

Inquadramento climatico stazionario mediante modelli regressivi di temperatura e precipitazioni e relative elaborazioni in ambiente GIS

Enrico GREGORI (*), Maria Costanza ANDRENELLI (*), Pier Lorenzo MARASCO (**),
Giovanni ZORN (*)

(*) C.R.A. Istituto Studio e Difesa del Suolo, piazza D'Azeglio 30, Firenze; tel 055 2491242, gregori@issds.it
(**) Collaboratore esterno

Riassunto

Viene proposto un approccio per la spazializzazione dei dati climatici su scala regionale basato su equazioni di regressione dei valori mensili di temperatura media e precipitazione su un insieme di variabili topografiche. Applicando queste relazioni in ambiente GIS ad un'area delle Marche (Acqualagna - PU) con vocazione tartuficola, è stato possibile inquadrare l'intero territorio sotto il profilo mesoclimatico ricorrendo a classificazioni ed indici di uso comune. A partire da tali dati è stata inoltre implementata una procedura per la stima del bilancio idrico del suolo secondo Thornthwaite, modificato per tener conto del ruolo della neve nella dinamica afflusso-deflusso.

Le regressioni delle temperature sono risultate molto accurate ($r^2 > 0.92$; $P < 0.001$), mentre i migliori stimatori delle precipitazioni hanno dimostrato una capacità predittiva leggermente inferiore, con errore standard delle stime mediamente inferiore a 6 mm.

Le classificazioni adottate hanno fornito informazioni sostanzialmente concordi ai fini della caratterizzazione climatica, individuando in maniera conforme le zone meno adatte alla produzione di carpori per presenza di siccità estiva più o meno accentuata.

Abstract

(Assessment of site climatic features within a GIS environment by means of temperature and rainfall regression models)

An approach for spatially extending climate data over regional scale is proposed; the method is based on regression equations of monthly values of mean temperature and total rainfall over a set of topographic variables. These equations have been applied to an area of the Marche region (Acqualagna) with special suitability for truffles production; a mesoclimatic characterization by means of several commonly adopted classifications and indexes has been performed. These data entered a procedure for the assessment of Thornthwaite's soil water balance, adjusted for considering the effects of snowfall on runoff formation.

Equations for monthly temperature performed very well ($r^2 > 0.92$; $P < 0.001$), while the best rainfall estimators provided somewhat lower accuracy, but with standard error of estimates lower than 6 mm on average.

Substantially uniform climate features have been attained through different classification frameworks; the various approaches agreed well in identifying areas with more or less pronounced water deficit in summer, thus recognizing the sites with scarce suitability for truffles production.

Introduzione

L'applicazione a scala territoriale di indici e modelli previsionali presuppone di conoscere la distribuzione spaziale di una o più variabili in ingresso. Questa informazione è spesso implicita nella variabile stessa (caso dell'uso del suolo o dei tipi vegetali) o viene acquisita mediante elaborazione matematica di osservazioni disposte secondo una griglia regolare, come nel caso

dell'informazione derivata dai modelli digitali del terreno o DTM (Wilson e Gallant, 2000). Altre volte è necessario invece estendere nello spazio dati rilevati puntualmente secondo approcci che dipendono dai criteri seguiti per localizzare il punto di misura, dalla variabilità della grandezza esaminata, dalla densità di campionamento, dalla possibilità di stabilire relazioni con altre variabili. È il caso della spazializzazione di variabili meteorologiche, specialmente in presenza di contesti morfologicamente articolati, in relazione all'analisi di serie climatiche di lungo periodo o all'indagine di tipo probabilistico di eventi eccezionali.

I metodi disponibili per la regionalizzazione di dati puntuali, con particolare riferimento alle misure di precipitazione, sono riassunti in Dingman (1994). Gli approcci più semplici consistono nel tracciare visivamente isolinee sulla base di dati puntuali e dell'esperienza dell'operatore o nel calcolare valori medi tra diversi punti, come nel classico metodo dei poligoni di Thiessen. La capacità di calcolo dei computer ha tuttavia aperto la strada a tecniche più sofisticate e/o accurate, ottenendo in vari modi (minimi quadrati, spline, inverso della distanza, triangolazione, kriging, etc.) una superficie che interpola adeguatamente le osservazioni. Queste tecniche hanno trovato un forte sviluppo con l'avvento dei GIS, in relazione alla costruzione di DTM, che a loro volta hanno dato origine a nuove possibilità esplorative ed operative (Albani e Klinkenberg, 2003).

Le grandezze meteorologiche presentano di norma relazioni piuttosto vincolanti con variabili astronomiche e topografiche: le temperature, per esempio, sono tipicamente legate a latitudine, altitudine e distanza da corpi idrici, mentre le precipitazioni dipendono da altitudine e posizione rispetto alla circolazione delle masse d'aria. Su scala regionale è allora possibile calcolare equazioni di regressione di queste grandezze rispetto ad altre di cui si conosce la distribuzione spaziale: esempi di questo approccio sono le relazioni fra temperature ed altitudine e morfologia trovate da Gentili (1959) e da Paiero (1967), rispettivamente per Toscana e Friuli.

La caratterizzazione di una stazione sotto il profilo climatico assume particolare rilevanza in molti settori, contribuendo alla definizione di aspetti gestionali, ma anche di opzioni pianificatorie consapevoli. La conoscenza della distribuzione spaziale degli afflussi meteorici è essenziale per valutare la probabilità che si verifichino dissesti idrogeologici, per individuare le realtà più esposte e per prevedere la risposta del sistema suolo-substrato. Allo scopo sono comunemente utilizzati i dati di pioggia e temperatura rilevati dai vari servizi meteorologici, la cui estendibilità, soprattutto in zone montane, è spesso condizionata dalla scarsa densità e dalla localizzazione delle stazioni.

Questo studio propone un approccio per spazializzare dati termo-pluviometrici a contesti territoriali relativamente omogenei basandosi sull'analisi di regressione con variabili topografiche diverse. Le equazioni applicate in ambiente GIS hanno fornito i dati mensili per la stima del bilancio idrico secondo Thornthwaite. Ciò ha consentito di ottenere la caratterizzazione climatica di un'area delle Marche a forte vocazione tartuficola (Acqualagna), con l'obiettivo di individuare condizioni di stress idrico non idonee alla fruttificazione dei funghi del genere *Tuber* (Gregori et al., 2004a).

Materiali e metodi

L'ambiente dell'area di Acqualagna (PU) è quello tipico della serie geologica Umbro-Marchigiana, dove i fondivalle e le colline marnose hanno destinazioni agricole (cerealicoltura avvicendata), mentre i rilievi calcarei ospitano un paesaggio prevalentemente forestale (querceti decidui, ostryeti). L'area compresa nel GIS si estende su più di 8000 ha a monte della confluenza fra il Metauro ed il Candigliano; il DTM è stato costruito con maglia di 10 m ricorrendo alla funzione Topogrid di ArcInfo® a partire dalle isoipse a 10 m digitalizzate dalla cartografia tecnica regionale in scala 1:10000 e dai punti quotati disponibili.

Per la stima del mesoclima sono stati utilizzati i dati mensili medi di almeno 25 anni di un set di 21 stazioni pluviometriche (di cui 9 con temperature) descritte in Gregori et al. (2004b). L'analisi di regressione multipla con procedura stepwise in avanti ha permesso di calcolare le migliori equazioni di stima: il modello esponenziale applicato alle variabili altitudine (m s.l.m.), latitudine (°dec) e distanza dal mare (km) si è dimostrato adatto per le precipitazioni (mm), mentre il modello bilogarithmico è risultato il migliore stimatore della temperatura media (°C) a partire da altitudine,

distanza dal mare e indice topografico di Gentili (1959). Questo indice tiene conto del fenomeno dell'inversione termica, variando da 5 per le posizioni di vetta a -5 al fondo delle forme concave, ed è stato ottenuto combinando opportunamente le curvature planimetrica e verticale derivate dal DTM. I modelli regressivi adottati si basano su tutte le variabili stazionali citate, anche se in taluni mesi il contributo di qualcuna di esse nell'interpretazione della devianza osservata non è risultato significativo.

Dopo aver costruito i grid relativi alle variabili indipendenti, le equazioni sono state applicate mediante Spatial Analyst, ottenendo per ciascun pixel i valori mensili di temperatura e precipitazione dell'annata media. Mediante Model Builder di ArcGis 9® è stata quindi definita una procedura di calcolo del bilancio idrico secondo Thornthwaite (Pinna, 1977) per un suolo con 100 mm di acqua utile per le piante. Nel tentativo di tener conto dell'effetto della eventuale presenza di copertura nevosa, sono state adottate alcune modificazioni rispetto all'impostazione originaria del modello: sono stati infatti introdotti un coefficiente nivometrico, che stima l'aliquota di precipitazioni nevose dalla temperatura del mese, ed un coefficiente di fusione, per valutare la persistenza del manto nevoso ed il contributo della sua fusione alla fase liquida circolante.

Sono stati inoltre applicati l'inquadramento climatico di Köppen e di Thornthwaite (Pinna, 1977), quello fitoclimatico di Pavari (Marchetti et al., 1987) ed alcuni descrittori, quali il pluviofattore di Lang e di De Martonne e l'indice di continentalità di Gams. Per evidenziare condizioni di aridità si è ricorso all'indice mensile di stress idrico (*Monthly Drought Stress*, MDS) di Mitrakos (1982), al rapporto fra precipitazione media annua (P) ed evapotraspirazione potenziale (ETP), ed al rapporto fra totali annui di deficit idrico e di ETP, pari all'indice di aridità nel sistema di Thornthwaite.

Risultati e discussione

La Tabella 1 riassume i parametri e l'accuratezza delle regressioni bilogaritmiche delle temperature mensili sulle variabili in ingresso; la buona capacità predittiva dei modelli è evidenziata dal valore minimo pari a 0.92 del coefficiente di determinazione di dicembre e da un errore medio standard delle stime (ESS) inferiore al 3% della media termica dei vari mesi e che non supera mai 0.4 °C.

Tabella 1 - Coefficienti delle regressioni multiple bilogaritmiche delle temperature medie mensili e relativi indici di accuratezza.

Mese	Variabili in ingresso			Termine noto	r^2	Errore standard delle stime	
	Indice topografico	Distanza dal mare	Altitudine			°C	% su media
gen	-0.0981	-0.5106	0.0414	3.1342	0.939	0.24	5.5%
feb	-0.0340	-0.3428	-0.1711	3.8586	0.952	0.32	6.4%
mar	-0.0006	-0.2338	-0.1721	3.8431	0.950	0.37	5.0%
apr	0.0324	-0.1297	-0.1674	3.7916	0.977	0.26	2.3%
mag	0.0444	-0.0956	-0.1334	3.7865	0.992	0.14	0.9%
giu	0.0486	-0.0792	-0.1273	3.8957	0.993	0.14	0.7%
lug	0.0546	-0.0871	-0.1055	3.9398	0.987	0.19	0.9%
ago	0.0531	-0.0789	-0.1038	3.8889	0.985	0.20	0.9%
set	0.0469	-0.1022	-0.1106	3.8587	0.991	0.15	0.8%
ott	0.0410	-0.1572	-0.1119	3.7715	0.982	0.21	1.6%
nov	0.0088	-0.2661	-0.0718	3.5010	0.928	0.35	4.0%
dic	-0.0185	-0.3893	-0.0345	3.2964	0.923	0.28	5.1%
anno	0.0343	-0.1462	-0.1143	3.6756	0.988	0.16	1.3%

I modelli di stima delle piogge si sono dimostrati un po' meno accurati rispetto a quelli delle temperature, arrivando a spiegare meno dell'80% della variabilità osservata nelle precipitazioni dei mesi estivi (tabella 2). A fronte di questa carenza interpretativa, l'accuratezza dei valori stimati

rimane tuttavia più che soddisfacente, con un ESS mediamente inferiore a 6 mm e compreso tra il 4.8% della media di settembre ed il 9.1% di quella di febbraio.

Tabella 2 - Coefficienti delle regressioni multiple esponenziali delle precipitazioni medie mensili.

Mese	Variabili in ingresso			Termine noto	r^2	Errore standard delle stime	
	Latitudine	Distanza dal mare	Altitudine			mm	% su media
gen	0.109	0.0136	0.00044	-1.161	0.913	5.8	7.8%
feb	-0.625	0.0101	0.00027	31.261	0.847	7.8	9.1%
mar	-0.321	0.0100	0.00025	18.095	0.889	6.3	6.7%
apr	-0.543	0.0066	0.00035	27.783	0.845	6.6	7.5%
mag	-0.693	0.0067	0.00026	34.265	0.905	4.8	5.9%
giu	-0.867	-0.0015	0.00027	42.077	0.775	3.7	5.0%
lug	-0.319	-0.0005	0.00010	17.878	0.164	4.2	7.7%
ago	-0.968	-0.0081	0.00019	46.876	0.579	4.8	5.9%
set	0.297	0.0068	0.00015	-8.775	0.824	4.3	4.8%
ott	-0.240	0.0072	0.00020	14.504	0.819	5.3	6.6%
nov	-0.077	0.0134	0.00019	7.612	0.952	6.3	5.0%
dic	-0.168	0.0133	0.00030	11.324	0.916	7.3	7.2%
anno	-0.370	0.0070	0.00025	22.706	0.913	48.9	4.7%

I dati dell'annata media inseriscono il clima generale dell'area nei tipi temperati senza stagione secca del sistema di classificazione di Köppen; la variante più rappresentata, che interessa poco più di $\frac{3}{4}$ dei pixel, ha temperatura media del mese più caldo $> 22^{\circ}\text{C}$ ($C_f a$), mentre quella con almeno 4 mesi con temperatura media $> 10^{\circ}\text{C}$ ($C_f b$) si estende sulla parte rimanente dell'area.

La classificazione di Thornthwaite evidenzia una netta prevalenza dei tipi umidi B_1 , B_2 e molto limitatamente B_3 ; la versione con deficit idrico estivo assente o trascurabile è esclusiva per il B_2 delle zone a maggiore altimetria e dominante per il B_1 (B_{1r}) dell'ambiente collinare, interessando il 55% di tutta l'area. Il tipo subumido C_2 , specialmente con modesta siccità estiva (C_{2s}), è limitato al settore nord-orientale dell'area, in corrispondenza del fondovalle del Metauro (figura 1a).

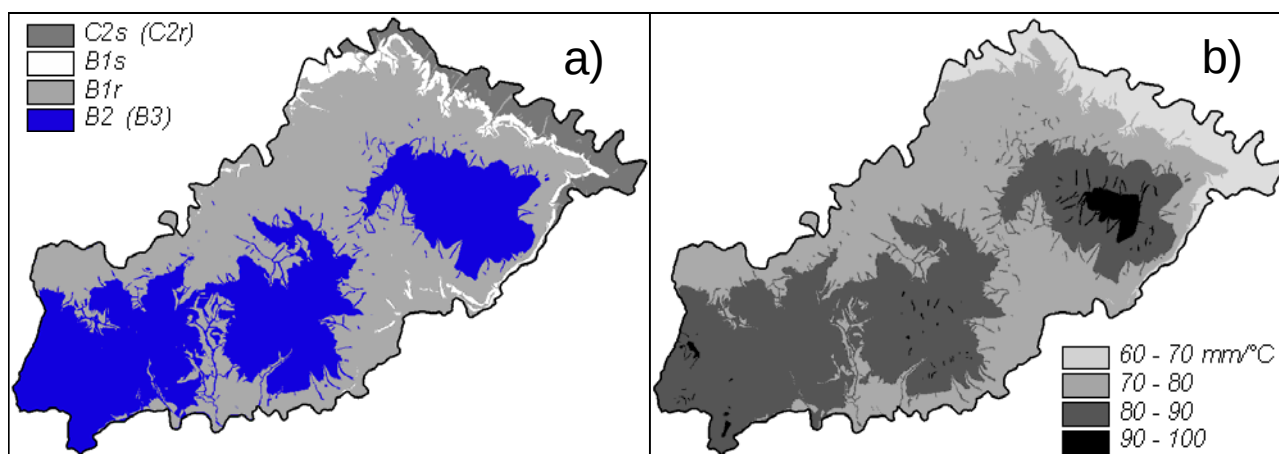


Figura 1 – Classificazione climatica dell'area secondo le tipologie di Thornthwaite a) ed il pluviofattore di Lang b).

La classificazione fitoclimatica di Pavari per l'annata media individua solamente la fascia del Castanetum, con netta dominanza del tipo caldo-secco (97% dell'area) su quello freddo senza siccità estiva, limitato alla parte sommitale del monte Pietralata (m 890 s.l.m.).

Il pluviofattore di Lang ($P/\text{temperatura media annua}$) è risultato compreso fra 60 e 100, individuando condizioni climatiche abbastanza piovose e non eccessivamente calde; questi valori

rientrano nell'intervallo riportato da diversi Autori per siti tartufigeni di *T. magnatum* nell'Italia Centrale (ARSIA, 1995; Tocci, 1985; Tocci et al., 1995). Questo indice produce una zonazione abbastanza articolata (figura 1b), con la fascia dei valori compresi fra 60 e 70 praticamente coincidente con i tipi di Thornthwaite caratterizzati da deficit idrico estivo (C_2s e B_1s di figura 1a). Risultati del tutto analoghi fornisce l'indice di De Martonne ($P/\text{temperatura media annua}+10^\circ\text{C}$). L'indice di continentalità di Gams (cotangente del rapporto $P/\text{altitudine}$) risulta compreso fra 7 e 50, identificando quindi un clima di tipo prevalentemente sub-continentale. Solo l'8% dei pixel presenta caratteristiche pluviometriche di tipo appenninico (indice >30), mentre per la parte rimanente valgono condizioni di ambiente collinare (indice $5\div30$), con spiccato accento di continentalità. Anche in questo caso gli indici sono allineati con i valori riferiti (o ricalcolati) dagli studi sul tartufo bianco pregiato per l'Italia Centrale (ARSIA, 1995; Tocci, 1985); valori più elevati sono invece riportati da Tocci et al. (1995) per stazioni montane del Molise. Dal momento che nelle zone montuose la temperatura è molto legata alla quota, questo indice risulta abbastanza simile a quello di Lang, ma comporta una eccessiva regolarità delle zonazioni; alla luce dei risultati dell'analisi della regressione (tabella 1), gli effetti della quota sulla temperatura vanno d'altronde a sommarsi con quelli di altre variabili, rendendo meno accentuata tale dipendenza. Il rapporto P/ETP che indicizza condizioni di aridità, risulta sempre superiore all'unità. Con riferimento alle soglie per la fruttificazione di *T. magnatum* proposte da Gregori et al. (2004a), solo il 6% dell'area presenta inoltre valori di P/ETP inferiori a 1.2 (coincidenti con il tipo C_2 di Thornthwaite), che indicano condizioni scarsamente adatte alla produzione di questo pregiato carpoforo; anche l'indice di aridità di Thornthwaite risulta sempre inferiore alla soglia di 25 suggerita dagli stessi Autori. Di fatto, solo il 10% dell'area di indagine presenta condizioni di modesto deficit idrico estivo (tipologie C_2s e B_1s di figura 1a), mentre l'indice MDS non evidenzia, per l'annata media, condizioni di aridità nei mesi estivi. Le simulazioni effettuate mediante il bilancio idrico indicano come perfino nelle zone più fredde le precipitazioni solide non superino il 3 % del totale annuo; di fatto nemmeno l'1% dell'area presenta almeno 1/10 delle precipitazioni invernali sotto forma di neve, come nell'esempio di figura 2.

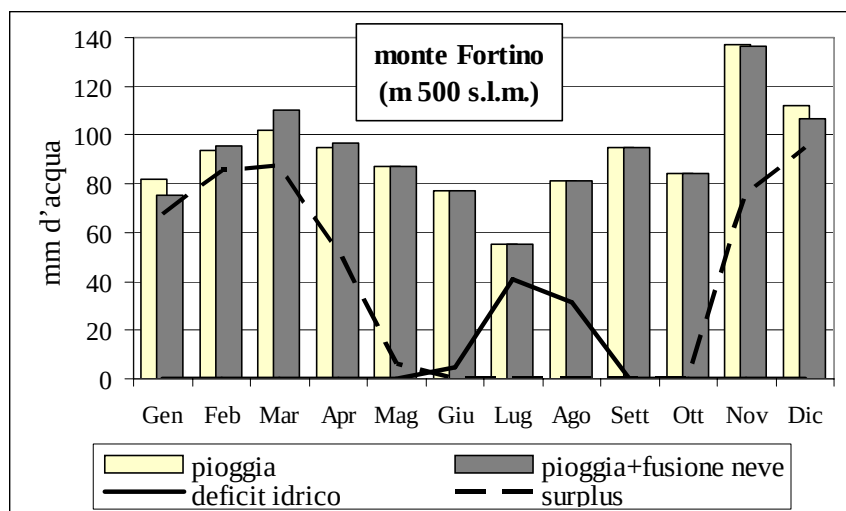


Figura 2 – Esempio di bilancio idrico di Thornthwaite modificato per una delle località più fredde.

Nei mesi di luglio e agosto si riscontra mediamente un deficit idrico di 87 mm ($35 \div 145$ mm), superiore al 75% del totale annuo; condizioni più aride in termini di deficit idrico e della sua durata si localizzano nelle zone di fondovalle, dove tuttavia il maggiore spessore edafico e quindi una capacità idrica di ritenuta superiore a 100 mm dovrebbero essere in grado di attenuarne gli effetti. Riguardo al surplus idrico, è stato rilevato che da novembre ad aprile sarebbero mediamente disponibili 370 mm di acqua per la formazione di deflusso, con estremi compresi fra 250 mm del

fondovalle del Metauro e 470 mm del monte Fortino come da figura 2. Nella stessa si può infine notare come la neve determini una lieve riduzione degli afflussi nel bimestre dicembre-gennaio ed un successivo aumento primaverile della disponibilità idrica per fusione del manto nevoso.

Conclusioni

L'applicazione dei modelli regressivi all'area di Acqualagna ha consentito di verificare la diversa capacità delle classificazioni climatiche di identificare le zone adatte alle varie specie di tartufo (Gregori et al., 2004b). Le tipologie di Köppen risultano infatti troppo generali, limitandosi a riconoscere l'assenza di una stagione secca e separando due sottotipi in base alle temperature estive; la zonazione fitoclimatica di Pavari, applicata all'annata media, risulta ancor più semplificativa, riconoscendo praticamente una sola fascia (Castanetum caldo-arido).

Gli altri approcci forniscono una valutazione coerente e più dettagliata rispetto all'ecologia dei tartufi. Anche se un indice molto sintetico, come il pluviofattore di Lang, appare già in grado di discriminare adeguatamente le varie condizioni stazionali, un quadro sinottico più articolato si ottiene con il sistema di Thornthwaite applicato a suoli con 100 mm di acqua utile, i cui indici di aridità e di umidità dovrebbero tuttavia essere calcolati sulla base dell'effettiva capacità idrica edafica. Le zonazioni ottenute in questo modo consentono tra l'altro di definire la corretta modalità di conduzione delle tartufaie esistenti (programmazione irrigua) e di scegliere le aree più adatte alle nuove piantagioni.

Data la scarsa importanza delle precipitazioni nevose in questa area, il modello elaborato a partire dal bilancio idrico del suolo non ha trovato un'adeguata occasione di verifica; in attesa di validazione in uno scenario più opportuno, è in fase di sviluppo un nuovo modello basato sulla programmazione ad oggetti in ambiente Visual Basic.

Bibliografia

- Albani M., Klinkenberg B. (2003), "A spatial filter for the removal of striping artifacts in digital elevation models", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69 (7): 755-765.
- ARSIA (1995), *Ecologia delle tartufaie di tartufo bianco in Toscana*, Regione Toscana, Arsia.
- Dingman S.L. (1994), *Physical Hydrology*, Macmillan Publishing Company, New York.
- Gentili J. (1959), "Le temperature montane in Toscana", *Rivista Geografica Italiana*, LXVI (4): 309-321.
- Gregori E., Sani L., Finoia M., Meli C., Zorn G. (2004a), "Impiego di indici di stress climatico per la caratterizzazione delle condizioni adatte alla fruttificazione dei tartufi. Un esempio per l'area di Acqualagna (PU)", *Linea Ecologica*, 26, 3: 12-21.
- Gregori E., Sani L., Finoia M., Meli C. (2004b), "Caratterizzazione mesoclimatica di un'area a vocazione tartuficola nelle Marche", *Linea Ecologica*, 26, 4: 35-44.
- Marchetti M., Remoti D., Finizio C. (1987), "Fasce fitoclimatiche: modello matematico a cartografia automatica", *Monti e Boschi*, 3: 11-16.
- Mitrakos K. (1982), "Winter low temperatures in mediterranean-type ecosystems", *Ecologia Mediterranea*, VIII (1-2): 95-102.
- Paiero P. (1967), "Correlazione fra temperature ed altitudine in Friuli", *L'Italia Forestale e Montana*, XXII: 67-76.
- Pinna M. (1977), *Climatologia*, UTET, Torino.
- Tocci A. (1985), "Ecologia di *T. magnatum* nell'Italia Centrale", *Annali Istituto Sperimentale Selvicoltura*; Arezzo; XVI: 423-542.
- Tocci A., Veracini A., Zazzi A. (1995), "Indagini preliminari sulla ecologia del tartufo bianco (*Tuber magnatum*) in Molise", *Micologia Italiana*, XXIV (2): 64-79.
- Wilson J.P., Gallant J.C. (2000), *Digital terrain analysis*, in: "Terrain analysis: Principles and applications", ed.: Wilson e Gallant, John Wiley and Sons: 1-27.