Robotic tools for deep water archaeology: Surveying an ancient shipwreck with an autonomous underwater vehicle.** Journal of Field Robotics, 27:702-717.
- Bisi F., Chirichella R., Chianucci F., Von Hardenberg J., Cutini A., Martinoli A., Apollonio M. 2018. **Climate, tree mast seeding and spatial behaviour in wild boar (Sus scrofa L.): insight from a long-term study.** Annals of forest science, 75: 1-9.
- Björk A., Erlandsson M., Häkli J., Jaakkola K., Nilsson Å., Nummilla K., Puntanen V., Sirkka A. 2011. **Monitoring environmental performance of the forestry supply chain using RFID.** Computers in industry, 62: 830-841. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2011.08.001>.
- Blackford C., Heung B., Baldwin K., Fleming R.L., Hazlett P.W., Morris D.M., Webster K.L. 2021. **Digital soil mapping workflow for forest resource applications: a case study in the Hearst forest, Ontario.** Canadian Journal of Forest Research 51: 59-77.

- Blagojević B., Jonsson R., Björheden R., Nordström E., Lindroos O. 2019. **Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) in Forest Operations – an Introductory Review.** *Croatian Journal Forest Engineering*, 40: 191-215.
- Bogdziewicz M., Szymkowiak J., Fernández-Martínez M., Peñuelas J., Espelta J.M. 2019. **The effects of local climate on the correlation between weather and seed production differ in two species with contrasting masting habit.** *Agricultural and forest meteorology*, 268: 109-115.
- Bonannella C., Chirici G., Travaglini D., Pecchi M., Vangi E., D'Amico G., Giannetti F. 2022. **Characterization of Wildfires and Harvesting Forest Disturbances and Recovery Using Landsat Time Series: A Case Study in Mediterranean Forests in Central Italy.** *Fire*, 5: 68.
- Bonney R., Cooper C.B., Dickinson J., Kelling S., Phillips T., Rosenberg K.V., Shirk J. 2009. **Citizen science: A developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy.** *BioScience*, 59: 977-984. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>.
- Bont L., Heinimann H. 2012. **Optimum geometric layout of a single cable road.** *European Journal of Forest Research*, 131:1439-1448.
- Bordas R.M., Davis G.A., Hopkins B.L., Thomas R.E., Rummer R.B. 2001. **Documentation of Hazards and Safety Perceptions for Mechanized Logging Operations in East Central Alabama.** *Journal of Agricultural Safety and Health*, 113-124.
- Borga M., Tonelli F., Salleroni J. 2004. **A physically based model of the effects of forest roads on slope stability.** *Water Resour. Res.*, 40, W12202. [doi:10.1029/2004WR003238](https://doi.org/10.1029/2004WR003238).
- Borga M., Tonelli F., dalla Fontana G., Cazorzi F. 2005. **Evaluating the influence of forest roads on shallow landsliding.** *Ecological Modelling*, 187 (1): 85-98, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.055>.
- Borselli L., Castelli G., Secchi G., Nsabayumva J.M.V., Preti F. 2021. **Optimal design of terraced landscapes: sensitivity analysis of geomechanical and bio-mechanical parameters.** LASOSU 2021, International Forum on Land Degradation, Soil Conservation and Sustainable Development; Session SS7, Dalian, China, 21-23 August 2021.
- Bowen J., Hinze A., Griffiths C. 2019. **Investigating real-time monitoring of fatigue indicators of New Zealand forestry workers.** *Accident Analysis & Prevention*, 1: 122-141.
- Bozinovski S., Fulgosi A. 1976. **The influence of pattern similarity and transfer of learning upon training of a base perceptron B2.** (original in Croatian: Utjecaj sličnosti likova i transfera učenja na obucavanje baznog perceptrona B2), *Proc. Symp. Informatica 3-121-5*, Bled.
- Butler Z., Corke P., Peterson R., Rus D. 2006. **From robots to animals: Virtual fences for controlling cattle.** *International Journal of Robotics*, 25: 485-508.
- Calvani S. 2019. **Alterazione dei processi idrologici ed erosivi a seguito di incendio sui Monti Pisani e monitoraggio della funzionalità degli interventi di salvaguardia a scala di versante.** In: Tesi di Laurea Magistrale, Università di Firenze.
- Camarero J.J., Albuixech J., Lopez-Lozano R., Casterad M.A., Montserrat-Martí G. 2010. **An increase in canopy cover leads to masting in *Quercus ilex*.** *Trees*, 24: 909-918.
- 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, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>.
- Cambi M., Giambastiani Y., Giannetti F., Nuti E., Dani A., Preti F. 2021. **Integrated Low-Cost Approach for Measuring the State of Conservation of Agricultural Terraces in Tuscany, Italy.** *Water*, 13, 113. <https://doi.org/10.3390/w13020113>.
- Calvani S. 2019. **Alterazione dei processi idrologici ed erosivi a seguito di incendio sui Monti Pisani e monitoraggio della funzionalità degli interventi di salvaguardia a scala di versante.** Tesi di Laurea Magistrale, Università di Firenze. a.a. 2018-19.
- Castellaneta M., Borghetti M., Colangelo M., Lapolla A., Rita A., Ripullone F. 2021. **SilvaCuore: un'App per monitorare lo stato di salute delle foreste italiane.** *Forest@* 18: 74-78.
- Chianucci F., Puletti N., Grotti M., Ferrara C., Giorelli A., Coaloa D., Tattoni C. 2020. **Nondestructive tree stem and crown volume allometry in hybrid poplar plantations derived from terrestrial laser scanning.** *Forest Science* 66: 737-746.
- Chianucci F., Bajocco S., Ferrara C. 2021a. **Continuous observations of forest canopy structure using low-cost digital camera traps.** *Agricultural and Forest Meteorology*, 307: 108516. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108516>.
- Chianucci F., Tattoni C., Ferrara C., Ciolli M., Brogi R., Zanni M., Cutini A. 2021b. **Evaluating sampling schemes for quantifying seed production in beech (*Fagus sylvatica*) forests using ground quadrats.** *Forest Ecology and Management*, 493: 119294.
- Chianucci F., Ferrara C., Puletti N. 2022. **coveR: An R package for processing Digital Cover Photography images to retrieve forest canopy attributes.** *bioRxiv*.
- Chiarabaglio P.M., Bergante S., Scire' M., Coaloa D. 2018. **Low cost poplar inventory in the plain of Piemonte (Italy).** *Annals of Silvicultural Research* (42 (1), 2018:39-42. online 20/06/2018. <http://dx.doi.org/10.12899/asr-1494>.
- Chiavetta U., Marzini S. 2021. **Foremast: an R package for predicting beech (*Fagus sylvatica* L.) masting events in European countries.** *Annals of Forest Science*, 78: 1-10.
- Chirici G., Corona P. 2006. **Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione nel rilevamento delle risorse forestali.** Aracne Editrice, Roma, ISBN: 88-548-0338-3.
- Chirici G., McRoberts R.E., Winter S., Bertini R., Bröändli U.B., Asensio I.A., Bastrup-Birk A., Rondeux J., Barsoum N., Marchetti M. 2012. **National forest inventory contributions to forest biodiversity monitoring.** *Forest Science*, 58: 257-268. <https://doi.org/10.5849/forsci.12-003>.
- Chirici G., Giannetti F., McRoberts R.E., Travaglini D., Pecchi M., Maselli F., Chiesi M., Corona P. 2020. **Wall-to-wall spatial prediction of growing stock volume based on Ital-**

- ian National Forest Inventory plots and remotely sensed data.** *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84: 101959. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101959>.
- Chirici G., Chiesi M., Fibbi L., Giannetti F., Corona P., Maselli F. 2022. **Agricultural and Forest Meteorology High spatial resolution modelling of net forest carbon fluxes based on ground and remote sensing data.** *Agricultural and Forest Meteorology*, 316: 108866. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108866>
- Ciesa M., Grigolato S., Cavalli R. 2014. **Analysis on vehicle and walking speeds of search and rescue ground crews in mountainous areas.** *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 6: 48-57.
- Cohen D., Schwarz M. 2017. **Tree-root control of shallow landslides.** *Earth Surf. Dynam.*, 5: 451-477. <https://doi.org/10.5194/esurf-5-451-2017>, 2017.
- Contreras M., Aracena P., Chung W. 2012. **Improving accuracy in earthwork volume estimation for proposed forest roads using a high-resolution digital elevation model.** *Croatian Journal of Forest Engineering*, 33: 125-142.
- Cooper P.A., Jeremic D., Radivojevic S., Ung Y.T., Leblon B. 2011. **Potential of near-infrared spectroscopy to characterize wood products.** *Canadian Journal of Forest Research*, 41: 2150-2157.
- Corona P., Scrinzi G. 2014. **Sicurezza dell'approvvigionamento di materiale legnoso forestale in Italia e innovazioni per la tracciabilità dei prodotti legnosi.** In: *Atti II Congresso Internazionale di Selvicoltura*, Firenze: 631-637.
- Corona P., Chianucci F., Quatrini V., Civitarese V., Clementel F., Costa C., Floris A., Menesatti P., Puletti N., Sperandio G., Verani S., Turco R., Bernardini V., Plutino M., Scrinzi G. 2017. **Precision forestry: riferimenti concettuali, strumenti e prospettive di diffusione in Italia.** *Forest@* 14: 1-12.
- Corona P., Chianucci F., Grotti M., Marcelli A., Mattioli W., Puletti N., Chiarabaglio P.M., Coaloa D., Rosso L. 2018. **Sviluppo di un sistema di monitoraggio annuale della pioppicoltura nella Pianura Padano-Veneta.** In: *Report intermedio progetto Monipoplar*, Arezzo.
- Costa C., Antonucci F., Pallottino F., Aguzzi J., Sarrià D., Menesatti P. 2013. **A review on agri-food supply chain traceability by means of RFID technology.** *Food and Bioprocess Technology*, 6: 353-366.
- Craven M., Wing M.G. 2014. **Applying airborne LiDAR for forested road geomatics.** *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29: 174-182.
- Crocker E., Condon B., Almsaeed A., Jarret B., Nelson C.D., Abbott A.G., Main D., Staton M. 2020 **TreeSnap: A citizen science app connecting tree enthusiasts and forest scientists.** *Plants People Planet*, 2: 47-52. <https://doi.org/10.1002/ppp3.41>.
- Cui S., Ling P., Zhu H., Keener H.M. 2018. **Plant pest detection using an artificial nose system: a review.** *Sensors*, 18: 378.
- Dani A., Preti F. 2015. **Evoluzione temporale della stabilità di versante a seguito di trattamenti selvicolturali.** In: *Atti del II Congresso Internazionale di Selvicoltura. Progettare il futuro per il settore forestale*, Firenze, 26-29 novembre 2014. Firenze: Accademia Italiana di Scienze Forestali. 1: 469-475. <http://dx.doi.org/10.4129/2cis-ad-evo>.
- Danilevicz M.F., Bayer P.E., Nestor B.J., Bennamoun M., Edwards D. 2021. **Resources for image-based high-throughput phenotyping in crops and data sharing challenges.** *Plant physiology*, 187: 699-715.
- Dechter R. 1986. **Learning while searching in constraint-satisfaction problems.** In *Proceedings of the Fifth AAAI National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'86)*. AAAI Press, 178-183
- Devries B., Decuyper M., Verbesselt J., Zeileis A., Herold M., Joseph S. 2015. **Tracking disturbance-regrowth dynamics in tropical forests using structural change detection and Landsat time series.** *Remote Sensing Environmental*, 169: 320-334.
- Di Stefano V., Ingoglia K. 2022. **La pianificazione forestale alla luce della nuova Strategia forestale nazionale.** *Diritto e giurisprudenza agraria alimentare e dell'ambiente* 1: 1-10 (online: <https://www.rivistadga.it/la-pianificazione-forestale-alla-luce-della-nuova-strategia-forestale-nazionale/>).
- Dreher A., Krieger T. 2010. **Diesel price convergence and mineral oil taxation in Europe.** *Applied Economics*, 42: 1955-1961.
- Dumont J., Hirvonen T., Heikkinen V., Mistretta M., Granlund L., Himanen K., ... & Keinänen M. 2015. **Thermal and hyperspectral imaging for Norway spruce (Picea abies) seeds screening.** *Computers and Electronics in Agriculture*, 116: 118-124.
- Dyck B. 2003. **Precision forestry – The path to increased profitability!** In: *Proceedings of the second international precision forestry symposium*, Washington: 3-8.
- Eitel J.U., Keefe R.F., Long D.S., Davis A.S., Vierling L.A. 2010. **Active ground optical remote sensing for improved monitoring of seedling stress in nurseries.** *Sensors*, 10: 2843-2850.
- Espiñeira M., Santaclara F.J. 2016. **What is food traceability?** In: *Advances in Food Traceability Techniques and Technologies*, Cambridge: 3-8.
- EUROPEAN COMMISSION 2021. **Fostering a European approach to Artificial Intelligence.** Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. Brussels, 21.4.2021.
- FAO 2020. **Global Forest Resources Assessment 2020: Main report.** Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>.
- Fernández-Martínez M., Garbulsky M., Peñuelas J., Peguero G., Espelta J.M. 2015. **Temporal trends in the enhanced vegetation index and spring weather predict seed production in Mediterranean oaks.** *Plant Ecology*, 216(8), 1061-1072.
- Ferrara C., Barone P.M., Steelman C., Pettinelli E., Endres A.L. 2013. **Monitoring shallow soil water content under natural field conditions using the early-time GPR signal technique.** *Vadose Zone Journal*, 12 (4): 1-9. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0202>

- Ferrara C., Barone P.M., Pettinelli E., Salvati L. 2014. **Ground Penetrating Radar as a remote-sensing approach to investigate the root system architecture beneath the soil.** *Applied Ecology and Environmental Research* 12 (3): 695-702. https://doi.org/10.15666/aeer/1203_695702.
- Ferrara C., Salvati L., Barone P.M. 2017. **Tree root system imaging using ground penetrating radar.** *Annals of Silvicultural Research*, 41(2), 80-83.
- Ferraz A., Saatchi S., Mallet C., Meyer V. 2016. **Lidar detection of individual tree size in tropical forests.** *Remote Sensing Environmental*, 183: 318-333.
- Figorilli S., Antonucci F., Costa C., Pallottino F., Raso L., Castiglione M., Pinci E., Del Vecchio D., Colle G., Proto A., Sperandio G., Menesatti P. 2018. **A Blockchain Implementation Prototype for the Electronic Open Source Traceability of Wood along the Whole Supply Chain.** *Sensors*, 18: 3133. <https://doi.org/10.3390/s18093133>.
- Figorilli S., Bruzzese S., Proto A.R., Costa C., Moscovini L., Blanc S., Brun F., 2021. **A Blockchain implemented App for forestry nursery management.** In: Proceedings of 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry, 3-5 Novembre 2021, Trento-Bolzano (Italy): 396-400.
- Francini S., McRoberts R.E., Giannetti F., Mencucci M., Marchetti M., Scarascia Mugnozza G., Chirici G. 2020. **Near-real time forest change detection using PlanetScope imagery.** *European Journal of Remote Sensing*, 53 (1): 233-244.
- Francini S., McRoberts R.E., Giannetti F., Marchetti M., Scarascia Mugnozza G., Chirici G. 2021. **The Three Indices Three Dimensions algorithm (3I3D): a new method for forest disturbance mapping and area estimation based on optical remotely sensed imagery.** *International Journal Remote Sensing*, 42:4696-4711.
- Francini S., McRoberts R.E., D'Amico G., Coops N.C., Hermosilla T., White J.C., Wulder M.A., Marchetti M., Mugnozza G.S., Chirici G. 2022. **An open science and open data approach for the statistically robust estimation of forest disturbance areas.** *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 106: 102663.
- Galtier O., Dupuy N., Le Dréau Y., Ollivier D., Pinatel C., Kister J., Artaud J. 2007. **Geographic origins and compositions of virgin olive oils determined by chemometric analysis of NIR spectra.** *Analytica Chimica Acta*, 595:136-144.
- Gan Q., Wang X., Wang Y., Xie Z., Tian Y., Lu Y. 2017. **Culture-free detection of crop pathogens at the single-cell level by micro-Raman spectroscopy.** *Advanced Science* 4: 1700127. <https://doi.org/10.1002/advs.201700127>.
- Garcia M., Zuckerberg B., LaMontagne J.M., Townsend P.A. 2021. **Landsat-based detection of mast events in white spruce (*Picea glauca*) forests.** *Remote Sensing of Environment*, 254: 112278.
- Garegnani G., Geri F., Zambelli P., Grilli G., Sacchelli S., Paletto A., Curetti G., Ciolli M., Vettorato D. 2015. **A new open source DSS for assessment and planning of renewable energy: r. green.** In: Proceedings of FOSS4G Europe, Como, 14-17.
- Garland J., Belart F., Crawford R., Chung W., Cushing T., Fitzgerald S., Green P., Kincl L., Morrisette B., Sessions J., Wimer J. 2019. **Safety in steep slope logging operations.** *Journal of Agromedicine*, 24: 138-145. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2019.1581115>.
- Giambastiani Y., Errico A., Preti F., Guastini E., Censini G. 2022. **Indirect root distribution characterization using electrical resistivity tomography in different soil conditions.** *Urban Forestry & Urban Greening*, 67: 127442. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127442>.
- Giannetti F., Puletti N., Quatrini V., Travaglini D., Botalico F., Corona P., Chirici G. 2017a. **Integrating terrestrial and airborne laser scanning for the assessment of single tree attributes in Mediterranean forest stands.** *European Journal of Remote Sensing*, 51: 795-807. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1482733>.
- Giannetti F., Chirici G., Travaglini D., Botalico F., Marchi E., Cambi M. 2017b. **Assessment of soil disturbance caused by forest operations by means of portable laser scanner and soil physical parameters.** *Soil Science Society of America Journal*, 81:1577-1585.
- Giannetti F., Pegna R., Francini S., McRoberts R.E., Travaglini D., Marchetti M., Mugnozza G.S., Chirici G. 2020a. **A new method for automated clearcut disturbance detection in mediterranean coppice forests using landsat time series.** *Remote Sensing*, 12: 1-23. <https://doi.org/10.3390/rs12223720>.
- Giannetti F., Puliti S., Puletti N., Travaglini D., Chirici G. 2020b. **Modelling Forest structural indices in mixed temperate forests: comparison of UAV photogrammetric DTM-independent variables and ALS variables.** *Ecological Indicators*, 117: 106513.
- Giannetti F., Pecchi M., Travaglini D., Saverio F., Amico G.D., Vangi E., Coccozza C., Chirici G. 2021. **Estimating VAIA windstorm damaged forest area in Italy using time series Sentinel-2 imagery and continuous change detection algorithms.** *Forests*, 12: 1-16.
- Giovannelli A., Deslauriers A., Fragnelli G., Scaletti L., Castro G., Rossi S., Crivellaro A. 2007. **Evaluation of drought response of two poplar clones (*Populus× canadensis* Mönch 'I-214' and *P. deltoides* Marsh. 'Dvina') through high resolution analysis of stem growth.** *Journal of Experimental Botany* 58: 2673-2683.
- Gonzalez-Ollauri A., Hudek C., Mickovski S.B., Viglietti D., Ceretto N., Freppaz M. 2021. **Describing the vertical root distribution of alpine plants with simple climate, soil, and plant attributes.** *Catena*, 1: 203.
- Granier A. 1985. **Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres [A new method of sap flow measurement in tree stems].** *Annales des Sciences Forestières*, 42: 193-200.
- Grayson L., Keefe R., Tinkham W., Eitel J., Saralecos J., Smith A., Zimbelman E. 2016. **Accuracy of WAAS-Enabled GPS-RF Warning Signals When Crossing a Terrestrial Geofence.** *Sensors*, 16: 912. <https://doi.org/10.3390/s16060912>.
- Grigolato S., Mologni O., Cavalli R. 2017. **GIS applications in forest operations and road network planning: An**

- overview over the last two decades.** *Croatian Journal of Forest Engineering*, 38: 175-186.
- Haas J., Hagge E.K., Schack-Kirchner H., Lang F. 2016. **Using photogrammetry to assess rutting caused by a forwarder-A comparison of different tires and bogie tracks.** *Soil Tillage Research*, 163:14-20.
- Hackenberg J., Spiecker H., Calders K., Disney M., Raumanen P. 2015. **SimpleTree - An efficient open source tool to build tree models from TLS clouds.** *Forests* 6: 4245-4294. <https://doi.org/10.3390/f6114245>.
- Harfouche A.L., Jacobson D.A., Kainer D., Romero J.C., Harfouche A.H., Scarascia Mugnozza G., et al. 2019. **Accelerating climate resilient plant breeding by applying next-generation artificial intelligence.** *Trends Biotechnol.*, 37, 1217-1235.
- Heinimann H.R. 2007. **Precision forestry – What’s that?.** *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 158: 235-242.
- Hellström D. 2009. **The cost and process of implementing RFID technology to manage and control returnable transport items.** *International Journal of Logistics Research and Applications*, 12:1-21.
- Hernández-Clemente R., Hornero A., Mottus M., Penueles J., González-Dugo V., Jiménez J.C., Suárez L., Alonso L., Zarco-Tejada P.J. 2019. **Early diagnosis of vegetation health from high-resolution hyperspectral and thermal imagery: lessons learned from empirical relationships and radiative transfer modelling.** *Current Forestry Reports* 5:169-183. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00096-1>.
- Hinze A., Bowen J., König J.L. 2022. **Wearable technology for hazardous remote environments: Smart shirt and Rugged IoT network for forestry worker health.** *Smart health*, 23.
- Hippoliti G. 1976. **Sulla determinazione delle caratteristiche della rete viabile forestale.** *L’Italia Forestale e Montana*, 241-255.
- Hippoliti G., Piegai F. 2000. **Tecniche e sistemi di lavoro per la raccolta del legno.** *Compagnia delle Foreste*.
- Hofmann A.A., Preti F. 2019. **Politiche di promozione del potere regimante del bosco.** *Quaderno CESBIM n. 5*, Il ruolo della copertura forestale dei versanti nella mitigazione del rischio idraulico e idrogeologico.
- Hsu Y.C., Chen A.P., Wang C.H. 2008. **A RFID-enabled traceability system for the supply chain of live fish.** In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, China.
- Hyyppä E., Yu X., Kaartinen H., Hakala T., Kukko A., Vastaranta M., Hyyppä J. 2020. **Comparison of backpack, handheld, under-canopy UAV, and above-canopy UAV laser scanning for field reference data collection in boreal forests.** *Remote Sensing*, 12: 1-31. <https://doi.org/10.3390/rs12203327>.
- INAIL 2011. **Opuscolo informativo per Lavoratori delle aziende di prima lavorazione del legno.** Segheria sicura disponibile al link: <https://www.inail.it/cs/internet/comunicazione/publicazioni/catalogo-generale/pubbl-segheria-sicura-opuscolo-informativo-per-lavoratori.html>.
- ISPA - International Society of precision agriculture 2018. <https://www.ispag.org/about/definition>.
- IUFRO 2014. **Precision Forestry: The anchor of your value chain.** In: *First Announcement, Precision Forestry Symposium*, South Africa: 1-124.
- IUFRO 2015. **Collection of definition or related elements Precision Forestry.** *SILVAVOC Terminology Project*: 1.
- Jones H.G., Schofield P. 2008. **Thermal and other remote sensing of plant stress.** *General and Applied Plant Physiology*, 34: 19-32.
- Jelavic E., Jud D., Egli P., Hutter M. 2021. **Towards Autonomous Robotic Precision Harvesting: Mapping, Localization, Planning and Control for a Legged Tree Harvester.** *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.10110>.
- Kangas A., Rasinmäki J., Eyvindson K., Chambers P. 2015. **A Mobile Phone Application for the Collection of Opinion Data for Forest Planning Purposes.** *Environmental Management*, 55: 961-971. <https://doi.org/10.1007/s00267-014-0438-0>.
- Katiyar D., Bhinda N.K., Kumar A. 2021. **Precision farming to make agriculture an ultra-tech activity.** *Bioingene PSJ*, 1 (2): 1-4.
- Keefe R.F., Eitel J.U.H., Smith A.M.S., Tinkham W.T. 2014. **Applications of multi transmitter GPS-VHF in forest operations.** In: *Proceedings of the 47th International Symposium on Forestry Mechanization and 5th International Forest Engineering Conference*.
- Keefe R.F., Zimbelman E.G., Wempe A.M. 2019a. **Use of smartphone sensors to quantify the productive cycle elements of hand fallers on industrial cable logging operations.** *International Journal of Forest Engineering*, 30: 132-143. <https://doi.org/10.1080/14942119.2019.1572489>.
- Keefe R.F., Wempe A.M., Becker R.M., Zimbelman E.G., Nagler E.S., Gilbert S.L., Caudill C.C. 2019b. **Positioning Methods and the Use of Location and Activity Data in Forests.** *Forests* 10: 458. <https://doi.org/10.3390/f10050458>.
- Kennedy R., McLeman R., Sawada M., Smigielski J. 2014. **Use of Smartphone Technology for Small-Scale Silviculture: A Test of Low-Cost Technology in Eastern Ontario.** *Small-Scale Forest*, 13: 101-115. <https://doi.org/10.1007/s11842-013-9243-5>.
- Kok J.N., Boers E.J., Kusters W.A., Van der Putten P., Poel M. 2009. **Artificial intelligence: definition, trends, techniques, and cases.** *Artificial intelligence*, 1: 270-299.
- Korten S., Kaul C. 2008. **Application of RFID (Radio Frequency Identification).** *Croatian Journal Forest Engineering*, 29: 85-94.
- Lagerstrom E., Magzamen S., Rosecrance J. 2017. **A mixed-methods analysis of logging injuries in Montana and Idaho.** *American Journal of Industrial Medicine*, 60:1077-1087.
- Land-Zandstra A.M., Devilee J.L., Snik F., Buurmeijer F., van den Broek J.M. 2016. **Citizen science on a smartphone: Participants’ motivations and learning.** *Public Understanding of Science*, 25: 45-60. <https://doi.org/10.1177/0963662515602406>.

- Lapietra G., Collot T., Sampietro L. 1980. **Inventario statistico per punti della pioppicoltura specializzata nella Pianura Padana**. Società agricola e forestale per le piante da cellulosa e da carta 1:112.
- Larsson J. 2011. **Unmanned operation of load-haul-dump vehicles in mining environments**. Tesi di dottorato, Università di Örebro, scuola di scienze e tecnologia.
- Laschi A., Neri F., Brachetti Montorselli N., Marchi E. 2016. **A methodological approach exploiting modern techniques for forest road network planning**. Croatian Journal of Forest Engineering, 27: 319-331.
- Laschi A., Foderi C., Fabiano F., Neri F., Cambi M., Mariotti B., Marchi E. 2019. **Forest road planning, construction and maintenance to improve forest fire fighting: a review**. Croatian Journal of Forest Engineering, 40: 207-219.
- Li S., Lideskog H. 2021. **Implementation of a System for Real-Time Detection and Localization of Terrain Objects on Harvested Forest Land**. Forests, 2021 12:1142.
- Liang X., Kankare V., Yu X., Hyyppä J., Holopainen M. 2014. **Automated stem curve measurement using terrestrial laser scanning**. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52: 1739-48. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2253783>.
- Lindroos O., Burström L. 2010. **Accident rates and types among self-employed private forest owners**. Accident Analysis and Prevention, 42: 1729-1735.
- Liu L., Wang Z., Li J., Zhang X., Wang R. 2020. **A non-invasive analysis of seed vigor by infrared thermography**. Plants, 9: 768.
- Lubello C., Cavalli R. 2006. **Ambiti applicativi della Precision forestry**. Sherwood 125: 11-16.
- Ludovisi R., Tauro F., Salvati R., Khoury S., Scarascia M.G., Harfouche A. 2017. **UAV-Based Thermal Imaging for high-throughput field phenotyping of Black Poplar response to drought**. Frontiers in plant science 8:1681. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01681>.
- Lupton D. 2017. **Digital health**. Critical and cross-disciplinary perspectives. <https://doi.org/10.4324/9781315648835>.
- Maclauchlan L. 2016. **Quantification of Dryocoetes confusus-caused mortality in subalpine fir forests of southern British Columbia**. Forest Ecology Management 359, 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.10.013>.
- Mahlein A.K., Kuska M.T., Behmann J., Polder G., Walter A. 2018. **Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: state of the art**. Annual review of phytopathology, 56: 535-558.
- Mao Z. 2022. **Root reinforcement models: Classification, criticism and perspectives**. Plant and Soil. doi:10.1007/s11104-021-05231-1.
- Marčeta D., Petković V., Ljubojević D., Potočnik I. 2020. **Harvesting system suitability as decision support in selection cutting forest management in northwest Bosnia and Herzegovina**. Croatian Journal of Forest Engineering, 41: 251-265. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.744>.
- Marra E., Cambi M., Fernandez-Lacruz R., Giannetti F., Marchi E., Nordfjell T. 2018. **Photogrammetric estimation of wheel rut dimensions and soil compaction after increasing numbers of forwarder passes**. Scandinavian Journal Forest Research, 33:613-620.
- Marra E., Laschi A., Fabiano F., Foderi C., Neri F., Mastrolonardo G., Nordfjell T., Marchi E. 2021a. **Impacts of wood extraction on soil: assessing rutting and soil compaction caused by skidding and forwarding by means of traditional and innovative methods**. European Journal of Forest Research, 141:71-86.
- Marra E., Wictorsson R., Bohlin J., Marchi E., Nordfjell T. 2021b. **Remote measuring of the depth of wheel ruts in forest terrain using a drone**. International Journal of Forest Engineering, 224-234.
- Marshall H. 2012. **An on-board machine stability information system**, Harvesting Technical Note, 05: 1-5.
- McEwan A. 2017. **Forecasting the Technology Drivers of Harvesting Systems for Fast Growing Eucalyptus and Acacia Plantation Forestry**. PhD thesis, University of Florence, Italy.
- Mitchell T.M. 1997. **Machine Learning**. Disponibile ISBN: 0070428077; 9780070428072.
- Mohan M., Leite R.V., Broadbent E.N., Wan Mohd Jaafar W.S., Srinivasan S., Bajaj S., Dalla Corte A.P., Do Amaral C.H., Gopan G., Saad S.N.M., Muhmad Kamarulzaman A.M., Prata G.A., Llewelyn E., Johnson D.J., Doamo W., Bohlman S., Almeyda Zambrano A.M., Cardil A. 2021. **Individual tree detection using UAV-lidar and UAV-SfM data: A tutorial for beginners**. Open Geosciences, 13: 1028-1039, <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0290>.
- Möller B., Wikander J., Hellgren M. 2011. **A field-tested log traceability system**. Forest Products Journal, 61: 466-472. <https://doi.org/10.13073/0015-7473-61.6.466>.
- Murphy P.N.C., Ogilvie J., Arp P. 2009. **Topographic modelling of soil moisture conditions. A comparison and verification of two models**. European Journal of Soil Science, 60: 94-109.
- Murphy G., Clark J.A., Pilkerton S. 2012. **Current and potential tagging and tracking systems for logs harvested from Pacific Northwest forests**. Western journal of applied forestry 27: 84-91.
- Nakomoto S. 2009. **Bitcoin: A Peer-to-peer Electronic Cash System**. In: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- Nelson E., Mendoza G., Regetz J., Polasky S., Tallis H., Cameron D., Shaw M. 2009. **Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales**. Frontiers in Ecology and the Environment, 7: 4-11.
- Nevalainen P., Salmivaara A., Ala-Homäki J., Launiainen S., Hiedanpää J., Finér L., Pahikkala T., Heikkonen J. 2017. **Estimating the rut depth by UAV photogrammetry**. Remote Sensing, 9:1-26.
- Olivera A., Visser R. 2016. **Using the harvester on-board computer capability to move towards precision forestry**. NZ Journal of Forestry, 60: 3-5.

- Olyazadeh R., Sudmeier-Rieux K., Jaboyedoff M., Derron M.H., Devkota S. 2017. **An offline-online Web-GIS Android application for fast data acquisition of landslide hazard and risk.** *Natural Hazards and Earth System Science*, 17: 549-561. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-549-2017>.
- Oren S., Ceylan H., Schnable P.S., Dong L. 2017. **High-resolution patterning and transferring of graphene-based nanomaterials onto tape toward roll-to-roll production of tape-based wearable sensors.** *Advanced Materials Technologies*, 2:12.
- Ortenzi L., Colle G., Costa C., Moscovini L. 2021. **Italian Speech Commands for Forestry applications.** In: Proceedings of 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry, Trento-Bolzano: 401-405.
- Paletto A., Notaro S., Pastorella F., Giacobelli G., Giovannelli S., Turco R. 2017. **Certificazione forestale in Calabria: attitudini, preferenze e disponibilità a pagare delle imprese di seconda trasformazione del legno.** *Forest@*, 107-123.
- Pan L., Rogulin R., Kondrashev S. 2021. **Artificial neural network for defect detection in CT images of wood.** *Computers and Electronics in Agriculture*, 187: 106312.
- Papetti P., Costa C., Antonucci F., Figorilli S., Solaini S., Menesatti P. 2012. **A RFID web-based infotracing system for the artisanal Italian cheese quality traceability.** *Food Control*, 27: 234-241.
- Parlamento Europeo 2021. **Plasmare il futuro digitale dell'Europa: eliminare gli ostacoli al funzionamento del mercato unico digitale e migliorare l'uso dell'IA per i consumatori europei.** Relazione - A9-0149/2021 (online: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0149_IT.html).
- Payne W.Z., Kourouski D. 2021. **Raman-based diagnostics of biotic and abiotic stresses in plants: a review.** *Frontiers in plant science* 11: 616672. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.616672>.
- Petrella S., Cau F., Galli G., Riccardi M. 2018. **Valutazione dei servizi ecosistemici nel Parco regionale urbano di Aguzzano.** In: Valutazione dei servizi ecosistemici nel Parco regionale urbano di Aguzzano (a cura di Petrella S., Cau F., Galli G., Riccardi M.) Associazione Casale Podere Rosa, Roma.
- Picchi G., Kühmaier M., Marques J.D.D. 2015. **Survival test of RFID UHF tags in timber harvesting operations.** *Croatian Journal Forest Engineering*, 36: 165-174.
- Picchi G. 2020. **Marking Standing Trees with RFID Tags.** *Forests*, 11:1-13. <https://doi.org/10.3390/f11020150>.
- Picchio R., Pignatti G., Marchi E., Latterini F., Benanchi M., Foderi C., Venanzi R., Verani S. 2018. **The Application of Two Approaches Using GIS Technology Implementation in Forest Road Network Planning in an Italian Mountain Setting.** *Forests* 9: 277.
- Picchio R., Latterini F., Mederski P.S., Venanzi R., Karaszewski Z., Bembek M., Croce M. 2019a. **Comparing Accuracy of Three Methods Based on the GIS Environment for Determining Winching Areas.** *Electronics*, 8: 53. <https://doi.org/10.3390/electronics8010053>.
- Picchio R., Proto A.R., Civitarese V., Di Marzio N., Latterini F. 2019b. **Recent Contributions of Some Fields of the Electronics in Development of Forest Operations Technologies.** *Electronics*, 8: 1465. <https://doi.org/10.3390/electronics8121465>.
- Picchio R., Latterini F., Mederski P.S., Tocci D., Venanzi R., Stefanoni W., Pari L. 2020. **Applications of GIS-Based Software to Improve the Sustainability of a Forwarding Operation in Central Italy.** *Sustainability*, 12: 5716. <https://doi.org/10.3390/su12145716>.
- Pieruschka R., Schurr U. 2019. **Plant phenotyping: past, present, and future.** *Plant Phenomics*, 19. <https://doi.org/10.34133/2019/7507131>.
- Pierzchała M., Talbot B., Astrup R. 2016. **Measuring wheel ruts with close-range photogrammetry.** *Forestry*, 89: 383-391. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpw009>.
- Pijl A., Reuter L.E.H., Quarella E., Teun A., Vogel T.A., Tarolli, P. 2020. **GIS-based soil erosion modelling under various steep-slope vineyard practices.** *CATENA*, 193: 104604, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104604>.
- Pocock M.J., Tweddle J.C., Savage J., Robinson L.D., Roy H.E. 2017. **The diversity and evolution of ecological and environmental citizen science.** *PLoS ONE*, 12: e0172579. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172579>.
- Pollini C. 2006. **Manuale per la Classificazione Visuale Qualitativa del Legno Tondo di Abete Rosso, Abete Bianco e Larice.** Servizio Foreste e Fauna e CNR IVALSA pp. 1-112.
- Preti F. 2006. **Stabilità dei versanti vegetati.** In: Manuale 3 Ingegneria Naturalistica Sistemazione dei versanti (a cura: Sauli G., Cornelini P., Preti F.), Regione Lazio, cap. 10, pp. 137-168.
- Preti F., Dani A., Laio F. 2010. **Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes.** *Ecological Engineering*, 36: 305-316.
- Preti F., Forzieri G., Chirico G.B. 2011. **Forest cover influence on regional flood frequency assessment in Mediterranean catchments.** *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15: 3077-3090, <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-3077-2011> www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/3077/2011.
- Preti F. 2013. **Forest protection and protection forest: Tree root degradation over hydrological shallow landslides triggering.** *Ecological Engineering*, 61: 633-645.
- Preti F. 2020. **Il territorio terrazzato: punti di forza e criticità.** Atti del Convegno "Il Futuro dei terrazzamenti sul territorio del Montalbano tra criticità e sviluppo", Villa medicea di Cerreto Guidi, febbraio 2020.
- Preti F., Dani A., Laio F. 2010. **Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes.** *Ecological Engineering*, 36: 305-316.
- Priori S., De Benedetto D., Stellacci A.M., Losciale P., Luigi M. 2016. **Sensori e metodi per rilievi prossimali delle proprietà del suolo e della coltura.** In: Agricoltura di precisione. Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali (a cura di Raffaele Casa), Il Sole 24 Ore Edagricole srl.

- Proto A.R., Zimbalatti G., Bernardi B. 2014. **Nuovi strumenti al servizio delle utilizzazioni forestali**. In: Proceedings of the Second International Congress of Silviculture, 1: 463-468.
- Puletti N., Grotti M., Scotti R. 2019. **Evaluating the Eccentricities of Poplar Stem Profiles with Terrestrial Laser Scanning**. *Forests*, 10: 239. <https://doi.org/10.3390/f10030239>.
- Raddi S., Giannetti F., Martini S., Farinella F., Chirici G., Tani A., Maltoni A., Mariotti, B. 2021. **Monitoring drought response and chlorophyll content in Quercus by consumer-grade, near-infrared (NIR) camera: a comparison with reflectance spectroscopy**. *New Forests*, 1-25.
- Reclus F., Drouard K. 2009. **Geofencing for fleet & freight management**. In: 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, 353-356.
- Rhee K.Y., Choe S.W., Kim Y.S., Koo K.H. 2013. **The trend of occupational injuries in Korea from 2001 to 2010**. *Safety and Health at Work*, 4: 63-70.
- Richards J.A., Jia X. 2006. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction**. In: *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction* (a cura di Richards J.A.), Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-29711-1>.
- Rizzi C. 2012. **Esperienze LiDAR in Stazione Forestale. Il tracciamento preventivo delle linee di gru a cavo**. *Sherwood*, 18: 15-18.
- Roberts T., Shaffer R.M., Bush R.J. 2005. **Injuries on mechanized logging operations in the southeastern United States in 2001**. *Forest Products Journal*, 55:86-89.
- Rossmann J., Buecken A., Hoppen M., Priggemeyer M. 2016. **Integrating Virtual Reality, Motion Simulation and a 4D GIS**. *Research in Urbanism Series*, 4, 25-42. <https://doi.org/10.7480/rius.4.854>.
- Roussel 2020. **Package ‘lidR’**.
- Saaty T.L. 1977. **A scaling method for priorities in hierarchical structures**. *Journal Mathematical Psychology*, 15: 234-281.
- Saaty T.L. 1980. **The Analytic Hierarchy Process**. McGraw-Hill, New York.
- Sahal R., Alsamhi S.H., Breslin J.G., Ali M.I. 2021. **Industry 4.0 towards Forestry 4.0: fire detection use Case**. *Sensors*, 21: 694.
- Saito M., Goshima M., Aruga K., Matsue K., Shuin Y., Tasa-ka T. 2013. **Study of automatic forest road design model considering shallow landslides with lidar data of Funyu experimental forest**. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 34: 1-16.
- Salmivaara A., Miettinen M., Finér L., Launiainen S., Tuom-inen H.S., Heikkonen J., Nevalainen P., Sirén M., Ala-Il-omäki J., Uusitalo J. 2018. **Wheel rut measurements by forest machine-mounted LiDAR sensors – accuracy and potential for operational applications?**. *International Journal of Forest Engineering*, 29: 41-52.
- Samuel A.L. 1959. **Some studies in machine learning using the game of checkers**. *IBM Journal of research and development*, 3: 210-229.
- Sarre A. 2001. **In pursuit of Precision**. *Tropical forest update* 11: 12-13.
- Schraml R., Entacher K., Petutschnigg A., Young T., Uhl A. 2020. **Matching score models for hyperspectral range analysis to improve wood log traceability by fingerprint methods**. *Mathematics*, 8:1071. <https://doi.org/10.3390/MATH8071071>.
- Schraml R., Charwat-Pessler J., Petutschnigg A., Uhl A. 2015. **Towards the applicability of biometric wood log traceability using digital log end images**. *Computers and electronics in agriculture*, 119: 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.10.003>.
- Sepúlveda M.F., Vega M., Gendvilas V., Williams D., Har-ri-son P.A., Vaillancourt R.E., Potts B.M. 2021. **R-based image analysis to quantify checking and shrinkage from wood wedges**. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79:1269-1281.
- Smith B.G. 2008. **Developing sustainable food supply chains**. *Philosophical Transactions*, 363: 849-861.
- Spencer G., Mateus F., Torres P., Dionísio R., Martins R. 2021. **Design of CAN Bus communication interfaces for forestry machines**. *Computers*, 10: 144.
- Sperandio G., Costa C., Figorilli S., Pallottino F., Scrinzi G., Colle G., Proto A., Macri G., Antonucci F., Menesatti P. 2017. **Valutazione economica delle tecnologie RFID e open source per la tracciabilità del legno in Calabria**. *Forest@*, 14: 124-134.
- StandForD 2010. **Introduction to StanForD 2010 structural descriptions and implementation recommendations**. Disponibile al link: https://www.skogforsk.se/cd_20210111174505/contentassets/1a68cdce4af1462ead-048b7a5ef1cc06/stanford-2010-introduction-200820.pdf.
- Stängle S.M., Brüchert F., Heikkilä A., Usenius T., Useni-us A., Sauter U.H. 2015. **Potentially increased sawmill yield from hardwoods using X-ray computed tomography for knot detection**. *Annals of Forest Science* volume, 72: 57-65.
- Statistics U.S.B. 2018. **Fatal occupational injuries by occupation and event or exposure, all United States**. Disponibile: <https://www.bls.gov/iif/oshwc/cfoi/cftb0326.htm>.
- Stentz A., Dima C., Wellington C., Herman H., Stager D. 2002. **A system for semi-autonomous tractor operation**. *Autonomous robots*, 13: 87-104.
- Sterenczak K., Moskalik T. 2015. **Use of LIDAR-based digital terrain model and single tree segmentation data for optimal forest skid trail network**. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 8: 661-667.
- Spinelli R., Magagnotti N., Sperandio G., Cielo P., Verani S., Zanuttini R. 2011. **Cost and productivity of harvesting high-value hybrid poplar plantations in Italy**. *Forest products journal* 61: 64-70.
- Sun Y., Liang X., Liang Z., Welham C., Li W. 2016. **Deriving merchantable volume in poplar through a localized tapering function from non-destructive terrestrial laser scanning**. *Forests*, 7: 1-11. <https://doi.org/10.3390/f7040087>.

- Schwarz M., Giadrossich F., Cohen D. 2013. **Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function**. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11): 4367-4377.
- Tarolli P., Calligaro S., Cazorzi F., Dalla Fontana G. 2011. **L'alterazione dei deflussi idrici superficiali da parte dei segmenti viari e dei sentieri: l'efficacia della topografia ad alta risoluzione**. Convegno di Medio Termine dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Belgirate, 22-24 settembre 2011.
- Tattoni C., Chianucci F., Ciolli M., Ferrara C., Marchino L., Zanni M., Cutini A. 2021. **A comparison of ground-based count methods for quantifying seed production in temperate broadleaved tree species**. *Annals of Forest Science*, 78: 1-14.
- Tauro F., Maltese A., Giannini R. et al. 2022. **Latent heat flux variability and response to drought stress of black poplar: A multi-platform multi-sensor remote and proximal sensing approach to relieve the data scarcity bottleneck**. *Remote Sensing of Environment*, 268:112771.
- Taylor S.E., Veal M.W., Grift T.E. 2002. **Precision Forestry: Operational Tactics for Today and Tomorrow**. In: *Proceedings of the international meeting of the "COFE" Vancouver*: 6.
- Taylor S.E., McDonald T., Mask P., Shaw J., Smidt M., Fulton J., Srivastava P., Gallagher T., Brodbeck C., Mullenix D. 2011. **Precision Forestry**. Disponibile al seguente link: www.eng.auburn.edu/programs/bsen/research/offhighway-vehicle/precision-forestry/index.html.
- Thomas L., Mili L., Thomas E., Shaffer C.A. 2007. **Defect detection on hardwood logs using laser scanning**. *Wood and Fiber Science*, 38: 682-695.
- Tognetti R., Smith M., Panzacchi P. 2022. **An Introduction to Climate-Smart Forestry in Mountain Regions**. In: Tognetti R., Smith M., Panzacchi P. (eds) *Climate-Smart Forestry in Mountain Regions*. *Managing Forest Ecosystems*, vol 40. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80767-2_1.
- Tomaščík J., Saloň Š., Piroh R. 2017. **Horizontal accuracy and applicability of smartphone GNSS positioning in forests**. *Forestry*, 90:187-198. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpw031>.
- Torresan C., Pelleri F., Manetti F.C., Becagli C., Castaldi C., Notarangelo M., Chiavetta U. 2021. **Comparison of TLS against traditional surveying method for stem taper modelling. A case study in European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of mount Amiata**. *Annals of Silvicultural Research*, 46: 128-140.
- Trochta J., Kruček M., Vrška T., Kraňal K. 2017. **3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR**. *PLoS One* 12, 1-17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176871>.
- Tsioras P., Rottensteiner C., Stampfer K. 2011. **Analysis of Accidents during cable yarding operations in Austria 1998-2008**. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 36: 549-560.
- Turing A.M.I. 1950. **Computing Machinery and Intelligence**, *Mind*, Volume LIX, Issue 236, October: 433-460.
- Umstatter C. 2011. **The evolution of virtual fences: A review**. *Computers Electronics in Agriculture*, 75: 10-22. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.10.005>.
- UNI EN 1316-1. **Legno tondo di latifoglie. Classificazione qualitativa**.
- UNI EN 14081-1:2011. **Strutture di legno - Legno strutturale con sezione rettangolare classificato secondo la resistenza - Parte 1**. UNI, 2011.
- UNI EN 1912:2009. **Legno strutturale - Classi di resistenza - Assegnazione delle categorie visuali e delle specie**.
- UNI EN 338. **Legno strutturale - Classi di resistenza**.
- Valentini R., Marchesini L.B., Gianelle D., Sala G., Yaroslavtsev A., Vasenev V., Castaldi S. 2019. **New tree monitoring systems: From industry 4.0 to nature 4.0**. *Annals of Silvicultural Research*, 43(2): 84-88.
- Vangi E., D'amico G., Francini S., Giannetti F., Lasserre B., Marchetti M., McRoberts R.E., Chirici G. 2021. **The effect of forest mask quality in the wall-to-wall estimation of growing stock volume**. *Remote Sensing*, 13: 1-20. <https://doi.org/10.3390/rs13051038>.
- van Zadelhoff F.B., Albaba A., Cohen D., Phillips C., Schaeffli B., Dorren L.K.A., Schwarz M. 2021. **Introducing SlideforMap; a probabilistic finite slope approach for modelling shallow landslide probability in forested situations**. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1-33.
- Vazken A. 2004. **Waters and forests: from historical controversy to scientific debate**. *Journal of Hydrology*, 291: 1-2.
- Villa F., Bagstad K.J., Voigt B., Johnson G.W., Portela R., Honzák M., Batker D. 2014. **A Methodology for Adaptable and Robust Ecosystem Services Assessment**. *PLoS ONE*, 9: 3.
- Visser R., Obi O.F. 2021. **Automation and Robotics in Forest Harvesting Operations: Identifying Near-Term Opportunities**. *Crojife journal of forest engineering* 42: 13-24.
- Weiser H., Schäfer J., Winiwarter L., Krašovec N., Fassnacht F.E., Höfle B. 2022. **Individual tree point clouds and tree measurements from multi-platform laser scanning in German forests**. *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 2989-3012. <https://doi.org/10.5194/essd-14-2989-2022>.
- Westerberg S. 2014. **Semi-Automatic Forestry Machines**. Tesi di dottorato, Università di Umeå.
- Wempe A.M., Keefe R.F. 2017. **Characterizing rigging crew proximity to hazards on cable logging operations using GNSS-RF: Effect of GNSS positioning error on worker safety status**. *Forests*, 8. <https://doi.org/10.3390/f8100357>.
- Wood S.L., Jones S.K., Johnson J.A., Brauman K.A., Chaplin-Kramer R., Fremier A., DeClerck F.A. 2018. **Distilling the role of ecosystem services in the Sustainable Development Goals**. *Ecosystem services*, 29: 70-82.
- World Bank 2017. **ICT in Agriculture: Connecting Smallholders to Knowledge, Networks, and Institutions**. Updated Edition. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1002-2>.

Xiong Q., Zhang L., Zheng X., Qian Y., Zhang Y., Zhao L., Cheng Q. 2021. **Rapid and Specific Detection of the Poplar Black Spot Disease Caused by *Marssonina brunnea* Using Loop-Mediated Isothermal Amplification Assay.** *Plants*, 10: 253.

Yoshida M., Sakurai R., Sakai H. 2019. **Forest road planning using precision geographic data under climate change.** *International Journal of Forest Engineering*, 30: 219-227.

Zenone T., Morelli G., Teobaldelli M., Fischanger F., Matteucci M., Sordini M., Seufert G. 2008. **Preliminary use of ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography to study tree roots in pine forests and poplar plantations.** *Functional plant biology* 35: 1047-1058.

Ziesak M. 2006. **Precision Forestry – An overview on the current status of Precision forestry. A literature review.** In: *Proceedings of the Precision Forestry Conference Technical University - IUFRO, Munich.*

Zimbelman E., Keefe R., Strand E., Kolden C., Wempe A. 2017. **Hazards in Motion: Development of Mobile Geofences for Use in Logging Safety.** *Sensors*, 17: 822. <https://doi.org/10.3390/s17040822>.

Zimbelman E.G., Keefe R.F. 2021. **Development and validation of smartwatch based activity recognition models for rigging crew workers on cable logging operations.** *PLoS ONE*, 16:1-25. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250624>.

Zopounidis C., Pardalos P.M. 2010. **Handbook of multicriteria analysis.** Springer Science & Business Media.

Zorzi I., Francini S., Chirici G., Coccozza C. 2021. **The TreeTalkersCheck R package: An automatic daily routine to check physiological traits of trees in the forest.** *Ecological Informatics*, 66, 101433. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101433>.