

LORENZO FARAONI (*) - DAVIDE TRAVAGLINI (*) (°)

CAMBIAMENTI CLIMATICI E IDONEITÀ AMBIENTALE
DEL TERRITORIO TOSCANO PER LE PINETE DI PINO NERO

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

(°) Autore corrispondente; davide.travaglini@unifi.it

In questo studio è stata valutata l'idoneità ambientale del territorio della Regione Toscana per le pinete di pino nero e per le specie secondarie più frequenti nelle pinete toscane - castagno, cerro e faggio - in uno scenario di cambiamento climatico.

Le carte di idoneità ambientale sono state costruite con il metodo della land suitability della FAO utilizzando parametri climatici (temperature e precipitazioni) e parametri fisici (pendenza del terreno e caratteristiche dei suoli). Lo scenario di cambiamento climatico utilizzato è lo scenario A2 del modello HadCM3. La capacità predittiva dei modelli cartografici è stata valutata con analisi statistica ROC.

L'accuratezza delle carte di idoneità ambientale è risultata buona (AUC = 0,875 per il castagno e 0,813 per il pino nero), specie per il faggio (AUC = 0,952); per il cerro, la qualità del modello cartografico è risultata inferiore (AUC = 0,628) a quella delle altre specie esaminate.

I risultati ottenuti indicano la presenza di criticità ambientali su circa il 20% della superficie complessiva delle pinete (10.071 ha) presenti nel territorio regionale, proporzione che sale al 50% nello scenario di cambiamento climatico considerato. I modelli costruiti per le specie secondarie indicano che il cerro e castagno potranno svolgere in futuro un ruolo utile ai fini della rinaturalizzazione delle pinete di pino nero in un contesto di cambiamenti ambientali.

Parole chiave: sistemi di supporto alle decisioni; modellistica ecologica; *land suitability*; valutazione multicriteriale; *fuzzy set*.

Key words: decision support system; ecological modeling; *land suitability*, multi-criteria evaluation, *fuzzy set*.

Citazione: Faraoni L., Travaglini D., 2016 - *Cambiamenti climatici e idoneità ambientale del territorio toscano per le pinete di pino nero*. *L'Italia Forestale e Montana*, 71 (3): 157-174.

<http://dx.doi.org/10.4129/ifm.2016.3.01>

1. INTRODUZIONE

Le relazioni tra gli ecosistemi forestali e i cambiamenti climatici sono numerose e complesse e includono, ad esempio, interazioni sulla fisiologia delle specie, variazioni della durata del ciclo vegetativo, variazioni della distribuzione geografica della vegetazione, variazioni dei cicli biogeochimici (Centritto, 2007; IPCC, 2007; IUFRO, 2009; White Paper, 2009).

Vari autori hanno studiato l'influenza dei cambiamenti climatici sulla distribuzione geografica potenziale della vegetazione. La scala di analisi di queste indagini coinvolge vari livelli, dalla scala regionale (Ruiz-Labourdette *et al.*, 2012; Fisichelli *et al.*, 2014; Jantsch *et al.*, 2014; Hansen e Phillips, 2015), a quella nazionale (Woodall *et al.*, 2010; García-López e Allué, 2011; Garcia *et al.*, 2013; Corda *et al.*, 2014) e sovranazionale (Iverson *et al.*, 2008; Hickler *et al.*, 2012; Meier *et al.*, 2012; Tanaka *et al.*, 2012; Casazza *et al.*, 2014).

I risultati delle ricerche segnalano una migrazione della vegetazione come conseguenza dello spostamento altitudinale e latitudinale dei limiti termici, con variazioni nella composizione delle comunità vegetali. Altri studi hanno esaminato l'impatto della frammentazione del territorio sulle potenziali "rotte" migratorie delle specie vegetali (Scheller e Mladenoff, 2008; Nabel *et al.*, 2013), evidenziando un rischio di estinzione per le specie con bassa plasticità ecologica e per quelle ai margini dell'areale di distribuzione, per le specie in stazioni relitte e per quelle con una bassa dispersione del seme (Allen *et al.*, 2010; Isaac e Williams, 2013; Bussotti *et al.*, 2015).

Il bacino del mediterraneo è una regione dall'equilibrio climatico delicato e sensibile alle perturbazioni. La vulnerabilità dei sistemi mediterranei è accentuata dai fattori di disturbo che si sono susseguiti nel tempo, come le trasformazioni di coltura, il pascolo, gli incendi (Giorgi e Lionello, 2008; Lionello, 2012; IPCC, 2013). La vulnerabilità è superiore nelle piantagioni forestali monospecifiche realizzate con specie esotiche o con specie indigene piantate fuori areale (Franceschini *et al.*, 2008; Green Paper, 2010). Ne sono un esempio i numerosi rimboschimenti di pino (Gómez-Aparicio *et al.*, 2009; González-Moreno *et al.*, 2011) realizzati nei paesi del mediterraneo ai margini dell'areale della specie impiantata. Peraltro, tali rimboschimenti si presentano spesso come soprassuoli densi per la mancata applicazione delle cure colturali necessarie a garantire la funzionalità delle formazioni artificiali (Pausas *et al.*, 2004; Allen *et al.*, 2010; Sánchez-Salguero *et al.*, 2012).

In Italia centro-meridionale, fra la fine dell'800 e la seconda metà del '900 numerose superfici sono state rimboschite con pino nero (*Pinus nigra* J.F. Arnold) e/o pino laricio (*Pinus nigra* J.F. Arnold ssp. *laricio* (Poiret) Maire) (di seguito indicate pinete di pino nero) per proteggere il suolo dall'erosione e per creare condizioni favorevoli alla ricostituzione di una copertura forestale con specie locali (Nicolaci *et al.*, 2014; Cantiani e Chiavetta, 2015). In Toscana, i rimboschimenti di pino nero si presentano in uno stato di vulnerabilità documentato da vari autori (Berneti e Mondino, 1998; Nocentini, 1999, 2001; Bianchi *et al.*, 2010) e tale condizione potrebbe aggravarsi a causa dei cambiamenti climatici in atto (Brunetti *et al.*, 2006) e del generale aumento di eventi estremi come le ondate di calore (Bartolini *et al.*, 2007) e le tempeste di vento (Bottalico *et al.*, 2015; Consorzio LaMMA, 2015).

L'obiettivo di questo studio è valutare l'idoneità ambientale potenziale del territorio della Regione Toscana ad ospitare le pinete di pino nero nelle condizioni climatiche attuali, riferite all'anno 2013, e in quelle future, riferite al 2080, model-

lizzate secondo uno scenario di cambiamento climatico riconosciuto a livello internazionale. In particolare, le domande a cui si è cercato di dare risposta sono: quale è la superficie regionale con caratteristiche ambientali idonee per il pino nero? quale è la superficie delle pinete che vegeta in condizioni ambientali favorevoli? quale è il limite altitudinale dove si trovano condizioni adatte al pino? quali variazioni sono attese a causa del cambiamento climatico? in quali condizioni ambientali si troveranno a vegetare le specie secondarie presenti nelle pinete toscane e quale ruolo potranno svolgere ai fini della rinaturalizzazione delle pinete?

Lo studio è stato sviluppato su base spaziale ed è stato condotto in più fasi. Prima sono state prodotte le carte di idoneità ambientale del territorio della Regione Toscana ad ospitare le specie esaminate (pino nero e specie secondarie) nelle condizioni climatiche attuali (2013) e in quelle al 2080 secondo lo scenario di cambiamento climatico dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), basato sul modello HadCM3, e ne sono state osservate le differenze. In seguito, le carte di idoneità sono state incrociate con la distribuzione sul territorio regionale delle specie considerate per individuare le formazioni sensibili al cambiamento climatico. Inoltre, per ciascuna specie è stata quantificata la variazione del limite altitudinale al variare delle condizioni climatiche. I risultati ottenuti sono discussi con lo scopo di fornire indicazioni utili per la pianificazione forestale a scala regionale.

2. MATERIALI E METODI

2.1. *Specie esaminate*

Lo studio è stato condotto in Regione Toscana (22.873 km²). Sono state esaminate le pinete a prevalenza di pino nero (copertura del pino > 70%) distribuite sul territorio regionale. La distribuzione delle pinete nel sistema di riferimento Gauss Boaga Fuso Ovest Datum Roma 1940 è stata derivata dalle celle di 400 m di lato dell'Inventario Forestale della Toscana - IFT (Hofmann *et al.*, 1998) - e trasformata nel sistema di coordinate UTM 32 Nord Datum WGS84 con il *software* Traspunto (Travaglini, 2004). La superficie delle pinete considerate ammonta a 10.710 ha. Inoltre si sono prese in esame le latifoglie che secondo IFT sono le specie secondarie più frequenti nei rimboschimenti di pino nero toscani: castagno, cerro e faggio. La superficie delle pinete dove queste latifoglie sono segnalate come secondarie è pari al 22% ed è così ripartita: 23% castagno, 44% cerro, 33% faggio.

2.2. *Scenario di cambiamento climatico*

Lo scenario di cambiamento climatico adottato si basa sulle previsioni climatiche del modello globale atmosferico-oceanografico HadCM3 (www.metoffice.gov.uk), con particolare riferimento allo scenario A2 che prevede un aumento della temperatura di 3,2 °C e una diminuzione delle precipitazioni del 7% all'anno 2080 (IPCC, 2000, 2007).

Tale modello è già stato utilizzato per valutare l'effetto dei cambiamenti climatici sulla distribuzione delle specie vegetali nel bacino mediterraneo e in Europa (Thuiller *et al.*, 2004; Casalegno *et al.*, 2010; Hickler *et al.*, 2012).

2.3. Carte di idoneità ambientale del territorio

Le carte di idoneità ambientale del territorio della Regione Toscana ad ospitare le specie esaminate sono state prodotte applicando in ambiente GIS la metodologia della *land suitability* della FAO (1976). Tale metodologia, nella sua formulazione originaria, era finalizzata alla valutazione del grado di attitudine del territorio ad un determinato uso del suolo. Nel nostro Paese, il metodo della *land suitability* è stato applicato per valutare l'attitudine del territorio all'impianto di specie forestali (a esempio, Chirici *et al.*, 2002; Cappelli *et al.*, 2009). In sintesi, il metodo prevede i seguenti passaggi principali:

- scelta dei parametri ambientali;
- modellizzazione dei parametri ambientali;
- valutazione e combinazione dei parametri ambientali.

La modellizzazione, la valutazione e la combinazione dei parametri è stata effettuata con il *software* TerrSet (Eastman, 2015).

2.3.1. Scelta dei parametri ambientali

Per individuare gli ambiti territoriali con caratteristiche ambientali potenzialmente idonee per le specie oggetto di studio è stata condotta un'analisi bibliografica preliminare sulle esigenze ecologiche delle specie esaminate. La ricerca si è focalizzata sui parametri di cui in letteratura era disponibile una loro quantificazione in relazione alle esigenze delle singole specie e per i quali erano disponibili prodotti cartografici adeguati a modellizzare la variabilità dei parametri sul territorio regionale. I parametri ambientali così selezionati sono: temperatura media annua, temperatura media del mese più freddo, precipitazione media annua, precipitazione media estiva, pendenza del terreno, tessitura, pH, drenaggio e profondità del suolo.

2.3.2. Modellizzazione dei parametri ambientali

Per ciascun parametro è stato predisposto un modello cartografico in formato *raster* con risoluzione spaziale di 250 m proiettato nel sistema di coordinate UTM 32 Nord Datum WGS84 con il *software* Traspunto.

Le carte della temperatura media annua, della temperatura media del mese più freddo (gennaio), della precipitazione media annua e della precipitazione media estiva (giugno, luglio e agosto) sono state ottenute elaborando le mappe mensili delle temperature e delle precipitazioni prodotte su scala nazionale da Blasi *et al.* (2007) con risoluzione geometrica di 250 m.

La carta della pendenza è stata derivata dal modello digitale del terreno (DTM) con pixel di 250 m prodotto su scala nazionale da Blasi *et al.* (2007). La carta della pendenza, espressa in percentuale, è stata riclassificata in 5 classi come indicato in Tabella 1.

Tabella 1 - Idoneità nella scala di valori *fuzzy* assegnata alle classi di pendenza.

Classe	Pendenza in %	Idoneità
1	0-20	1,00
2	20-40	0,75
3	40-60	0,50
4	60-173	0,25
5	>173	0,00

Le carte della tessitura, pH, drenaggio e profondità del suolo sono state ottenute dalla Carta dei suoli della Toscana in scala 1:250,000 realizzata secondo il “Manuale del database georeferenziato dei suoli d’Europa in scala 1:250,000” (Finke *et al.*, 1998), le cui caratteristiche edafiche fanno riferimento alla “Guida alla descrizione dei suoli in campagna e alla definizione delle loro qualità” (Gardin *et al.*, 2002).

Per simulare gli effetti del cambiamento climatico sull’idoneità ambientale del territorio toscano per le specie esaminate, le carte delle temperature e le carte delle precipitazioni sono state ricalcolate sulla base dell’aumento delle temperature e della diminuzione delle precipitazioni attese al 2080 secondo lo scenario di cambiamento climatico considerato. Tutti gli altri parametri ambientali sono stati mantenuti invariati.

2.3.3. Valutazione e combinazione dei parametri ambientali

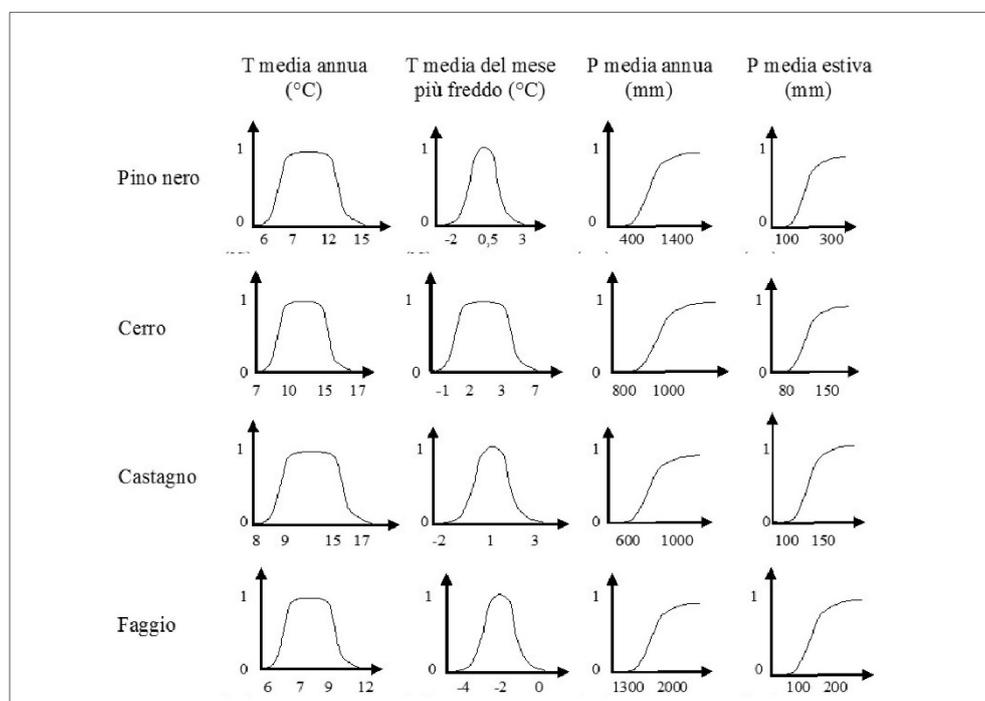
I modelli cartografici dei parametri ambientali sono stati valutati singolarmente per quantificare l’attitudine del territorio in funzione delle esigenze delle specie esaminate. La valutazione è stata effettuata secondo un approccio basato sulla teoria dei *fuzzy set* (Zadeh, 1965).

Tale approccio prevede l’applicazione di funzioni di appartenenza *fuzzy* per mezzo delle quali il livello di idoneità dei singoli parametri ambientali è espresso in una scala di valori continui compresi tra 0 e 1, dove 0 corrisponde al livello minimo di idoneità (non idoneo) e 1 corrisponde al livello massimo (idoneo); i valori compresi nell’intervallo 0-1 esprimono livelli di idoneità intermedi. Le funzioni di appartenenza *fuzzy* utilizzate in questo studio sono state messe a punto per ciascun parametro ambientale sulla base delle esigenze ecologiche delle specie esaminate. Le funzioni così elaborate per i parametri climatici sono riportate in Figura 1. Nel caso di parametri ambientali di tipo qualitativo, come le classi di pendenza e i parametri edafici, l’idoneità è stata determinata assegnando a ciascun parametro un punteggio nella scala di valori *fuzzy* come indicato nelle Tabelle 1 e 2. Nel caso dei parametri climatici la valutazione è stata effettuata sia per i valori di temperatura e di precipitazione di riferimento (2013), sia per quelli ricalcolati al 2080 sulla base dello scenario di cambiamento climatico considerato.

Per ciascuna specie, la carta dell’idoneità ambientale complessiva del territorio regionale nelle condizioni climatiche attuali e al 2080 è stata ottenuta nella scala di valori *fuzzy* combinando i valori di idoneità dei singoli parametri ambientali con il metodo della *linear combination* (Eastman, 2015).

Tabella 2 - Idoneità nella scala di valori *fuzzy* assegnata ai parametri edafici per le specie esaminate.

Parametro	Classe	Idoneità			
		Pino nero	Cerro	Castagno	Faggio
Profondità	Profondo	1,0	1,0	1,0	1,0
	Mediamente profondo	1,0	0,5	0,5	0,5
	Superficiale	0,5	0,0	0,0	0,0
Drenaggio	Buono	1,0	1,0	1,0	1,0
	Medio	1,0	0,5	0,5	0,5
	Lento	0,5	0,0	0,0	0,0
Tessitura	Sabbiosa	1,0	0,0	1,0	0,5
	Limosa	1,0	1,0	1,0	1,0
	Argillosa	1,0	1,0	0,0	0,5
pH	Acido	0,0	0,5	1,0	0,5
	Neutro	0,5	1,0	0,5	1,0
	Alcalino	1,0	0,5	0,0	0,5

Figura 1 - Funzioni di appartenenza *fuzzy* elaborate per i parametri climatici considerati.

Infine, per agevolare la lettura e semplificare l'impiego operativo delle cartografie prodotte, è stata eseguita un'operazione di *hardening* in modo da convertire i valori originali di idoneità, espressi nella scala di valori *fuzzy*, in tre classi di idoneità: non idoneo, moderatamente idoneo, idoneo. I valori soglia utilizzati per effettuare la riclassificazione sono stati stabiliti esaminando i valori di

idoneità $fuzzy$ al 2013 in corrispondenza delle celle dell'IFT dove le specie considerate sono segnalate come prevalenti (copertura > 70%). Sulla base di tale analisi si è osservato che la distribuzione di frequenza dei valori $fuzzy$ segue, per ciascuna specie, un andamento gaussiano con un valore medio di idoneità di circa 0,77-0,78 (deviazione standard $\pm 0,08$). Si è quindi stabilito di considerare idonei al 2013 e al 2080 i territori con valori $fuzzy > 0,83$, non idonei i territori con valori $fuzzy < 0,70$ e moderatamente idonei i restanti territori.

2.4. Accuratezza delle carte di idoneità ambientale

L'accuratezza della carta di idoneità ambientale del territorio di ciascuna specie esaminata è stata valutata con l'analisi delle curve ROC (*Receiver Operating Characteristics*) (Zweig e Campbell, 1993) delle carte elaborate all'anno 2013.

Le curve ROC sono utilizzate per valutare la *performance* predittiva di un modello sulla base di una variabile di risposta, in questo caso la presenza/assenza della specie analizzata. L'area sottesa dalla curva ROC, denominata AUC (*Area Under the Curve*), è un indice della misura della qualità del modello: maggiore è l'area sottesa dalla curva, maggiore è il potere discriminante del modello (Phillips *et al.*, 2006). L'intervallo di valori che può assumere la AUC è compreso tra 0,5 (accuratezza minima) e 1,0 (accuratezza massima). I valori di AUC compresi nell'intervallo 0,5-1 sono stati interpretati in termini di accuratezza del modello come descritto da Swets (1988).

Per effettuare l'analisi ROC, per ciascuna specie è stato estratto un campione casuale di 2000 punti, di cui 1000 ricadenti nei territori dove la specie è segnalata presente dall'IFT, e 1000 nei territori dove la specie è assente. L'analisi ROC è stata effettuata con il *software* R (R Development Core Team, 2009) utilizzando il pacchetto ROCR (Sing *et al.*, 2005, 2013).

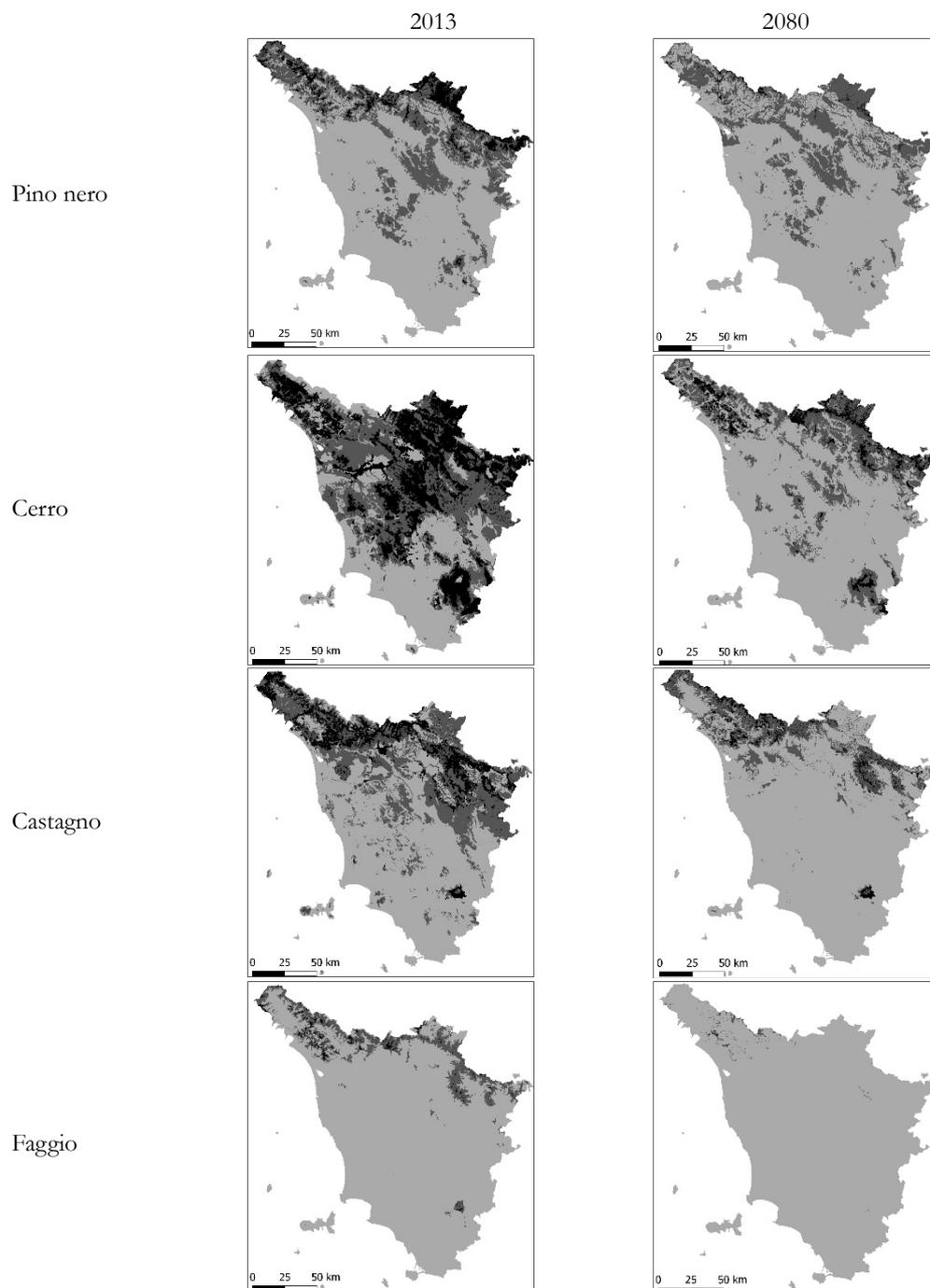
3. RISULTATI

Le carte di idoneità ambientale potenziale del territorio della Regione Toscana, elaborate con il metodo della *land suitability* per il pino nero, il cerro, il castagno e il faggio nelle condizioni ambientali di riferimento (2013) e in quelle attese (2080) secondo lo scenario di cambiamento climatico considerato, sono riportate in Figura 2.

I risultati dell'accuratezza dei modelli cartografici prodotti all'anno di riferimento (2013), valutata con l'analisi ROC, sono riportati in Figura 3. Il modello sviluppato per il faggio è risultato accurato (AUC = 0,952); i modelli costruiti per il castagno e il pino nero sono risultati moderatamente accurati (AUC = 0,875 per il castagno e 0,813 per il pino); il modello elaborato per il cerro presenta un livello di accuratezza (AUC = 0,628) inferiore a quello delle altre specie esaminate.

La superficie regionale che nelle condizioni climatiche di riferimento (2013) presenta caratteristiche ambientali idonee per il pino nero è risultata pari al 6% della superficie complessiva. Il 25,5% della superficie regionale presenta

Figura 2 - Carte di idoneità ambientale potenziale del territorio della Regione Toscana elaborate per il pino nero, il cerro, il castagno e il faggio nelle condizioni climatiche di riferimento al 2013 e in quelle previste al 2080 dallo scenario di cambiamento climatico considerato. In nero la classe di idoneità ambientale "idoneo"; in grigio scuro la classe di idoneità ambientale "moderatamente idoneo"; in grigio chiaro la classe di idoneità ambientale "non idoneo".



caratteristiche ambientali moderatamente idonee per il pino e il restante 68,5% di superficie è risultato essere non idoneo per questa conifera. Nello scenario di cambiamento climatico considerato, la superficie regionale non idonea per il pino aumenta del 6,9% dal 2013 al 2080, mentre la superficie del territorio regionale con caratteristiche moderatamente idonee e idonee per il pino si riduce, rispettivamente, dell'1,5% e del 5,4% nel periodo esaminato. Tendenze simili a quelle stimate per il pino nero sono state ottenute per le specie secondarie (Tabella 3).

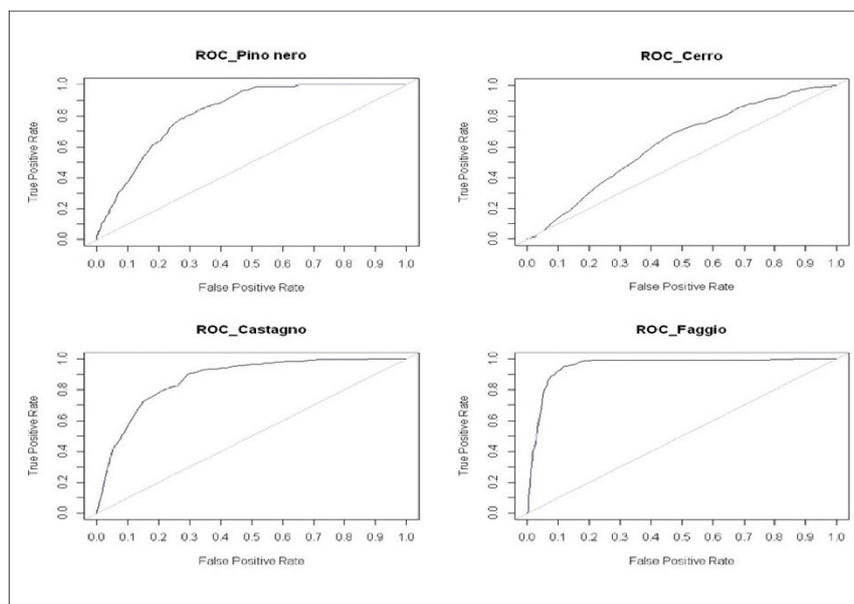


Figura 3 - Curva ROC delle carte di idoneità ambientale del territorio elaborata al 2013 per le specie esaminate.

Tabella 3 - Superficie (in % rispetto alla superficie regionale) delle classi di idoneità ambientale delle specie esaminate nelle condizioni climatiche di riferimento al 2013 e in quelle previste al 2080 dallo scenario di cambiamento climatico considerato.

Specie	Classe di idoneità	2013	2080	Variazione
		%	%	%
Pino nero	Non idoneo	68,5	75,4	+ 6,9
	Moderatamente idoneo	25,5	24,0	- 1,5
	Idoneo	6,0	0,6	- 5,4
Cerro	Non idoneo	34,8	71,6	+ 36,8
	Moderatamente idoneo	36,0	22,8	- 13,2
	Idoneo	29,2	5,6	- 23,6
Castagno	Non idoneo	59,3	82,7	+ 23,4
	Moderatamente idoneo	29,9	14,5	- 15,4
	Idoneo	10,8	2,8	- 8,0
Faggio	Non idoneo	89,6	99,3	+ 9,7
	Moderatamente idoneo	9,4	0,7	- 8,7
	Idoneo	1,0	0,0	- 1,0

Nelle condizioni climatiche di riferimento (2013), la superficie delle pinete di pino nero che ricadono nella classe di idoneità ambientale “idoneo” è pari a 2.650 ha, che corrisponde al 24,7% della superficie complessiva delle pinete di pino nero toscane. La superficie delle pinete nelle classi “moderatamente idoneo” e “non idoneo” è risultata rispettivamente pari a 5.859 ha (54,7% della superficie delle pinete) e 2.201 ha (20,6% della superficie delle pinete). Nelle condizioni attese al 2080, la ripartizione della superficie delle pinete nelle classi di idoneità è risultata pari a 241 ha nella classe “idoneo” (2,3% della superficie delle pinete, -22,4% rispetto al 2013), 5.456 ha nella classe “moderatamente idoneo” (50,9% della superficie delle pinete, -3,8% rispetto al 2013) e 5.013 ha nella classe “non idoneo” (46,8% della superficie delle pinete, +26,2% rispetto al 2013).

In Tabella 4 sono riportati i limiti altitudinali del pino nero e delle specie secondarie stimati al 2013 e al 2080 incrociando la classe “idoneo” delle carte di idoneità ambientale con il DTM. Nel caso del pino nero, il limite altitudinale passa da una quota media di 858 m s.l.m. nel 2013 a una quota media di 1.197 m s.l.m. nel 2080, facendo registrare uno spostamento verso l'alto del limite di 339 m s.l.m. con una velocità di spostamento di circa 5 m l'anno. Una tendenza simile a quella osservata per il pino è stata ottenuta per il cerro e il castagno; per il faggio, lo spostamento verso l'alto del limite superiore (+ 569 m) è risultato maggiore di quello delle altre specie, con una velocità di circa 8,5 m l'anno.

La Tabella 5 mostra la ripartizione della superficie delle pinete nelle classi di idoneità ambientale delle specie secondarie all'anno 2080. Dalla tabella si evince che il cerro troverà condizioni ambientali idonee su circa il 22% delle pinete e il castagno su circa l'11%. Il faggio, invece, nelle pinete di pino nero toscane troverà sempre condizioni ambientali non idonee se si verificheranno le previsioni di cambiamento climatico dello scenario considerato.

Tabella 4 - Limite altitudinale (medio, minimo e massimo) potenziale delle specie esaminate stimato per la classe di idoneità ambientale “idoneo” nelle condizioni climatiche di riferimento al 2013 e in quelle previste al 2080 dallo scenario di cambiamento climatico considerato.

Specie	2013			2080			Variazione	
	Quota media (m)	Quota min (m)	Quota max (m)	Quota media (m)	Quota min (m)	Quota max (m)	Quota media (m)	Velocità (m/anno)
Pino nero	858	240	1.632	1.197	375	1.968	+ 339	5,1
Cerro	445	1	1.315	840	201	1.717	+ 395	5,9
Castagno	623	4	1.421	944	379	1.850	+ 321	4,8
Faggio	1.056	447	1.706	1.625	1154	2.009	+ 569	8,5

Tabella 5 - Ripartizione (in ettari e in %) della superficie delle pinete di pino nero nelle classi di idoneità ambientale delle specie secondarie riferite all'anno 2080.

Specie	Classe di idoneità	Superficie	
		ha	%
Cerro	Non idoneo	2.219	20,7
	Moderatamente idoneo	6.082	56,8
	Idoneo	2.409	22,5
Castagno	Non idoneo	5.596	52,3
	Moderatamente idoneo	3.924	36,6
	Idoneo	1.190	11,1
Faggio	Non idoneo	10.650	99,4
	Moderatamente idoneo	60	0,6
	Idoneo	0	0,0

4. DISCUSSIONE

In questo studio è stata valutata l'idoneità ambientale potenziale del territorio della Regione Toscana per il pino nero, il cerro, il castagno e il faggio, sia nelle condizioni climatiche attuali, riferite all'anno 2013, sia in quelle future riferite all'anno 2080, simulate applicando lo scenario A2 del modello globale atmosferico-oceanografico HadCM3.

Le carte di idoneità ambientale, elaborate con il metodo della *land suitability* della FAO con una risoluzione spaziale di 250 m, riconducibile ad una scala cartografica di 1:1,000,000 secondo lo standard di riferimento internazionale dell'*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS, 2015), sono state valutate in termini di accuratezza con l'analisi ROC. Il metodo utilizzato, che può essere sviluppato facilmente con comuni *software* GIS commerciali e *open source* in altri contesti territoriali, ha prodotto modelli cartografici per il pino, il castagno e il faggio caratterizzati da un buon livello di accuratezza (AUC > 0,8), specie per il faggio (AUC > 0,9). Il modello cartografico del cerro invece è risultato di qualità inferiore (AUC < 0,7). Altri autori hanno tuttavia segnalato che l'analisi ROC restituisce valori di AUC tendenzialmente bassi nel caso di specie dotate di spettro ecologico relativamente ampio (Wiley *et al.*, 2003; Phillips *et al.*, 2006; Amici *et al.*, 2012), come può essere considerato il cerro in Toscana dove si trova distribuito in vari ambienti, dalle colline costiere alla montagna appenninica fino a circa 1300 m di quota. Nel caso del pino nero si deve poi considerare che in Toscana questa specie è stata talvolta piantata in zone non particolarmente adatte al pino e questo può avere influito sulla valutazione dell'accuratezza della carta di idoneità ambientale della conifera (Casalegno *et al.*, 2010).

Il confronto tra le carte di idoneità ambientale elaborate al 2013 e al 2080 mostra una riduzione della superficie regionale considerata idonea per tutte le specie esaminate, soprattutto nella Toscana meridionale, dove il clima è più

marcatamente mediterraneo e maggiore è lo stress idrico che le piante devono sostenere. La riduzione maggiore di superficie regionale idonea è stata stimata per il faggio, essendo questa una specie microterma e con maggiori esigenze di umidità rispetto al pino e alle altre specie esaminate. Questo risultato è in linea con quanto osservato da altri autori che segnalano una riduzione dell'areale di distribuzione delle specie più mesofile e microterme a causa dei cambiamenti climatici (Pignatti, 2011; Borghetti *et al.*, 2012; Bussotti *et al.*, 2014; Jantsch *et al.*, 2014).

Per il pino nero, la superficie con caratteristiche ambientali ritenute idonee alla specie passa dal 6% della superficie regionale nel 2013 allo 0,6% nel 2080. I risultati ottenuti indicano che solo il 2% delle pinete si troveranno a vegetare in ambiti territoriali risultati idonei per la specie, mentre circa il 50% delle pinete troverà nel 2080 condizioni ambientali che non sono idonee secondo il modello utilizzato. Altri autori hanno osservato una tendenziale riduzione della superficie idonea per il pino nero nel bacino del mediterraneo a causa dei cambiamenti climatici (a esempio, Ruiz-Labourdette *et al.*, 2013; López-Tirado e Hidalgo, 2014). Tuttavia, almeno per le nostre conoscenze, questo risulta essere il primo studio che ha esaminato gli effetti del cambiamento climatico sulla idoneità ambientale del territorio toscano per le pinete di pino nero.

I modelli cartografici prodotti possono rappresentare un utile strumento informativo per la pianificazione forestale regionale, a esempio per supportare la scelta delle aree geografiche dove intervenire prioritariamente con azioni capaci da un lato di mitigare gli effetti del clima sulle pinete di pino nero e dall'altro di aumentare la capacità di adattamento delle pinete ai cambiamenti ambientali in corso.

In un contesto di cambiamento climatico, nelle pinete da rinaturalizzare risulterà utile conoscere quali specie potranno trovare in futuro condizioni ambientali favorevoli per pianificare al meglio la scelta delle specie da favorire con gli interventi culturali. I risultati prodotti in questo studio permettono di fare alcune prime considerazioni sul ruolo che potranno svolgere in questo senso specie come il castagno, il cerro e il faggio, che peraltro sono le specie secondarie più frequenti nelle pinete di pino nero toscane. Il cerro presenta al 2080 condizioni idonee su circa il 22% delle pinete e il castagno su circa l'11%, proporzione che sale a circa l'80% per il cerro e a circa il 48% per il castagno se consideriamo anche gli ambiti territoriali classificati dal modello come moderatamente idonei per le due latifoglie. Tuttavia, si rileva che gli ambiti territoriali dove cerro e castagno sono già presenti come specie secondarie nelle pinete che ricadono in zone ritenute idonee e moderatamente idonee per queste latifoglie coprono una superficie relativamente limitata, rispettivamente pari all'8% della superficie complessiva delle pinete nel caso del cerro e al 4% nel caso del castagno. Nelle condizioni climatiche qui ipotizzate, il faggio non sembra essere capace di svolgere un ruolo efficace ai fini della rinaturalizzazione delle pinete di pino nero in Toscana.

Un ulteriore effetto dei cambiamenti climatici sulla distribuzione delle specie esaminate, evidenziato dall'analisi dei modelli cartografici, è l'innalzamento del limite altitudinale delle aree di idoneità ambientale, specie per il faggio. Nel periodo esaminato, lo spostamento verso quote maggiori del limite altitudinale, quantificato in circa 320-570 m a seconda della specie considerata, determina per il pino nero uno spostamento della fascia altitudinale nella classe idoneo da circa 850-1.650 m s.l.m. nel 2013 a circa 1.200-2.000 m s.l.m. nel 2080. Tale valore è in linea con quanto osservato di recente in certe zone dell'Appennino Centrale, dove è stata segnalata l'espansione del pino nero sopra il limite superiore del bosco, fra 1.600 e 2.200 m di quota (Piermattei *et al.*, 2012; Piermattei *et al.*, 2014). La velocità di spostamento in altitudine stimata per le specie esaminate, ad eccezione del faggio, è di circa 5-6 m l'anno, valore simile a quello riportato da Giordano e Scarascia Mugnozza (2010).

5. CONCLUSIONI

In questo studio è stata valutata per la prima volta l'idoneità ambientale del territorio della Regione Toscana per le pinete di pino nero e per le specie secondarie più frequenti nelle pinete toscane (castagno, cerro e faggio) in uno scenario di cambiamento climatico.

Il metodo della *land suitability* della FAO, utilizzato per elaborare i modelli cartografici di idoneità ambientale, è risultato di semplice applicazione e può essere trasferito in altri contesti territoriali. L'accuratezza delle cartografie prodotte è risultata buona, ad eccezione della carta elaborata per il cerro essendo questa una specie che in Toscana presenta uno spettro ecologico relativamente ampio. Ulteriori indagini sono comunque necessarie per confrontare le *performance* del metodo utilizzato con quelle di altri modelli predittivi impiegati per esaminare la distribuzione potenziale delle specie o degli *habitat*, a esempio: *Logistic regression*, *Random forest*, *Maxent*.

In Toscana, le pinete di pino nero sono soprassuoli di origine artificiale la cui vulnerabilità è stata documentata da vari autori. I risultati di questo studio indicando la presenza di criticità ambientali su circa il 20% delle pinete presenti nel territorio regionale, proporzione che sale al 50% nello scenario di cambiamento ipotizzato.

In questo contesto, è necessario pianificare e attuare con urgenza una serie di azioni volte a mitigare gli effetti del *climate change* e ad aumentare la capacità di adattamento delle pinete ai cambiamenti ambientali. In questa prospettiva, modelli cartografici simili a quelli prodotti in questo studio costituiscono degli strumenti di supporto alle decisioni utili per stabilire dove orientare prioritariamente gli interventi ed eventualmente per guidare la scelta delle specie da favorire in uno scenario di cambiamento climatico.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il Dott. Cristiano Foderi del Dipartimento GESAAF dell'Università degli Studi di Firenze per il supporto fornito nell'analisi statistica delle curve ROC e la Prof.ssa Susanna Nocentini del Dipartimento GESAAF per i suggerimenti forniti.

SUMMARY

Climate change and land suitability for Pinus nigra J.F. Arnold in Tuscany, Central Italy

In this study we assessed the land suitability for black pine forests (*Pinus nigra* J.F. Arnold) in Tuscany Region (Central Italy), and for the most frequent minor species in the pine stands – chestnut, turkey oak and beech - in a climate change scenario.

The habitat suitability maps were constructed by the land suitability method of FAO using climatic parameters (temperature and precipitation) and physical parameters (slope of the land and soil characteristics). The climate change scenario used is the A2 scenario of HadCM3 model. The predictive ability of cartographic models was evaluated with ROC statistical analysis.

The accuracy of the habitat suitability maps was good (AUC = 0.875 for chestnut, and 0.813 for black pine), especially for beech (AUC = 0.952); for the turkey oak, the quality of the cartographic model was lower (AUC = 0.628) than the other species.

The results indicate the presence of critical environmental issues for about 20% of the total area of pine forests (10,071 ha), a proportion that rises to 50% in the climate change scenario considered. The models obtained for minor species indicate that turkey oak and chestnut could play a useful role in the future for the re-naturalization of black pine forests in the context of environmental changes.

BIBLIOGRAFIA

- Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Venetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N., 2010 - *A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests*. Forest Ecology and Management, 259: 660-684.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Amici V., Marcantonio M., Geri F., 2012 - *Applicazione di un modello di nicchia ecologica nella classificazione di coperture forestali*. Forest@ 9: 75-88. <http://dx.doi.org/10.3832/efor0689-009>
- ASPRS, 2015 - *ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 81 (3): A1-A26. <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.81.3.A1-A26>
- Bartolini G., Morabito M., Torrigiani T., Petralli M., Cecchi L., Orlandini S., Baldi M., Grifoni D., Dalu G., Pasqui M., Maracchi G., 2007 - *Climatologia delle temperature ed eventi estremi estivi a scala nazionale e regionale*. In: Clima e cambiamenti climatici: le attività di ricerca del CNR (a cura di: Carli B., Cavarretta G., Colacino M., Fuzzi S.). Consiglio Nazionale delle Ricerche - Roma, ISBN 978-88-8080-075-0: 233-236.
- Bernetti G., Mondino G.P., 1998 - *I tipi forestali, boschi e macchie di Toscana*. Edizione Regione Toscana.
- Bianchi L., Paci M., Bresciani A., 2010 - *Effects of thinning intensities in experimental plots of Black European pine in "Foreste Casentinesi, Monte Falterona and Campigna National Park" (Tosco-Romagnolo Apennine, Italy), eight years after the felling*. Forest@, 2: 73-83.
<http://dx.doi.org/10.3832/efor0616-007>

- Blasi C., Chirici G., Corona P., Marchetti M., Maselli F., Puletti N., 2007 - *Spazializzazione di dati climatici a livello nazionale tramite modelli regressivi localizzati*. *Forest@*, 4: 213-219. <http://dx.doi.org/10.3832/efor0453-0040213>
- Borghetti M., La Mantia T., Menozzi P., Piotti A., 2012 - *Probabili impatti del cambiamento climatico sulla biodiversità delle foreste italiane*. *Forest@*, 9: 245-250. <http://dx.doi.org/10.3832/efor0708-009>
- Bottalico F., Bottacci A., Galipò G., Nocentini S., Torrini L., Travaglini D., Ciancio O., 2015 - *Formazione dei gap causati dal vento in soprassuoli coetanei di abete bianco (Abies Alba Mill.)*. Un caso di studio nella montagna appenninica (Italia centrale). In: Atti del Secondo Congresso Internazionale di Selvicoltura "Progettare il futuro per il settore forestale", Volume I (a cura di: Orazio Ciancio). Firenze, 26-29 Novembre 2014. Accademia Italiana di Scienze Forestali, p. 257-262. <http://dx.doi.org/10.4129/2cis-fb-for>
- Brunetti M., Maugeri M., Monti F., Nanni T., 2006 - *Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series*. *International Journal of Climatology*, 26: 345-381. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1251>
- Bussotti F., Ferrini F., Pollastrini M., Fini A., 2014 - *The challenge of Mediterranean sclerophyllous vegetation under climate change: From acclimation to adaptation*. *Environmental and Experimental Botany*, 103: 80-98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.013>
- Bussotti F., Pollastrini M., Holland V., Brüggemann W., 2015 - *Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change*. *Environmental and Experimental Botany*, 111: 91-113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.11.006>
- Cantiani P., Chiavetta U., 2015 - *Estimating the mechanical stability of Pinus nigra Arn. using an alternative approach across several plantations in central Italy*. *iForest* 8: 846-852 [online 2015-04-08] URL: <http://www.sisef.it/iforest/contents/?id=ifor1300-007>
- Cappelli V., Maltoni A., Mariotti B., Montagni A., Nocentini S., Tani A., Travaglini D., 2009 - *Individuazione delle aree vocate all'arboricoltura con specie a legname pregiato in Provincia di Firenze*. In: Atti del III Congresso Nazionale di Selvicoltura per il miglioramento e la conservazione dei boschi italiani, 16-19 ottobre 2008 - Taormina (Messina), Volume 2. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, p. 796-803.
- Casalegno S., Amatulli G., Camia A., Nelson A., Pekkarinen A., 2010 - *Vulnerability of Pinus cembra L. in the Alps and the Carpathian mountains under present and future climates*. *Forest Ecology and Management*, 259: 750-761. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.10.001>
- Casazza G., Giordani P., Benesperi R., Foggi B., Viciani D., Filigheddu R., Farris E., Bagella S., Pisanu S., Mariotti M.G., 2014 - *Climate change hastens the urgency of conservation for range-restricted plant species in the central-northern Mediterranean region*. *Biological Conservation*, 179: 129-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2014.09.015>
- Centritto M., 2007 - *Impatto dei Cambiamenti Climatici sugli Ecosistemi Agro-Forestali Mediterranei*. In: *Clima e cambiamenti climatici: le attività di ricerca del CNR* (a cura di: Carli B., Cavarretta G., Colacino M., Fuzzi S.). Consiglio Nazionale delle Ricerche – Roma, ISBN 978-88-8080-075-0: 717-720.
- Chirici G., Corona P., Marchetti M., Travaglini D., Wolf U., 2002 - *Modello di valutazione dell'attitudine fisica del territorio per la realizzazione di piantagioni di noce comune e di douglasia in Italia meridionale*. *Monti e Boschi*, 6: 25-31.
- Consorzio LaMMA, 2015 - *Report meteorologico 4-5 marzo 2015*. Firenze, p. 1-11.
- Corda A.F., Kleinb D., Morac F., Dech S., 2014 - *Comparing the suitability of classified land cover data and remote sensing variables for modeling distribution patterns of plants*. *Ecological Modelling*, 272: 129-140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.09.011>
- Eastman J.R., 2015 - *TerrSet manual*. Clark Labs. Clark University. Worcester, MA, USA, p. 392.
- FAO, 1976 - *A framework for land evaluation*. FAO Soils Bulletin, 32. Roma.
- Finke P., Hartwich R., Duadal R., Ibanez J., Jamagne M., King D., Montanarella L., Yassoglou N., 1998 - *Georeferenced soil database for Europe. Manual of procedures version 1.0*. *European Soil Bureau, EUR 18092 EN*. Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, p.32-36.
- Fischelli N.A., Bella S.R., Peters M., Krist F.J., 2014 - *Climate, trees, pests, and weeds: Change, uncer-*

- tainty, and biotic stressors in eastern U.S. national park forests.* Forest Ecology and Management, 327: 31-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.033>
- Franceschini A., Longo S., Moricca S., 2008 - *Arversità biotiche e mutamenti climatici in ambienti forestali.* In: Atti del terzo congresso nazionale di Selvicoltura. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, p. 605-610.
- García K., Lasco R., Ines A., Lyon B., Pulhin F., 2013 - *Predicting geographic distribution and habitat suitability due to climate change of selected threatened forest tree species in the Philippines.* Applied Geography, 44: 12 - 22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.07.005>
- García-López J.M., Allué C., 2011 - *Modelling phytoclimatic versatility as a large scale indicator of adaptive capacity to climate change in forest ecosystems.* Ecological Modelling, 222: 1436-1447. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.001>
- Gardin L., Costantini E., Napoli R., 2002 - *Guida alla descrizione dei suoli in campagna e alla definizione delle loro qualità.* Ministero delle Politiche Agricole e Forestali, Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo; Regione Toscana, Dipartimento Sviluppo Economico Servizio Foreste e patrimonio agroforestale.
- Giordano E., Scarascia Mugnozza G., 2010 - *Silviculture: climate change effects on forest ecosystems.* L'Italia Forestale Montana, 65 (2): 233-238. <http://dx.doi.org/10.4129/ifm.2010.2.14>
- Giorgi F., Lionello P., 2008 - *Climate change projections for the Mediterranean region.* Global and Planetary Change, 63: 90-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Gómez-Aparicio L., Zavala M.A., Francisco J., Zamora R., 2009 - *Are pine plantations valid tools for restoring Mediterranean forests? An assessment along abiotic and biotic gradients.* Ecological Applications, 19: 2124-2141. <http://dx.doi.org/10.1890/08-1656.1>
- González-Moreno P., Quero J.L., Poorter L., 2011 - *Is spatial structure the key to promote plant diversity in Mediterranean forest plantations?* Basic and Applied Ecology, 12: 251-259. <http://dx.doi.org/10.1016/j.baaec.2011.02.012>
- Green Paper, 2010 - *On Forest Protection and Information in the EU: Preparing forests for climate change.* Brussels, 13.2010, COM(2010).
- Hansen A.J., Phillips L.B., 2015 - *Which tree species and biome types are most vulnerable to climate change in the US Northern Rocky Mountains?* Forest Ecology and Management, 338: 68-83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.008>
- Hickler T., Vohland K., Feehan J., Miller P.A., Smith B., Costa L., Giesecke T., Fronzek S., Carter T.R., Cramer W., Kühn I., Martin T., 2012 - *Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model.* Global Ecology and Biogeography, 21: 50-63. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00613.x>
- Hofmann A., Goretti D., Merendi A., Tabacchi G., Vignoli M., Bernetti G., 1998 - *L'Inventario Forestale - Boschi e Macchie di Toscana.* Edizione Regione Toscana.
- IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change), 2000 - *Emissions Scenarios.* A Special Report of the Intergovernmental, Panel on Climate Change.
- IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change), 2007 - *Climate Change 2007. Gli Impatti dei Cambiamenti Climatici, l'Adattamento e la Vulnerabilità.* Quarto Rapporto di Valutazione IPCC, II Gruppo di Lavoro.
- IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change), 2013 - *Climate Change 2013: The Physical Science Basis.* The Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (WG1 AR5).
- Isaac J.L., Williams S.E., 2013 - *Climate Change and Extinctions.* Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition), p. 73-78.
- IUFRO (International Union of Forest Research Organizations), 2009 - *Adaptation Of Forests And People To Climate Change – A Global Assessment Report.* IUFRO World Series, Vol. 22.
- Iverson L.R., Prasad A.M., Matthews S.N., Peters M., 2008. *Estimating potential habitat for 134 eastern US tree species under six climate scenarios.* Forest Ecology and Management, 254: 390-406. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.07.023>
- Jantsch M.C., Fischer H.S., Winter S., Fischer A., 2014 - *How are plant species in central european beech (fagus sylvatica L.) forests affected by temperature changes? - sbift of potential suitable habitats under global warming.* Annali di Botanica (Roma), 4: 97-113.

- Lionello P., 2012 - *The Climate of the Mediterranean Region - From the Past to the Future*. First Edition. Elsevier Oxford, 592 p. ISBN 9780124160422.
- López-Tirado J., Hidalgo P.J., 2014 - *A high resolution predictive model for relict trees in the Mediterranean-mountain forests* (*Pinus sylvestris* L., *P. nigra* Arnold and *Abies pinsapo* Boiss.) *from the south of Spain: A reliable management tool for reforestation*. *Forest Ecology and Management*, 330: 105-114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.009>
- Meier E.S., Lischke H., Schmatz D.R., Zimmermann N.E., 2012 - *Climate, competition and connectivity affect future migration and ranges of European trees*. *Global Ecology and Biogeography*, 21: 164-178. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00669.x>
- Nabel J., Zurbriggen N., Lischke H., 2013 - *Interannual climate variability and population density thresholds can have a substantial impact on simulated tree species' migration*. *Ecological Modelling*, 257: 88-100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.02.015>
- Nicolaci A., Travaglini D., Menguzzato G., Nocentini S., Veltri A., Iovino F., 2014 - *Ecological and anthropogenic drivers of Calabrian pine* (*Pinus nigra* J.F. Arn. ssp. *laricio* (Poiret) Maire) *distribution in the Sila mountain range*. *iForest* 8: 497-508 [online 2014-11-10]
URL: <http://www.sisef.it/iforest/contents/?id=ifor1041-007>. doi: 10.3832/ifor1041-007
- Nocentini S., 1999 - *La gestione dei rimboschimenti tra selvicoltura e arboricoltura da legno*. In: *Nuove frontiere nella gestione forestale* (a cura di: Orazio Ciancio). Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, p. 117-129.
- Nocentini S., 2001 - *La rinaturalizzazione come strumento di recupero dei sistemi forestali semplificati nell'Italia Meridionale*. *L'Italia Forestale e Montana*, 56 (5): 344-351.
- Pausas J.G., Blad´e C., Valdecantos A., Seva J.P., Fuentes D., Alloza J.A., Vilagrosa A., Bautista S., Jordi C., Ramon V., 2004 - *Pines and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes of Spain: New perspectives for an old practice – a review*. *Plant Ecology*, 171: 209-220. <http://dx.doi.org/10.1023/B:VEGE.0000029381.63336.20>
- Phillips S.J., Anderson R.P., Schapire R.E., 2006 - *Maximum entropy modeling of species geographic distributions*. *Ecological Modeling*, 190: 231-259. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Piermattei A., Renzaglia F., Urbinati C., 2012 - *Recent expansion of Pinus nigra Arn. above the timberline in the central Apennines, Italy*. *Annals of Forest Science*, 69: 509-517. <http://dx.doi.org/10.1007/s13595-012-0207-2>
- Piermattei A., Garbarino M., Urbinati C., 2014 - *Structural attributes, tree-ring growth and climate sensitivity of Pinus nigra Arn. at high altitude: common patterns of a possible treeline shift in the central Apennines (Italy)*. *Dendrochronologia*, 32: 210-219. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2014.05.002>
- Pignatti G., 2011 - *La vegetazione forestale di fronte ad alcuni scenari di cambiamento climatico in Italia*. *Forest@*, 8: 1-12.
- R Development Core Team, 2009 - *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ruiz-Labourdette D., Nogues-bravo D., Sainz Ollero H., Schmitz M.F., Pineda F.D., 2012 - *Forest composition in Mediterranean mountains is projected to shift along the entire elevational gradient under climate change*. *Journal of biogeography*, 39: 162-176. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02592.x>
- Ruiz-Labourdette D., Schmitz M.F., Pineda F.D., 2013 - *Changes in tree species composition in Mediterranean mountains under climate change: Indicators for conservation planning*. *Ecological Indicators*, 24: 310-323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.06.021>
- Sánchez-Salguero R., Navarro-Cerrillo R.M., Swetnam T.W., Zavala M.A., 2012 - *Is drought the main decline factor at the rear edge of Europe? The case of southern Iberian pine plantations*. *Forest Ecology and Management*, 271: 158-169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.040>
- Scheller R.M., Mladenoff D.J., 2008 - *Simulated effects of climate change, fragmentation, and inter-specific competition on tree species migration in northern Wisconsin, USA*. *Climate Research*, 36: 191-202. <http://dx.doi.org/10.3354/cr00745>
- Sing T., Sander O., Beerenwinkel N., Lengauer T., 2005 - *ROCR: visualizing classifier performance in R*. *Bioinformatics Applications Note*, 21: 3940-3941.

- Sing T., Sander O., Beerenwinkel N., Lengauer T., 2013 - *Visualizing the performance of scoring classifiers*. Package 'ROCR'2013.
- Swets J.A., 1988 - *Measuring the accuracy of diagnostic systems*. *Science*, 240: 1285-1293. <http://dx.doi.org/10.1126/science.3287615>
- Tanaka N., Nakao K., Tsuyama I., Higa M., Nakazono E., Matsui T., 2012 - *Predicting the impact of climate change on potential habitats of fir (Abies) species in Japan and on the East Asia in continent*. *Procedia Environmental Sciences*, 13: 455-466. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.039>
- Thuiller W., Brotons L., Arafijo M.B., Lavorel S., 2004 - *Effects of restricting environmental range of data to project current and future species distributions*. *Ecography*, 27: 165-172. <http://dx.doi.org/10.1111/j.0906-7590.2004.03673.x>
- Travaglini D., 2004 - *Trasformazioni tra sistemi di coordinate: software disponibili, limiti e potenzialità*. *Forest@1* (2): 128-134. [online] URL: <http://www.sisef.it/>
- White Paper, 2009 - *Adapting to climate change: Towards a European framework for action*. Brussels, 1.4.2009 COM(2009) 147 final.
- Wiley E.O., McNyset K.M., Peterson A.T., Robins C.R., Stewart A.M., 2003 - *Niche modeling and geographic range predictions in the marine environment using a machine-learning algorithm*. *Oceanography*, 16: 120-127. <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2003.42>
- Woodall C.W., Oswalt C.M., Westfall J.A., Perry C.H., Nelson M.D., Finley A.O., 2010 - *Selecting tree species for testing climate change migration hypotheses using forest inventory data*. *Forest Ecology and Management*, 259: 778-785. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.022>
- Zadeh L.A., 1965 - *Fuzzy sets*. *Information and Control*, 8: 338-353. [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zweig M.H., Campbell G., 1993 - *Receiver-operation characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine*. *Clinical Chemistry*, 39: 561-77.