



**Citation:** Fabio Gaetano Santeramo, Irene Maccarone (2022) Analisi storica delle rese agricole e la variabilità del clima: analisi dei dati italiani sui cereali. *Italian Review of Agricultural Economics* 77(2): 77-91. DOI: 10.36253/rea-13596

**Received:** April 19, 2022

**Revised:** July 26, 2022

**Accepted:** August 2, 2022

**Copyright:** ©2022 Fabio Gaetano Santeramo, Irene Maccarone. This is an open access, peer-reviewed article published by Firenze University Press (<http://www.fupress.com/rea>) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Data Availability Statement:** All relevant data are within the paper and its Supporting Information files.

**Competing Interests:** The Author(s) declare(s) no conflict of interest.

Research article

## Analisi storica delle rese agricole e la variabilità del clima: analisi dei dati italiani sui cereali

### Historical crop yields and climate variability: analysis of Italian cereal data

FABIO GAETANO SANTERAMO\*, IRENE MACCARONE

*University of Foggia, Italy*

\*Corresponding author E-mail: [fabioaetano.santeramo@gmail.com](mailto:fabioaetano.santeramo@gmail.com)

**Abstract.** Climate change is impacting on the agricultural sector in several ways, and the effects on yields are generally among the most observable ones. Open fields crops, such as cereals, are very vulnerable to climate change. We study the historical data on yields of main cereals, namely barley, maize, oats, rice, rye, wheat, to conclude on the long run impacts of temperature and precipitation, over the period 1920-2015. Yields are found to be inversely correlated with temperatures and positively with precipitation, in both cases the relationships are non-linear, as expected.

**Keywords:** climate change, cereals, detrendisation.

**JEL Codes:** Q11, Q18, Q54.

#### HIGHLIGHTS:

- Climate change is challenging the Italian cereal sector.
- We quantify the impacts of climate change on yields levels and variability.
- Increased temperatures and reduced rainfall are detrimental for cereals yields.
- Risk management strategies are more and more relevant.

#### INTRODUZIONE

I cambiamenti climatici hanno notevoli impatti non ancora del tutto evidenziati, sebbene la loro rilevanza sia sempre più un argomento approfondito. Gli effetti di questo fenomeno sono evidenti sulle rese agricole, oggetto del presente studio. L'attenzione crescente posta all'aleatorietà del settore agricolo a causa del decorso meteorologico è dimostrata dalla notevole presenza di studi ed elaborati (Schlenker, Roberts, 2006; Finger, 2010; Kim, Moschini, 2018), che perseguono un obiettivo comune: comprendere come il clima influenzi il comparto agricolo.

L'agricoltura risulta gravemente compromessa da tale tematica ed è identificata come il settore più sensibile e vulnerabile al cambiamento del clima

(Rowhani *et al.*, 2011; Trnka *et al.*, 2016; Avanzini *et al.*, 2014; Agnolucci, De Lipsis, 2019). Alcune conseguenze negative già osservate (e.g. variazione quantitativa delle rese, riduzione della biodiversità, alterazione dei cicli produttivi), probabilmente si intensificheranno in futuro, così da compromettere la produzione agricola in molti Paesi (Peltonen-Sainio *et al.*, 2010; Sarker *et al.*, 2012; Challinor *et al.*, 2014). Per queste motivazioni occorre approfondire tali dinamiche con ulteriori studi per anticipare sfide future come l'adattamento ai cambiamenti climatici (modificazioni dei sistemi colturali per fronteggiare l'acuirsi degli impatti del clima) e interpretare le trasformazioni strutturali del settore primario (Cabas *et al.*, 2010; Ray *et al.*, 2015; Kim, Moschini, 2018).

La maggioranza degli studi individuati in letteratura ha analizzato gli effetti del clima sulle rese agricole a livello mondiale (Furuya, Koyama, 2005; Ray *et al.*, 2015) o in alcune Nazioni (e.g. Africa, India, America, Australia) (Thornton *et al.*, 2009; Barnwal, Kotani, 2013; Gaudin *et al.*, 2015; Fletcher *et al.*, 2020), rivelando che gli impatti del decorso meteorologico sono probabilmente simili nei diversi territori esaminati.

L'obiettivo dell'articolo è fornire un contributo per caratterizzare le rese delle principali coltivazioni dell'Italia. I cereali rivestono un ruolo centrale nell'agricoltura italiana, sia in termini di consumo annuo, sia per quanto riguarda la domanda delle industrie agro-alimentari.

I principali cereali coltivati in Italia sono il frumento (nella varietà durum e in quella aestivum), il mais, l'orzo, il riso, l'avena, il sorgo e la segale. Il frumento duro riveste un primario interesse nel nostro Paese, grazie alla diffusa presenza di industrie molitorie. La sua coltivazione è localizzata in particolare nell'Italia meridionale (soprattutto in aree caratterizzate da carenza idrica, nelle quali non vi sono alternative colturali). Secondo l'ultimo report dell'Istat (2021) sul settore agricolo, nel confronto tra il 2010 e il 2020, il peso dei cereali sui seminativi (in termini di superficie agricola utilizzata) passa dal 51,9% al 45,9%. Il frumento duro aumenta la sua incidenza sul complesso delle superfici cerealicole, passando dal 36,9% al 40,3%. Un discreto incremento caratterizza anche il frumento tenero (dal 15,8% del 2010 al 16,7% del 2020), l'orzo (dal 7,8% all'8,8%) e il riso (dal 7,1% al 7,6%). La coltivazione del mais, al contrario, incide sempre meno sul totale dei cereali: dal 26,7% al 20,1%. Fra i cereali minori l'avena (dal 3,7% al 3,4%) e la segale (rimasta sostanzialmente invariata) rivestono importanza per la cerealicoltura italiana.

Dando un'occhiata alle annate precedenti, risulta che queste siano caratterizzate da continue flessioni (di intensità variabile) dovute soprattutto alle condizioni climatiche avverse, alle basse quotazioni e alle conseguenti

riduzioni dei margini di profitto sui costi fissi delle coltivazioni. Da un report dell'Istat (2019) si evince che i cambiamenti climatici dell'ultimo decennio hanno condizionato la redditività del settore agricolo. Le perdite di raccolta dovute a calamità naturali hanno assunto, negli ultimi anni, un carattere ricorrente. Varie produzioni sono state interessate, ad esempio il mais nel 2015 (-22,2%) e nel 2012 (-19,4%), il frumento duro nel 2017 (-16,4%) e nel 2009 (-29,4%).

Per le ragioni esposte, i cambiamenti climatici stanno influenzando, seppur lentamente, gli imprenditori agricoli ad aumentare il ricorso agli schemi assicurativi. Tra gli strumenti di gestione del rischio, un'opportunità strategica è rappresentata dal Fondo di mutualità nazionale sulle avversità catastrofali (Fondo MeteoCAT), previsto nella Pac 2023-27. In questo modo viene fornita alle aziende agricole una copertura dai danni alle produzioni causati da gelo e brina, siccità ed alluvioni.

Una valida alternativa sono le assicurazioni indicizzate, le quali permettono un'adeguata gestione contro le diminuzioni delle rese agricole derivanti da variabili, quali le precipitazioni e le temperature. A tal proposito sono essenziali sia i dati meteorologici storici (per una valutazione dei rischi associati agli accadimenti passati), sia i dati meteorologici previsionali (così da poter prevedere eventuali avversità climatiche). In una visione di lungo periodo, in considerazione dell'acuirsi del cambiamento del clima, il monitoraggio dei dati meteo-climatici potrà permettere una gestione efficiente dei rischi del comparto agricolo.

In questo articolo viene presentata un'analisi del comparto cerealicolo nazionale. Il contributo del lavoro è quello di evidenziare come le dinamiche meteo-climatiche di lungo periodo abbiano influenzato i cambiamenti di lungo corso delle rese agricole nel comparto cerealicolo. Nello specifico sono stati esaminati gli andamenti di temperature, precipitazioni e rese nel settore cerealicolo italiano (avena, frumento, mais, orzo, riso, segale) per il periodo 1920-2015. Nella prima sezione dell'elaborato è riportata una rassegna scientifica di alcuni lavori pubblicati, riguardanti l'argomento in esame. Nel secondo paragrafo sono descritte le variabili considerate, il modus operandi selezionato per l'analisi e i modelli econometrici utilizzati; nel terzo ci si concentra sulla presentazione e sul commento dei risultati ottenuti e infine nell'ultimo sono indicate delle considerazioni critiche sul fenomeno in questione con indicazioni di policy.

## 1. EXCURSUS SULLA LETTERATURA RESE-CLIMA

Ker and Goodwin (2000) e Hennessy (2009) hanno evidenziato le caratteristiche principali delle rese agrico-

le. Gli studi indicano due proprietà fondamentali: *negatively skewed distribution* e *long left tail*. Una distribuzione con asimmetria negativa (*negatively skewed distribution*) presenta la media aritmetica inferiore della mediana, a sua volta minore della moda ( $\mu > \mu_e > \mu$ ); questo genera una coda alla sinistra della media (*long left tail*), che si estende verso i valori più negativi. Sia a livello concettuale che pratico, tale condizione proviene dall'eterogeneità delle condizioni di coltivazione; gli appezzamenti (di conseguenza anche le rese che ne derivano) differiscono nello spazio per molteplici cause (e.g. vincoli biologici, variazioni del clima e del suolo, utilizzo di tecnologie diverse).

Mentre i sopraccitati autori hanno delineato la forma delle distribuzioni, Finger (2010) ha posto l'attenzione sull'identificazione e l'eliminazione delle tendenze nelle serie temporali dei dati sulle rese, step essenziale per molte applicazioni in economia agraria. Non tenere adeguatamente conto della tendenza può indurre un errore di tipo I<sup>1</sup> o II negli studi che esaminano la normalità delle rese agricole. Ker and Goodwin (2000), indicano l'utilizzo del metodo di stima non parametrica del kernel per ottenere le densità di resa delle colture. Lo studio degli impatti del clima sulle rese agricole è svolto da almeno mezzo secolo (Black, Thompson, 1978; Furuya, Koyama, 2005; Finger, 2010), analizzando gli effetti delle temperature e delle precipitazioni in diversi contesti (Thornton *et al.*, 2009; Rowhani *et al.*, 2011; Gaudin *et al.*, 2015; Agnolucci, De Lipsis, 2019).

Gli aspetti maggiormente trattati riguardano gli effetti delle temperature e delle precipitazioni sul livello e sulla variabilità delle rese agricole. La letteratura indica che l'incremento delle temperature e il decremento delle precipitazioni siano potenziali cause della riduzione del livello delle rese (Schlenker, Roberts, 2006; Cabas *et al.*, 2010; Kim, Moschini, 2018; Lamonaca *et al.*, 2021), la cui variabilità (Briche *et al.*, 2014; Challinor *et al.*, 2014; Ray *et al.*, 2015) è ascrivibile all'aumento delle temperature e alla diminuzione delle precipitazioni (questi risultati sono riassunti nella Fig. 1).

Nella rassegna della letteratura, riportata in Tabella 1, non sono presenti contraddizioni nei risultati raggiunti dai vari studi, sebbene riguardanti sia colture cerealicole (nella maggior parte dei casi), che colture arboree, leguminose e ortive, nonché territori con notevoli differenze di sviluppo (e.g. Africa, America, Australia, Europa, India), a riprova della generalità dei risultati.

### 1.1 Caso studio: l'Italia

L'analisi degli impatti climatici sul comparto agroalimentare italiano è stata svolta, nella maggior parte dei casi, a livello regionale o per aree geografiche ancor più circoscritte (Ferrara *et al.*, 2010; Campiglia *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2016; Mereu, *et al.*, 2021). Molti dei contributi scientifici reperibili a riguardo, si focalizzano su colture specifiche (e.g. frumento, mais, olivo, vite), confrontano varietà, impostando un'analisi d'impronta prevalentemente agronomica (Campiglia *et al.*, 2015; Orlandi *et al.*, 2020).

Ad esempio in Ferrara *et al.* (2010) vengono analizzati gli impatti del clima sul frumento coltivato nel Sud Italia; mentre nel lavoro di Zhu *et al.* (2016) si discute riguardo le modificazioni del sistema di coltivazione della vite realizzata in Toscana, in seguito ai cambiamenti meteorologici. Un aspetto comune di tutti i contributi scientifici considerati può essere così riassunto: i sistemi agricoli stanno andando incontro ad una aumentata variabilità delle produzioni con una tendenza alla riduzione delle rese per molte specie coltivate (Ferrara *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2016; Orlandi *et al.*, 2020).

Risulta necessario poter avere una disamina generalizzata del problema, che coinvolga l'intero territorio nazionale e consideri differenti colture. Queste sono le motivazioni che hanno indirizzato il seguente studio a focalizzarsi sulla tematica a livello nazionale, descrivendo quale sia la macro-dinamica che coinvolge l'Italia.

## 2. DATI E METODOLOGIA APPLICATA

### 2.1 Rese agricole

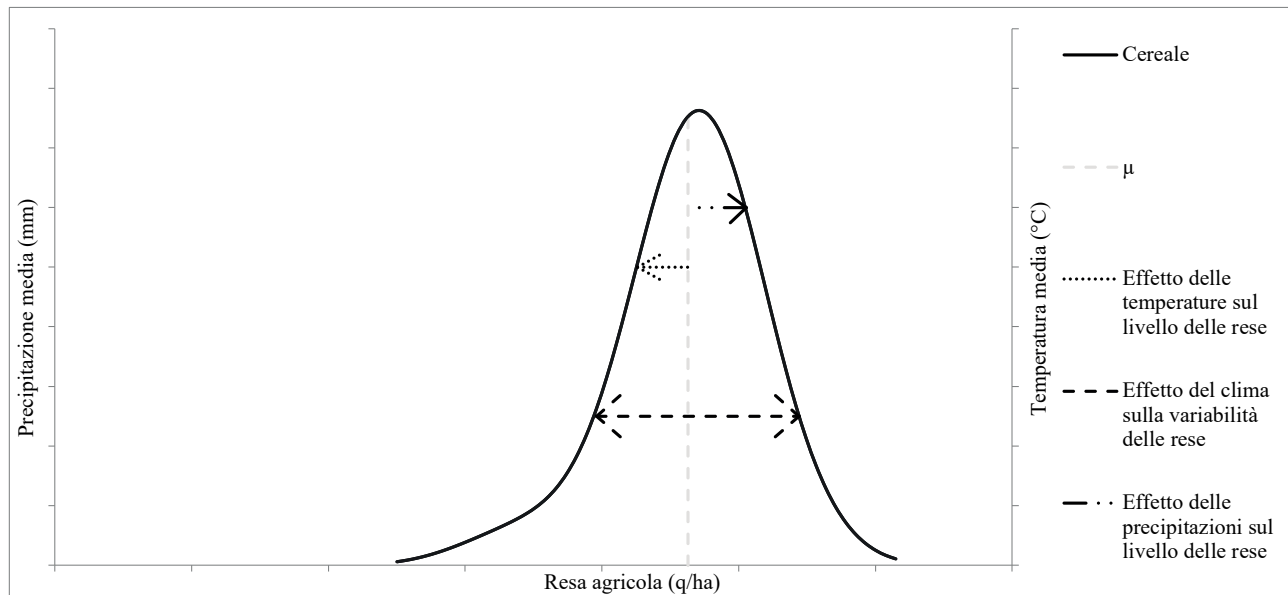
I dati sulla resa agricola riguardano le principali colture cerealicole italiane (avena, frumento, mais, orzo, riso, segale) nell'arco temporale dal 1920 al 2015 ottenuti come serie storiche dal database dell'INEA<sup>2</sup>, dell'ISTAT e del MIPAAF. Nel reperire i dati d'interesse, gli autori si sono assicurati che, nonostante le informazioni siano state attinte da tre banche dati differenti, i campioni siano omogenei.

La resa agricola è calcolata come rapporto della produzione totale rispetto la superficie totale, espressa in quintali su ettari (q/ha). Più precisamente si ottengono sei serie storiche, una per ogni coltura. Le serie storiche per antonomasia constano di diverse compo-

<sup>1</sup> L'errore di tipo I è il rifiuto dell'ipotesi nulla (H<sub>0</sub>) quando risulta vera; mentre l'errore di tipo II è l'accettazione di ipotesi nulla (H<sub>0</sub>) quando questa è falsa.

<sup>2</sup> INEA (Istituto Nazionale di Economia Agraria) 1924 al 1926, ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) dal 1927 al 2015 e MIPAAF (Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali) dal 1920 al 1923.

Fig. 1. Quadro concettuale.



Note: gli acronimi sono gradi Celsius (°C), millimetri (mm), quintali su ettari (q/ha).

nenti, quali la ciclicità<sup>3</sup>, l'irregolarità, la stagionalità e la tendenza a lungo termine (Turvey, Zhao, 1999; Ker, Goodwin, 2000; Hennessy, 2009). Tali componenti possono essere relazionate in maniera moltiplicativa (Popp *et al.*, 2005; Ye *et al.*, 2015; Lu *et al.*, 2017). Un modello moltiplicativo è appropriato quando l'ampiezza dell'oscillazione stagionale aumenta (o diminuisce) proporzionalmente all'aumento (o diminuzione) del livello della serie. Le serie storiche sono state detrendizzate<sup>4</sup> per la caratterizzazione del fenomeno in osservazione e per la previsione di valori futuri, al netto dell'innovazione tecnologica (Leng, Huang, 2017; Lu *et al.*, 2017; Setiyono *et al.*, 2018).

$$\varepsilon_t = \frac{y_t}{y_t^T} \quad (1)$$

$\varepsilon_t$  rappresenta i residui della serie al netto del trend,  $y_t$  è il valore della resa tal quale, mentre  $y_t^T$  la tendenza a lungo termine.

<sup>3</sup> La ciclicità è originata da condizioni di espansione o contrazione del contesto economico; l'irregolarità è data da movimenti erratici o accidentali provocati da una serie di circostanze, di entità trascurabile. La stagionalità rappresenta le oscillazioni originate da fattori climatici (alternanza delle stagioni) e di organizzazione sociale; il trend è il movimento tendenziale monotono di fondo, di lungo periodo.

<sup>4</sup> La detrendizzazione consta nell'ottenere la linea di tendenza per ogni serie, quindi calcolare il valore tendenza, per ogni anno. Infine, dividere il valore originario della serie per il valore tendenza calcolato e moltiplicarlo per un anno base della serie.

In seguito alla detrendizzazione delle rese storiche si ottengono degli indici adimensionali di serie storiche. Risulta necessario normalizzare tali indici rapportandoli ad un anno base, in questo caso il 2014<sup>5</sup>.

$$y_t^{dT} = \varepsilon_t * y_{2014} \quad (2)$$

$y_t^{dT}$  la serie detrendizzate ed  $y_{2014}$  il valore della resa nel 2014.

La detrendizzazione dei dati è valutata dagli autori come una scelta metodologica efficace agli obiettivi dell'elaborato, senza implicare delle limitazioni allo svolgimento dell'analisi.

Le distribuzioni<sup>6</sup> delle rese agricole sono state ottenute tramite un metodo non parametrico: *kernel density estimation* (Turvey, Zhao, 1999; Popp *et al.*, 2005; Ye *et al.*, 2015). Considerando un campione di dati, in questo caso le osservazioni delle serie, una variabile casuale, la resa e avvalendosi di una costante del kernel e di una bandwidth è possibile analizzare le distribuzioni delle rese. Variando attentamente il parametro  $h^7$  è possibile

<sup>5</sup> Seguendo il criterio di selezione dell'anno che fosse comune per tutte le serie storiche e più recente possibile dell'arco temporale considerato.

<sup>6</sup> Sono stati rimossi gli outlier (calcolando il limite inferiore  $Q1 - (IQR * 1,5)$  e quello superiore  $Q3 + (IQR * 1,5)$ ). Le osservazioni inferiori al limite inferiore e quelle superiori al limite superiore sono state scartate. Queste sono state reintrodotti (insieme ai valori di resa mancanti in origine) tramite un'interpolazione lineare (utilizzando i dati più prossimi a quelli mancanti).

<sup>7</sup> Troppo piccolo la distribuzione risulta appuntita, troppo grande risulta smussata.

Tab. 1. Rassegna della letteratura.

Autore	Studio Anno pubblicazione	Oggetto d'analisi				Risultati					
		Coltura		Territorio		Periodo considerato	Livello rese		Variabilità rese		
		Cereali*	Altro	PS	PVS		T	P	T	P	
Black and Thompson	1978	x	Fagioli	x		1870-1970	-				
Furuya and Koyama	2005	x	Soia	x	x	1961-2000	-	+			
Schlenker and Roberts	2006	x		x		1950-2004	-				
Thornton <i>et al.</i>	2009	x	Fagioli		x	2000-2050	-	+			
Cabas <i>et al.</i>	2010	x	Soia	x		1981-2006	-	+			
Finger	2010	x		x		1961-2006			+		+
Lobell and Burke	2010	x			x	2010-2050	-	+			
Peltonen-Sainio <i>et al.</i>	2010	x	Barbabietola, colza, patata	x		1975-2008	-	+			
Rowhani <i>et al.</i>	2011	x			x	1992-2005	-	+			
Sarker <i>et al.</i>	2012	x			x	1972-2009	-	+			
Barnwal and Kotani	2013	x			x	1971-2004	-	+			
Briche <i>et al.</i>	2014		Vite	x		1971-2000			+		+
Challinor <i>et al.</i>	2014	x		x		2010-2100	-	+	+		
Gaudin <i>et al.</i>	2015	x	Soia	x		1982-2012	-	+			
Ray <i>et al.</i>	2015	x	Soia	x	x	1979-2008			+		+
Trnka <i>et al.</i>	2016	x		x		1901-2012	-				
Kim and Moschini	2018	x	Soia	x		1971-2015	-	+			
Agnolucci and De Lipsis	2019	x		x		1960-2020	-				
Fletcher <i>et al.</i>	2020	x		x		1900-2016	-	+			
Diffenbaugh <i>et al.</i>	2021	x		x		1991-2017	-	+			

Note: \* avena, frumento, mais, orzo, riso, sorgo; gli acronimi sono Paesi sviluppati (PS), Paesi in via di sviluppo (PVS), temperature (T) e precipitazioni (P); la simbologia utilizzata rappresenta rispettivamente un decremento (-) oppure un incremento (+) delle variabili in esamina.

mettere in luce i pattern significativi, tralasciando quelli non significativi. Sono stati redatti i grafici di stima del kernel (riportati in appendice), uno per ogni serie storica, per osservare la densità di probabilità di ciascuna coltura in esamina. La normalità delle distribuzioni è stata verificata analiticamente con due test statistici<sup>8</sup> (Shapiro-Wilk Test e d'Agostino-Pearson) ed attraverso i qq-plot<sup>9</sup> (riportati in appendice) tale ipotesi è stata confermata graficamente (Hennessy, 2009; Lu *et al.*, 2017; Setiyono *et al.*, 2018). È stato individuato un andamento normale nella distribuzione dell'avena e in quella della segale.

La Tabella 2 fornisce le statistiche descrittive per le rese delle coltivazioni analizzate. La media storica dell'a-

vena è pari a 23,2 q/ha, quella della segale 28,3 q/ha, quella dell'orzo 36,3 q/ha, quella del frumento 38,5 q/ha, quella del riso si attesta a 64 q/ha, nettamente superiore è la media storica del mais con 102,4 q/ha. Il grafico in Figura 2 riporta le distribuzioni dei cereali analizzati evidenziando tutti andamenti gaussiani, in seguito alla normalizzazione.

## 2.2 Fattori climatici

Quando si definisce il clima si fa riferimento ad una determinata area geografica, per la quale vengono definite le condizioni medie dell'atmosfera, in seguito ad osservazioni di almeno trent'anni consecutivi (World Meteorological Organization).

In questo studio sono state prese in considerazione le temperature e le precipitazioni medie annuali per il territorio italiano a livello nazionale, nell'arco temporale dal 1920 al 2015. I dati d'interesse sono stati estratti dalla fonte Climate Change Knowledge Portal Word Bank.

<sup>8</sup> In entrambi ho le seguenti caratteristiche: H0 (la distribuzione dei dati è normale), H1 (la distribuzione dei dati non è normale),  $\alpha$  è il livello di significatività (probabilità di accettare o rifiutare l'ipotesi nulla), fissato pari a 0,05, infine p-value è il valore di probabilità (probabilità che la differenza tra i valori osservati e quelli calcolati sia significativa o casuale). P-value > alpha accettazione di H0, p-value ≤ alpha accettazione H1.

<sup>9</sup> Frappongono i quantili della distribuzione calcolata cumulata con quelli di una distribuzione normale cumulata.



Tab. 2. Statistiche descrittive.

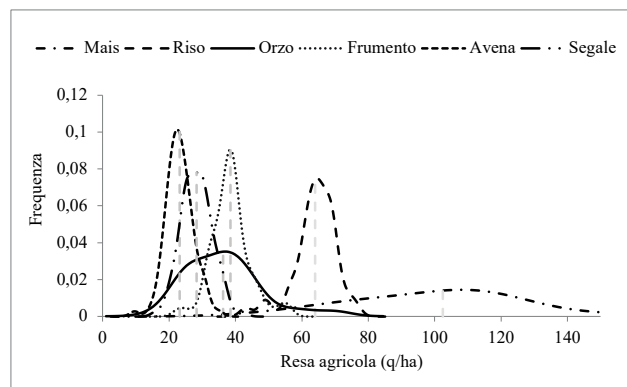
	$\mu$	$\sigma$	Q1	Q3
Colture (q/ha)				
Avena	23,2	4,1	20,5	25,5
Fumento*	38,5	5,9	35,4	40,3
Mais	102,4	27,6	82,0	115,7
Orzo	36,3	11,1	27,2	41,7
Riso	64,0	6,4	61,7	68,2
Segale	28,3	4,6	25,1	31,2
Variabili climatiche				
Precipitazioni (mm)	70,7	6,4	66,0	74,9
Temperature (°C)	11,8	0,4	11,5	12,1

Note: gli acronimi sono media ( $\mu$ ), deviazione standard ( $\sigma$ ), primo quartile (Q1), terzo quartile (Q3), quintali/ettari (q/ha), gradi Celsius (°C), millimetri (mm).

\* sia la varietà duro che tenero.

Fonte: elaborazione su dati CCKP (per i fattori climatici), INEA, ISTAT, MIPAAF (per le rese agricole).

Fig. 2. Distribuzione delle rese agricole.

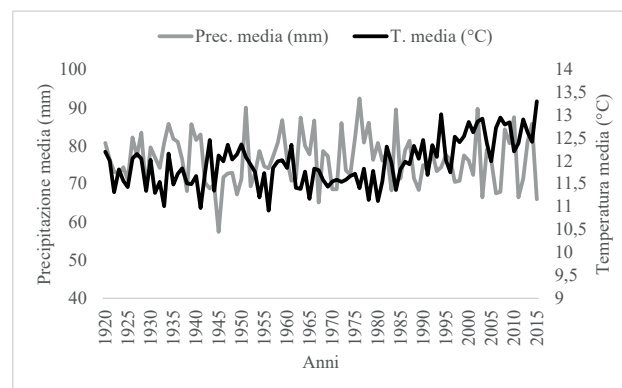


Note: l'acronimo è quintali su ettari (q/ha).

Fonte: elaborazione su dati INEA, ISTAT, MIPAAF.

Dal 1920 in poi la temperatura aumenta di almeno mezzo grado centigrado, raggiungendo un "picco" verso la fine degli anni '40 (Fig. 3). Segue una breve discesa termica, poi, a partire dal 1980, una netta risalita, nel corso della quale la temperatura guadagna 1°C in soli due decenni, per stabilizzarsi sui nuovi valori raggiunti nel corso degli anni Duemila. La piovosità annuale mostra un ciclico alternarsi di periodi piovosi e periodi di siccità. L'andamento delle piogge segnala una lenta diminuzione, oscillando attorno alla media. Si segnala un periodo di forte siccità negli anni Quaranta, un trentennio abbastanza piovoso tra il 1950 ed il 1980, ed un calo delle piogge tra il 1995 fino ad oggi. Il risultato è un'Italia decisamente più calda, rispetto ad una volta, mentre le precipitazioni han-

Fig. 3. Distribuzione delle variabili climatiche.



Note: gli acronimi sono gradi Celsius (°C) e millimetri (mm).

Fonte: elaborazione su dati CCKP.

no subito, almeno per il momento, solo una lieve diminuzione (Ray *et al.*, 2015; Trnka *et al.*, 2016; Agnolucci, De Lipsis, 2019). Sia per le temperature che per le precipitazioni si parla di una media generale, riguardante tutto il territorio nazionale. Le serie climatiche (così come le serie agricole), sono state detrendizzate e normalizzate, considerando come anno base<sup>10</sup> l'osservazione del 1996 per le temperature e del 1997 per le precipitazioni.

Le due distribuzioni<sup>11</sup> sono state studiate tramite il metodo non parametrico di stima del kernel, grazie al quale le due variabili climatiche sono state rappresentate graficamente (grafici riportati in appendice). La normalità delle distribuzioni è stata verificata analiticamente con due test statistici (Shapiro-Wilk Test e d'Agostino-Pearson) ed attraverso i qq-plot (riportati in appendice) tale ipotesi è stata confermata graficamente. È stato individuato un andamento normale in entrambe le distribuzioni (Schlenker, Roberts, 2006; Rowhani *et al.*, 2011; Diffenbaugh *et al.*, 2021). La Tabella 2 fornisce le statistiche descrittive per le due variabili climatiche analizzate. La media storica delle temperature è pari a 11,8 °C, quella delle precipitazioni 70,7 mm.

### 2.3 Modelli econometrici

Il quadro econometrico che adottiamo è la classe generale di modelli non lineari, spesso impiegati come

<sup>10</sup> Per le temperature è stata scelta l'ultima osservazione disponibile prima dell'inizio della fase di netta crescita (1996). Per le precipitazioni è stata selezionata l'osservazione dell'anno successivo (1997), poiché il dato del 1996 è un outlier.

<sup>11</sup> Sono stati rimossi gli outlier e reintrodotti (insieme ai valori di temperatura e precipitazione mancanti in origine) tramite la funzione di interpolazione lineare.

dispositivi di previsione in economia agraria, nelle scienze climatiche per rappresentare l'andamento delle temperature, delle precipitazioni e dei loro rispettivi impatti (Thornton *et al.*, 2009; Trnka *et al.*, 2016; Agnolucci, De Lipsis, 2019). Questo approccio ci permette di eseguire uno studio esplicito e generale delle rese agricole, catturando il ruolo potenziale delle variabili climatiche, le cui conseguenze possono variare nel tempo.

Eseguiamo la nostra analisi empirica in due fasi distinte, ognuna ideata per affrontare una diversa domanda di ricerca. Nella prima fase, indaghiamo se la resa agricola è influenzata da variabili meteorologiche e forniamo una misura quantitativa dei loro effetti. Nella seconda fase, esaminiamo la variabilità delle rese, esploriamo la potenziale esistenza di correlazione con i trend climatici. Di seguito, descriviamo più in dettaglio ciascuna delle due fasi dello studio.

L'obiettivo principale di questo studio è l'impiego di un approccio di regressione multipla per analizzare l'effetto della variazione storica delle temperature e delle precipitazioni nelle distribuzioni delle principali colture cerealicole in Italia. È stata postulata una semplice equazione di regressione non lineare per valutare le riposte delle rese agricole ai cambiamenti climatici. Nello specifico, in linea con Kim, Moschini (2018) e Tappi *et al.* (2022), la resa:  $y_{kt}$  per la coltura  $k$  al tempo  $t$  è modellata come:

$$y_{kt} = \alpha_1 + \beta_1 T_t + \delta_1 T_t^2 + \gamma_1 P_t + \theta_1 P_t^2 + \varepsilon_{kt} \quad (3)$$

$\alpha_1$  è la costante,  $T_t$  è il trend lineare delle temperature,  $P_t$  è il trend lineare delle precipitazioni,  $T_t^2$  è il trend al quadrato delle temperature,  $P_t^2$  è il trend al quadrato delle precipitazioni,  $\varepsilon_{kt}$  è l'errore.

Seguendo la letteratura (e.g. Finger, 2010; Rowhani *et al.*, 2011; Barnwal and Kotani, 2013), una seconda equazione di regressione non lineare è stata postulata per valutare la variabilità delle rese agricole, in risposta ai cambiamenti climatici. In dettaglio, la deviazione standard bootstrap<sup>12</sup> della resa  $\sigma(y_{kt})$  per la coltura  $k$  al tempo  $t$  è modellata come:

$$\sigma(y_{kt}) = \alpha_1 + \beta_1 \sigma(T_t) + \delta_1 \sigma(T_t^2) + \gamma_1 \sigma(P_t) + \theta_1 \sigma(P_t^2) + \varepsilon_{kt} \quad (4)$$

$\alpha_1$  è la costante,  $T_t$  è la deviazione standard del trend lineare delle temperature,  $P_t$  è la deviazione standard del trend lineare delle precipitazioni,  $T_t^2$  è la deviazione standard del trend al quadrato delle temperature,  $P_t^2$  è la deviazione standard del trend al quadrato delle precipitazioni,  $\varepsilon_{kt}$  è l'errore. Usando il modello (4) si assume

che le differenti variabilità nelle temperature e nelle precipitazioni possano avere un effetto sulla produttività dei cereali considerati.

Il nostro metodo consiste essenzialmente nell'utilizzare tre specifiche econometriche delle due equazioni descritte. In un primo caso sono stati considerati gli effetti complessivi del clima su tutte le colture in esame, ipotizzando una relazione non lineare tra le rese cerealicole e le temperature, parimenti tra rese e precipitazioni. Nella seconda specifica sono stati implementati gli effetti fissi dei fattori climatici su ciascuna coltura. Infine, nel terzo sono state inserite delle variabili fittizie (variabili che rappresentano gli effetti della temperatura e delle precipitazioni specifiche della coltura) per ogni coltivazione, linearmente alle temperature e alle precipitazioni.

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

In questa sezione, illustriamo i risultati che otteniamo dall'applicazione della metodologia sopra descritta sui dati italiani. L'obiettivo di questa fase è comprendere la natura delle variazioni quantitative delle rese dei cereali selezionati, considerando l'influenza dei fattori meteorologici (Rowhani *et al.*, 2011; Agnolucci, De Lipsis, 2019; Diffenbaugh *et al.*, 2021). Valutiamo l'impatto delle condizioni climatiche sul tasso di crescita a lungo termine delle rese agricole. Seguendo le indicazioni presenti in letteratura (Schlenker, Roberts, 2006; Lobell, Burke, 2010; Trnka *et al.*, 2016), la ricerca ha preso in considerazione due approcci econometrici (descritti nella sezione 2.3): stimare gli effetti del clima sul livello e sulla variabilità delle rese.

I risultati dell'applicazione della nostra metodologia sono mostrati nella Tabella 3. Osservando i risultati si può affermare che le relazioni tra l'andamento del clima e quello delle rese cerealicole sono coerenti con quanto riscontrato dalla letteratura scientifica (Furuya, Koyama, 2005; Finger, 2010; Sarker *et al.*, 2012; Trnka *et al.*, 2016).

Nello specifico per le temperature non si individua un effetto generalizzato per i sei cereali analizzati, mentre per le colture del mais e dell'orzo l'aumento delle temperature comporta una riduzione delle rese; tale riscontro ha andamento non lineare (Schlenker, Roberts, 2006; Lobell, Burke, 2010). Per le precipitazioni si riscontra una correlazione positiva e non lineare con le rese cerealicole; quindi, la contrazione di queste causa una riduzione delle rese, in maniera più accentuata per il mais (Rowhani *et al.*, 2011; Agnolucci, De Lipsis, 2019).

In merito all'analisi dell'impatto del clima sulla variabilità delle rese agricole risulta che la deviazione

<sup>12</sup> Tecnica statistica di ricampionamento con re-immissione per approssimare la distribuzione campionaria di una statistica.

Tab. 3. Stime sul livello e sulla variabilità delle rese.

Variabili climatiche	Livello rese (1)			Variabilità rese (2)		
	I	II	III	I	II	III
T	7.605 (5.127)	-43.87 (71.91)	-37.33 (70.12)	0.326*** (0.0367)	1.074** (0.514)	0.937** (0.419)
(T) <sup>2</sup>	0.153** (0.0625)	0.188** (0.0795)	0.188** (0.0773)	-0.00196*** (0.000448)	-0.00247*** (0.000568)	-0.00247*** (0.000462)
P	102.9*** (20.85)	103.8*** (20.90)	102.4*** (20.51)	0.392*** (0.149)	0.378** (0.149)	0.358*** (0.122)
(P) <sup>2</sup>	-0.0487*** (0.0102)	-0.0492*** (0.0103)	-0.0492*** (0.00998)	-0.000183** (7.32e-05)	-0.000176** (7.33e-05)	-0.000176*** (5.96e-05)
T* <i>Dummy</i> (coltura)						
Avena			1.055 (7.342)			0.00202 (0.0438)
Frumento			-1.768 (7.342)			0.0442 (0.0438)
Mais			-28.50*** (7.342)			0.597*** (0.0438)
Orzo			-13.04* (7.342)			0.201*** (0.0438)
Riso			3.041 (7.342)			-0.0239 (0.0438)
P* <i>Dummy</i> (coltura)						
Avena			-0.303 (4.133)			0.0148 (0.0247)
Frumento			-0.424 (4.133)			0.0191 (0.0247)
Mais			9.689** (4.133)			0.0709*** (0.0247)
Orzo			0.415 (4.133)			0.0158 (0.0247)
Riso			-0.974 (4.133)			-0.00344 (0.0247)
Anni		0.524 (0.730)	0.524 (0.710)		-0.00762 (0.00522)	-0.00762* (0.00424)
Effetti fissi sulle colture	No	Si	Si	No	Si	Si
Costante	-282.0*** (63.68)	-1,337 (1,434)	-1,329 (1,395)	10.43** (4.704)	18.13* (10.25)	18.19** (8.328)
Osservazioni	576	576	576	576	576	576

Note: gli acronimi sono temperature (T), precipitazioni (P); (1) rese *detrendizzate*, (2) deviazione standard bootstrap delle rese *detrendizzate*; in parentesi sono riportati gli errori standard \*\*\*p<0.01, \*\*p<0.05, \*p<0.1.

Fonte: elaborazione su dati CCKP, INEA, ISTAT, MIPAAF.

standard delle rese ha una correlazione positiva con il trend delle temperature a livello generico (maggiormen- te per mais e orzo) e che tale relazione non è lineare (Barnwal, Kotani, 2013; Diffenbaugh *et al.*, 2021).

Quindi si evince che l'aumento delle temperature comporti un aumento della variabilità delle rese. Invece, riguardo le precipitazioni, la loro diminuzione implica una maggiore variabilità delle rese agricole in maniera generalizzata, più accentuata per il mais (Ray *et al.*, 2015;

Trnka *et al.*, 2016). In conclusione, si può asserire che il trend<sup>13</sup> delle temperature e quello delle precipitazioni influenzano notevolmente sia il livello medio delle rese sia la loro variabilità, in maniera eterogenea fra le colture, in particolare appare evidente l'impatto sul mais, le

<sup>13</sup> Ottenuta come differenza tra le serie storiche delle temperature e precipitazioni tal quali e le serie storiche *detrendizzate* e *normalizzate* delle suddette.



cui rese hanno maggiormente risentito dei cambiamenti climatici in corso. In questo modo abbiamo quantificato le effettive perdite che hanno interessato il comparto cerealicolo italiano, in seguito al cambiamento del clima. Delineare delle stime permette di comprendere quali siano le difficoltà a cui l'agricoltura va incontro, così da intraprendere le opportune modifiche nella gestione del sistema agricolo.

Quest'area di ricerca, attiva da diversi decenni, presenta molti sviluppi recenti, al fine di individuare il modo migliore di misurazione dei danni climatici nel comparto agro-alimentare (Thornton *et al.*, 2009; Barnwal, Kotani, 2013; Gaudin *et al.*, 2015). L'instabilità e la vulnerabilità delle rese cerealicole osservate in questo studio potranno aggravarsi negli anni futuri. La tendenza, delineata nell'elaborato e prevista dalla letteratura corrente, di un clima più caldo e secco può accentuare la riduzione dei raccolti (Furuya, Koyama, 2005; Finger, 2010; Sarker *et al.*, 2012; Trnka *et al.*, 2016; Lamonaca *et al.*, 2021). Ampliare le conoscenze scientifiche, per stimare le conseguenze economiche dei cambiamenti climatici è importante sia come area di indagine accademica, che come input nella formazione di decisioni politiche di adattamento e mitigazione (Briche *et al.*, 2014; Challinor *et al.*, 2014; Ray *et al.*, 2015).

I dati panel, come quelli utilizzati nel seguente studio, contengono molte informazioni sugli effetti delle variazioni meteorologiche a breve, medio e lungo termine. La divulgazione di tali informazioni può contribuire alla realizzazione un approccio innovativo per aiutare a adattare gli agroecosistemi ai prossimi cambiamenti nelle condizioni di coltivazione delle colture; affrontando allo stesso tempo le questioni di sostenibilità associate al mantenimento delle rese in ambienti di produzione sempre più difficili. Questo complesso problema richiede l'adozione di politiche coerenti ed integrate per affrontare i temi del cambiamento climatico.

#### 4. CONSIDERAZIONE CONCLUSIVE

I cambiamenti climatici sono sempre più evidenti in termini economici e preoccupano l'intera società. Gli effetti non saranno semplici, tantomeno equi: alcuni settori produttivi saranno molto più interessati di altri a causa del diverso grado di vulnerabilità agli eventi meteo-climatici. Il settore agroalimentare è un caso emblematico: gli effetti dei cambiamenti climatici saranno evidenti sia dal lato produttivo, sia da quello dei consumatori, le cui abitudini alimentari sono destinate a modificarsi. Le colture di pieno campo (e.g. cereali) sono, più di altre, esposte agli eventi meteorologici.

Il presente studio mostra come le tendenze meteo-climatiche giochino un ruolo fondamentale nella determinazione degli andamenti delle rese agricole delle colture cerealicole in Italia. Seppure il fenomeno sia stato già studiato (Thornton *et al.*, 2009; Barnwal, Kotani, 2013; Gaudin *et al.*, 2015), il presente studio ha il pregio di concentrare l'attenzione sul caso italiano e sulle rese dei principali cereali coltivati in Italia (soprattutto mais e orzo): gli effetti sulle rese appaiono complessi e altamente non lineari. In dettaglio, si riscontra che le temperature e le precipitazioni influenzano notevolmente sia il livello medio delle rese che la loro variabilità. Tuttavia, tali effetti sono eterogenei fra le colture poste in rassegna, con particolari evidenze sull'impatto per il mais, le cui rese hanno maggiormente risentito dei cambiamenti climatici in corso.

Il nostro contributo aiuta a stimolare il dibattito sulle strategie da porre in essere per limitare gli effetti negativi dei cambiamenti climatici e coglierne le opportunità, orientando la ricerca futura e la progettazione di strumenti di gestione del rischio legati agli andamenti meteorologici. La ricerca in questo ambito è certamente promettente, soprattutto alla luce della imminente necessità di attenuare il cambiamento climatico (Santeramo 2019; Kolstad, Moore, 2020; Tappi *et al.*, 2022).

La crescente frequenza delle avversità climatiche impone la ricerca di nuove soluzioni in ambito assicurativo. A tal proposito, l'istituzione del Fondo di mutualità nazionale (Fondo MeteoCAT) è una soluzione strategica per la gestione degli eventi catastrofici, in linea con le linee programmatiche europee di lungo periodo (Cordier, Santeramo, 2020).

Quantificare gli effetti dell'andamento delle temperature e delle precipitazioni sui dati agricoli è importante anche per pianificare schemi assicurativi basati su indici meteo (Kahil, Albiac, 2013; Trnka *et al.*, 2016; Agnolucci, De Lipsis, 2019). Negli ultimi anni, l'attenzione nei confronti delle assicurazioni basate sugli indici meteorologici (*Weather Index-Based Insurances*, WIBI) è cresciuta notevolmente, soprattutto perché esse possono aiutare gli agricoltori a far fronte ai rischi climatici superando i problemi più comuni di assicurazioni tradizionali basate sull'indennizzo, ovvero l'informazione asimmetrica, gli alti costi di transazione, il rischio morale e la selezione avversa (Santeramo, Di Gioia, 2018). Inoltre, le WIBI non possono essere manipolate né dagli assicuratori né dagli assicurati, perché sono indici raccolti da dataset storici e aggiornati da enti riconosciuti (Kolstad, Moore, 2020; Tappi *et al.*, 2022).

La gestione del rischio in agricoltura diverrà sempre più un pilastro della politica agricola. Si prevede che le fluttuazioni della temperatura e delle precipitazioni

umenteranno con il cambiamento climatico globale, con eventi estremi più frequenti e più intensi. Gli scenari climatici futuri prevedono una potenziale contrazione complessiva delle rese agricole (Furuya, Koyama, 2005; Finger, 2010; Sarker *et al.*, 2012; Cooper, DelBeCq, 2014; Trnka *et al.*, 2016; Santeramo, Russo, 2021), quindi se non si interviene potenziando gli strumenti tecnici disponibili gli effetti sull'intero sistema agroalimentare saranno catastrofici.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Agnolucci P., De Lipsis V. (2019). Long-run trend in agricultural yield and climatic factors in Europe. *Climatic Change*, 1-21. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02622-3>
- Avanzini M., Salvador I., Gios G. (2018). Climate change and variations in mountain pasture values in the central-eastern Italian Alps in the eighteenth and nineteenth centuries. *Bio-based and Applied Economics*, 7(2): 97-116. DOI: 10.13128/bae-7670
- Barnwal P., Kotani K. (2013). Climatic impacts across agricultural crop yield distributions: An application of quantile regression on rice crops in Andhra Pradesh, India. *Ecological Economics*, 87: 95-109. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.11.024>
- Black J.R., Thompson S.R. (1978). "Some evidence on weather-crop-yield interaction." *American Journal of Agricultural Economics*, 60(3): 540-543. DOI: <https://doi.org/10.2307/1239954>
- Briche E., Beltrando G., Somot S., Quénot H. (2014). Critical analysis of simulated daily temperature data from the ARPEGE-climate model: application to climate change in the Champagne wine-producing region. *Climatic change*, 123(2): 241-254. DOI: 10.1007/s10584-013-1044-5
- Campiglia E., Mancinelli R., De Stefanis E., Pucciarmati S., Radicetti E. (2015). The long-term effects of conventional and organic cropping systems, tillage managements and weather conditions on yield and grain quality of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) in the Mediterranean environment of Central Italy. *Field Crops Research*, 176: 34-44. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.02.021>
- Cabas J., Weersink A., Olale E. (2010). "Crop yield response to economic, site and climatic variables." *Climatic change*, 101(3): 599-616. DOI: 10.1007/s10584-009-9754-4
- Challinor A.J., Watson J., Lobell D.B., Howden S.M., Smith D.R., Chhetri N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4(4): 287-291. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2153>
- Cooper J., DelBeCq B. (2014). A multi-region approach to assessing fiscal and farm level consequences of government support for farm risk management. *Bio-Based and Applied Economics Journal*, 3(1050-2016-85763): 205-227. DOI: <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.196654>
- Cordier J., Santeramo F. (2020). Mutual funds and the Income Stabilisation Tool in the EU: Retrospect and Prospects. *EuroChoices*, 19(1): 53-58. DOI: <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12210>
- Diffenbaugh N.S., Davenport F.V., Burke M. (2021). Historical warming has increased US crop insurance losses. *Environmental Research Letters*, 16(8): 084025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1223>
- Ferrara R.M., Trevisiol P., Acutis M., Rana G., Richter G.M., Baggaley N. (2010). Topographic impacts on wheat yields under climate change: two contrasted case studies in Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1): 53-65. DOI: 10.1007/s00704-009-0126-9
- Finger R. (2010). "Evidence of slowing yield growth—the example of Swiss cereal yields." *Food Policy*, 35(2): 175-182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2009.11.004>
- Fletcher A.L., Chen C., Ota N., Lawes R.A., Oliver Y.M. (2020). Has historic climate change affected the spatial distribution of water-limited wheat yield across Western Australia?. *Climatic Change*, 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02666-w>
- Furuya J., Koyama O. (2005). Impacts of climatic change on world agricultural product markets: estimation of macro yield functions. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 39(2): 121-134. DOI: <http://www.jircas.affrc.go.jp>
- Gaudin A.C.M., Tolhurst T.N., Ker A.P., Janovicek K., Tortora C., Martin R.C., Deen W. (2015). "Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability." *PloS one*, 10(2), e0113261. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113261>
- Hennessy D.A. (2009). "Crop yield skewness and the normal distribution." *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 34-52. DOI: <https://www.jstor.org/stable/41548400>
- ISTAT (2019). *Agricoltura: nel 2018 +0,6% produzione e +0,9% valore aggiunto, ma i margini calano.*
- ISTAT (2021). *In calo le superfici cerealicole, ma previsioni in crescita per il 2021.*
- Kahil M.T., Albiac J. (2013). Greenhouse gases mitigation policies in the agriculture of Aragon, Spain. *Bio-based and Applied Economics Journal*, 2(1050-2016-

- 85745): 49-72. DOI: <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.149222>
- Kim H., Moschini G. (2018). The dynamics of supply: US corn and soybeans in the biofuel era. *Land Economics*, 94(4): 593-613. DOI: 10.3368/le.94.4.593
- Ker A.P., Goodwin B.K. (2000). "Nonparametric estimation of crop insurance rates revisited." *American Journal of Agricultural Economics*, 82(2): 463-478. DOI: <https://doi.org/10.1111/0002-9092.00039>
- Kolstad C.D., Moore F.C. (2020). Estimating the economic impacts of climate change using weather observations. *Review of Environmental Economics and Policy*. Doi: <https://doi.org/10.1093/reep/rez024>
- Lamonaca E., Santeramo F.G., Seccia A. (2021). Climate changes and new productive dynamics in the global wine sector. *Bio-based and Applied Economics*, 10(2): 123-135. DOI: 0.36253/bae-967
- Leng Guoyong, Maoyi Huang (2017). "Crop yield response to climate change varies with crop spatial distribution pattern." *Scientific Reports*, 7(1): 1-10. DOI: 10.1038/s41598-017-01599-2
- Lobell D.B., Burke M.B. (2010). "On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change." *Agricultural and forest meteorology*, 150(11): 1443-1452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.07.008>
- Lu J., Carbone G.J., Gao P. (2017). "Detrending crop yield data for spatial visualization of drought impacts in the United States, 1895-2014." *Agricultural and forest meteorology*, 237: 196-208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.001>
- Mereu V., Gallo A., Trabucco A., Carboni G., Spano D. (2021). Modeling high-resolution climate change impacts on wheat and maize in Italy. *Climate Risk Management*, 33, 100339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100339>
- Orlandi F., Rojo J., Picornell A., Oteros J., Pérez-Badia R., Fornaciari M. (2020). Impact of climate change on olive crop production in Italy. *Atmosphere*, 11(6): 595. DOI: 10.3390/atmos11060595
- Peltonen-Sainio P., Jauhiainen L., Trnka M., Olesen J.E., Calanca P., Eckersten H., Eitzinger J., Gobin A., Kersebaum K.C., Kozyra J., Kumar S., Dalla Marta A., Micale F., Schaap B., Seguin B., Skjelvag A.O., Orlandini S. (2010). Coincidence of variation in yield and climate in Europe. *Agriculture, ecosystems & environment*, 139(4), 483-489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.09.006>
- Popp M., Rudstrom M., Manning P. (2005). "Spatial yield risk across region, crop and aggregation method." *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie*, 53(2-3): 103-115. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7976.2005.00408.x>
- Ray D.K., Gerber J.S., MacDonald G.K., West P.C. (2015). "Climate variation explains a third of global crop yield variability." *Nature communications*, 6(1): 1-9. DOI: 10.1038/ncomms6989
- Rowhani P., Lobell D.B., Linderman M., Ramankutty N. (2011). Climate variability and crop production in Tanzania. *Agricultural and forest meteorology*, 151(4): 449-460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.12.002>
- Sarker M.A.R., Alam K., Gow J. (2012). Exploring the relationship between climate change and rice yield in Bangladesh: An analysis of time series data. *Agricultural Systems*, 112: 11-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.06.004>
- Santeramo F.G., Di Gioia L. (2018). *La gestione del rischio in agricoltura. Assicurazioni, credito e strumenti finanziari per lo sviluppo rurale*. Edagricole – New Business Media.
- Santeramo F.G. (2019). I learn, you learn, we gain experience in crop insurance markets. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 41(2): 284-304. DOI: <https://doi.org/10.1093/aep/ppy012>
- Santeramo F.G., Russo I. (2021). Behavioural aspects in crop insurance uptakes: the Italian market. *Italian Review of Agricultural Economics*, 76(2): 73-90. DOI: 10.36253/rea-12186
- Setiyono T.D., Quicho E.D., Gatti L., Campos-Taberner M., Busetto L., Collivignarelli F., Garcia-Haro F.J., Boschetti M., Kan N.I., Holecz, F. (2018). Spatial rice yield estimation based on MODIS and Sentinel-1 SAR data and ORYZA crop growth model. *Remote Sensing*, 10(2): 293. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10020293>
- Schlenker W., Roberts M.F. (2006). "Nonlinear temperature effects of weather on corn yields." *Review of agricultural economics*, 28(3): 391-398. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>
- Tappi M., Nardone G., Santeramo F.G. (2022). On the relationships among durum wheat yields and weather conditions: evidence from Apulia region, Southern Italy. *Bio-Based and Applied Economics*, 11(2). Forthcoming.
- Thornton P.K., Jones P.G., Alagarswamy G., Andresen J. (2009). Spatial variation of crop yield response to climate change in East Africa. *Global environmental change*, 19(1): 54-65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.08.005>
- Trnka M., Olesen J.E., Kersebaum K.C., Rötter R.P., Brázdil R., Eitzinger J., Janssen S., Skjelvag A.O., Peltonen-Sainio P., Hlavinka P., Balek J., Eckersten H., Gobin A., Vuceti V., Dalla Marta A., Orlandini S., Alexandrov V., Semerádova D., Štěpánek P., Svobo-

dova E., Rajdl, K. (2016). Changing regional weather crop yield relationships across Europe between 1901 and 2012. *Climate Research*, 70(2-3): 195-214. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr01426>

Turvey C.G., Zhao J. (1999). *Parametric and non-parametric crop yield distributions and their effects on all-risk crop insurance premiums* (No. 1620-2016-134858). DOI: <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.34129>

Ye T., Nie J., Wang J., Shi P., Wang Z. (2015). Performance of detrending models of crop yield risk assessment: evaluation on real and hypothetical yield data. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 29(1): 109-117. DOI: 10.1007/s00477-014-0871-x

Zhu X., Moriondo M., van Ierland E.C., Trombi G., Bindi M. (2016). A model-based assessment of adaptation options for Chianti wine production in Tuscany (Italy) under climate change. *Regional Environmental Change*, 16(1): 85-96. DOI: 10.1007/s10113-014-0622-z

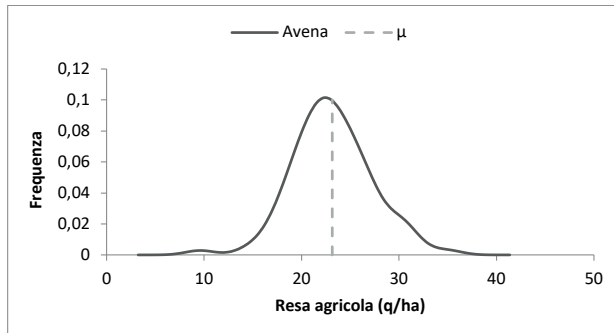
## APPENDICE

### a. Andamento delle rese agricole

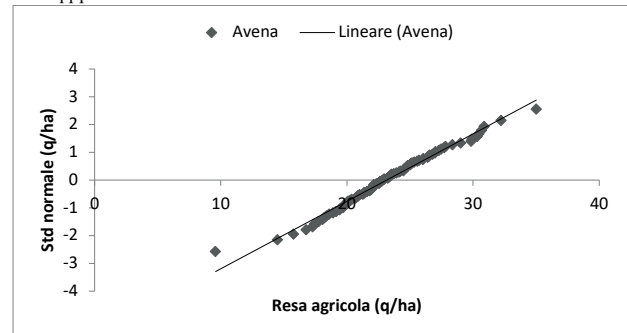
Al fine di rendere esauriente la comprensione del fenomeno agricolo, l'analisi è stata accompagnata dal supporto di alcuni grafici. Per descrivere l'andamento delle distribuzioni delle rese agricole sono stati utilizzati i kdc (*kernel density charts*), i quali rappresentano la funzione di densità di probabilità (*probability density function*), tramite un metodo non parametrico: *kernel density estimation*. Per osservare la densità di probabilità delle distribuzioni delle colture, sono stati redatti sei grafici, uno per ogni coltivazione considerata. Si riportano in ascissa i valori della resa agricola espressi in quintali su ettari (q/ha) e in ordinata i valori della frequenza dei dati. Solamente per due coltivazioni, quali avena e segale, l'andamento riscontrato è normale. In aggiunta a questa tipologia di grafici sono stati eseguiti dei qq-plot (*quantile-quantile plot*). Questi frappongono i quantili della distribuzione calcolata cumulata con quelli di una distribuzione normale cumulata. Tanto più i quantili delle due sono uguali, tanto più i dati confermano l'ipotesi gaussiana. È un metodo di rapida applicazione e di immediata inter-

Fig. A.1. Rese agricole.

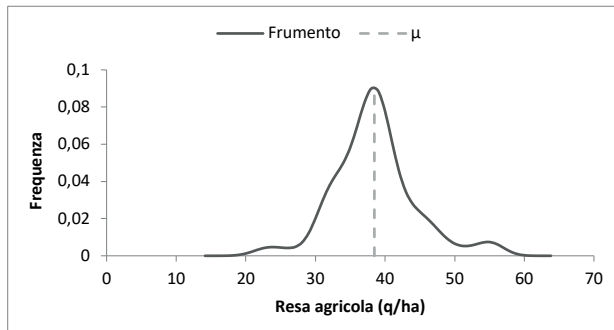
1A – kdc avena



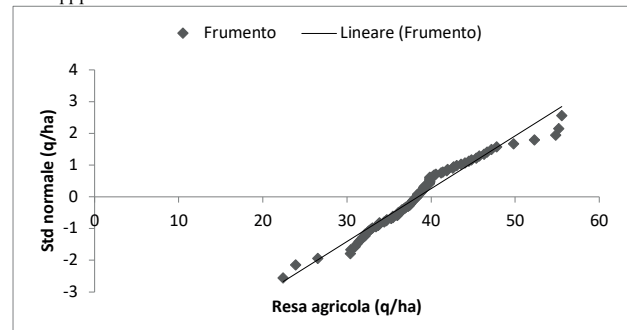
1B – qq-plot avena



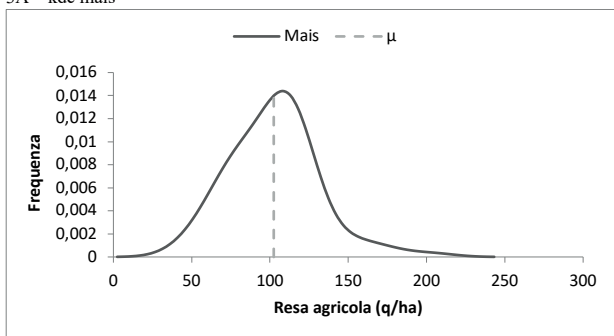
2A – kdc frumento



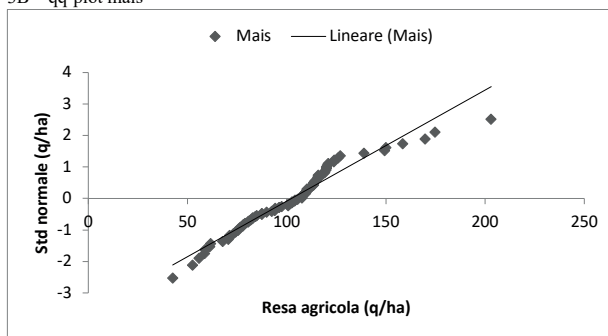
2B – qq-plot frumento



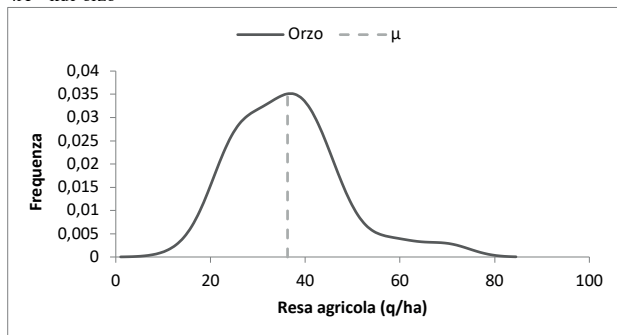
3A – kdc mais



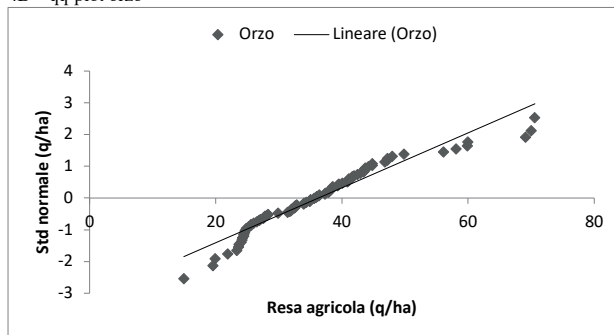
3B – qq-plot mais



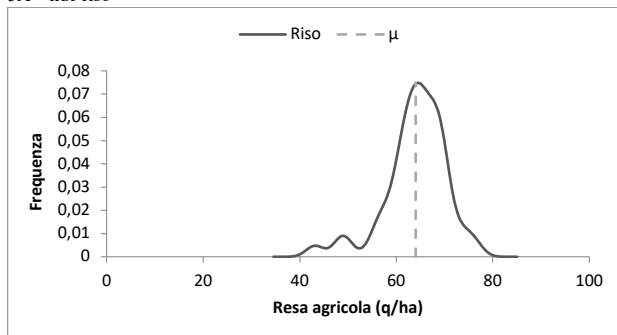
4A – kdc orzo



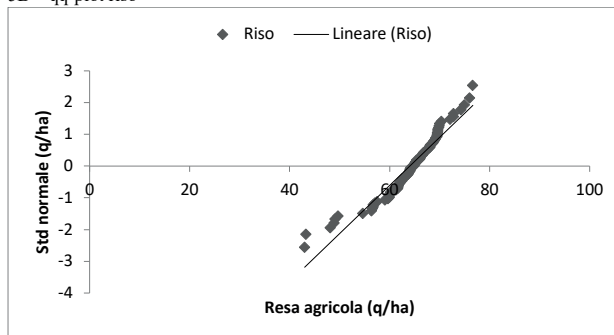
4B – qq-plot orzo



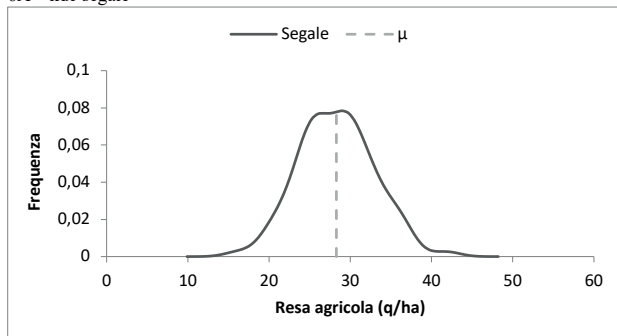
5A – kdc riso



5B – qq-plot riso



6A – kdc segale



6B – qq-plot segale

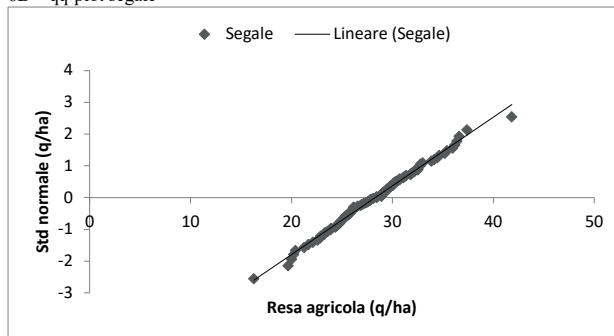
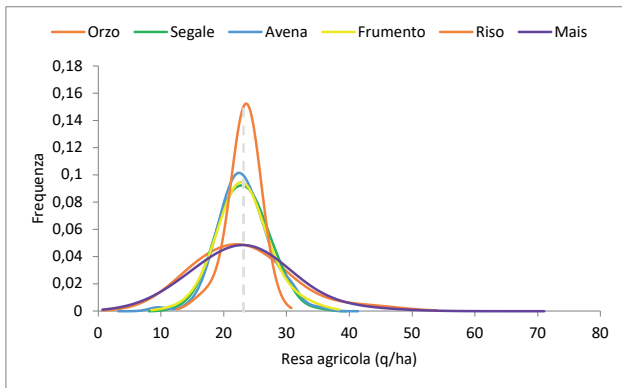




Fig. A.2. Variabilità delle rese agricole.



Note: le medie sono centrate al valore della media minore delle sette, dell'avena; l'acronimo è quintali su ettari (q/ha).  
 Fonte: elaborazione su dati INEA, ISTAT, MIPAAF.

pretazione. Sono riportati sei grafici, uno per ogni coltivazione considerata. In ascissa sono indicati i valori della resa agricola osservati, espressi in quintali su ettari (q/ha) ed in ordinata i valori della resa agricola teorici, espressi parimenti in quintali su ettari (q/ha). Solamente per due colture, quali avena e segale, l'ipotesi gaussiana è confermata.

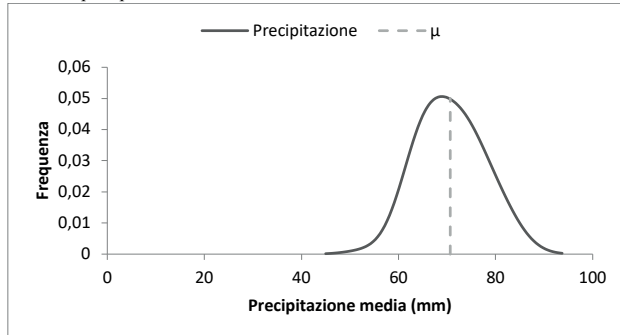
In aggiunta ai grafici esaminati ne è stato redatto un ulteriore, nel quale si osservano contemporaneamente le rese analizzate di tutte le colture. Per tali rese la distribuzione è stata rapportata alla coltura con minore valore medio di resa negli anni, l'avena. Così facendo le distribuzioni delle diverse coltivazioni hanno subito una traslazione verso i valori della coltura di riferimento, mentre le medie, per ovvi motivi, sono coincidenti con quella dell'avena.

b. Andamento delle variabili climatiche

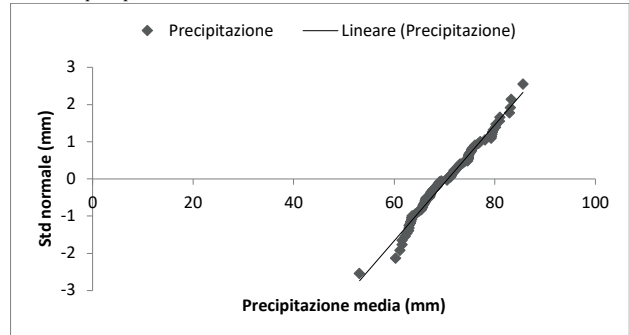
Per i due fattori climatici presi in considerazione, quali temperature e precipitazioni, l'analisi è stata supportata da alcuni grafici. Parimenti a quanto eseguito per le rese agricole, al fine di rendere i fenomeni climatici meglio comprensibili, sono state redatte due tipologie di grafici. Sono riportati di seguito i kdc (kernel density charts), con i quali mediante un metodo non parametrico, viene descritta la funzione di densità di probabilità per le temperature e le precipitazioni. In ascissa sono riportate rispettivamente, le temperature medie espresse in gradi Celsius (°C) e le precipitazioni medie in millimetri (mm), mentre in ordinata la frequenza dei dati.

Fig. A.3. Fattori climatici.

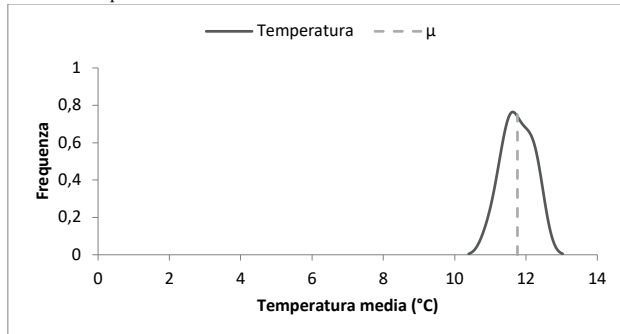
1C – kdc precipitazioni



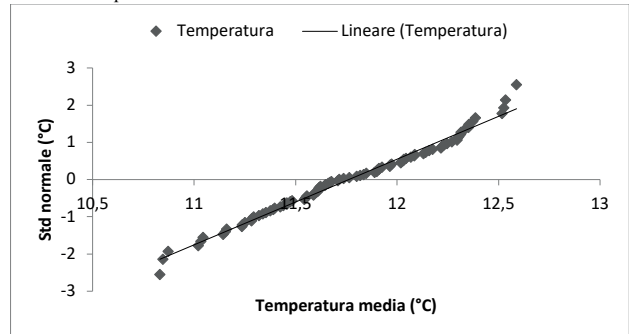
1D – kdc precipitazioni



2C – kdc temperature



2D – kdc temperature





Per entrambi i fattori climatici le distribuzioni presentano andamento normale. Tale normalità è stata inoltre verificata con un'altra tipologia di grafici, i qq-plot (quantile-quantile plot). Per i due fattori climatici, in ascissa sono riportati i valori delle precipitazioni medie o delle temperature medie osservate, espressi rispettivamente in millimetri (mm) ed in gradi Celsius (°C), in ordinata i valori di precipitazioni o di temperature teorici, espressi allo stesso modo in millimetri (mm) ed in gradi Celsius (°C). Per entrambe le variabili climatiche l'ipotesi di normalità è confermata.

### c. Andamento della superficie agricola utilizzata nazionale

È interessante osservare come nel corso degli anni analizzati la superficie destinata al comparto agricolo sia cambiata. Come si evince dalla Tabella A.1., complessivamente dal secondo dopoguerra la superficie adibita all'agricoltura è progressivamente diminuita. Nello specifico si evidenzia un decremento di qualche punto percentuale tra gli anni 1930-1961-1970, dopo di che tra gli anni '70 ed '80 si assiste ad una contrazione di circa il 30%. Da questo momento in poi la SAU (superficie agricola utilizzata) continuerà a presentare una discesa lenta e graduale.

**Tab. A.1.** Variabilità della superficie agricola utilizzata.

Anni	SAU (Mha)
1930	25,6
1961	25,8
1970	24,4
1980	15,4
1987	15,1
1993	14,7
2000	13,2
2010	12,9
2013	12,4
2016	12,6

Note: gli acronimi sono superficie agricola utilizzata (SAU) e milioni di ettari (Mha).

Fonte: elaborazione su dati ISTAT.

Al fine di poter quantificare nello specifico, la variabilità della superficie agricola utilizzata, per le colture e l'arco temporale d'interesse, è stato formulato un indice di stabilità (IS) adimensionale:

$$IS = \frac{\sqrt{\sum (s - s_i)^2}}{\sqrt{[max/s - s_i]^2 * n}}$$

s rappresenta la superficie coltivata annualmente di una coltura, mentre  $s_i$  è il valore di superficie messa a coltura di riferimento dell'anno 2014, infine  $n$  è il numero delle osservazioni di superficie disponibili nell'arco temporale scelto (1920-2015). Tale indice può essere al massimo pari a 1, in caso di elevata costanza della superficie messa a coltura o viceversa pari a 0, in caso di notevole variabilità della stessa. I risultati, nella Tabella A.2., evidenziano come per le coltivazioni dell'avena, del frumento e della segale l'andamento della superficie è piuttosto omogeneo, mentre per le rimanenti colture l'indice manifesta una contenuta variabilità della superficie.

**Tab. A.2.** Stabilità delle rese agricole nazionali.

Colture	IS
Avena	0,64
Frumento	0,63
Mais	0,38
Orzo	0,39
Riso	0,48
Segale	0,51

Note: l'acronimo è indice di stabilità (IS).

Fonte: elaborazione su dati ISTAT.