POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Energia e Agricoltura: Meccanizzazione, Produttività, Efficienza

Relatori

Prof. Walter Franco

.....

Prof. Mario De Salve

.....

Candidato

Matteo De Piccoli

Aprile 2018

Sommario

1. ENERGIA E CIVILTÀ 3
1.1 Un quadro introduttivo 3
1.2 I consumi energetici dal mondo antico ell'epoca preindustriale 5
1.3 L'energia tra presente e futuro 11
1.4 L'agricoltura 20
1.5 Lavoro e potenza sviluppata da uomini e animali 31
2. ORGANIZZAZIONE AZIENDALE E PRATICHE COLTURALI 36
2.1 La scala aziendale 36
2.2 Pratiche colturali 42
2.3 Uno sguardo all'Italia 51
3. ENERGIA E MECCANIZZAZIONE 55
4. MIETITURA E TREBBIATURA DEL GRANO 66
4.1 Il grano e le sue lavorazioni nell'antichità 66
4.2 Innovazioni tecnologiche nel "Nuovo Mondo": evoluzione della mietitura 68
4.3 La trebbiatura 79
4.4 L'avvento delle mietitrebbie 90
4.5 L'analisi comparata 99
5. IL DIROMPIMENTO DEL TERRENO 113
5.1 Breve storia dell'Aratura 113
5.2 Tecnologie di lavorazione primaria del terreno e elaborazione dei dati 117
5.3 L'analisi complessiva 130
6. CONCLUSIONI 138
Appendici 147
Bibliografia 148

Abstract

L'obiettivo di questo elaborato consiste in un'analisi delle conseguenze della meccanizzazione in diversi processi agricoli. Questa verrà condotta in termini energetici, meccanici e storici, così da poter creare uno spazio di lavoro abbastanza ampio da permettere un approccio olistico e comprensivo di diverse discipline.

La meccanizzazione dell'agricoltura si è sviluppata enormemente negli ultimi due secoli, e come per molte altre discipline ha seguito il flusso della massimizzazione della produttività e dei profitti, in termini sia teorici che pratici.

Figure che si approcciano a un tale modello considerando fattori come sostenibilità, consumo delle risorse, l'approccio al mondo "naturale" o biologico non inteso unicamente come sfruttamento di una risorsa in termini economici, sono nate solo negli anni successivi alla crisi petrolifera degli anni '70: questi hanno elaborato le basi di un pensiero atto a imporre delle costrizioni alla crescita senza freni, unitamente alla smania degli infiniti bisogni che caratterizza la civiltà moderna. Sebbene non ci sia stato un consenso diffuso e tantomeno pratico, è scoccata la scintilla della consapevolezza di abitare in un mondo finito.

Le regole del gioco a cui stiamo giocando vanno al di là dell'uomo e della sua piena comprensione, che ne sia o meno consapevole: pensare possano essere definite in ambito esclusivamente antropico considerando quello che "non è uomo" come una risorsa unicamente materiale, da sfruttare per produrre beni e servizi che soddisfano il compiacimento dell'individuo a prescindere da cosa comporti è dannoso, oltre che irresponsabile; non tanto per la natura o l'ambiente, ma per l'uomo stesso. Nella totale mancanza di interazione consapevole con quello che ci circonda, si dovrebbe ricordare sempre che senza di esso la *vita* non esisterebbe.

Se è vero che in quaranta anni la direzione è rimasta la stessa nonostante i problemi siano aumentati, è passato un periodo di tempo tale da poter rivedere le tesi sviluppate dai pionieri e confrontarle con le conoscenze e le realtà attuali, portandole con maggiore forza e consapevolezza nella realtà sistemica: alcune preoccupazioni, quali ad esempio l'esaurimento dei combustibili fossili, dovrebbero essere ridimensionate; mentre una maggiore importanza va data agli studi biologici relativi all'interazione tra biosfera e organismi viventi. Queste relazioni costituiscono dei limiti ben più pressanti e con potenziali problematiche difficilmente quantificabili, ma sicuramente da evitare in un'ottica di conservazione della nostra specie. Problema chiaro a molti già 40 anni fa, la differenza al giorno d'oggi la fanno le conferme avute in questi anni; l'urgenza deriva dalla consapevolezza della necessità di affrontare il problema in modo diretto e non agendo superficialmente, come fosse sempre un problema degli "altri". Non dovessero essere prese misure importanti entro i prossimi 50 anni l'innesco di processi non reversibili da rischio è divenuto certezza.

L'esigenza di analizzare dei metodi che siano conformi a un'ottica di sostenibilità che vada al di là di interessi economici o individuali è nata proprio da questa consapevolezza e vuole fornire una possibilità che non sia solo di critica ma principalmente costruttiva, così da cercare un'*alternativa* concreta a chi vuole riprendersi quelle responsabilità derivanti dalla consapevolezza di vivere in un modello che ad oggi non è sostenibile, dal voler dare un contributo reale perché possa diventarlo.

Si cercherà quindi di elaborare una panoramica dei consumi energetici in agricoltura; in seguito analizzeranno i processi di meccanizzazione che hanno caratterizzato le lavorazioni di mietitura, trebbiatura e dirompimento del terreno con l'obiettivo di offrire delle alternative possibili, attuali e congrue al soddisfacimento dei bisogni primari tendenti a un'ottica di *stato stazionario* piuttosto che di *crescita illimitata*.

Con la speranza che le tradizioni, gli usi e le conoscenze che vengono tramandate di generazione in generazione non rimangano solo un ricordo e con la consapevolezza che è imparando dal nostro passato che si può volgere lo sguardo al futuro.

1. ENERGIA E CIVILTÀ

1.1 Un quadro introduttivo

"*Una teoria è tanto più convincente quanto più semplici sono le sue premesse, quanto più varie sono le cose che essa collega, quanto più esteso è il suo campo di applicazione. Per questo la termodinamica classica mi fece un'impressione così profonda. È la sola teoria fisica di contenuto universale che sono certo non sarà mai sovvertita, entro i limiti in cui i suoi concetti sono applicabili* [1]."

Albert Einstein, "Pensieri di un uomo curioso"

In questa prima parte del capitolo si cercherà di mettere le basi per una comprensione degli utilizzi dell'energia a scopo antropico nelle sue varie forme: come viene prodotta, quanta ne viene consumata e per che tipo di attività. L'analisi verrà formulata inizialmente a livello storico sviluppando successivamente una panoramica sugli usi attuali e le conseguenze relative all'uso delle fonti sfruttate, così da fornire le basi minime necessarie alle analisi che verranno fatte nei capitoli successivi.
In una seconda parte verrà posto l'accento sugli usi energetici rispetto al settore agricolo nelle varie forme.
Per fornire gli strumenti adeguati è necessario definire la terminologia che consente l'espressione dei concetti relativi agli usi energetici: l'energia si presenta in diverse forme, principalmente può essere suddivisa come *associata* alla materia o relativa al *trasporto* dalla materia. Nel primo caso si parla di energia potenziale, cinetica e interna, nel secondo di energia termica (calore), energia meccanica (lavoro), energia radiativa (irraggiamento). In questo secondo caso c'è un trasferimento di energia da un corpo a un altro, che vede una modificazione del contenuto energetico tra il corpo che cede energia e quello che la riceve. L'energia elettrica viene comunemente trattata alla stregua del lavoro meccanico [2]. Come si può facilmente arguire per completare il quadro va considerato anche il ruolo della durata degli scambi energetici, quindi va associato a uno scambio il tempo necessario perché questo avvenga, ovvero la durata del fenomeno.
Per riuscire a mettere in comune tutti questi aspetti si definisce il concetto di energia primaria, ovvero l'energia che può essere ricavata direttamente dalle risorse naturali senza necessitare di una manipolazione o trasformazione in senso antropico (energia solare, eolica, petrolio grezzo, gas naturale, ecc). Si parla di fonti secondarie quando invece queste hanno visto una trasformazione (energia elettrica, benzina, ecc).
Le unità di misure atte a definire le quantità e gli scambi energetici sono numerose, in quanto diverse sono le quantità in gioco rispetto ai diversi usi energetici. Quelle utilizzate in questa trattazione, in termini di energia saranno principalmente il Joule e la Tonnellata Equivalente di Petrolio (TOE), per quanto riguarda la Potenza si farà riferimento al Watt. Le conversioni tra le varie unità di misura si trovano nelle appendici.
Oltre al concetto di energia, è importante essere consapevoli di come questa e gli scambi che la interessano possano essere quantificati e definiti in termini scientifici, prima che quantitativi.
Il Primo Principio esprime la conservazione dell'energia stabilendo l'equivalenza tra calore e lavoro [3].
Al secondo principio è direttamente collegato il concetto di *entropia*, che Clausis nel 1865 definisce come "grado del disordine di un sistema": parola derivante dal greco, ha il significato di *trasformazione*, *cambiamento*. Questa grandezza permette di stabilire come in un sistema chiuso la disponibilità di energia utile possa unicamente diminuire, in quanto l'entropia può solo aumentare, o, al massimo, nei processi ideali e reversibili (non riproducibili nel mondo reale per definizione), rimanere costante.
Il secondo principio, inoltre, permette una valutazione in termini di *qualità* rispetto alle trasformazioni da una forma di energia all'altra. Questa legge pone dei limiti a tali conversioni, introducendo una gerarchia nelle diverse forme energetiche: mentre tutte le forme di energia possono essere *completamente* convertite in calore, la conversione del calore in altre forme di energia non può *mai* essere completa; un cesto di riso o un una tanica di benzina rappresentano una fornitura di energia di

alta qualità e ordinata, quindi a bassa entropia e in grado di fornire un gran quantitativo di lavoro una volta metabolizzato o bruciato; ma una volta consumate queste risorse si trasformeranno in moto casuale di particelle, uno stato disordinato ad alta entropia; è impossibile pensare di ripercorrere un tale processo in senso inverso. La dissipazione entropica unidirezionale porta a una perdita di complessità, a un maggiore disordine e quindi maggiore omogeneità in ogni sistema chiuso. Ma tutti gli organismi viventi, intesi nella più ampia scala possibile, dal singolo batterio alla civiltà globale, sfidano temporaneamente questa tendenza metabolizzando, scambiando, trasformando energia per mantenere il proprio stato ordinato. Questo significa che ogni organismo deve essere un sistema aperto, mantenendo un continuo flusso di energia e materia per mantenersi tale, a spese del sistema da cui vi attinge; finchè rimane in vita, il sistema non può mai essere in equilibrio termodinamico e chimico: lo stato di equilibrio corrisponde con la morte dell'organismo, quando le sue funzioni biologiche smettono di funzionare e questi smette di trasformare energia [4] [5].
Si ha quindi una misura della *qualità* delle diverse forme di energia che non era possibile stabilire unicamente attraverso il primo principio, che se da un lato permette una valutazione quantitativa, dall'altro non permette di considerare queste differenze fondamentali: un kWh di energia può essere espresso per calore, lavoro, energia elettrica; ma un kWh di energia elettrica, per essere prodotto, necessita mediamente di una quantità tripla di energia termica a seconda del rendimento del processo di conversione: il secondo principio permette quindi di considerare queste differenze qualitative di grande importanza. Viene così introdotto il concetto di *exergia* come massimo lavoro estraibile idealmente da una trasformazione: l'exergia, a differenza dell'energia, non si conserva ma viene distrutta nei processi reali, a causa dell'aumento di entropia; infatti in termini di primo e secondo principio, e quindi in termini assoluti, non è corretto parlare di *consumo* di energia, quanto di *degradazione* nella sua qualità valutabile in termini entropici, o piuttosto di consumo di exergia.
Tra tutte le svariate applicazioni, le implicazioni del secondo principio si estendono anche all'economia (N. G. Roegen), a valutazioni energetiche di bilancio in termini globali (J. T. Szargut), all'ingegneria ecologica e all'utilizzo dell'exergia come indicatore di sostenibilità (H.T. Odum).
Dal lato argicolo ed energetico gli autori più incisivi studiati in letteratura sono stati Vaclav Smil per le incredibili analisi di società e civiltà tra presente e passato; David Pimentel le cui analisi in termini di input/uoutput energetici sono stati un punto di partenza per moltissimi studiosi e Mario Giampietro per il rapporto tra agricoltura, socioeconomia, dipendenza dai combustibili fossili; infine Pellizzi è stato il riferimento per quanto riguarda l'agricoltura italiana.
Gli enti di riferimento da cui si è attinto per la maggior parte dei dati sono IEA (International Energy Agency) e BP (British Petroleum) per quanto riguarda le analisi energetiche, principalmente FAO (Food and Agriculture Organization) per il campo agricolo.
Attraverso questi principali strumenti si cercherà di sfruttare gli studi disponibili in letteratura per effettuare delle analisi il più possibile significative e aderenti alla realtà, consci dei limiti che scaturiscono dalla complessità dell'ambiente che ci circonda e la società in cui viviamo, i processi che la caratterizzano e attraverso i quali si evolve (e ci evolviamo); la descrizione di una tale complessità non può essere condensabile in un unico parametro o in uno studio prettamente limitato a considerazioni energetiche: per quanto l'energia possa essere intesa come il motore primo di qualsiasi fenomeno non si possono tralasciare i fenomeni sociali, economici, politici, religiosi, che da sempre caratterizzano la civiltà umana.
Si può però affermare che come per ogni sistema complesso e dinamico, si può intendere la stabilità come la capacità di ritornare a una configurazione di equilibrio a fronte di una perturbazione: nel caso in cui la risposta del sistema diverga il sistema si porta a uno stato di non equilibrio. È necessario tenere sotto controllo le variabili che permettono al sistema di mantenersi a uno stato stazionario per evitare di divergere verso uno stato irreversibile, di non ritorno.

1.2 I consumi energetici dal mondo antico ell'epoca preindustriale

Per comprendere il quadro della situazione odierna in termini di consumi è necessario effettuare una breve analisi dei consumi energetici nel corso della storia umana. L'energia riveste un ruolo fondamentale in tutti i processi biologici a prescindere dalla consapevolezza dei beneficiari e sapere come sfruttarla al meglio permette un indubbio vantaggio. Il percorso compiuto dall'uomo ne è un perfetto esempio: fino a un periodo per nulla distante dal nostro, e tutt'ora in alcuni paesi del Terzo Mondo, la maggior parte delle spese in termini energetici sono convogliate per il soddisfacimento dei bisogni primari: secondo Lotka e la *Formulazione della Legge di Massima Energia* da un punto di vista prettamente biologico l'evoluzione umana può essere vista come una ricerca il cui fine è il controllo di sempre maggiori riserve e flussi di energia cercando di convertirla in modi sempre più accessibili, a costi minori e con maggiore efficienza in calore, luce e movimento. Per quel che riguarda il bioma[1] non si tratta della massima efficienza di conversione, ma della massima potenza in uscita. Questa è più importante in termini di crescita, riproduzione, sostentamento, diffusione della specie: gli organismi che abitano i diversi ecosistemi non tendono a convertire l'energia con la massima efficienza possibile, ma a un tasso ottimizzato rispetto alla massima potenza in uscita (che per Odum e Pinkerton è sempre inferiore alla massima possibile, senza mai superare il 50% del tasso ideale [6]) [5].
Nel corso della sua evoluzione l'uomo ha attraversato diverse tappe chiave: il bipedalismo e il conseguente sviluppo di organi vocali più raffinati che portano all'uso della parola, la scoperta del fuoco (prima *tecnologia prometeica*[2]) [4] [7]: tutti questi fattori permettono un aumento progressivo della complessità sociale, enfatizzato con l'avvento dell'agricoltura. Si potrebbe riassumere la storia dell'uomo come l'espressione di uno sforzo continuo atto a facilitare il soddisfacimento dei bisogni di primaria necessità, così da poter permettersi una sempre maggior disponibilità in termini temporali e materiali per dedicarsi ad altri scopi, che variano da civilità a civiltà a seconda del livello di complessità sociale e culturale raggiunto.
Un fattore determinante nell'evoluzione umana sono indubbiamente i cambiamenti climatici: secondo Behringer ci sono le prove geologiche che siano avvenute almeno venti glaciazioni nel corso degli ultimi due milioni di anni, oltre a immense eruzioni vulcaniche [8]: una progressiva diminuzione della temperatura media e una continua fluttuazione di temperatura sono stati più intensi negli ultimi stadi evolutivi e alcuni paleoantropolgi pensano che questi continui cambiamenti possano essere stati determinananti per l'evoluzione umana [9].

---

[1] Un bioma rappresenta un'ampia porzione di biosfera, caratterizzata da "*un ampio complesso di vegetali con assetto stabile su di una vasta area geografica. La relativa stabilità di un bioma è data principalmente dalle interazioni tra vegetazione e clima, e secondariamente da quelle con il suolo (il rapporto tra piante e suolo è strettissimo e rappresenta lo sbocco del lunghissimo percorso evolutivo lungo il quale il mondo vegetale ha consolidato la propria conquista delle terre emerse). In sostanza, appartengono allo stesso bioma complessi vegetazionali simili non in termini genetici o tassonomici, ma in quanto presentano lo stesso tipo di stadio climax della vegetazione con la dominanza di una forma di crescita sulle altre (viene detto climax lo stadio finale relativamente stabile di una successione ecologica caratterizzato da cambiamenti estremamente lenti delle comunità vegetale e animale)* [214]." Da Treccani, "Enciclopedia della Scienza e della Tecnica"

[2] La definizione di tecnologia prometeica è da attribuire a Georgescu-Roegen: "*per una comprensione della presente crisi dell'energia è necessario scartare le innovazioni abbaglianti ma sussidiarie, per scoprire quelle che hanno rappresentato un reale progresso tecnico. Cronologicamente la prima è stata il dominio del fuoco e la sua utilizzazione per gli scopi più vari. L'importanza di questa scoperta deriva da due singolari proprietà del fuoco. Dapprima il fuoco rappresenta una conversione qualitativa dell'energia, la conversione di una certa forma di energia chimica in energia calorifica. Inoltre il fuoco procede come una reazione a catena: con una sola piccola fiamma si può fare bruciare un'intera foresta, anzi tutte le foreste. Il fuoco ha messo gli uomini in condizione di scaldarsi e di cuocere gli alimenti, ma soprattutto di fondere e di forgiare metalli, di far cuocere la ceramica e la pietra e la calcina. Gli antichi Greci avevano potenti ragioni nell'attribuire il dono del fuoco a Prometeo, semidio, non un semplice mortale* [215]*."* Da "Bioeconomia e degradazione della materia: il destino prometeico della tecnologia umana".

Non ci sono cause univoche atte a spiegare i motivi per cui l'uomo antico è stato spinto ad abbandonare le pratiche di caccia e raccolta e preferire la coltivazione stabile. Sicuramente è stato un connubio che trae origine da cause quali aumento della popolazione e stress ambientali, o una combinazione tra fattori sociali e naturali; le temperature più alte rispetto ai periodi precedenti hanno inevitabilmente contribuito: tra 10˙000 e 5˙000 anni fa le coltivazioni si evolvono in modo indipendente almeno in 7 aree dislocate in tre diversi continenti [4]. Sicuramente non c'è stato un momento specifico, ma un passaggio progressivo dalla caccia e raccolta alla sedentarietà. I vantaggi indiscussi dell'agricoltura, nonostante inizialmente non fosse energeticamente più conveniente rispetto a metodi precedenti, permettevano una maggior sicurezza alimentare, oltre a stimolare complessità e organizzazione sociale: caccia e raccolta potevano sostenere una media di 25 persone ogni 100 km^2 (media su 340 diverse culture [4]), ovvero 0.0025 persone per ettaro. Le prime forme di agricoltura come la *shifting cultivation*[3] o agricoltura itinerante aumentano questi valori a 0.2-0.6 persone per ettaro con un ritorno energetico dalle 15 alle 30 volte maggiore rispetto agli input. Questi dati variano da popolazioni Asiatiche a europee e superano di almeno un ordine di grandezza i precedenti metodi di caccia e raccolta.
Il passo verso una stanzialità maggiore e la nascita delle prime civiltà è molto breve: i metodi agricoli cominciano ad affinarsi, si hanno le prime rotazioni, lo sfruttamento di sistemi di irrigazione, l'utilizzo degli animali per trazione. Si parla quindi di *agricoltura tradizionale*. Il grafico di figura 1 mostra la densità di popolazione raggiunta nel corso del tempo dalle maggiori civiltà. Si nota come la base sia comune e di circa una persona per ettaro. La scala di tempo perché un tale valore raddoppi è sui 2˙000 anni per Cina ed Egitto, ma anche per quanto riguarda l'Europa, sebbene in periodi diversi. Questo tipo di agricoltura era basato su tecniche ben più complesse, in accordo con la complessità che queste civiltà avevano sviluppato rispetto ai loro ancestori: l'introduzione prima dell'aratro e poi dell'irrigazione, l'utilizzo degli animali da tiro, i migliori metodi di coltivazione, costituiscono le basi che rimarranno tali fino al periodo preindustriale del XVIII secolo.

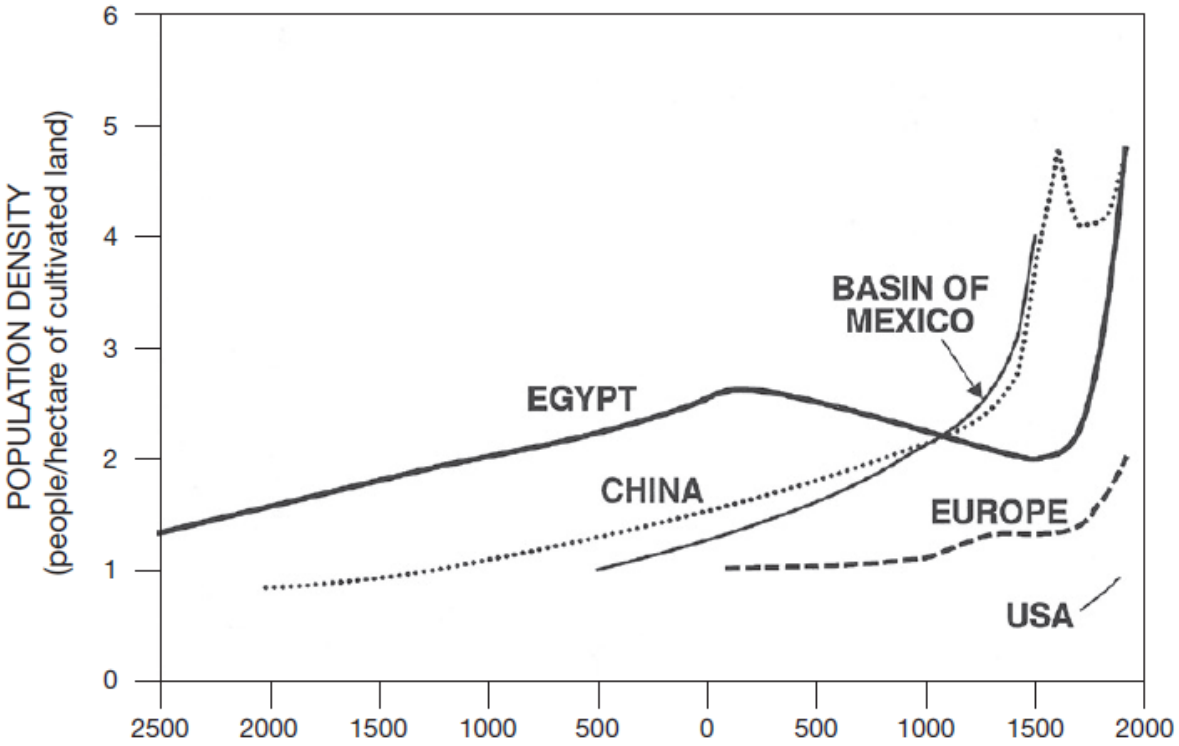


Figura 1 Densità di popolazione per ettaro nel corso della storia per le principali civiltà [4]

[3] Agricoltura dove una minor parte del territorio viene sfruttata a coltura mentre la maggior parte viene lasciata a ricrescita naturale. I campi lasciati a maggese possono essere impiegati per altri scopi.

In questo tipo di agricoltura l'input energetico maggiore è il lavoro umano o animale: con questi presupposti è comprensibile come ci fosse la tendenza a massimizzare la disponibilità di lavoro, quindi avere famiglie numerose. D'altra parte una simile strategia non consentiva di aumentare la resa per persona a un livello tale da evitare carestie e lunghi periodi di carenza di cibo, e un aumento di intensità rispetto all'utilizzo di animali da tiro si traduceva in una maggiore superficie destinata al nutrimento degli stess; in assenza di limitazioni si creava, alla lunga, una condizione insostenibile come per il caso dell'agricoltura americana dei primi anni del '900 (tema appronfondito in seguito su questo elaborato). Solo con l'avvento dei combustibili fossili è stato possibili svincolarsi da queste dinamiche e sostenere sia un aumento di popolazione che un aumento dell'apporto nutritivo per abitante: questo grazie alla meccanizzazione, l'utilizzo sistematico di fertilizzanti, quindi un maggiore input energetico. Le prime popolazioni a passare a questo metodo saranno gli inglesi e gli americani alle soglie del XIX secolo [4].
L'utilizzo dei combustibili fossili ha svolto un ruolo fondamentale nel passaggio dalla civiltà preindustriale a quella moderna. Un tale passaggio è stato possibile per una convergenza di fattori che hanno reso maturi i tempi in era preindustriale così da sfruttare una nuova forma energetica. Anche in questo caso, come nel passaggio dai metodi di caccia e raccolta all'agricoltura sedentaria, si è verificato un cambiamento su larga scala, dalla sfera sociale a quella individuale. Questo non sarebbe stato possibile se non con la nascita degli stati nazionali centralizzati, che potevano disporre di risorse e controllo in un modo che fino al XVI secolo non era pensabile. Gli anni della grande corsa al colonialismo, della conquista dei nuovi mondi, dell'esaltazione del primato della cultura occidentale che porterà alla conquista da parte dei grandi imperi europei della maggior parte delle terre emerse e annesse risorse, sfociando in seguito nella Grande Guerra: l'Impero Britannico nel 1920 dominava circa 458 milioni di persone, ovvero un quinto della popolazione mondiale, e copriva un quarto della superficie terrestre. Si può notare, analizzando il grafico in figura 2, come questo periodo coincida con l'ingresso prepotente del carbone tra le risorse più utilizzate a partire dal 1700 e come successivamente queso percorso sia proseguito con gli idrocarburi in modo analogo [10].
Le conseguenze del colonialismo sopravvivono ancora oggi: nel 1900 con solo il 20% della popolazione mondiale l'occidente (UE e Nord America) consumava attorno al 95% dei combustibili fossili. Durante il XX secolo la domanda di energia globale cresce attorno alle 15 volte, diminuendo la percentuale a carico dei paesi occidentali; nonostante ciò, con meno del 15% della popolazione mondiale questi consumano

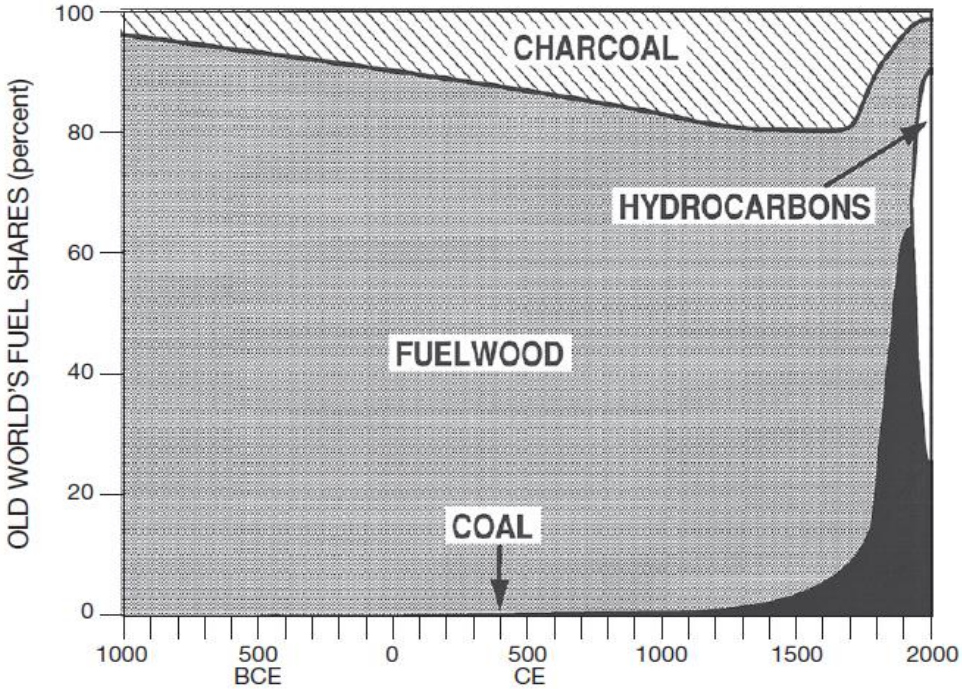


Figura 2 Distribuzione percentuale dell'utilizzo dei combustibili più utilizzati dal 1000 a. C. [4]

il 50% di tutta l'energia primaria ad uso commerciale. I paesi occidentali rimarrano i principali consumatori di combustibili ed elettricità in termini pro capite mantenendone la leadership fino ai giorni nostri, nonostante il rapido sviluppo della Cina. Nonostante questa sia diventata il primo consumatore di energia nel 2010, consumando il 32% in più rispetto agli Stati Uniti nel 2015, il suo consumo pro capite non va oltre a un terzo rispetto ad essi [4].
Osservando il grafico in figura 2 la prima cosa che balza agli occhi è quanto sia stato breve in termini di tempo il passaggio tra legno e carbone, dopo millenni trascorsi ad usare il legno come preponderante risorsa energetica. Il carbone gioca un ruolo fondamentale per il passaggio da un'economia a bassa intensità energetica a una ad alta intensità: la disponibilità di una risorsa con maggiore densità energetica accompagnata da scoperte quali la *macchina a vapore*[4] permette un'evoluzione della dicotomia tecnologia-*motore primo*[5] (che verrà approfondita anche in seguito in modo specifico). Questo significa che la disponibiltà di una fonte ad alta intensità energetica permise la sostituzione delle fonti precedentemente adottate e uno sviluppo rispetto alle potenzialità in termini tecnologici su tutti i piani: nel campo dei trasporti, metalmeccanico, industriale, bellico, ponendo le basi di una società che da questo momento in poi conoscerà uno sviluppo industriale senza precedenti, grazie a tanta disponibilità di energia a basso "costo".
Le società preindustriali sfruttavano principalmente l'energia sprigionata dal sole nelle sue varie forme, covertendo solo una piccola frazione in termini di lavoro utile rispetto all'energia radiante in ingresso. Le civiltà moderne estraggono invece un enorme quantitativo di combustibili fossili in una scala di tempo infinitamente minore rispetto a quella necessaria per il rinnovamento di tali fonti: questo trend iniziato col carbone non si arresta ma anzi si accentua nella corsa successiva agli idrocarburi. Mentre nel 1800 il carbone copriva il 20% dei fabbisogni energetici e il legno un abbondante 60%, nel 1900 le percentuali si invertono: un secolo dopo sono gli idrocarburi a coprire più della metà del fabbisogno, con una percentuale di carbone poco sopra il 20% rispetto ai consumi totali. In termini assoluti l'estrazione del carbone cresce di un fattore 100, da 10 Mt a 1 Gt tra il 1810 e il 1910, raggiungendo 1.53 Gt nel 1950, 4.7 Gt nel 2000 e 8.25 Gt nel 2015. L'estrazione di olio cresce di 3˙000 volte dagli anni '80 dell'800 al 1988, passanndo da 10 Mt a 30 Gt. La crescita prosegue al 2000 con 3.6 Gt passando a 4.4 nel 2015. Stesso discorso vale per il gas naturale: la produzione dello stesso evolve da poco meno di 2 Gm^3 a 2 Tm^3 da fine '800 al 1991, crescendo di 1˙000 volte, per passare a 2.4 Tm^3 nel 2000 a 3.5 Tm^3 nel 2015. In termini aggregati nel XX secolo l'estrazione di combustibili fossili nel mondo cresce di 14 volte [4].
Secondo le ricostruzioni di Smil [4] riguardo le transizioni di energia, il carbone rimpiazzando la legna come fonte primaria controlla il 5% del mercato globale attorno al 1840, il 10% nel 1855, il 15% nel 1865, il 20% nel 1870, il 25% nel 1875, il 33% nel 1885, il 40% nel 1895 e il 50% nel 1900. La sequenza di anni necessaria al raggiungimento di queste tappe fu 15-20-35-45-55-60. L'intervallo necessario al petrolio per operare la sostituzione al carbone, col 5% di copertura del fabbisogno raggiunta nel 1915 è virtualmente identica: 15-20-35-40-50-60 (senza mai raggiungere il 50%). Il gas naturale raggiunse il 5% nel 1930 e il 25% dopo 55 anni impiegando ben più tempo per conquistare una simile percentuale a differenza di carbone e olio. La progressione analoga di queste tre transizioni globali, che considera un periodo di tempo pari a 2-3 generazioni o 50-75 anni ha dell'eccezionale. Si devono considerare le

[4] "*La macchina a vapore, a guisa del fuoco, rappresenta una conversione qualitativa, cioè, la conversione dell'energia calorifica in energia motrice. Come il fuoco la macchina a vapore trascina un processo a catena. Con una sola macchina a vapore e un po' di carbone si può estrarre molto carbone e altri minerali per produrre altre macchine a vapore con le quali si possono produrre ancora altre macchine a vapore e così via, purché vi sia sufficiente combustibile e minerali appropriati. Come il dono di Prometeo I, la macchina a vapore mise gli uomini in grado di utilizzare per la prima volta una nuova e più potente fonte di energia motrice, quella dei combustibili fossili. Noi viviamo ancora nell'età di questi combustibili. Ma la straordinaria fortuna, mineralogica, che è cominciata circa duecento anni fa, si avvicina prematuramente alla fine, conseguenza inevitabile dell'impiego stravagante del secondo dono prometeico* [215]." Da "Bioeconomia e degradazione della materia: il destino prometeico della tecnologia umana", Nicholas Georgescu-Roegen.
[5] In questo elaborato il termine motore primo verrà inteso come macchina che provvede l'esercizio di potenza atto a un'operazione, o macchina motrice. Verrà usata questa accezione anche per quanto riguarda l'utilizzo dell'energia umana e animale, oltre che per le macchine motrici "convenzionali" in uso oggi.

difficoltà annesse alle differenze tecniche e tecnologiche necessarie a estrazione, conversione, distribuzione delle diverse materie prime (carbone, petrolio e gas sono in tre stati fisici diversi, con tutte le inevitabili complicazioni che ne derivano) e soprattutto le scale in termini assoluti che comportava il soddisfacimento di tali operazioni: il passaggio dal 10 al 20% del carbone è riferito a un aumento in termini di produzione annua pari a poco meno di 4 EJ (95.54 MTOE) mentre lo stesso salto in termini percentuali rispetto al gas naturale comporta una produzione energetica pari a circa 59 EJ (1˙409 GTOE), superiore di più di un ordine di grandezza. I due fattori essenziali che spiegano queste similitudini nel ritmo caratterizzante le transazioni sono i prerequisiti per un enorme investimento in termini di infrastrutture e l'inerzia di questi enormi sistemi energetici (figura 3 - [4]). Questo non significa che un'altra eventuale transazione debba avvenire con lo stesso ritmo, ma l'inerzia che caratterizza simili sistemi produttivi, tanto massivi e complessi, è molto difficile da alterare. Sicuramente è ancora più improbabile che una simile sostituzione possa avvenire senza l'ausilio dei combustibili fossili, ma è necessario soffermarsi un attimo sulla situazione attuale per poter fare qualche considerazione in più.
Analisi simili sono state effettuate negli anni '70 da Marchetti e Nakicenovic con lo studio di funzioni logistiche atte alla comprensione della dinamica dei sistemi energetici e la sostituzione di una fonte all'altra [11]. Le ipotesi di Marchetti e Nakicenovic al 2040 prevedevano la sostituzione del nucleare da fissione al gas come risorsa primaria e una successiva sostituzione della fissione con tecnologie a fusione o per mezzo di fonti rinnovabili, in particolare tramite energia solare. Secondo queste ipotesi, i due si aspettavano al 2020 un ruolo principale del gas al 60%, il petrolio a circa il 20% sostituito progressivamente dalla fonte nucleare (al 2020 circa al 10% del fabbisogno totale) ipotizzando che la fusione nucleare potesse essere una tecnologia in fase di produzione commerciale ai giorni nostri. Ma questa transizione non si è verificata: la sicurezza degli impianti nucleari è certamente aumentata (i fattori di rischio dai progetti degli anni '60 sono diminuiti almeno di 3 ordini di grandezza), gli investimenti per le fonti rinnovabili in questi anni sono stati ingenti, eppure al 2015 i combustibili fossili continuano a dominare la scena coprendo l'86% del fabbisogno globale di energia primaria, solo il 4% in meno rispetto al 1990. E in questo contesto il solare copre solo lo 0.4% del fabbisogno, l'eolico l'1.2%, la somma delle quali non raggiunge nemmeno il 2% [12].
E anche nell'ottica, per quanto improbabile (un'analisi più approfondita sarà effettuata nel prossimo paragrafo), di poter effettivamente operare la sostituzione energetica in termini di fonti *carbon-free* non va dimenticato quanto le industrie di cemento, acciai, plastiche e ammoniaca dipendano in modo altrettanto spinto dai combustibili fossili, non solo in termini energetici [4].

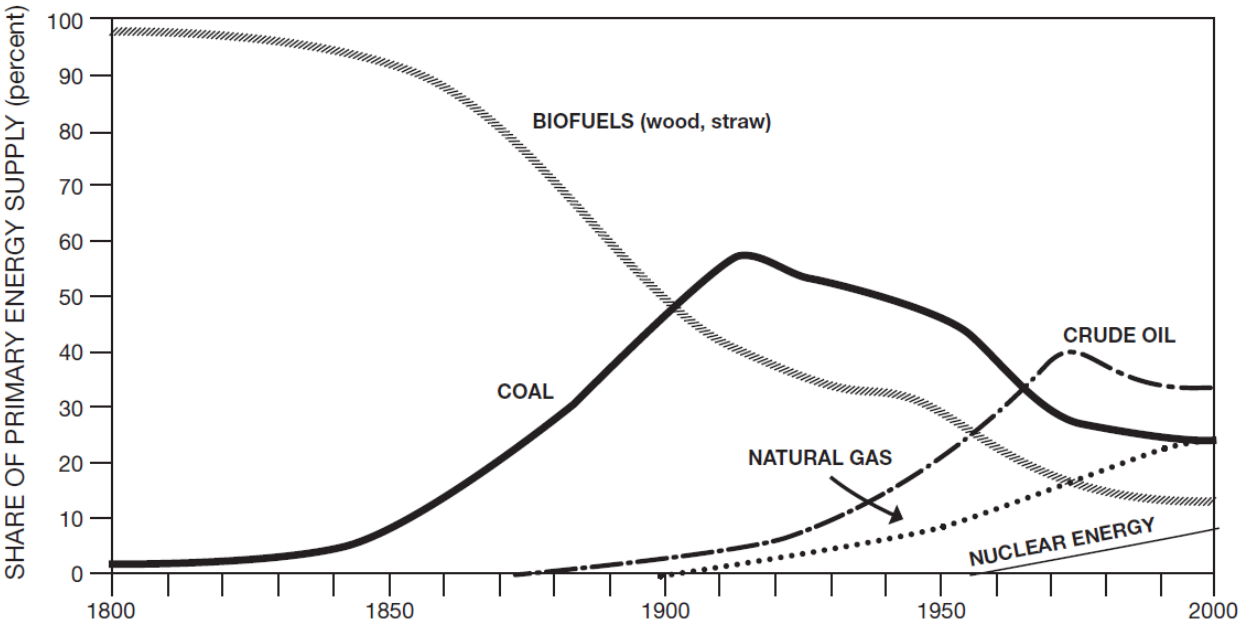


Figura 3 "Onde" di sostituzione dei combustibili dal 1800 [4]

Lo sfruttamento intensivo delle fonti fossili ha portato alla creazione di una società che trasforma un quantitativo di energia senza precedenti: questa trasformazione ha apportato enormi vantaggi in agricoltura in termini di produttività e resa; ha consentito una rapidissima industrializzazione e urbanizzazione, fenomeni strettamente correlati all'espansione del settore dei trasporti e dell'informazione, della comunicazione. Tutti questi fattori hanno permesso un lungo periodo di fortissima crescita in termici economici (il famoso *miracolo economico* accompagnato, in agricoltura, dalla *rivoluzione verde*[6]), in particolare nei paesi industrializzati aumentando in modo importante le aspettative di vita, la fruibilità di un sistema sanitario e producendo un enorme quantitativo di beni e servizi.
Il punto focale è che questo sfruttamento di risorse comporta numerose conseguenze che, nel caso in cui non venissero presi dei provvedimenti, rischiano di mettere in seria difficoltà la civiltà moderna. Ma oltre ai fattori politici e socioeconomici, più difficili da quantificare e non inerenti a questo elaborato, la preoccupazione principale è la degradazione ambientale ormai diffusa a livello globale; questo rapido cambiamento nasce a causa dell'estrazione e la conversione di energia fossile e non, produzione industriale, urbanizzazione spinta, globalizzazione, deforestazione e pratiche improprie in agricoltura e allevamento. Gli effetti cumulati di questi problemi hanno abbondantemente superato il livello locale apportando cambiamenti e instabilità a livello di biosfera in senso globale oltre alle conseguenze (ancora non ben conosciute) derivanti dal riscaldamento climatico.

Per dirla con le parole di Smil:
"*Modern civilization has engineered a veritable explosion of energy use and has extended human control over inanimate energies to previously unthinkable levels. These gains have made it fabulously liberating and admirably constructive—but also uncomfortably constraining, horribly destructive, and, in many ways, self-defeating. All these changes have brought generations of strong economic growth and expectations that this process, fed by incessant innovation, need not end anytime soon—but its continuation is by no means certain* [4]."

Il biologo Eugene Stoermer negli anni '80 coniò il termine *antropocene*, poi ripreso dal premio Nobel per la chimica atmosferica Paul Crutzen, per definire l'epoca geologica in cui l'ambiente terrestre (inteso come l'insieme delle caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche in cui si svolge ed evolve la vita) è fortemente condizionato su scala sia locale che globale dagli effetti dell'azione umana, ovvero la produzione di beni e servizi richiesti e sfruttati dalla società moderna [13].

[6] La *Rivoluzione Verde*, *Green Revolution* o *Terza Rivoluzione Agricola* avviene dopo la seconda guerra mondiale e punta a una diffusa ditribuzione di macchinari e input tecnologici così da aumentare le rese agricole. Questo tema sarà largamente approfondito nei prossimi capitoli (Paragrafo 2.2).

1.3 L'energia tra presente e futuro

Si focalizza ora l'attenzione sui consumi energetici in tempi recenti: per quantificarli solitamente si ricorre al TPES (Total Primary Energy Supply) solitamente espresso in tonnellate di olio equivalente (TOE). Nel grafico a torta in figura 4 è possibile apprezzare i consumi energetici globali risalenti al 2015 suddivisi per fonte primaria. Come affermato precedentemente, più dell'80% dell'energia consumata deriva da fonti fossili, in cui il petrolio primeggia col 31,7%. Oltre alle fonti fossili coprono un ruolo non trascurabile l'energia nucleare e l'idroelettrico, sfruttati per la produzione di energia elettrica, e la biomassa, perlopiù adoperata per soddisfare fabbisogni termici e nei paesi del II e III mondo.
Ad oggi molti i paesi sviluppati hanno creato delle politiche comuni atte a ridurre la dipendenza dai consumi energetici dai combustibili fossili. La combustione infatti causa delle problematiche legate alle emissioni di gas serra in atmosfera: lo scopo è cercare di minimizzare per quanto possibile l'impatto dei cambiamenti climatici, cercando di non superare dei limiti prestabiliti di concentrazione di CO_2 in atmosfera: l'innalzamento di temperatura oltre ai 2°C a livello globale porterebbe a delle modificazioni nel clima terrestre di difficile previsione. Per questo motivo è stato istituito l'UNFCC (United Nations Framework on Climate Change), un trattato ambientale internazionale prodotto dalla conferenza di Rio nel 1992. Questo prevede attraverso diversi step il tentativo di stabilizzare le concentrazioni di anidride carbonica a un livello tale da prevenire interferenze antropogeniche dannose per il sistema climatico. Così si è redatto il Protocollo di Kyoto (1997) sottoscritto da 192 paesi, valutando dei limiti di soglia rispetto alle emissioni di gas serra in ambiente. A questo accordo ne sono seguiti altri, l'ultimo dei quali tenutosi a Parigi nel 2015.
A tal proposito è stato istituito l'IPCC (International Panel on Climate Change), il cui compito è studiare in modo scientifico gli scenari possibili sul futuro incremento della temperatura globale con l'intento di quantificare gli sforzi necessari per rimanere all'interno di vincoli accettabili [14].
Nonostante questo, anche ammesso che le misure di mitigazione volute dagli Accordi di Parigi fossero rispettate [14], secondo quanto scritto nel "World Energy Outlook" del 2015 redatto dall'International Energy Agency (IEA) "*i combustibili fossili rimarrebbero la principale fonte di sfruttamento a fini energetici almeno per i prossimi 40 anni* [15]".
Su queste basi è possibile fare delle proiezioni che, a seconda degli scenari adottati, forniscono delle stime sugli sviluppi futuri riguardo ai consumi di energia. Lo scenario *450s* considerato in figura 5 si basa sulle politiche atte a limitare la temperatura globale al di sotto dei 2° e stabilizzare la concentrazione di gas serra a 450 ppm di CO_2 equivalente; questo esplora le implicazioni dei prezzi più bassi sostenuti sul sistema energetico globale. In realtà sarebbe già virtualmente impossibile rispettare le soglie del 450s

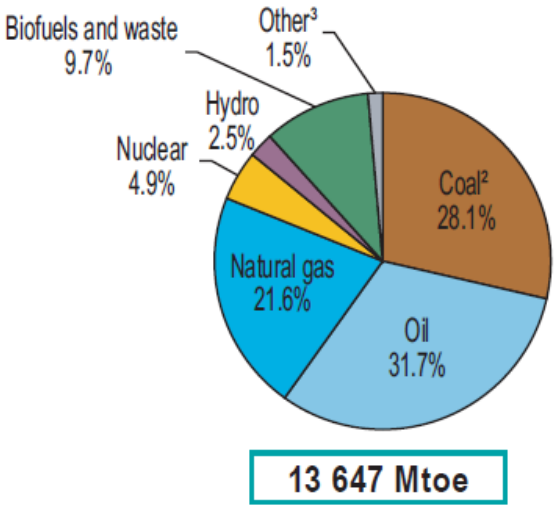


Figura 4 Distribuzione dei consumi energetici per tipo di fonte, IEA 2015 [15]. Nella voce "other" *è considerata l'energia fornita da fonti quali eolico, solare, geotermico ecc.*

viste le concentrazioni al 2017 (oltre i 400 ppm - [16][7]). Il "*New Policies Scenario (NPS)*" tiene conto invece delle misure politiche adottate prima dei trattati di Parigi, quindi fino a luglio 2015. Per stabilire gli andamenti nei consumi energetici nel WEO (World Energy Outlook) è stato assunto che il PIL a livello globale cresca con un trend del 3,5% annuo nel periodo 2013-2040, che significa un aumento pari a due volte e mezzo il PIL attuale; i due terzi di tale crescita sarebbero dovuti all'espansione nel settore dei servizi. La popolazione mondiale nella stessa finestra temporale passerebbe da 7.1 a 9 miliardi, con incremento concentrato in Africa, India, Sud-Est Asiatico e Medio Oriente. Secondo tali proiezioni l'India diventerebbe più popolosa della Cina attorno alla metà della decade 2020-2030 [15].
Si nota in figura 5 come l'industria energetica rimarrebbe, a prescindere dallo scenario, fortemente vincolata ai combustibili fossili, in particolare per quanto riguarda il petrolio. Secondo l'IEA:

"The conclusion, reinforced by projections from our WEO-2015 central scenario, is that the framework for climate action agreed at COP21 needs to provide a procedure which will secure progressively stronger climate commitments over time if the world is to keep to an emissions trajectory consistent with the 2 °C goal. A clear and credible vision of long-term decarbonisation is vital to provide the right signals for investment and to allow a low-carbon, high-efficiency energy sector to be at the core of international efforts to combat climate change [15]*."*

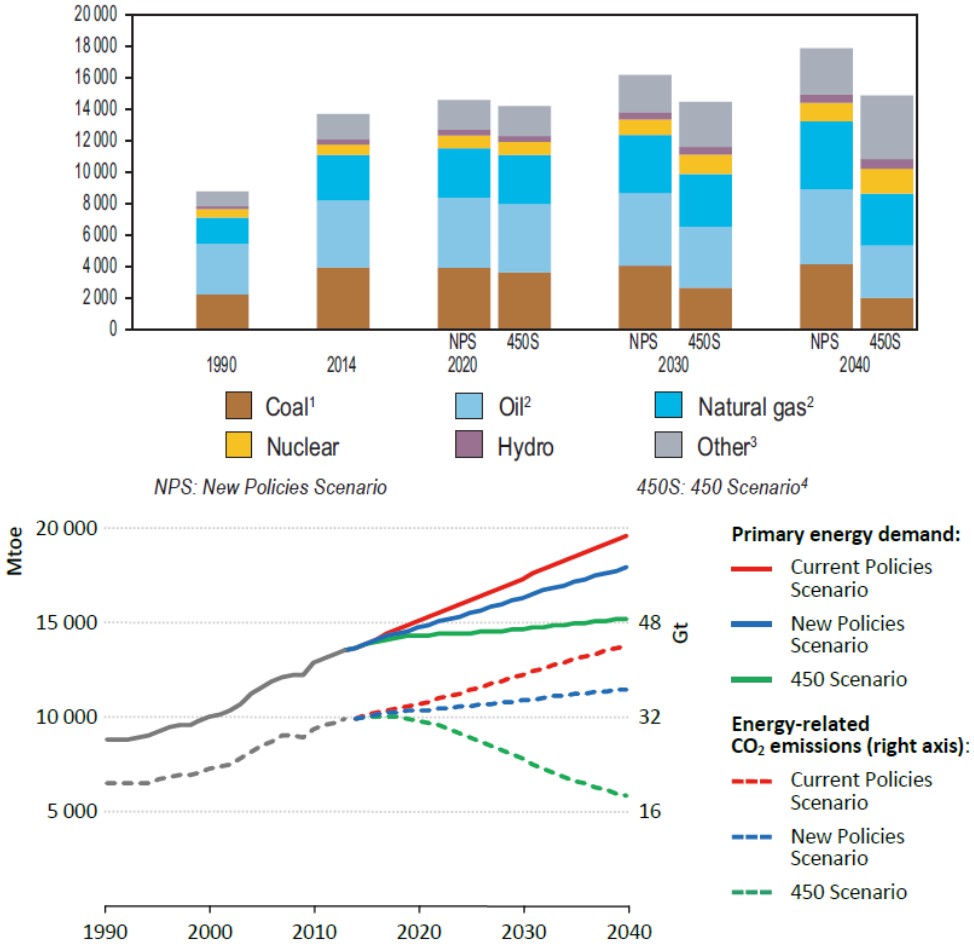


Figura 5 Sopra: Scenari futuri rispetto al consumo di energia primaria nel mondo fino al 2040 [Mtoe]; Sotto: Domanda energetica globale ed emissioni di CO2 per scenario [15]

[7] Nei rapporti IPCC all'aumento di temperatura la variabile correlata è l'aumento di flusso termico al suolo. Dal rapporto del 2013 si potrebbe rimanere all'interno dei 2°C con un RCP (Representative Concentration Pathway) [216] pari a +2.6 W m^{-2} corrispondente qualitativamente allo scenario 450s IEA, mentre lo scenario *Current Policies Scenario* corrisponderebbe a un RCP pari a +8.5 W m^{-2} che corrisponderebbe a un aumento di temperatura pari a 5° C.

Uno dei principali temi riguardante queste fonti è legato alla non rinnovabilità delle stesse su scale di tempo compatibili con l'evoluzione dell'essere umano e quindi per quanto ancora possano essere sfruttate. Tale argomento è controverso e di difficile delucidazione: è noto come non sia possibile fornire dati deterministici. Per prima cosa è fondamentale fare una distinzione tra *riserve* e *risorse*: le prime sono i depositi già identificati e sfruttabili in maniera economicamente competitiva con le tecnologie disponibili, mentre le seconde sono i depositi indicati come probabili ma sfruttabili a costi non competitivi o che ancora non sono stati identificati con certezza. Secondo stime ENEA, adottando l'indicatore R/P (R indica le riserve stimate e P la produzione attuale) [17], la disponibilità di petrolio è stimata in circa 50,6 anni, quella di gas in 52,5 e quella di carbone in 153 [18].
Si introduce quindi il tema della transazione dal punto di vista energetico, nonostante si debba considerare come attualmente le alternative siano adatte principalmente alla produzione di energia elettrica. Analizzando il grafico di figura 6 ci si rende conto di come l'energia elettrica non occupi una parte preponderante dei consumi: al 2013 questa fonte copre il 20% del fabbisogno totale, secondo le stime IEA nello scenario 450s non supererebbe il 25% nel 2040 [19].
La transizione dalle energie fossili a fonti energetiche alternative si presenta come una necessità, ma l'applicabilità di questa opportunità nasconde delle difficoltà di grande scala. Innanzitutto, i principali convertitori energetici dipendono dai combustibili fossili: le turbine a vapore, maggiori responsabili della trasformazione necessaria a produrre l'energia elettrica da fonti fossili e nucleari, producono più del 70% dell'energia elettrica. Il rimanente è prodotto da turbine a gas, idroelettrico e motori a combustione (principalmente diesel). Il motore a combustione interna è il più utilizato motore primo nel settore dei trasporti, le turbine a gas per quanto riguarda l'aviazione. Infine, il motore elettrico di Tesla è il principale responsabie della conversione nella produzione industriale. Ognuno di questi motori è caratterizzato nel mondo moderno da uno stato maturità tecnologica avanzato, col maggior salto di miglioramento in termini di efficienza termodinamica avvenuto già nei primi decenni dopo la comparsa di questi motori [20]; anche nelle migliori delle ipotesi quindi non sono possibili aumenti di efficienza importanti, tenendo sempre in conto i limiti termodinamici. Un'eventuale conversione alle energie rinnovabili dovrebbe trovare il modo di sostituire tutte queste tecnologie necessarie per rendere effettive le transizioni energetiche precedenti, trovandosi di fronte a un problema di scala enorme. Se a questo si accompagna la minor densità di energia che le caratterizza, l'intermittenza e la distribuzione diseguale di livello geografico si capisce come la sfida assuma una connotazione ben più vasta rispetto a una visione meramente energetica.

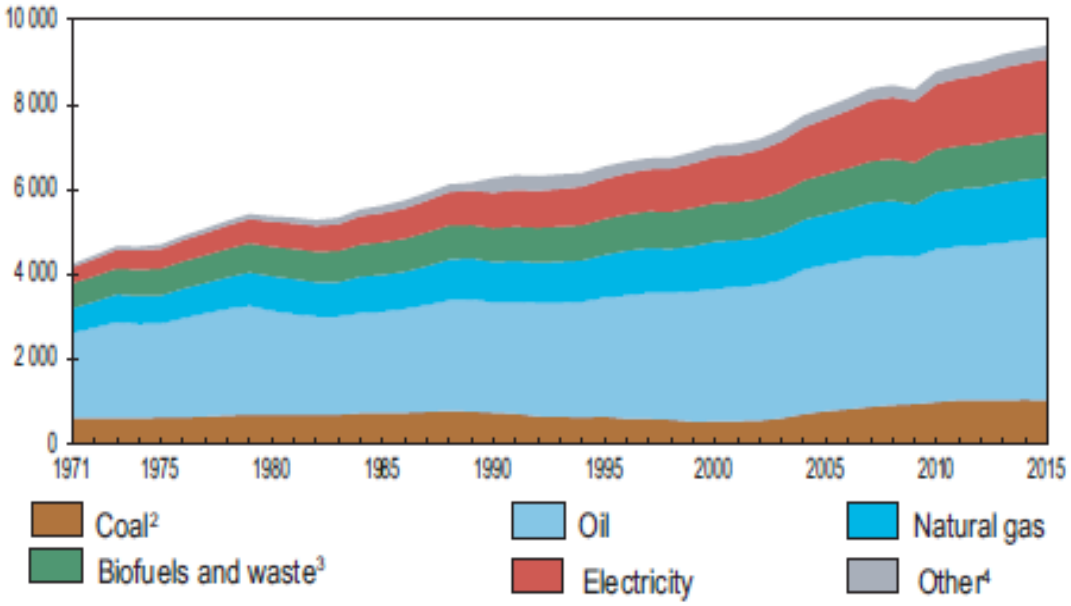


Figura 6 Consumo di energia globale per fonte (Mtoe) [19]

I limiti principali inoltre sono legati alla scala dei consumi attuali della società. L'unico flusso che potrebbe realmente soddisfare i nostri bisogni è quello solare, essendo la radiazione che raggiunge la superficie terrestre di 4 ordini di grandezza superiore ai consumi umani (nel 2015 si aggirano attorno ai 15 TW in termini di potenza). Le altre energie rinnovabili consentirebbero appena di soddisfare i nostri fabbisogni di energia (10 TW per il vento, 5 per le maree, meno di 2 per l'idroelettrico) nell'ottica di fattibilità tecnica ideale, senza considerare le fattibilità economiche ed ecologiche. Secondo il Millennium Ecosystem Assessment del 2005 la maggior parte dei servizi ecosistemici essenziali è già stata compromessa, modificata o ridotta in modo "preoccupante" [21].
Per quanto riguarda il solare, il flusso di radiazione solare medio sulla superficie terrestre è di circa 170 W m^{-2}. Considerando un'efficienza dei pannelli pari al 30% (valore superiore alla media) la densità di potenza esprimibile da una cella è dell'ordine delle decine di W m^{-2}.
La transizione ai combustibili fossili ha introdotto combustibili con densità di energia superiori, mentre la transizione alle fonti rinnovabili comporterebbe l'opposto: come visibile in figura 7 rimpiazzare le fonti fossili con un sistema di produzione a base solare per quanto concerne il settore residenziale, industriale e dei trasporti comporterebbe gap in termini di densità di potenza di 2 o 3 ordini di grandezza [5] [20] [22]. In termini esemplificativi prendendo come esempio un'area di 80 km^2 pari a quella di Boston, si considera come questa città usufruisca di un flusso in termini di potenza pari a 2.4 GW. Per rendere disponibile una tale potenza attraverso il fotovoltaico sarebbe necessaria approssimativamente un'area pari a quella occupata dalla città stessa [23].

La fonte che più si avvicina ai combustibili fossili come intensità energetica e continuità di carico ed è disponibile in termini tecnologici odierni è sicuramente l'energia nucleare da fissione.
Però è difficile che l'interesse verso questa tecnologia possa crescere al punto da rappresentare una soluzione netta: un cambio di rotta pretenderebbe un intenso sforzo a livello internazionale e un tale sforzo, dopo gli eventi di Cernobyl aggravati dall'episodio di Fukushima sembra altamente improbabile. In questo senso l'Europa viaggia in direzione diametralmente opposta, avendo intrapreso un percorso che va verso la dismissione o non sostituzione degli impianti esistenti nella maggior parte dei paesi

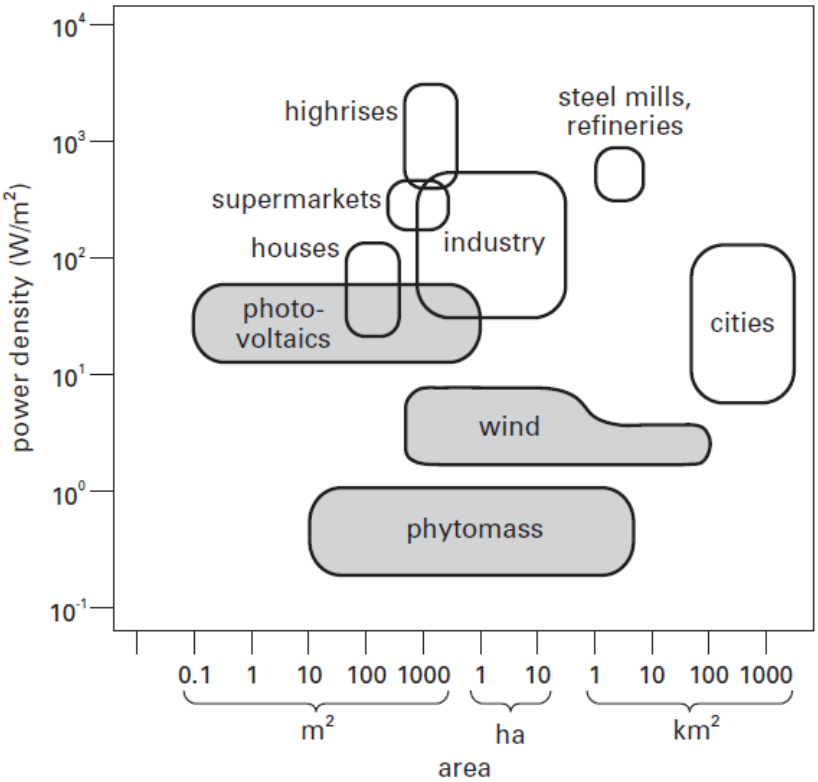


Figura 7 Mancanza di intersezione tra densità di potenza resa disponibile da fonti rinnovabili e necessaria per gli usi convenzionali odierni [5].

membri. Anche dal punto di vista della ricerca l'interesse verso questa tecnologia è fortemente diminuito in Europa (spostatosi verso la fusione), a differenza di India, Cina, Russia e altri paesi. Al di là della volontà politica ci sono forti problematiche legate all'accettazione sociale sia a livello sociale che individuale (logica del *NIMBY* - Not In My BackYeard).
Un'alternativa futura, sempre legata alla produzione di energia elettrica sembra essere offerta dalla fusione nucleare. Per questa fonte gli interessi dal punto di vista internazionale sono cospicui e molto si sta investendo. Dopo anni di studi e ricerche sono molteplici gli sforzi per la progettazione di un prototipo che possa fornire energia in modo continuo e intensivo. Grazie agli studi che saranno compiuti in ITER si proseguirà col suo successore, DEMO (DEMOnstrating Fusion Power Reactor), il reattore di ricerca che dovrebbe fungere da trampolino di lancio verso i reattori commerciali. Tale progetto è supervisionato da Eurofusion, consorzio europeo per lo sviluppo dell'energia nucleare [24].
Ma è difficile poter credere che una soluzione possa essere offerta prima di mezzo secolo: saranno necessari ulteriori test una volta costruito DEMO per ragionare rispetto alla fattibilità di un reattore riproducibile a livello industriale: non si parla sicuramente di soluzioni a breve termine.
Si deve considerare che la costruzione ipotetica di centrali di questo tipo richiede l'investimento di grossi capitali e una capacità tecnologica difficilmente disponibile in un paese "non sviluppato", decisamente superiore a quella necessaria per la costruzione di un reattore a fissione, per non parlare di un impianto a carbone, olio o gas.

Tra i fattori che aggravano queste problematiche ci sono da tenere in considerazione anche l'aumento della popolazione mondiale [15] e l'accessibilità all'energia elettrica: nel 2012 più di un miliardo di persone non ne dispongono [25] e il dislivello dei consumi tra paesi del primo, secondo e terzo mondo raggiunge due ordini di grandezza in termini di consumi energetici (un americano consuma dieci volte di più di un cubano, cento volte di più di un nigeriano). Basti pensare come il consumo dovuto all'utilizzo dell'automobile di una famiglia americana per una settimana (che mediamente dispone di due macchine) equivale al consumo di energia primaria annuo di un cittadino indiano mediamente benestante [5]. Dalla figura 8 si nota inoltre che i paesi in cui si prevede la maggior crescita demografica sono quelli con la minor accessibilità all'energia.

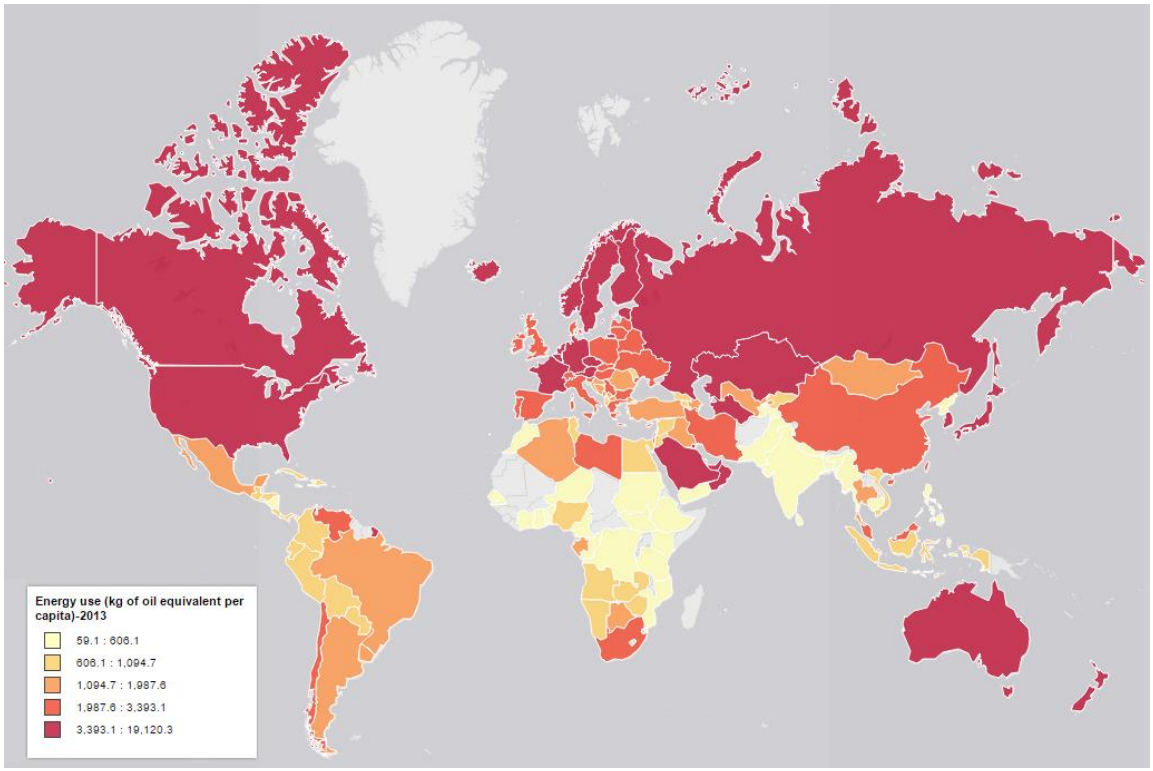


Figura 8 Consumo di energia primaria pro capite per stati al 2013 [35]

Un problema simile si riscontra anche per quanto riguarda lo sfruttamento e l'estrazione delle risorse minerarie, il cui uso è diventato impropugnabile a livello globale, tematica focale per i processi di governance delle risorse a livello internazionale [26]. Per citare una frase di Gordon, professore di geologia all'università di Yale:

"To provide the services enjoyed by the developed nations to all peoples in the developing world, current technologies would require the entire copper and zinc ore resource in the lithosphere and perhaps that of platinum as well." [27]

Una questione cardine è sicuramente quella dell'efficienza energetica. Questa può essere valutata anche come intensità energetica (W/$, J/$), ovvero la quantità di energia utilizzata per unità di prodotto interno lordo (espresso in dollari – figura 9) o, più in generale, effetto utile.
Nel 1900 l'efficienza media globale degli usi energetici non superava il 20%, raggiungendo il 35% nel 1950 e nel 2015 il rendimento medio per la conversione di calore in energia elettrica raggiunge il 50%. Un simile discorso può essere presentato anche per il riscaldamento domestico: mentre il fabbisogno energetico da fonti fossili nel XX secolo aumenta di 14 volte, i progressi in termini di efficienza permettono di consumare 30 volte l'energia consumata nel 1900. Questo significa che i cittadini delle nazioni sviluppate, dove i combustibili fossili dominano la scena già nel 1900, ora possono disporre di una quantità di energia due o tre volte superiore per unità di combustibile rispetto a un secolo prima: le tradizionali energie da biomassa non permettono invece un rendimento superiore all'1% in materia di luminosità e minore del 10% per quanto riguarda il calore[8]. Le realtà del terzo mondo, dove la scena dell'energia è stata dominata fino agli anni '50 da fonti di questo tipo, oggi si consuma da 5 a 10 volte l'energia primaria consumata un secolo fa. In termini pro capite l'uso di energia dal 1900 è aumentato più di otto volte, ma questo dato nasconde forti differenze tra le singole nazioni (figura 9 a destra).
A tal proposito è interessante notare come all'inizio del XXI secolo la quantità di approvvigionamenti disponibili si attesta attorno alle 2'800 kcal (11'721 kJ, 0.28 kg di olio equivalente) pro capite, una quantità più che sufficiente al fabbisogno del singolo essere umano. Nonostante ciò il 12% della popolazione mondiale è in stato di denutrizione a causa del limitato accesso al cibo mentre nei paesi

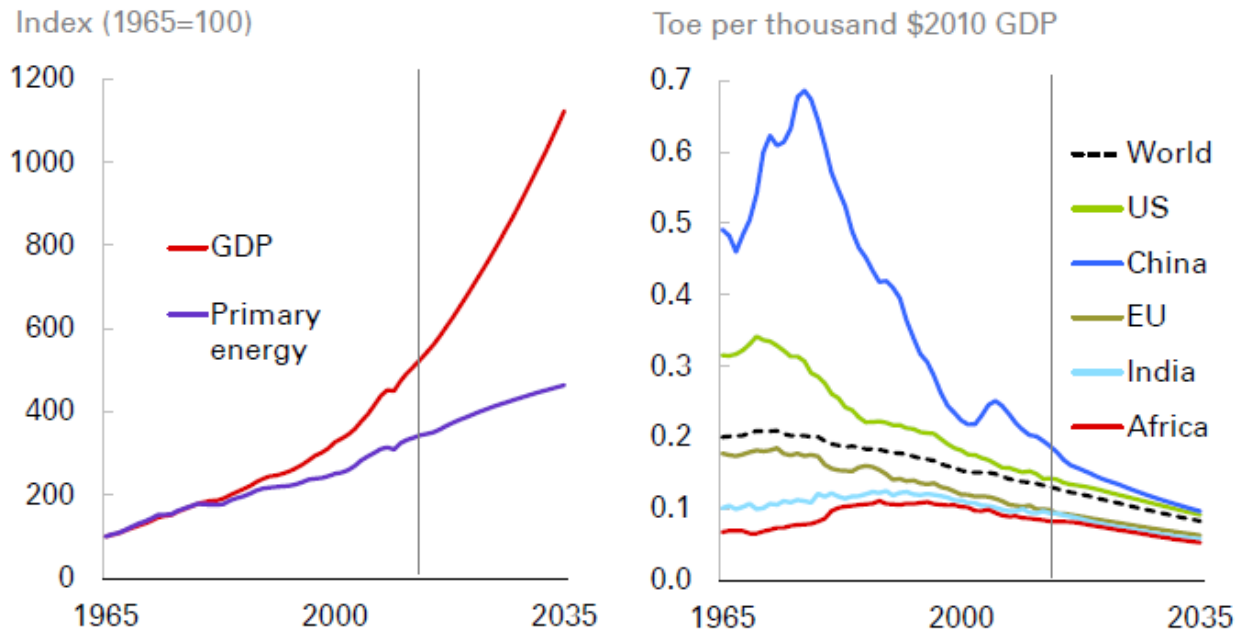


Figura 9 Intensità energetica nel mondo e per alcune regioni (TOE per thousand $2010 GDP) [195]

[8] I bassi rendimenti sono dovuti principalmente allo sfruttamento non commerciale dell'energia, realtà ancora significativa nei paesi sottosviluppati.

ricchi l'affluenza di cibo è per il 75% superiore al fabbisogno effettivo, col risultato di enormi sprechi (30-40% della totalità dei prodotti alimentari al dettaglio) e alti tassi di sovrappeso e obesità [4].
Un ulteriore informazione ricavabile dal grafico è come una maggiore *efficienza* non sia sinonimo di *sufficienza* ovvero, se non riduzione, stazionarietà dei consumi. Considerazioni simili sono trattate a livello teorico e più economico nel paradosso di Jevons [28], il quale afferma che l'aumento di efficienza energetica abbassa il prezzo dei servizi energetici aumentandone l'accessibilità e quindi il consumo complessivo. Questo viene detto anche *effetto rebound*: si consuma in modo sempre più efficiente sempre più energia. L'importanza dell'effetto rebound si stima attorno al 10-30% per servizi energetici come riscaldamento e raffreddamento, illuminazione e trasporto. Non c'è dubbio quindi che i *risparmi relativi*, quali ad esempio quelli relativi alla figura di cui sopra, sono spesso accompagnati da un *aumento* dei consumi in termini *assoluti*, come del resto si nota dalla figura medesima nel confronto tra PIL (GDP) e consumo di energia primaria.
L'esempio più eclatante è quello dell'efficienza luminosa: in termini di efficienza le candele si attestano tra lo 0.01 e lo 0.04% mentre le luci a fluorescenza gungono ad efficienze dell'ordine del 10% dopo la seconda guerra mondiale [4], mentre l'utilizzo di questa tecnologia è aumentato in maniera esponenziale (di 5 ordini di grandezza in Inghilterra dal 1700 [29]).

Le conseguenze di questo massiccio utilizzo di energia diventano chiare nel momento in cui si va ad approfondire l'analisi in termini biologici, oltre che energetici. La specie umana vive in un una realtà nella quale questi aspetti sono una componente fondamentale per quanto riguarda il soddisfacimento dei bisogni primari, in primis per quanto riguarda l'agricoltura e quindi l'approvvigionamento di cibo e delle risorse primarie, non di meno per tutte le operazioni svolte da organismi biologici necessarie per la nostra sopravvivenza (fotosintesi, ciclo dell'acqua, maree, cicli di carbonio e azoto ecc).
Nell'articolo "Energy budget of the biosphere and civilization: Rethinking environmental security of global renewable and non-renewable resources" [30] gli autori effettuano un bilancio dell'energia consumata per scopi antropici comparandola con quella utilizzata dall'ecosistema terrestre per soddisfare le proprie esigenze biotiche. L'approccio attuale tende a un consumo "pulito" di energia, senza però considerare che la stabilità ambientale è controllata a livello locale e globale dal funzionamento di ecosistemi naturali esistenti nelle terre emerse e negli oceani: ad oggi la pressione antropica negli ecosistemi non permette una mitigazione efficace se non riducendo considerevolmente i consumi *a prescindere dal tipo di fonte utilizzata.*
Il paradigma convenzionale energia/ambiente non tiene conto del grado con il quale l'ambiente sia controllato dalla biosfera globale, che sicuramente supera di diversi ordini di grandezza l'influenza della civiltà moderna. Il problema sorge nel momento in cui il disturbo antropico diventa rilevante per gli equilibri globali: negli ultimi 50 anni gli esseri umani hanno modificato gli ecosistemi più rapidamente che in qualsiasi altro periodo della storia umana, soprattutto per soddisfare la rapida crescita di richiesta di cibo, acqua, legname, fibre, carburante e i vari beni di consumo, il che ha comportato a una sostanziale e diffusa perdita *irreversibile* nella diversità delle forme di vita esistenti sulla Terra: ad oggi si parla persino di una sesta estinzione di massa [31]: approssimativamente il 60% dei servizi ecosistemici sono in uno stato di degrado per la quale non possono assolvere le funzioni utili all'uomo (disponibilità di acqua potabile, qualità dell'aria, pesca, regolazione del clima a livello locale, rischio di eventi climatici non comuni, parassiti) e molte evidenze dimostrano che sono sostanziali e la gravità tenda a crescere [30]. Secondo Barnosky et al. il tasso di estinzione delle specie viventi in data odierna è maggiore di qualsiasi altra estinzione di massa precedente, compresa la più catastorifca verificatosi nel Pleistocene [32], con i relativi problemi oltre che di perdita di biodiversità, anche di alterazione, distribuzione, composizione e abbondanza della stessa (figura 10 - [33]).
Molti di tali ecosistemi si sono degradati a causa dell'aumento del fabbisogno di beni e servizi. Due "fattori guida" fondamentali riguardo all'impatto sugli ecosistemi (il cambiamento climatico e il fabbisogno di cibo) sono infatti destinati ad aumentare nelle prossime decadi in modo cospicuo.
Ci sono prove accertate che i cambiamenti portati agli ecosistemi provochino un aumento della probabilità di modificazioni non lineari negli ecosistemi stessi che hanno importanti conseguenze anche per il benessere dell'uomo. Il degrado di tali ecosistemi si abbatte in modo sproporzionato nelle realtà

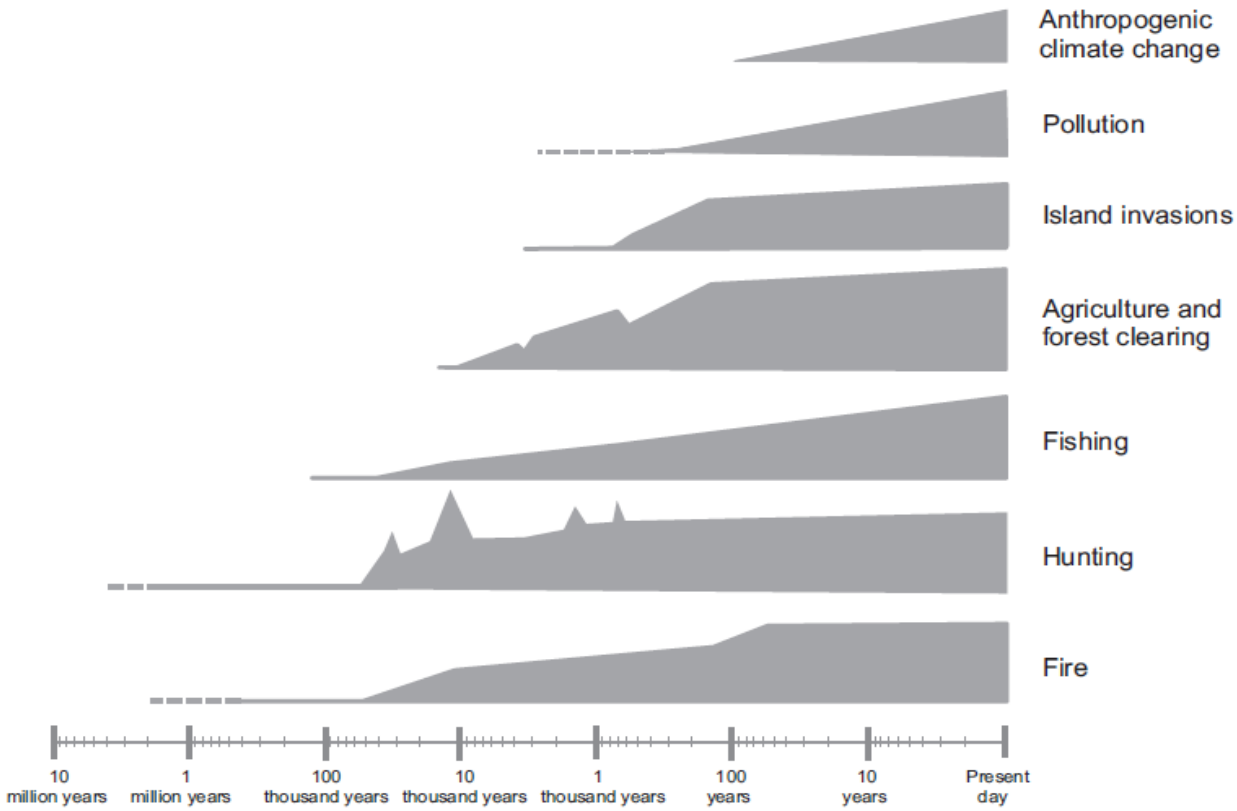


Figura 10 Rappresentazione qualitativa dell'evoluzione temporale dei principali agenti di origine antropica responsabili nel cambiamento di biodiversità: Fuoco, Caccia, Pesca, Agricoltura e Deforestazione, Invasione di Specie aliene sulle isole, Inquinanti, Cambiamenti climatici di origine antropica [33]

con minor disponibilità economica essendo spesso la causa principe di mantenimento o aumento dello stato di povertà e conflitti sociali. Rispetto a tali argomenti è perfettamente aderente il lavoro di Joan Rockstrom che sviluppa dei parametri per quantificare la soglia entro la quale la terra possa rimanere abitabile dall'essere umano [34].

Diversi studi sono stati fatti per capire le grandezze in gioco, di particolare interesse a riguardo è l'articolo "*Exergy Consumption of the Earth*" di G. Q. Chen in cui si analizza il nostro pianeta come un sistema termodinamico aperto verso l'esterno. Chen, anche grazie allo studio di altri autori, effettua un bilancio exergetico della terra confrontando le grandezze ricavate attraverso il consumo di exergia per causa antropica, scoprendo che gli utilizzi derivanti per la gran parte dei combustibili fossili sono dello stesso ordine di grandezza dei consumi per il mantenimento dei processi fondamentali al nostro pianeta (fotosintesi, ciclo dell'acqua, maree…):

"*An overall exergy budget of the earth system are presented with implication to the problem of global sustainability […].*

For the human society, the main source of exergy is fossil and nuclear fuels, and the products of photosynthesis comprising food, fuels and building timber. The sum of the anthropogenic exergy losses has been evaluated by Szargut (2003) at 13 TW, or by Wall and Gong (2001) at 12TW.

This intensity is already in the order of magnitude of 1% of the global terrestrial exergy consumption in the material earth. Though about 340 times smaller than the global exergy loss, this amount, as is lost near the earth's surface, might be compared with the losses associated with certain processes occurred near the earth's surface, such as the amount of 37 TW for the photosynthesis associated with the ecosphere and 31 TW for the geothermal effect essential for the landscape.

While the global intensities are comparable, local or instant density of anthropogenic exergy impact can be greater than that of natural exergy consumption for some local regions, and anthropogenic impact may dominant some ecosystems over there.

Anthropogenic exergy use is already in the order of magnitude of 1% of the global exergy consumption of the material earth and can be dominant for some terrestrial processes, which provides an essential evidence for illustrating the seriousness of the globally concerned problem of resources, environment and sustainability [35]."

Si arguisce come al di là di effetto serra, riscaldamento globale, inquinamento e via dicendo, sia l'impatto sull'ecosistema il meccanismo principale che provoca dei cambiamenti a livello mondiale, climatici o ambientali che siano. Non è possibile pensare di ridurre l'impatto antropico nell'ecosistema terrestre senza diminuire il consumo di energia sfruttato dalla civiltà odierna [36].
Tale affermazione persiste a prescindere dall' inquinamento o dall'aumento della concentrazione di anidride carbonica e si dovrebbero sviluppare analisi scientifiche sui meccanismi influenzanti la stabilità della biosfera, dei biomi e i possibili rimedi attuabili, non solo in termini di consumo energetico e di risorse.
In assenza di ciò, il tentativo di trovare fonti alternative che possano sostenere l'attuale livello di consumi (nella migliore delle ipotesi, maggiore osservando le proiezioni dei grafici in figura 5 e 9) alimenta una logica senza uscita che non farebbe altro che aggravare una situazione già in piena fase irreversibile, con un'ovvia perdita della maggior parte dei servizi ecosistemici di cui l'umanità è dipendente in modo imprescindibile [30].

Per la maggior parte del tempo il modello occidentale moderno ha drammaticamente sottostimato la componente naturale della biosfera considerandola in modo prettamente primitivo: come mezzo di consumo, di cibo, materiali strutturali, piaceri di svariato genere.
Un tale atteggiamento, incoraggiato dalla mentalità del consumo e diversi paradigmi scientifici, ha favorito politiche di sfruttamento intensivo e indiscriminato verso la biosfera, ignorandone totalmente le possibili conseguenze o esternalità.
Come sta diventando ogni giorno più evidente, la componente naturale della biosfera è una realtà incredibilmente complessa e necessaria per il mantenimento dell'abitabilità del pianeta Terra e quindi la sopravvivenza della specie umana.

"Per renderci conto delle difficoltà della situazione presente dell'umanità è sufficiente domandarci se gli Stati Uniti con i loro straordinari mezzi di produzione potranno nutrire una simile popolazione. D'altra parte nei Paesi dove l'industria è fortemente sviluppata il consumo per ogni abitante è cento volte più elevato che in molti altri paesi dove regna la povertà assoluta delle masse.
E per l'apparecchio industriale dei Paesi sviluppati anche il comfort stravagante al quale i loro abitanti si sono abituati, un approvvigionamento di petrolio ampio ma a prezzo contenuto costituisce una questione di vita o di morte.
Niente attualmente ci incoraggia a credere che la lotta per il possesso dell'ultimo barile di petrolio non condurrà ad una guerra nucleare."

Nicholas Georgescu-Roegen in "The Threating Economy"; New York Times, 30 dicembre 1979.

1.4 L'agricoltura

Tutte le forme di vita di questo pianeta vivono attraverso la trasformazione dell'energia solare ed è la fotosintesi a permettere questo miracolo. L'assorbimento della luce solare, le successive reazioni fotochimiche e termochimiche effettuate nei cloroplasti dei batteri fotosintetici e delle piante verdi, rappresentano la più importante conversione energetica sul pianeta [5]; i nostri combustibili, fossili o legnosi, non rappresentano altro che uno "stock" di energia solare immagazzinata nell crosta terrestre. Come già affermato, gli esseri viventi per mantenersi in vita necessitano di un costante flusso energetico: l'energia del sole viene assorbita dagli organismi autotrofi (che sintetizzano energia e biomassa da sostanze inorganiche ad es. piante e alghe) che sono base di energia e nutrienti per erbivori e quindi carnivori (entrambi organismi eterotrofi, che sintetizzano ciè energia e biomassa da altree sostanze organiche). Autotrofi, erbivori e carnivori "nutrono" a loro volta i saprofiti o decompositori, che restituiscono i nutrienti minerali agli autotrofi i quali tramite fotosintesi chiudono il ciclo rendendolo circolare [2]. L'eliminazione o l'impossibilità di svolgere le proprie "mansioni" da parte degli autotrofi determinerebbe quindi l'interruzione del flusso energetico agli altri esseri viventi impedendone la sopravvivenza.
In figura 11 si può apprezzare il bilancio di energia nella biosfera: è possibile quantificare l'energia associata alla fotosintesi, pari a 63 TW, contro i quasi 16 TW consumati globalmente dalle civiltà umane

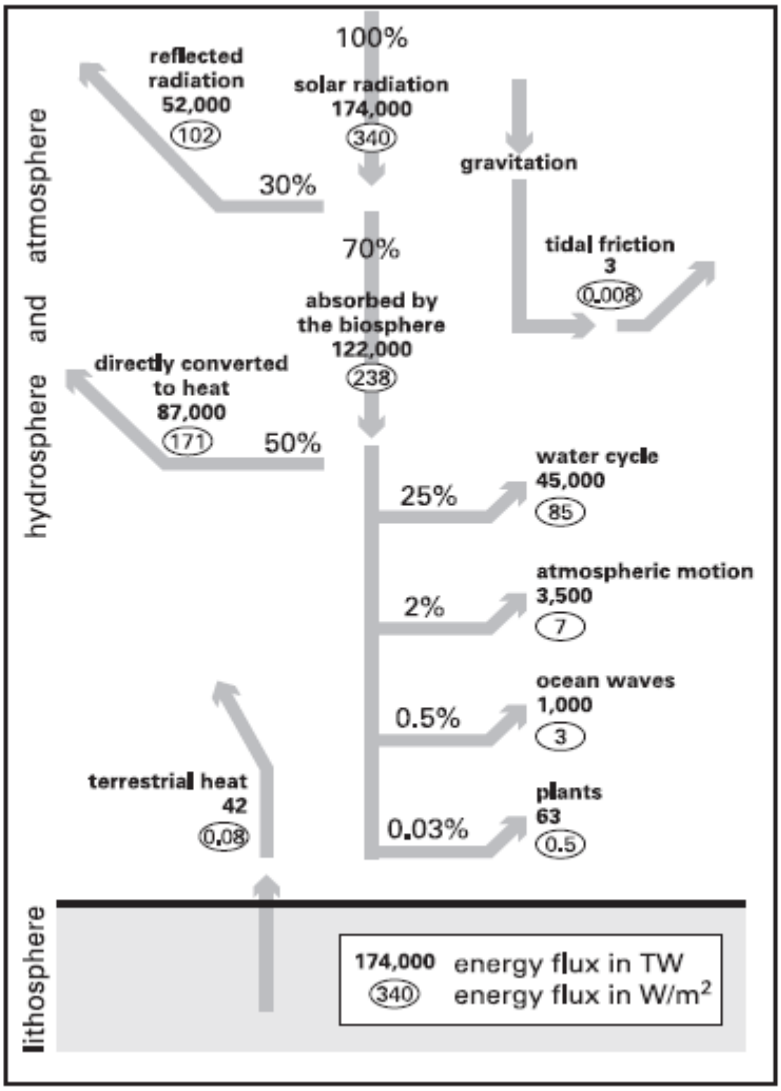


Figura 11 Flussi di energia nella biosfera [5]

nel 2011[9] [2]. La ricchezza e la diversità di tutti gli organismi eterotrofi, la complessità della civiltà umana, sono quindi energizzate in modo praticamente esclusivo dalla fotosintesi.
Il quantitativo di sussidi in termini energetici apportati dall'essere umano per la produzione di biomassa, confrontato con l'input in termini di energia solare, è praticamente insignificante: un campo di di mais coltivato in modo intensivo può percepire fino a 30 GJ ha^{-1} y^{-1} (716 kg di olio equivalente) in termini di energia diretta e indiretta mentre l'energia solare che giunge nei campi nei 150 giorni compresi tra la semina e a raccolta ammonta a circa 30 TJ ha^{-1} (716 TOE), una differenza di tre ordini di grandezza [37].
Per contributi energetici *diretti* si intendono quelli relativi allo sfruttamento di oli e combustibili per macchinari, riscaldamento, luci; per *indiretti* si intende principalmente la produzione di pesticidi e fertilizzanti.
Ma per apprezzare i consumi del settore agricolo ai giorni nostri è bene effettuare una breve analisi di come siano cambiate nel tempo le disponibilità energetiche e i consumi: osservando gli istogrammi in figura 12 si nota come l'uso energetico delle prime civiltà di cacciatori e raccoglitori fosse consumato solamente per cibo e movimento, sui 5-7 GJ pro capite per anno (120-170 kgOE). Le prime civiltà complesse quali egiziani (10-12 GJ pro capite all'anno), cinesi e romani (18 GJ pro capite) introducono l'utilizzo di manufatti, vestiti e trasporti con l'utilizzo di energia tramite vento, combustibili e cibo. Nell'Europa del 1300 ci aggiriamo attorno ai 22 GJ pro capite (525 kgOE) dove l'aumento si vede

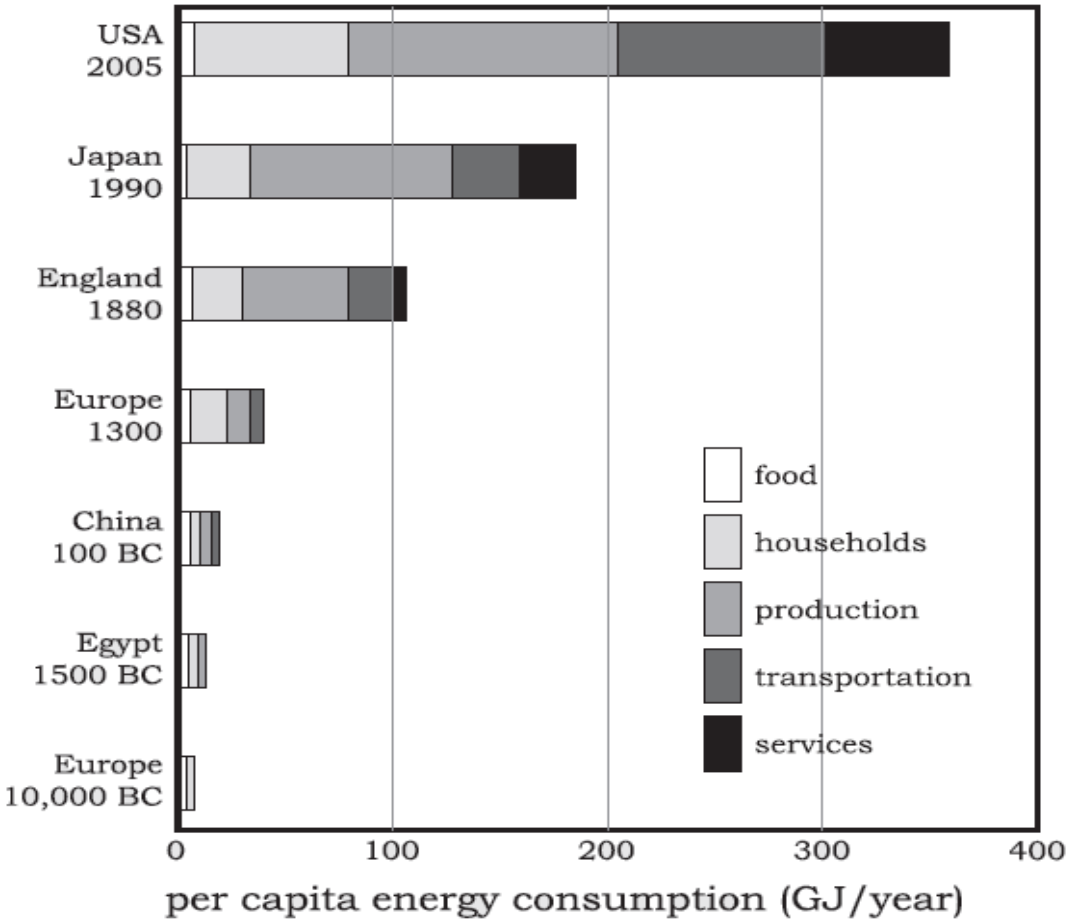


Figura 12 Energia pro capite consumata da diverse nazioni in diverse civiltà [22]

[9] Il dato riferito ai consumi di potenza della società umana varia a seconda delle fonti tra i 14-15 TW negli anni 2000 e i 15-18 TW al 2015. Questo valore viene spesso ottenuto dividendo i consumi di energia annuali per 31.536 x 10^6, il numero di secondi in un anno. I differenti valori sono dovuti a differenti formulazioni dei calcoli e condizioni al contorno, ma per l'analisi qui condotta ciò che è realmente importante è l'ordine di grandezza a cui si attestano, concorde a tutte le fonti.

principalmente per i servizi domestici e la produzione di beni. Da questo momento in poi comincerà il grande divario tra le nazioni industrializzate e i paesi le quali economie rimarrano prevalentemente agricole. Tra il 1810 e il 1920 Inghilterra e Galles schizzano da 60 a 153 GJ pro capite, in Germania da 18 a 86, in Italia da 10 a 22 e negli Stati Uniti da 70 a 150 [4]. Un secolo dopo le nazioni europee consumano più di 150 GJ pro capite (3.6 TOE), gli Stati Uniti oltre i 300 (7.2 TOE). Analizzando per che scopo fosse utilizzata tale energia, mentre nelle società antiche il cibo era il principale energizzante, nell'impero romano cibo e foraggio ammontano al 45% dell'utilizzo di energia totale. Nell'Europa preindustriale questa percentuale si attesta mediamente sul 30% fino al 1820 scendendo al 10% nel 1900 in Inghilterra e Germania. Dal 1960 il consumo di cibo e foraggi diminuisce al 2-3% attestandosi a questa quantità in tutte le realtà industrializzate [4]; a livello mondiale nel 2009 il consumo di energia primaria relativo al settore agricolo si attesta al 2.07%. Questa percentuale sempre nel 2009 è pari al 2,16% in Unione Europea, all'1.98% in Africa, all'1.07% per il Nord America e al 2.25% in Asia [38]: un valore abbastanza simile tra i vari continenti. Andando a valutare il settore del cibo nel suo complesso (coltivazione, trasformazione, imballaggio e trasporto) questo valore aumenta grandemente, toccando il 17% dell'energia primaria lorda in UE [39].
Secondo i dati di Stout [40] dal 1940 al 1970 gli input energetici nel settore del cibo triplicano passando da 3 a 9 EJ (da 71.7 MTOE a 215) mentre l'energia consumata in termini di cibo approssimativamente raddoppia da 0.8 a 1.6 EJ (da 19.1 a 38.2 MTOE).
Negli Stati Uniti dal 1997 al 2002 il consumo di energia dovuto al cibo aumenta del 22.4%, con un aumento pro capite del 16.4% consumando il 12.2% nel 1997 e il 14.4% nel 2002 ovvero circa 363 MTOE.

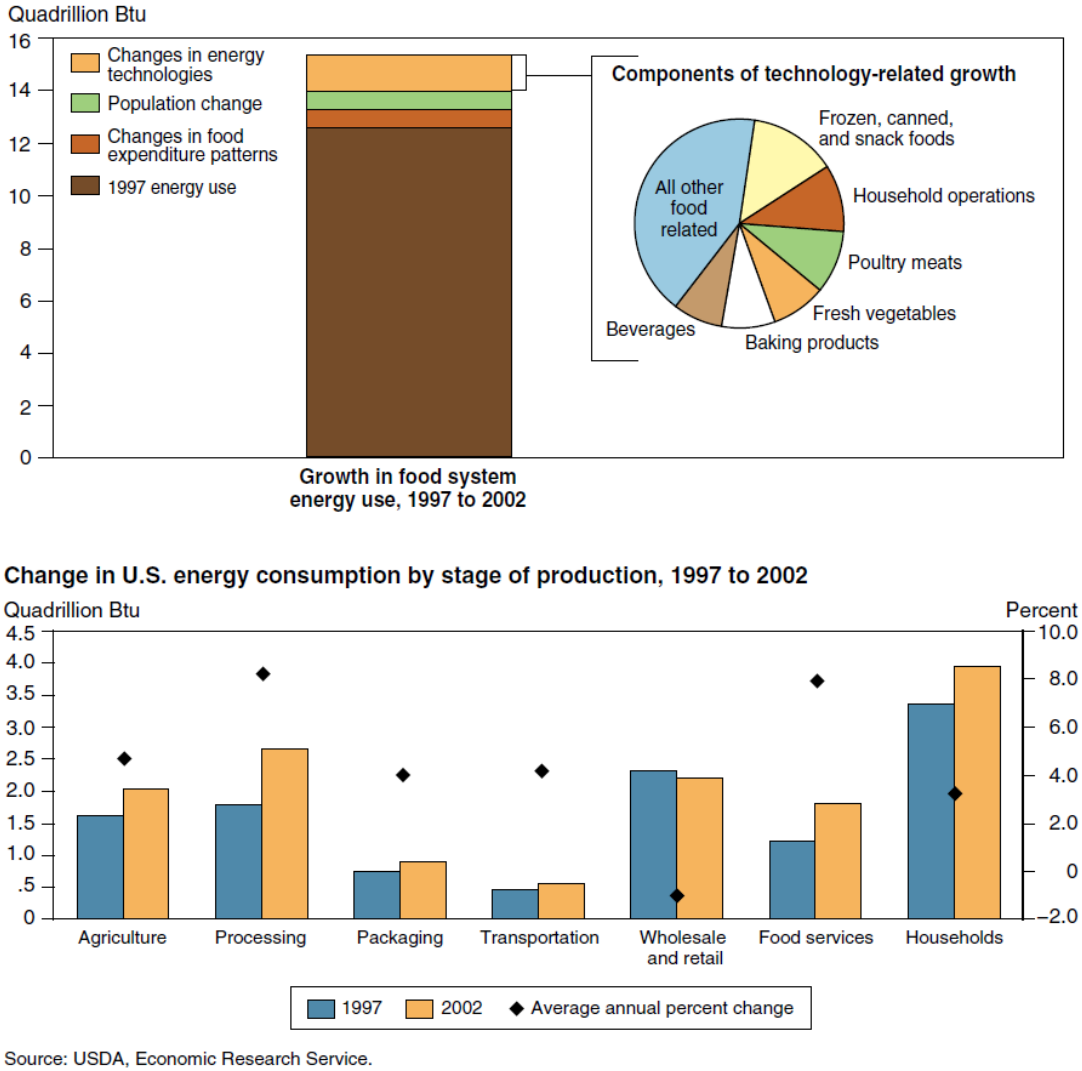


Figura 13 Consumi energetici nel settore di cibo, Stati Uniti [41]

Questi aumenti sono dovuti a uno spostamento del lavoro umano causato da una maggiore disposizione di energia in quasi tutte le categorie di spesa alimentare, la maggiore delle quali è dovuta all'esternalizzazione, da parte di famiglie e stabilimenti alimentari, della preparazione del cibo manuale [41]. Dalla figura 13 si nota anche come il maggior consumo di energia sia dovuto più a nuove tecnologie introdotte che all'aumento di popolazione. Inoltre i settori con la maggiore tendenza all'aumento dei consumi sono quelli di processo e dei servizi alimentari, seguiti dall'agricoltura; si consideri che in Nord America frutta e verdura viaggiano normalmente per 2˙500-4˙000 km e il trasporto internazionale via nave per quanto riguarda le merci edibili è pari a 800 Mt nel 2000, quadruplicato rispetto al 1960. A livello globale l'energia utilizzata nei processi di produzione, distribuzione, vendita all'ingrosso e al dettaglio è circa il doppio rispetto all'energia consumata per agricoltura e allevamento: la preparazione del cibo consuma il 30-50% dell'energia totale usata nella catena alimentare delle nazioni sviluppate [5]. Se è vero che la produzione di cibo è aumentata nel corso del tempo a livello mondiale, non è altrettanto vero che l'efficienza di produzione, intesa come rapporto input/output oppure in termini di sussidi energetici per tonnellata di prodotto, sia aumentata in modo proporzionale. Secondo Pellizzi [42] a livello comunitario dal 1950 al 1990 il rapporto input/output ha subito un sensibile aumento passando da un valore pari a circa 0.4 a uno di 0.9-1, più che raddoppiato (figura 38 capitolo 3). Giungere a valori prossimi a 1 significherebbe un sistema agricolo non autosufficiente. Nonostante il flusso solare sia la componente fondamentale ai fini della produzione agricola, grazie al contributo dei sussidi energetici derivanti principalmente da meccanizzazione e fertilizzanti è stato possibile sostenere una popolazione in continua crescita. Ciò nonostante i rapporti input/output suggeriscono un link diretto tra energia fornita e energia edibile, concetto che in termini assoluti non è corretto in quanto la maggiore fonte di input resta quella solare dovuta alla fotosinetesi: i sussidi eneregetici antropici migliorano l'efficienza di conversione fotosintetica, quindi sarebbe più corretto parlare di influenza "indiretta". Nel 1900 un ettaro poteva nutrire al massimo 1.5 persone, con una dieta limitata in termini di varietà di alimenti; oggi nell'agricoltura moderna questo numero sale a 4 persone per ettaro (che potrebbero essere 6 se i consumi fossero pari a quelli del '900) con delle performance che giungono fino a 15 persone per ettaro in Cina, dove il consumo di carne è molto inferiore e si fa grande uso di fertilizzanti. Ma in termini energetici questo ha richiesto un enorme aumento di sussidi: dal grafico in figura 14 in scala semilogaritmica è evidente come mentre dal 1900 al 2000 l'equivalente energetico dei raccolti sia aumentato di 6.7 volte e la resa di 4.75, l'input energetico sia aumentato di ben 128 volte! Di questi 12.8 EJ totali (circa 300 MTOE), due (15.6%) sono diretti alla produzione e il mantenimento dei macchinari agricoli (trattori, mietitrebbie, sistemi di irrigazione), 5 EJ (40%) per il carburante, altri 5 EJ per estrazione, sintetizzazione e distribuzione dei fertilizzanti, 500 PJ per la produzione di pesticidi ed erbicidi, 300 PJ per costruire i sistemi di irrigazione e fornire l'acqua ai campi [5]. Delle opportune considerazioni sono comunque necessarie: pensare di basare i sistemi colturali solo in termini di rapporti input/output energetici non considera le varietà necessarie alla sopravvivenza umana: in termini di efficienza energetica vorrebbe dire coltivare solo tuberi, che rappresentano la varietà più performante in questi termini; ma queste piante offrono un apporto ben poco significativo di proteine e lipidi e sono molto meno convenienti in termini di conservazione. Questo è il principale motivo per cui le civiltà avanzate si sono sempre basate sui cereali; inoltre i rapporti di energia non tengono in conto che tali input sono mirati oltre che a una maggiore produzione, a una maggiore produttività: la disponibilità energetica nei paesi industrializzati ha permesso di diminuire in modo cospicuo l'apporto di lavoro prettamente svolto dall'uomo e ha supportato un continuo incremento della popolazione riuscendo nel contempo (anche se solo in una parte del mondo) ad aumentare i livelli nutrizionali [5]. Il nocciolo della questione quindi si sposta in un ambito ben più complesso: è meglio conseguire migliori rapporti energetici diminuendo la dipendenza dai combustibili fossili tramite un maggiore utilizzo di lavoro umano o animale oppure spingere ulteriormente verso la direzione dell'agricoltura industrializzata con minori efficienze ma mantenendo la popolazione occupata in campo agricolo al 2-10%? Non ci sono risposte dirette o semplici, ma questo quesito sarà investigato e approfondito più volte nel corso di questo elaborato, presentando quando possibile dei dati relativi all'una o all'altra possibilità.

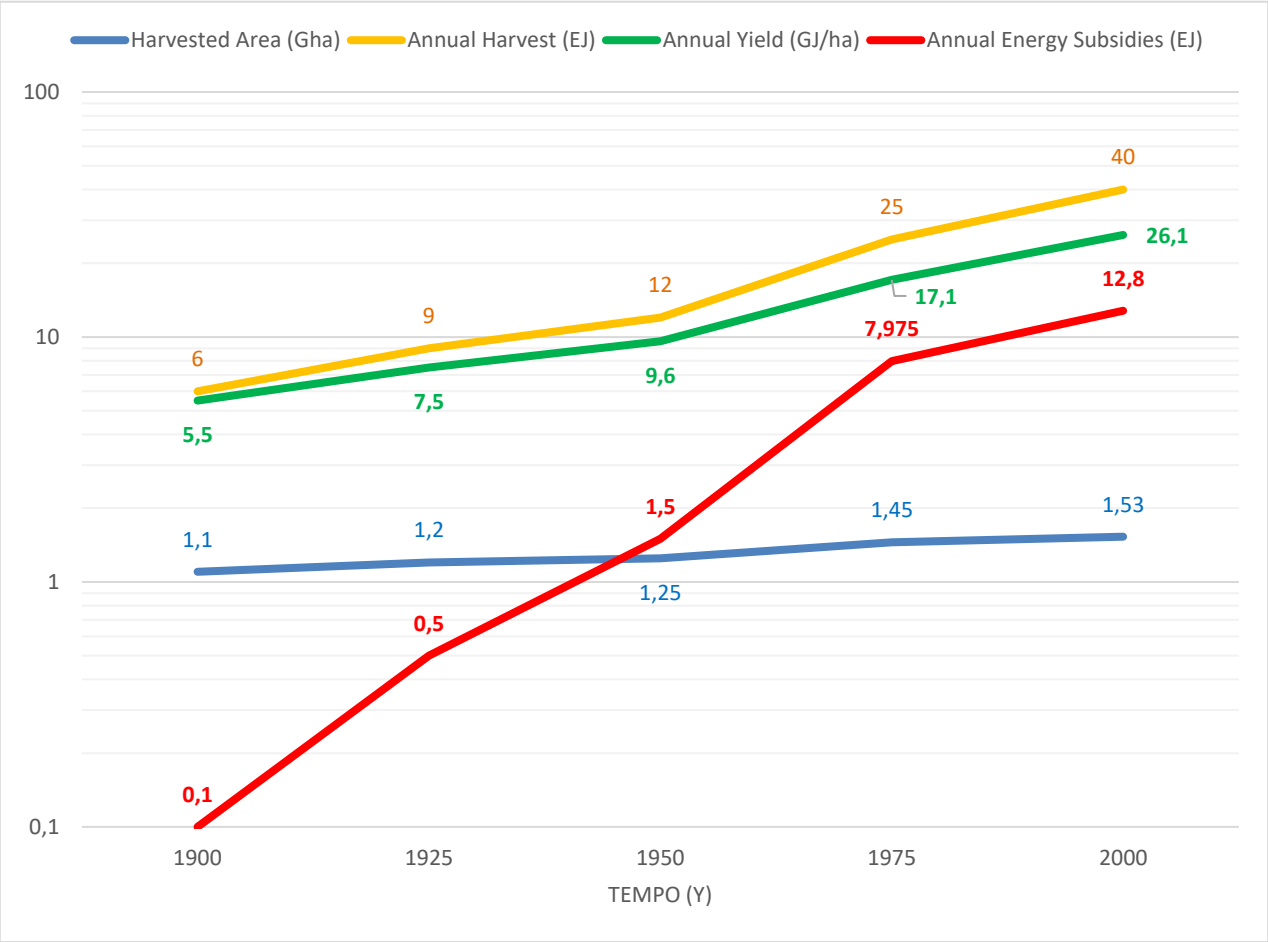


Figura 14 Area di raccolto, Equivalente energetico del raccolto, Sussidi energetici, Popolazione e resa a livello mondiale. Rielaborazione dati Smil [5]

Come visto, in ambito agricolo meccanizzazione e fertilizzanti si spartiscono le maggiori fette dei consumi energetici; mentre la meccanizzazione verrà abbondantemente discussa in seguito nell'elaborato, è opportuno fare un appunto sull'utilizzo dei fertilizzanti che detegono il primato tra gli usi energetici indiretti. In termini di macronutrienti i fertilizzanti reintegrano nel suolo N, P e K: nel 2000 a livello globale mediamente vengono applicati 53 kg/ha di Azoto, 9 kg/ha di fosforo e 12 kg/ha di potassio, con grosse disparità tra paesi sviluppati (in alcune colture cinesi l'applicazione di queste sostanze è dieci volte maggiore) e non sviluppati dove spesso non ne è nemmeno previsto l'utilizzo. La produzione di fertilizzanti inorganici nel 2000 tocca i 5 EJ (119.4 MTOE), poco meno dell'1.5% dei consumi primari globali [5].

Fino al XX secolo l'utilizzo dei fertilizzanti è sempre stato limitato all'ambito organico, il fattore rivoluzionario nella produzione dei fertilizzanti inorganici è rappresentato dalla sintesi di Haber-Bosch nel 1910 (figura 15 - [43]): nel 1913 questo processo, che utilizzava carbon coke di partenza, necessita di 100 GJ/t NH_3; nel 1950 usando gas naturale come base il consumo scende a 50-55 GJ/t NH_3 e grazie all'introduzione di compressori centrifughi e il reforming del vapore (processo che permette la produzione di *syngas* a partire da idrocarburi e vapore acqueo) si giunge ai 27 GJ/t NH_3 nel 2000, un valore prossimo all'energia stechiometrica necessaria alla sintesi dell'ammoniaca pari a 20.8 GJ/t. Nonostante questo gli agricoltori prediligono l'applicazione di composti liquidi o solidi solitamente in forma di urea che contiene una maggior percentuale in termini di azoto (45%). La conversione dell'ammoniaca in urea, l'imballaggio e il trasporto portano il consumo medio di energia a 55 GJ/t: noto che l'uso di questi composti in agricoltura nel 2015 è stato pari a 115 Mt di N, la sintesi dei fertilizzanti

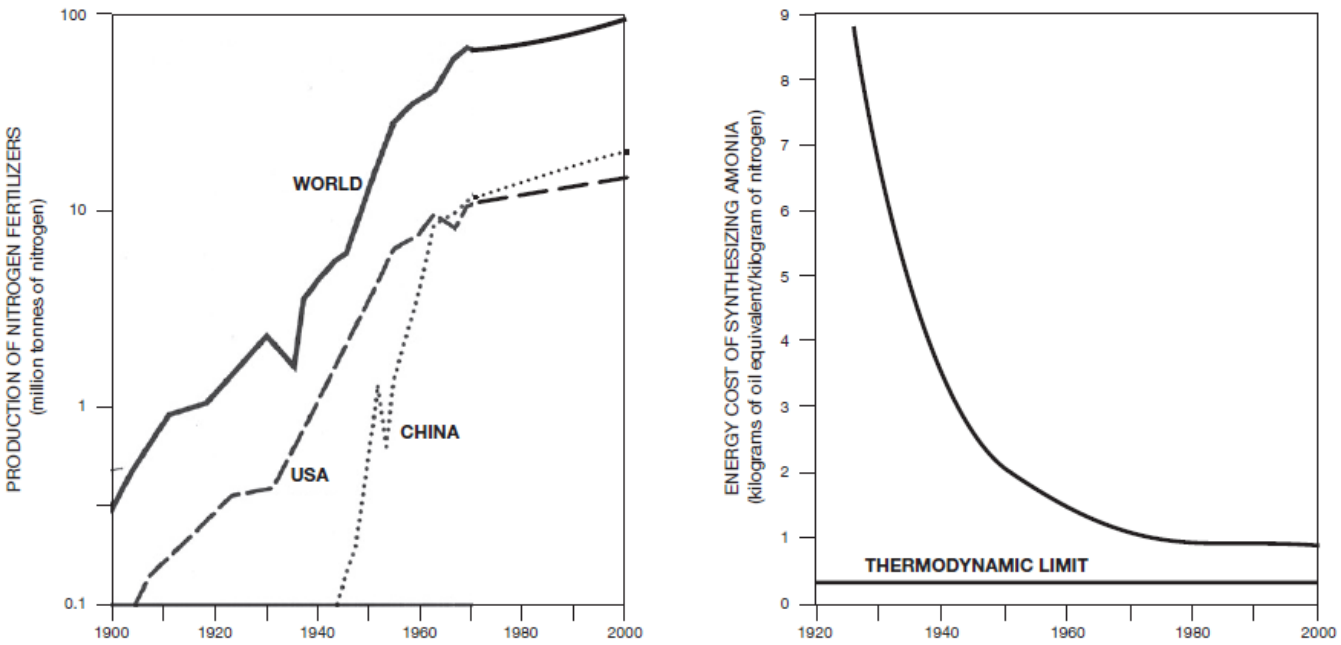


Figura 15 A sinistra, la produzione dei fertilizzanti azotati. A destra, l'evoluzione dei costi energetici relativi alla sintesi dell'ammoniaca [4]

a base azotata consuma sui 6.3 EJ (150 MTOE), circa l'1% del TPES. Dal momento in cui i tre quarti dell'azoto contenuto nelle proteine del cibo proviene dalle coltivazioni vegetali, il 40% del fabbisogno di cibo dipende dal processo di sintesi dell'ammonia di Haber-Bosch. Per quanto riguarda i fertilizzanti a base di fosforo e potassio, questi aumentano il consumo all'incirca del 10% [4]. In accordo coi meccanismi descritti nel paragrafo precedente, l'aumento dell'efficienza di produzione dei fertilizzanti non ha comportato una riduzione nell'utilizzo degli stessi, bensì un aumento costante (seppur con intensità variabile) per tutto il corso del XX secolo; per confronto la curva dell'efficienza nella produzione degli stessi tende a un asintoto dettato dal limite termodinamico caratterizzante il processo.
Per quanto i fertilizzanti permettano un indubitabile miglioramento nelle rese agricole, il largo utilizzo degli stessi va a interferire in modo importante col ciclo dell'azoto: oltre alle 55 Mt/anno di composti azotati, si aggiungono 35-40 Mt/anno per il riciclo organico di colture a carattere leguminoso e 30 Mt/anno dovute agli ossidi di azoto sprigionati da combustioni ad alta temperatura; in termini aggregati si giunge a 150 Mt/anno, praticamente pari al tasso annuale di biofissazione naturale dei batteri[10]. Un eccesso di azoto provoca piogge acide, diminuisce il pH del suolo, causa eutrofizzazione[11] e solleva preoccupazioni rispetto a tematiche quali biodiversità e produttività di aree prative e foreste [5].

Per quanto riguarda i pesticidi si stima che ne vengano utlizzati 3 Mt all'anno (2003), 500˙000 tonnellate dei quali negli Stati Uniti, di 600 differenti tipi. Nonostante tali sforzi gli agenti infestanti distruggono il 37% delle potenziali raccolte, del quale il 13% a causa degli insetti, il 12% per gli agenti patogeni e il 12% dalle gramigne. Nel caso degli Stati Uniti, inoltre, a fronte di un aumento di 10 volte nel loro consumo dal 1945 al 2000, le perdite dovute agli insetti sono aumentate dal 7 al 13%: dimostrazione del fatto che un utilizzo degli stessi non è sinonimo di un miglioramento nella debellazione di tali problematiche. L'adozione di pratiche monoculturali industriali sono un perfetto esempio di questo effetto; il rimpiazzo

[10] Se non per il caso delle piante leguminose, la maggior parte delle piante non è in grado di utilizzare l'azoto libero, che viene reso tale dai meccanismi di azotofissazzione [217]. Questi riducono l'azoto molecolare N2 in azoto ammonico NH3, successivamente disponibile per la formazione di molecole fondamentali come amminoacidi, proteine, vitamine [218]. Per approfondimenti si rimanda a testi specifici di biologia e chimica.
[11] Fenomeno di arricchimento di sostanze nutritive in un dato ambiente, generalmente nitrati e fosfati provenienti da fonti naturali o antropiche, che provoca un aumento di fitoplancton con conseguente carenza di ossigeno rendendo l'ambiente inabitabile da altre specie [219].

di colture rotazionali a mais con colture intensive ha causato un aumento delle perdite a causa di insetti dal 3.5 al 12% a fronte di un aumento nell'utilizzo dei pesticidi di 1˙000 volte: oggi il mais è il maggior usufruente di insetticidi negli Stati Uniti [37].
Le esternalità dovute a questo utilizzo sono numerose: avvelenamento (220˙000 vittime l'anno, 750˙000 malati cronici), cancro, residui nei cibi (fino al 5% del cibo testato nel 1997 negli Stati Uniti conteneva residui oltre al limite di soglia concesso dalla Food and Drug Administration), l'avvelenamento di animali domestici e selvatici e dei prodotti stessi (il 3% dei polli venduti nei supermercati contenevano un contenuto oltre soglia - NAS, 1987), l'eliminazione di predatori naturali e parassiti, una evoluzione e sviluppo della resistenza ai pesticidi da parte di insetti, malattie delle piante e gramigne, tossicità per le api (i meccanismi di impollinazione naturale sono essenziali per almeno un terzo delle colture mondiali e in Cina esistono già i primi "impollinatori umani": le perdite di impollinazione ad oggi ammontano al 10% di campi impollinati per anno, per un costo di 210 milioni di $), contaminazione del suolo e danni provocati a artropodi, vermi, batteri e funghi [44]. Secondo Pimentel tali problemi non sono da prendere alla leggera e necessitano di studi più approfonditi nel più breve tempo possibile, in quanto fin'ora le pubblicazioni rispetto ad argomenti tanto complessi e diffusi non sono sufficienti a fornire dei dati che permettano delle conclusioni più approfondite e chiare.

Tutte le tecnologie di cui abbiamo discusso fin'ora dipendono largamente dall'utilizzo dei combustibili fossili, sia per quanto riguarda l'energizzazione delle lavorazioni in sito, che in fase di produzione, che come materia prima per usi indiretti; ad oggi la situazione si aggrava ulteriormente nell'ottica di utilizzo di pratiche agricolturali di precisione. Come verrà discusso anche in altri capitoli, d'altra parte, questo rende i metodi di produzione attuali incapaci di reagire a un eventuale mancanza di idrocarburi, possibilità che comporterebbe delle problematiche per nulla indifferenti. Pimentel nel 1998 riassume efficacemente:
"Nonostante tali sistemi [intensivi, Ndr] siano altamente produttivi, la loro sostenibilità è dubbia, in quanto:
1) Il rapido aumento di popolazione necessita il continuo incremento nell'uso di terreni agricoli e risorse acquifere
2) Le risorse fossili essenziali per fornire fertilizzanti, pesticidi, irrigazione e meccanizzazione non sono rinnovabili
3) L'ambiente agricolo si degrada a causa di erosione del suolo, di terreni agricoli, pascoli e l'inquinamento di risorse idriche altrimenti sane.

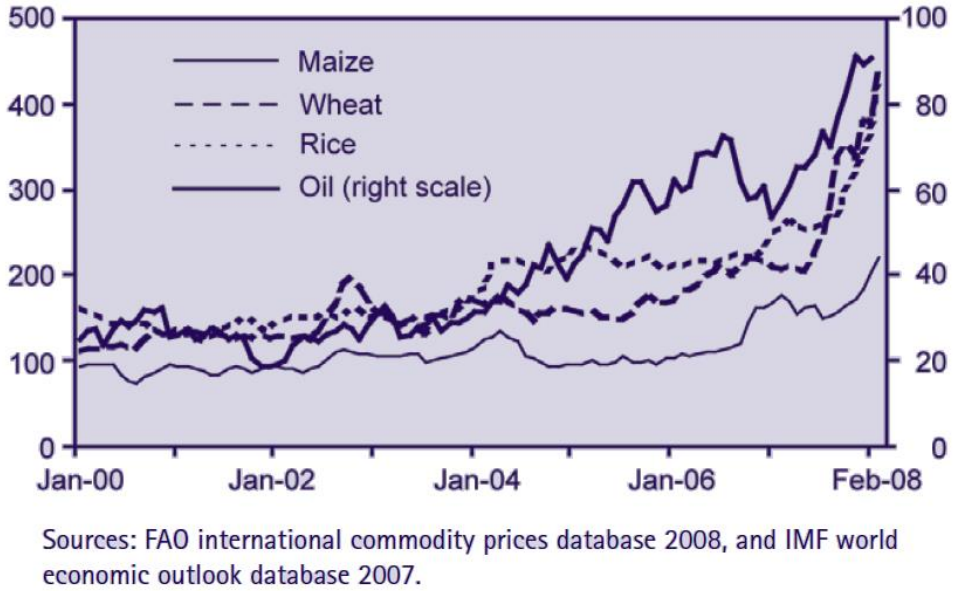


Figura 16 Confronto tra prezzo del petrolio e dei principali cereali [236]

Per far fronte alle necessità alimentari nell'attuale aumento della popolazione un sistema agricolo produttivo e sostenibile deve diventare un obiettivo prioritario." [44].
In quanto sebbene l'agricoltura non sia il settore più energivoro, risultando fortemente dipendente dalle fonti fossili, è vulnerabile alle variazioni di prezzo e disponibilità del petrolio (figura 16).
Tale dipendenza può essere valutata andando a considerare l'andamento nel tempo nella decade del prezzo medio del barile di petrolio [45] a confronto col prezzo del cibo. Si nota la dipendenza tra i due parametri può essere messa a confronto anche per mezzo del FAO Food Price Index (FFPI) col prezzo del barile di petrolio. Questo è un indicatore introdotto nel 1996 così da poter monitorare gli sviluppi rispetto al mercato mondiale dei prodotti agricoli e misura il cambiamento di prezzo mensile nel mercato internazionale riguardo ai prodotti alimentari considerando principalmente il prezzo di cereali, oli vegetali, latticini, carne e zucchero. Questo indice oltre a dare un'idea del prezzo del cibo fornisce anche una misura delle potenziali problematiche riguardo alla sicurezza alimentare dei paesi in via di sviluppo, più vulnerabili alle variazioni dei beni di primaria necessità [46].
La distribuzione altamente diseguale nel flusso di petrolio tra i paesi del globo, una preoccupazione strategica principale che continua dal XX secolo, è fortemente dovuta a dinamiche createsi nel corso degli eventi storici accaduti in seguito alla seconda guerra mondiale per "l'accaparramento delle risorse"; il Golfo Persico ne è un esempio perfetto: detiene 12 dei 15 maggiori giacimenti di olio e nel 2015 conteneva il 65% delle riserve di petrolio liquido, motivo più che sufficiente perché ci fosse e ci sia interesse per la zona; la scacchiera si complica enormemente considerando i disordini che cronicamente vi avvengono, causati principalmente da confini arbitrari attraverso gruppi etnici antichissimi con forti differenze religiose.
Il grafico in figura 17 elaborato dalla British Petroleum [18] fornisce delle informazioni per nulla scontate per quanto riguarda l'evoluzione del prezzo del petrolio dalla seconda guerra mondiale a oggi; la stabilità

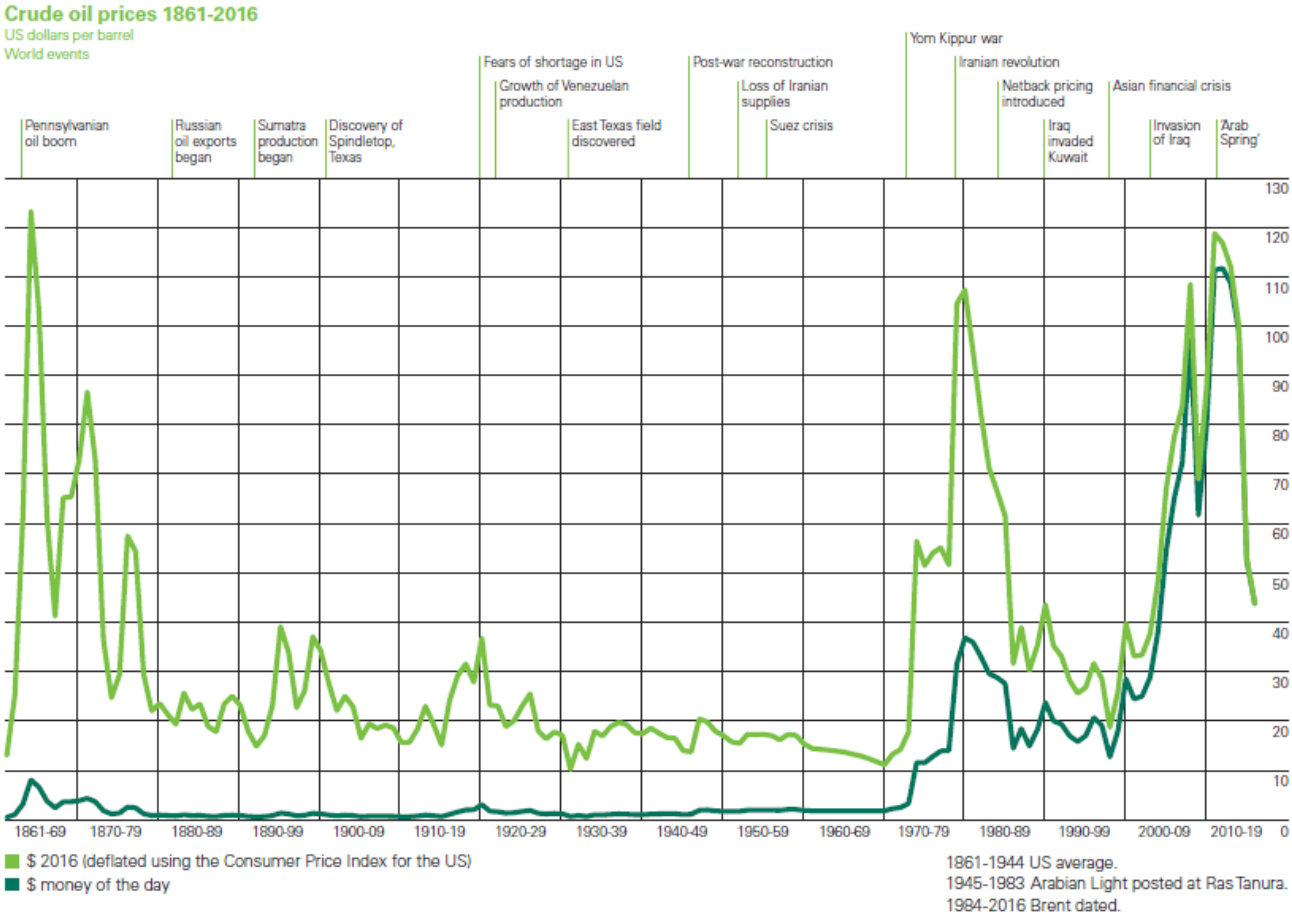


Figura 17 Andamento del prezzo del petrolio con annessi eventi storici di rilievo. BP [18]

dei prezzi diffusa fino agli anni '70 è dovuta fondamentalmente alla supremazia dei paesi occidentali per quanto riguarda il controllo delle materie prime. Dopo la II guerra mondiale il processo di decolonizzazione dei paesi del II e III mondo si fa sempre più spinto mentre gli Stati Uniti detengono il primato come produttori e consumatori di petrolio a livello mondiale. È il periodo delle Sette Sorelle, locuzione coniata da Enrico Mattei: un oligopolio formato dalle maggiori industrie del petrolio dell'epoca (tra cui l'attuale BP, Texaco, Esso ecc) che giunsero nei primi degli anni '70 a controllare la maggior parte delle riserve di olio mondiale esercitando così un controllo sulle risorse altamente centralizzato. Per contro i principali paesi esportatori formarono l'OPEC (Organization of Petroleum Exporting Countries) nel 1960 a Baghdad. Inizialmente vi facevano parte Iran, Iraq, Kuwait, Arabia Saudita e Venezela [47].
Le prime ingerenze nella zona da parte di paesi esteri cominciano dall'invasione sovietica del Nord Iran (1945-1946), seguti dagli Stati Uniti in Libano (una volta nel 1958 e una nel 1985). Le nazioni occidentali armano pesantemente Iran e Arabia Saudita prima del 1979, con comportamenti speculari sovietici per nazioni quali Egtto, Siria e Iraq [4]. Nel 1973 i paesi dell'OPEC dichiarano un embargo che comporta un aumento dei prezzi nei periodi 1973-74 (di 5 volte) e nel 1979-80 (di 4 volte) con le conseguenze ben note in termini di inflazione e diminuzione della crescita [48]. Di tutta risposta i maggiori importatori occidentali e il Giappone stipulano accordi di emergenza in accordo con la IEA rispetto a stategie di condivisione energetica, imponendo anche la costituzione di riserve strategiche di petrolio (alcuni paesi promuovendo legami bilaterali più stretti coi paesi dell'OPEC), sovvenzionando la ricerca diretta a una maggiore indipendenza dai prodotti petroliferi: un esempio lampante è dato dal largo utilizzo di energia nucleare in Francia o il risparmio energetico in Giappone).
L'occidente beneficia in termini di mercato dalla guerra tra Iraq e Iran (1980-1988, grande abbassamento dei prezzi del petrolio in figura 17), culminata con un massiccio intervento Statunitense in cooperazione con le Nazioni Unite per contrastare l'invasione Iraqena del Kuwait. Così facendo l'Iraq raddoppia le sue riserve di olio raggiungendo il 20% delle totali nel mondo: una tale avanzata minacciò seriamente i giacimenti sauditi e persino la monarchia stessa, che controllava un quarto delle riserve mondiali di olio. Nonostante Saddam Hussein sia rimasto al potere in seguito all'attentato dell'11 settembre negli Stati Uniti, le paure di un'ulteriore aggressione (tra l'altro mal riposte vista l'assenza di armi di distruzione di massa iraqene verificata successivamente) portarono gli Stati Uniti all'occupazione dell'Iraq nel 2003 seguita da anni di violenze [4].
La fortissima crescita economica cinese, diventando la Cina importatore netto dal 1994 e l'esaurimento dei giacimenti convenzionali in Alaska e Mare del Nord fanno schizzare nuovamente il prezzo del barile nel luglio del 2008, aumento che ha portato alla ben nota crisi del 2008. La ripresa economica e il nuovo aumento della domanda portano a un nuovo aumento del prezzo nel 2014, questa volta mitigato dal ritrovamento di ampi giacimenti di *shale oil* [12] negli Stati Uniti, i quali riemergono nel mercato come primi produttori grazie alla tecnica della *fratturazione idraulica* [13], non definibile propriamente "eco-friendly".
Al di là di considerazioni soggettive del perché sia avvenuto un conflitto piuttosto che un altro e da parte di chi, è difficile parlare di sicurezza quando si tratta di disponibilità e soprattutto stabilità nel procacciamento delle risorse petrolifere ed è ovvio dover considerare che dipendere dal petrolio voglia dire anche dipendere, che sia in piccola o grande misura, da dinamiche internazionali di una certa complessità.

---

[12] Lo *shale oil* o *olio di scisto* è un petrolio non convenzionale surrogato del petrolio grezzo, prodotto da frammenti di rocce di origine sedentaria chiamati scisti bituminosi. Entrano a far parte delle riserve di olio negli anni 2000 in seguito all'aumento dei prezzi dell'olio convenzionale e poco dopo diventano "convenienti" da sfruttare economicamente: la lavorazione richiesta per l'estrazione di olio attraverso questo metodo è più complicata e richiede un maggior diespendio energetico [220] [221].
[13] La *fratturazione* o *fracking* è un processo di ingegneria geochimica che prevede l'iniezione di enormi volumi d'acqua, sabbia e agenti chimici per fratturare il terreno e facilitare il recupero delle riserve non convenzionali di petrolio e gas. Questo metodo causa grossi rilasci di metano in atmosfera (che ha un potenziale di riscaldamento gloabale, GWP, 24 volte superiore alla CO_2), influenza l'erosione del suolo, i rischi sismici, l'inquinamento delle acque e i cicli idrogeologici locali [222].

Visti i temi trattati, si giunge alla conclusione di come il problema non sia tanto l'esaurimento dei combustibili fossili in sé e per sé, ma le problematiche legate alla reperibilità degli stessi. Più che preoccuparsi dell'esaurimento dei combustibili fossili, si dovrebbe preoccuparsi della loro reperibilità o di come viene archiviata. Un ulteriore fattore che migliora la comprensione di queste affermazioni in un sinile ginepraio è l'EROI (Energy Return Of Investment): l'energia impiegata da un determinato processo di produzione di energia rispetto all'energia in input necessaria per ottenerla. Gli studi di questo parametro relativamente alle fonti petrolifere forniscono valori decrescenti del tempo, come dovrebbe essere ovvio aspettarsi: per quanto ci sia un aumento nelle efficienze di estrazione e varie metodologie di lavorazione, è inervitabile come servano sempre più energia nella ricerca e nell'estrazione di risorse sempre più difficili da raggiungere, vista la non sostituibilità delle stesse. È interessante come questo argomento venga poco considerato, nonostante abbia importanti implicazioni in termini sia fisici che economici: l'esaurimento dei giacimenti convenzionali porta ad estrarre fonti fossili in altri siti nel quale la risorsa pretende uno sforzo maggiore per essere estratta, oltre ad essere di qualità più scarsa, e visto il continuo aumento di richiesta di questi combustibili è poco rassicurante sapere come in letteratura non ci siano studi sull'impatto sociale della diminuzione dell'EROI rispetto alle fonti fossili, se non in quantità molto limitata [49]. L'aumento in termini estrattivi da sabbie e scisti sfruttato dagli Stati Uniti nel periodo recente non fa che confermare questo trend: l'esaurimento delle risorse convenzionali sta spostando lo sfruttamento verso la direzione "non convenzionale" che diminuirà l'energia di ritorno dalla produzione di idrocarburi. Da un punto di vista di scoperta di nuovi giacimenti, facendo una valutazione in termini di EROI, si passa da un valore di 1˙200 GJ scoperti/GJ speso nel 1919 a un valore pari a circa 10 GJ scoperti/GJ speso nel 2010 [50].
Il trend in continua diminuzione dell'EROI per petrolio e gas [51] [52] (alcuni stdui rispetto al carbone pongono il "picco" dell'EROI non ancora raggiunto) associato a un aumento del prezzo del petrolio (figura 18), visto l'impatto che potrebbe comportare a livello sociale ed economico in termini di stabilità, è sicuramente un'ulteriore variabile che incide negativamente sul banco di imputazione dell'oro nero: la diminuzione dell'EROI per le principali fonti fossili suggerisce che nella gara tra lo sviluppo tecnologico e l'esaurimento delle stesse, il vincente è l'esaurimento [53].
Il problema dell'estrema dipendenza di praticamente la totalità dei settori produttivi della civiltà attuale alle fonti fossili e il petrolio in particolare quindi esula dalla non rinnovabilità e finitezza delle suddette risorse in senso stretto, rappresentando le cause in forma solo indiretta.
Approfittando delle proiezioni IEA rispetto all'andamento del prezzo del petrolio, a prescindere dallo scenario considerato, si prevede un aumento della domanda se non per lo scenario *450*, il quale, come già notato, a tre anni di distanza risulta estremamente poco realizzabile. Si nota in figura 19 come il prezzo del barile tenda in ogni caso ad aumentare da qui al 2040. A tal proposito sono significative le

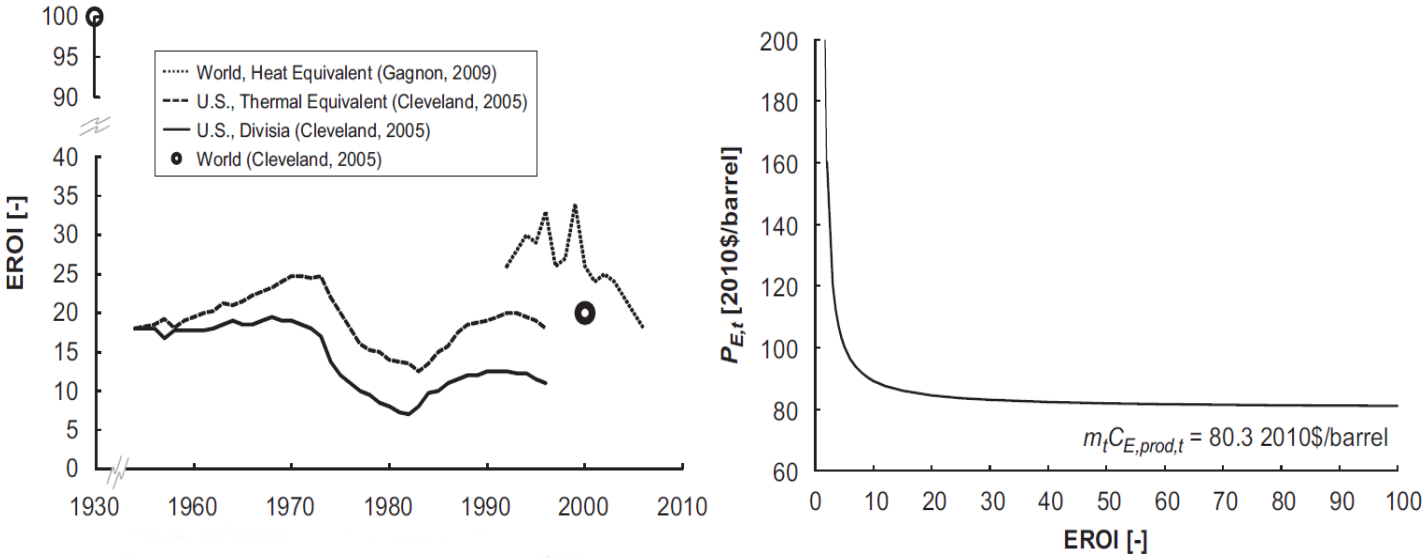


Figura 18 A sinistra, EROI decrescenti a livello globale e per Stati Uniti. A destra, prezzo del petrolio in funzione dell'EROI, da una correlazione sviluppata da Matthew Kuperus Heun e Martin deWit nel 2011 [53]

considerazioni tratte dal WEO 2015 che prevedono in uno scenario intermedio (New Policies Scenario) il prezzo dell'olio salire da 80 $ al barile nel 2020 a 128 $ al barile nel 2040 [15].
Come perfettamente illustrato da Odum, uno dei più grandi esponenti di temi riguardanti ecologia e tra i primi a sfruttare il concetto di exergia in un'ottica di sostenibilità:

"*A whole generation of citizens thought that the carrying capacity of the earth was proportional to the amount of land under cultivation and the higher efficiencies in using the energy of the sun had arrived. This is a sad hoax, for industrial man no longer eats potatoes made on solar energy, now he eats potatoes partly made of oil* [54]".

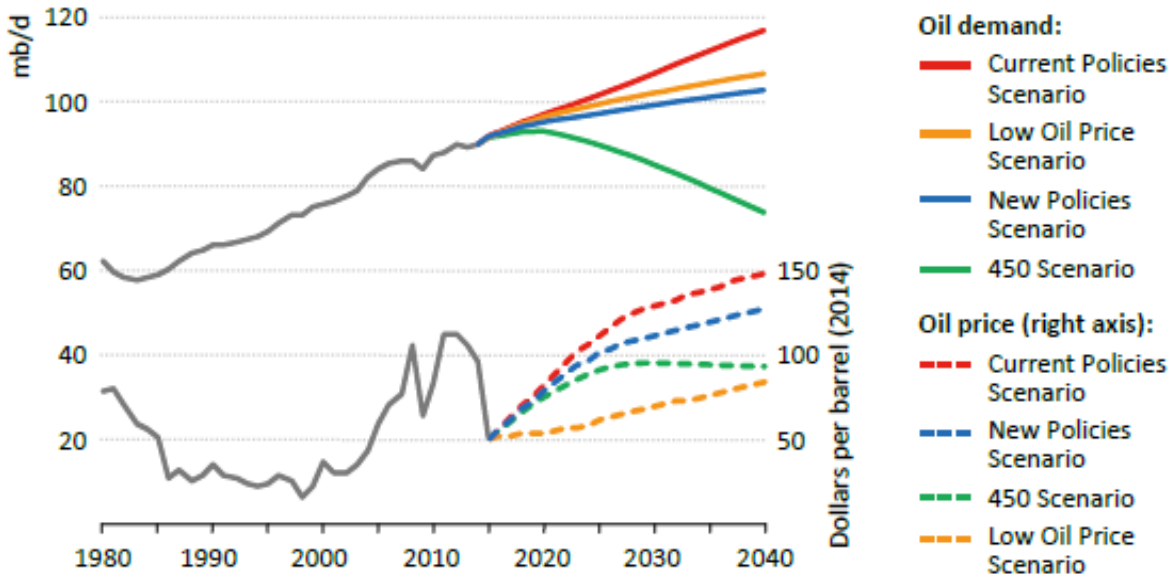


Figura 19 Domanda di petrolio mondiale e prezzo per differenti scenari [15]

1.5 Lavoro e potenza sviluppata da uomini e animali

Al fine di calcolare la potenza sviluppata dall'*uomo medio* è stata necessaria un'analisi degli studi compiuti, che pongono la loro base negli anni compresi tra il 1840 e il 1880 e ancora oggi in fase di sviluppo. È noto ad esempio come durante il corso dell'esistenza di un individuo le necessità di assunzioni energetiche varino di un fattore due e più e le differenze metaboliche che si nascondono dietro questi numeri non sono ancora state spiegate [55]. Rimane il fatto che la conversione energetica essenziale nei meccanismi umani si basa sull'ossidazione di cibo in riserve di grassi e, se necessario, proteine. Macronutrienti quali carboidrati, proteine e grassi sono consumati con un rateo che varia tra i 10 (lipidi e proteine) e i 100 (carboidrati) g per giorno; per i micronutrienti il fabbisogno è di 2.5 g al giorno per Potassio (k) e Azoto (N) e 3 µg/giorno per la vitamina B 12, il consumo della quale è imperativo necessario per rimanere in salute [5]. Si deve tenere presente la grande varietà delle necessità metaboliche anche in rapporto alle differenze che riguardano la digestione e commestibilità rispetto allo stato di aggregazione dei cibi: per quanto la cellulosa sia uno dei carboidrati più presenti in natura non è commestibile per l'essere umano. Non sarebbe quindi corretto ridurre i regimi alimentari a una mera analisi di resa energetica degli alimenti, in quanto non verrebbero prese in considerazione le reali necessità dell'essere umano.
Con riferimento alla figura 20, l'energia contenuta nel cibo ingerito è misurata come la completa resa combustione di CO_2 e H_2O; parte di quest'energia (Gross Energy – GE) viene persa nelle feci (FE) e per la fermentazione microbica (GaE – gas intestinali). Parte dell'energia digeribile (DE) viene a sua volta persa a causa delle urine (UE) e dispersa attraverso la pelle (SE); una frazione della rimanente energia metabolizzabile (ME) viene convertita in calore a causa della fermentazione microbiotica e della termogenesi come specifica azione dinamica del cibo (digestione) che eleva il BMR (Basal Metabolic Rate) o metabolismo basale, relativo a una dieta mista, del 10% [5]. Si giunge quindi a definire l'energia

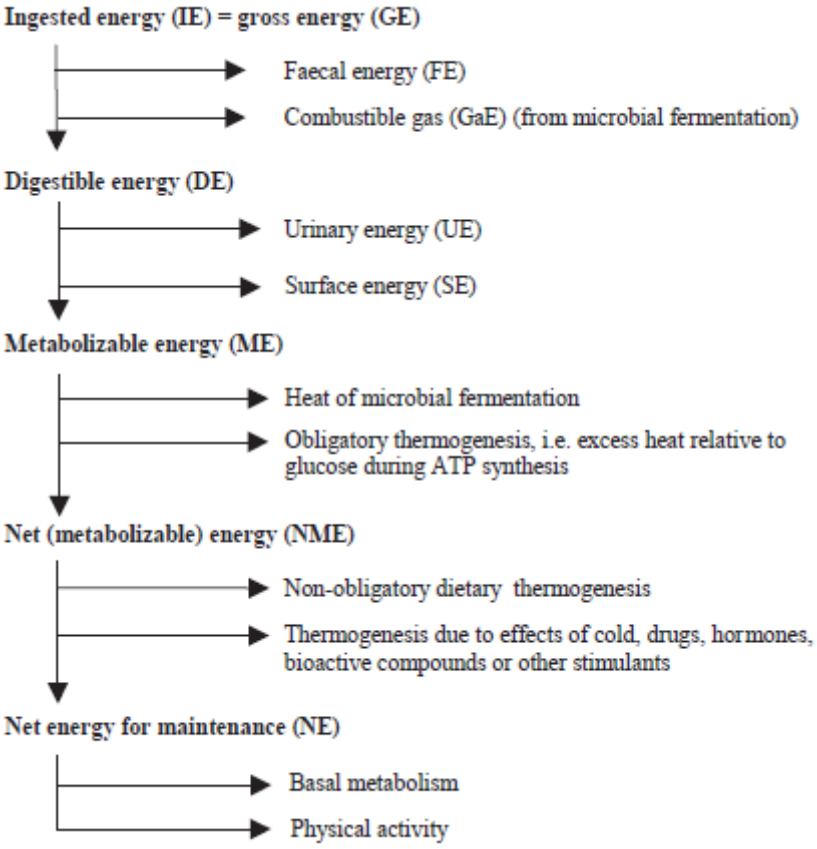


Figura 20 Panorama del flusso energetico alimentare attraverso il corpo per il mantenimento del bilancio energetico [56]

netta metabolizzabile (NME) che deve parte delle sue perdite per termogenesi causata da ormoni, farmaci o stimolanti giungendo finalmente all'energia netta convertita effettivamente per il mantenimento del metabolismo basale e l'espressione delle attività fisiche [56].
Per quanto riguarda la potenza esercitabile, secondo il Nerli si può assumere un rendimento del "motore umano" attorno al 20% rispetto l'equivalente calorico in input, o del tasso di energia consumata per una tale attività [57].
L'energia lorda dei carboidrati è pari 17.3 kJ g^{-1}, vale 23 kJ g^{-1} per le proteine e 39 kJ g^{-1} per i grassi: questi valori si riducono in fase di assimilazione a causa delle perdite sopra elencate per una quantità che può variare dal 7 al 20% a seconda dei metodi utilizzati per valutare la conversione [56]. I carboidrati rappresentano l'energizzante dominante nell'evoluzione umana, assimilati per mezzo di cereali, tuberi, piante leguminose e prodotti raffinati dello zucchero. Il consumo dei grassi nelle società antiche era molto limitato mentre nei paesi industrializzati costituiscono oggi il 40% del totale consumo dei fabbisogni alimentari, chiaro segnale di pessima qualità delle diete.
Il metabolismo basale[14] (BMR) conta la maggior percentuale di utilizzo di questa energia, in quanto si occupa di sfruttare l'energia per i meccanismi di base di funzionamento del corpo umano: le funzioni cellulari, la sintesi degli enzimi, il lavoro costante degli organi interni quali cuore o polmoni, il mantenimento della temperatura corporea.
Tale parametro può essere valutato, per l'uomo medio tra i 30 e 60 anni, come [5]:

$$BMR\left(\frac{MJ}{day}\right) = 0.048\,kg + 3.653$$

Una tale formulazione porta a valori di BMR pari a 700 kJ/giorno alla nascita, 7.5 MJ/giorno nell'adolescenza e circa 6 MJ/giorno in età adulta. Per quanto riguarda invece la spesa energetica totale (TEE – Total Energy Expenditure) questa ammonta rispettivamente a 3 W/kg per i neonati, variando in modo considerevole e raggiungendo 1.5 W/kg a 15 anni e diminuendo mediamente del 2.9% per ogni decade successiva. Per il sesso femminile i valori differiscono del 10-20%. I valori maggiori in età adolescenziale sono dovuti al soddisfacimento delle esigenze di crescita (figura 21 a sinistra). Ben più complesso risulta il calcolo per la spesa energetica dovuta alle azioni umane.
Il minimo fabbisogno di sopravvivenza si attesta tra i 6.2 MJ/day per una donna di 50 kg e i 9.6 MJ/day per un uomo di 80 kg con flussi che variano tra i 70 e i 110 W [5].
Per esprimere il consumo energetico delle attività si utilizza l'equivalente metabolico (MET- Metabolic Equivalent of Task): questo identifica il rapporto tra il tasso metabolico dovuto al lavoro e il tasso metabolico a riposo e vale 1 kcal kg^1 h^1 oppure 1.1628 W kg^{-1} [58].
L'energia spesa per uso sportivo dipende dall'intensità dell'esercizio praticato: il ciclismo ne è un esempio perfetto, infatti la richiesta energetica di questa attività può variare grandemente (figura 21 a destra); questa attività risulta tra le più efficienti in quanto fa utilizzo dei muscoli più importanti delle gambe.
Un adulto sano può sopportare diverse ore di lavoro al 40-50% della sua massima capacità aerobica, confondibile conservativamente a una potenza metabolica lorda di 380-490 W per un uomo di 60-70 kg. Con una efficienza cinetica assunta al 20% significa 75-100 W di lavoro utile.
Grazie a tali dati è stato possibile ricavare le potenze necessarie alle varie attività agricole considerate in questo lavoro.
Secondo Carena "*Nei riguardi della adattabilità ai più svariati movimenti, della molteplicità dei modi in cui può esplicarsi e della elasticità, o capacità di poter scegliere in ogni istante lo sforzo e la velocità per poter vincere una determinata resistenza col minimo dispendio di energia, il lavoro umano riesce di gran lunga superiore a quello ottenibile da qualsiasi altro motore animato* [59]."
Questi sostiene che un uomo di 70 kg può sostenere uno sforzo di 6-8 kgm/s (60-80 J) lavorando in modo continuativo per parecchie ore, corrispondenti a una potenza di 60-75 W.

[14] Il metabolismo basale è un indice del minimo costo energetico dell'esistenza allo stato stazionario, va misurato a riposo e in un ambiente neutralmente termico [5].

Basandosi sui dati presenti nei database riguardanti il MET, assumendo un rendimento medio di conversione del 20% è stato quindi possibile calcolare con maggior precisione la potenza necessaria alle operazioni agricole manuali. Le attività agricole tipiche dell'agricoltura tradizionale sono considerate come esercizio moderato o pesante: tra queste si può considerare un MET variabile tra 4 e 8 per aratura, semina e raccolta. Lo scavo e la pulitura di canale di irrigazione, il taglio di alberi attorno a 8. Nella trattazione considerata ci si è basati su quattro valori di intensità del lavoro, corrispondenti a un MET pari a 2.5 per lavori a bassa intensità corrispondente a un esercizio di potenza pari a 40 W, un MET pari a 4.5 per lavori a media intensità con potenza esercitata pari a 75 W, un MET pari a 6 per lavori a medio alta intensità corrispondente a un esercizio di potenza pari a 100 W e infine a un MET pari a 8 per lavori ad alta intensità corrispondente a un esercizio di potenza pari a 130 W.

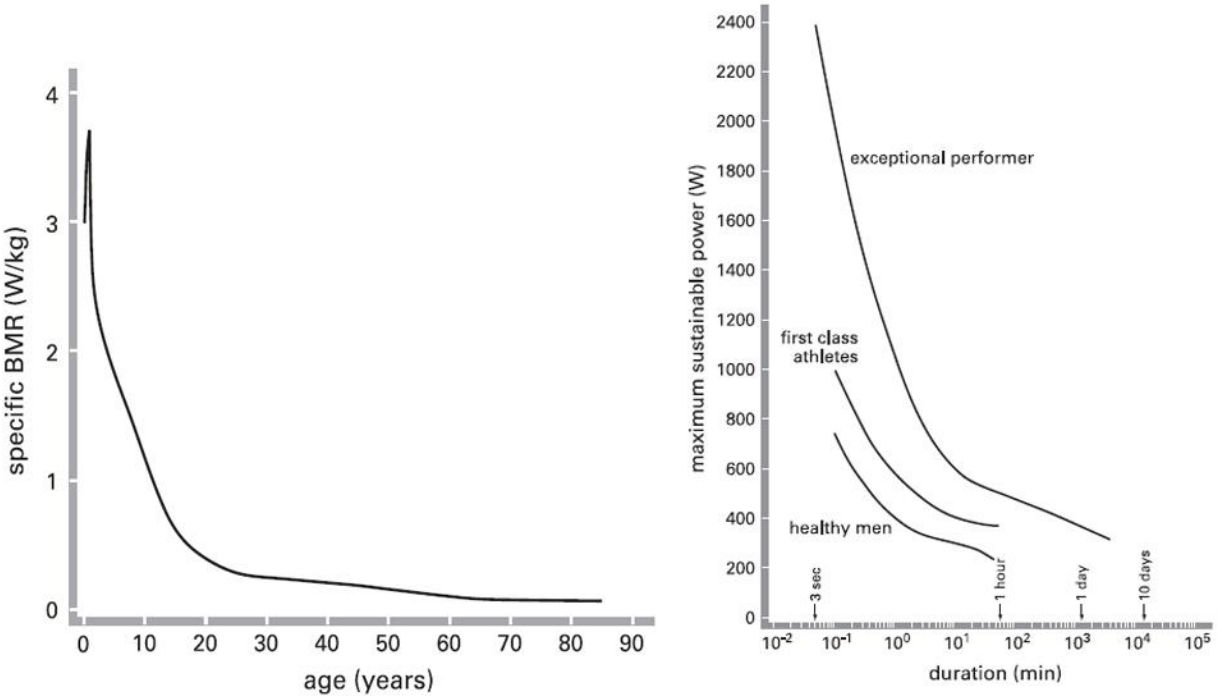


Figura 21 A sinistra: Andamento del BMR con l'età.
A destra: Costo energetico dell'utilizzo della bicicletta [5]

La convenienza degli animali da tiro comparata col lavoro umano è chiara: da un confronto con la potenza esercitata da un essere umano, mediamente sui 75 W, gli animali da tiro esercitano una potenza di un ordine di grandezza superiore, mediamente sui 600 W. Questo permette l'utilizzo di macchine più pesanti e complesse, alla base dello sviluppo agricolo preindustriale.
Osservando il grafico in figura 22 ci si può fare un'idea delle potenze sviluppabili da animali quali l'asino, il bue e il cavallo, valutate in funzione dello sforzo di trazione e la velocità.
Si nota come il cavallo sia l'animale più adatto agli sforzi di trazione e come permetta una maggiore espressione di potenza e velocità. Queste caratteristiche lo rendono l'animale ideale per l'utilizzo nei campi nelle condizioni ideali, in quanto la produttività della gran parte degli strumenti agricoli aumenta in modo diretto con la velocità di esecuzione. Inoltre questi se mantenuti in buone condizioni di nutrimento godono di una maggiore resistenza rispetto agli altri animali e un maggiore esercizio nella potenza massima che riescono ad esercitare per brevi istanti.
Si devono però considerare anche fattori esterni: da un punto di vista meccanico infatti la maggiore altezza del cavallo tende ad aumentare l'angolo di traino, diminuendo l'efficacia della spinta: buoi e asini, avendo un baricentro più basso, sfruttano meglio la propria energia in termini di trazione. Un altro fattore da considerare è il miglior comportamento di asini e buoi in terreni accidentati o declivi. Un buon compromesso tra cavallo e bue può essere il bufalo d'acqua, animale che ha origine in Asia.
Si può assumere un valore di potenza utilizzabile pari a una media di 500 W per un bue e 750 W per un cavallo.
Da un punto di vista di consumo, un cavallo di 500 kg richiede l'equivalente di 70 MJ al giorno di energia digeribile (DE) e a seconda del periodo e dell'attività può aumentare di 1.5-1.9 volte. Nei primi anni del XX secolo l'agricoltore americano forniva al singolo cavallo 4.5 kg di avena e altrettanti di fieno al giorno [5].

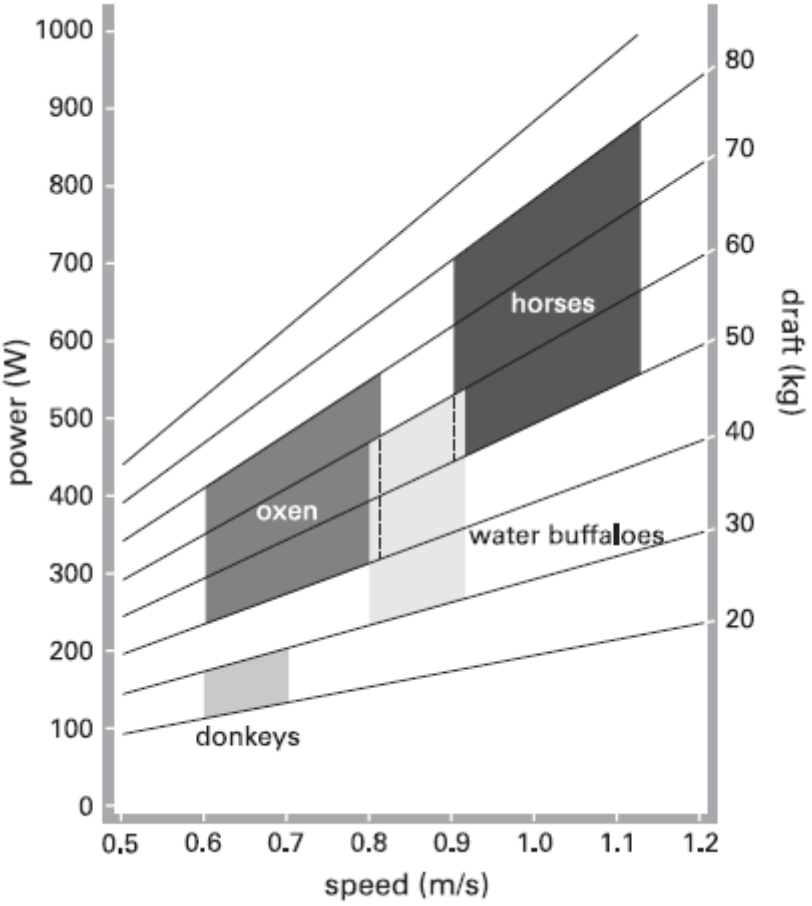


Figura 22 Potenza utilizzabile, velocità e sforzo corrispondente degli animali da tiro più comuni [5]

Secondo gli studi condotti da Carena aggiogando più animali contemporaneamente lo sforzo di trazione complessivo risulta sempre inferiore alla somma degli sforzi dei singoli animali; questo sarebbe dovuto alla non perfetta simultaneità e parallelismo degli sforzi esercitati dagli stessi.
Dalle esperienze di Ringelmann lo sforzo di trazione si riduce nel modo seguente:

Numero animali aggiogati	1	2	3	4	5	6	7	8
Frazione di sforzo per animale	1	0,93	0,85	0,77	0,7	0,63	0,56	0,49

Nel caso di *n* animali viene fornita da Bockelberg una formulazione empirica:

$$P_n = 1.075\ (1 - 0.07\ n)\ P\ n$$

Dove P rappresenta lo sforzo di trazione individuale [59].

2. ORGANIZZAZIONE AZIENDALE E PRATICHE COLTURALI

2.1 La scala aziendale

"[…] *I contadini e il loro mestiere (l'agricoltura) hanno una storia di grande ricchezza che si è continuamente rinnovata nel corso del tempo, i contadini hanno prodotto saperi e tecniche, non solo la riproduzione della tradizione. L'unica costante è il rapporto diretto con l'ambiente, la cura per la terra. Proprio in ragione di tale rapporto ne è derivata una straordinaria varietà di coltivazioni, paesaggi e colture. Nel passaggio a una forma superiore di civiltà, tanto necessario quanto incerto, la transizione ad una agricoltura ecologicaoccupa un ruolo centrale, ma l'agricoltura ecologica potrà essere tale solo se farà perno sui contadini, che dovranno appropriarsi del meglio della tecnologia attraverso il suo utilizzo selettivo e intelligente, senza dimenticare che sino ad oggi l'agricoltura contadina è l'unica economia circolare che abbia funzionato. Essa quindi, anche nell'ottica oggi dominante, non appartiene a un passato morto e sepolto ma si colloca al centro dei problemi del nostro tempo.* [60]"

Pier Paolo Poggio, "Le tre agricolture: contadina, industriale, ecologica"

Nel corso del tempo i metodi di coltivazione hanno influenzato grandemente il livello di scala di quella che modernamente si chiama impresa agricola. Le più grandi modificazioni si sono viste per lo più dall'avvento dell'era industriale e in particolare nei paesi sviluppati dove la dimensione media dell'impresa è cambiata considerevolmente. Nonostante ciò, ad oggi un terzo delle persone economicamente attive nel mondo sono occupate nel settore agricolo. In Asia e Africa milioni di agricoltori su piccola scala, pescatori, allevatori, producono la maggior parte del cibo consumato nel mondo, nella maggior parte dei casi in piccoli fazzoletti di terra [61].
Occorre fare una differenziazione tra i vari criteri per distinguere le aziende agricole: quello della Comunità Europea prevede una classificazione che può essere fatta a diversi livelli:

- In base alla dimensione
- In base alla destinazione produttiva
- In base ai rapporti tra impresa, proprietà e manodopera

Per il lavoro corrente la classificazione di interesse è principalmente relativa alla dimensione. All'interno di tale categoria la dimensione può essere intesa come fisica o economica (in termini di produzione vendibile). Fattori influenzanti la classificazione sono la terra agricola (utilizzata o totale) e il lavoro (quello effettivamente fornito dall'azienda in termini di giornate di lavoro assorbite).

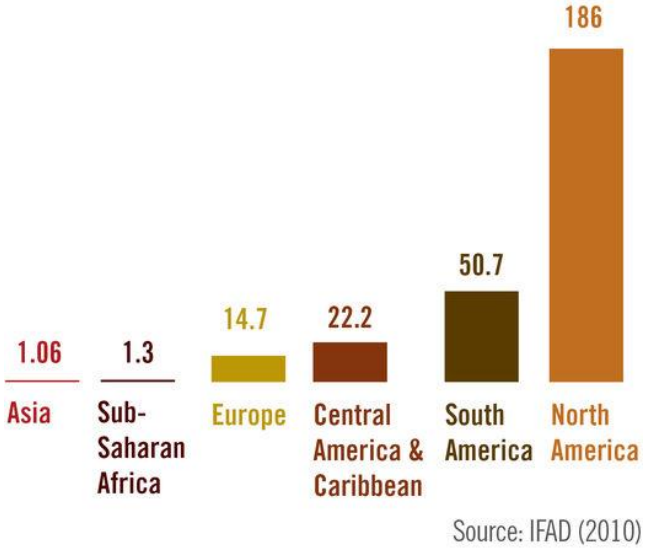


Figura 23 Dimensione media delle aziende agricole in ha per macroregioni globali [61]

Considerando la dimensione, in figura 23 si vede quale sia la distribuzione media delle aziende agricole a livello globale. Tengono il primato le americhe, seguite da Europa, Africa e Asia con grosse differenze in termini quantitativi.
Per indagare rispetto ai motivi di tali differenze operiamo una prima divisione tra "piccola" e "grande" scala dal punto di vista di impresa agricola considerando il valore di 10 ha come discriminante. In figura 24 è raffigurata la distribuzione di aziende agricole secondo questa distinzione. Approssimativamente il 40% delle persone nel mondo vivono in aree rurali, dipendendo dall'agricoltura in modo diretto per sopravvivere [62].
Sul testo presentato nel 2016 da "Food and Agriculture Organization of the United Nations" una panoramica generale permette di far luce in modo ancora più chiaro sulla questione. Dal rapporto emerge che nel mondo sono presenti più di 570 milioni di fattorie, 475 milioni delle quali sono inferiori ai 2 ettari. Dal 1960 al 2000 la scala media dell'azienda agricola è diminuita nella maggior parte dei paesi sottosviluppati, in via di sviluppo e in tutto il Sud asiatico; è diminuita dal 1960 al 1990 anche in America Latina e Caraibi, per aumentare poi dal 1990 al 2000.
Non è così semplice fare previsioni per il futuro: per i paesi a basso reddito la dimensione aziendale agricola media probabilmente continuerà a diminuire. Globalmente l'84% delle aziende agricole non supera i due ettari occupando circa il 12% del suolo agricolo. Nei paesi a basso reddito le piccole fattorie occupano la maggior parte della quota a differenza di quanto succede nei paesi ad alto reddito.
Nei paesi del Sud-Est asiatico, dell'area del Pacifico (Cina esclusa) e dell'Africa Sub-Sahariana attorno al 70-80% delle fattorie ha una dimensione inferiore ai 2 ettari usufruendo del 30-40% dei terreni agricoli.
Si deve porre attenzione a non confondere la piccola azienda con l'azienda a conduzione familiare, termini che non sono intercambiabili né a livello qualitativo né quantitativo. Rispetto all'utilizzo del termine *a conduzione familiare*, più del 90% delle aziende agricole nel mondo ricade all'interno di questa categoria, mentre solo l'84% delle aziende si considera come "piccola" fattoria, ovvero al di sotto dei due ettari in questa accezione. Infatti, mentre le aziende a conduzione familiare compongono la maggior parte delle terre destinate ad uso agricolo, circa il 75%, le piccole aziende arrivano solo al 12% [63].
Quindi la maggior parte delle aziende agricole nel mondo sono più piccole di due ettari, nonostante le maggiori produzioni siano legate a modelli agricoli più estesi e, di conseguenza, avanzati: sarebbe impossibile infatti riuscire gestire aziende agricole molto grandi in assenza di una certa facilità di accesso ai grandi fondi necessari agli investimenti atti a supportare lo sviluppo della meccanizzazione, situazione tipica delle coltivazioni su larga scala.
Secondo dati FAO (figura 25 sopra) l'andamento della dimensione delle aziende agricole dagli anni '60 è aumentato per quanto riguarda i paesi ad alto reddito; per ciò che riguarda i paesi a medio e basso reddito la curva assume invece un andamento opposto. Nello studio in questione, del 2016, gli autori

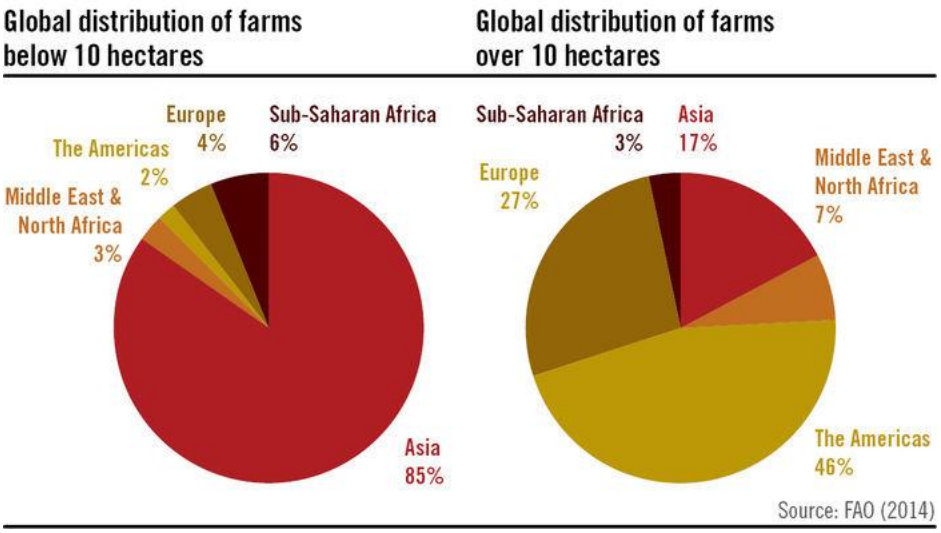
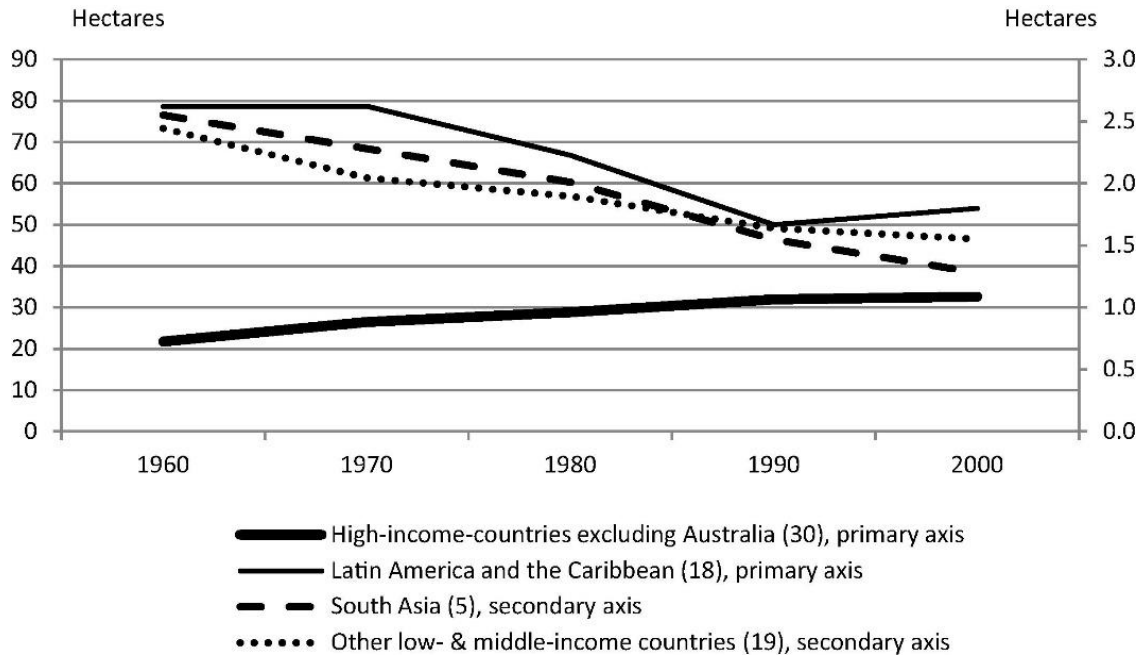


Figura 24 Distribuzione globale di aziende agricole sopra e sotto i dieci ettari [62]

hanno incluso per quanto riguarda i paesi ad alto reddito i 30 che rappresentavano il 96% delle *holdings*[15] e il 98% dell'area agricola.
Le altre classificazioni riguardano 18 paesi dell'America latina (79% delle holdings e 87% dell'area agricola), 5 dell'Asia del Sud (98% delle holdings e 86% dell'area agricola) e 19 paesi rimanenti con medio e basso reddito 5 dei quali appartenenti a medio oriente e Nord Africa, 9 dell'Africa Sub-Sahariana [63].
Dalla tabella sottostante si nota come Cina, Australia e Stati Uniti coprano quasi un terzo della superficie usata a scopi agricoli in tutto il mondo; Al 2014 gli Stati Uniti producono il 12% del valore lordo della produzione mondiale di prodotti agricoli (US $ 2018 - [38]).
La necessità di aumentare la produttività fu strettamente associata all'industrializzazione; questa fu dovuta in parte alla crescita di nuovi mercati costituiti dalla forza lavoro industriale e urbana [64] e in parte alla necessità di aumentare la produttività delle attività agricole in modo che stessero al passo con l'aumento dei costi e con la scarsità dovuta all'aumento di domanda della forza lavoro nei centri industriali. L'industrializzazione ha anche provveduto ai mezzi attraverso i quali aumentare la produttività: meccanizzazione e fertilizzanti, pesticidi. Nel caso di alto rapporto terra - lavoro (terra relativamente abbondante, per es. Stati Uniti) il maggior peso è dato alla meccanizzazione, in caso contrario ai fertilizzanti [65].
Al di là di tali differenze nell'agricoltura intensiva è caratteristica la combinazione di prodotti agrochimici, meccanizzazione e irrigazione con l'adozione di varietà colturali adatte. Dagli anni '60 questo modello è stato adottato nei paesi industrializzati con sensibili aumenti della produttività (grazie



Agricultural holdings (in millions)			Agricultural area (in millions ha)		
Top five countries	Most recent estimate	Share of the world's agricultural holdings (%)	Top five countries	2010	Share of the world's agricultural area (2010) (%)
China	201	35	China	525	11
India	138	24	Australia	456	9
Indonesia	25	4	United States of America	414	8
Russian Federation	23	4	Brazil	261	5
Bangladesh	15	3	Russian Federation	217	4
World total	570		World total	4,889	

Figura 25 Sopra: i 5 paesi col maggior numero di holdings e superficie agricola, compilazione degli autori del rapporto da dati FAO 2014. Sotto: Dimensione delle aziende agricole dal 1960 ad oggi [63]

[15] Secondo la FAO per holding si intende un'unità economica a produzione agricola sotto un'unica gestione da parte di un individuo o una famiglia, un clan o tribù, da una persona giuridica (per esempio una corporazione o un'agenzia di governo) [190].

alla cosiddetta *Green Revolution*). Al di là delle problematiche ampiamente discusse e da discutere su questa forma di agricoltura, il capitale di investimento necessario per soddisfare la struttura necessaria ad operare in condizioni di agricoltura intensiva favorisce un controllo del territorio in modo centralizzato a scapito delle popolazioni rurali, oltre alla forte dipendenza dai combustibili fossili [66].
Per quanto riguarda la resa in rapporto con la scala dell'azienda agricola, in particolare per quanto riguarda i paesi in via sviluppo, l maggior parte degli studi rivela relazione inversa tra produttività e dimensioni dell'impresa [67] [68]: Russia, India, Africa, Asia, Europa e America Latina. Delle controtendenze sono espresse da due studi condotti in Nigeria e Sudan. Questa relazione sembra essere causata dei maggiori input specifici utilizzati nelle fattorie di piccola scala e delle imperfezioni legate alle interconnessioni tra sfruttamento della terra e mercato del lavoro.
La differenza di produttività tra paesi sviluppati e in via di sviluppo si verifica nonostante un maggior utilizzo di risorse e una quota maggiore di occupazione dei paesi in via di sviluppo rispetto a quelli industrializzati. Tale divario può spiegarsi tramite politiche a livello aziendale che stanziano risorse in modo improprio ad aziende di dimensioni diverse. Vi sono ampie prove su una varietà di istituzioni, frizioni e politiche a livello di azienda agricola che distorcono le dimensioni nei paesi poveri, suggerendo che la "piccolezza" rappresenta almeno in parte un sintomo di errata assegnazione all'interno dell'agricoltura [69]. Si adducono quindi motivazioni di tipo più che altro politico e di gestione, non propriamente inerente a temi di carattere ingegneristico [70]. Di fatto, non si riesce a fornire una reale correlazione tra dimensione aziendale e produttività, mettendo più che altro in luce la difficoltà nell'identificare fattori che possano permettere un confronto significativo.
Mentre diversi tipi di attività economica traggono benefici dall'economia di scala le ricerche svolte nei paesi in via di sviluppo riportano valori di produttività per ettaro maggiori su aziende di piccola scala suggerendo una *dis*-economia di scala [71]. Sicuramente il settore agricolo esprime caratteri peculiari: la produzione e l'occupazione in agricoltura sono volatili e non correlati positivamente con la produzione e l'occupazione come nel resto dell'economia [70].
I censimenti agricoli in diversi paesi in via di sviluppo mostrano che la dimensione media delle aziende tende a decrescere nel tempo. Si arguisce inoltre che se valessero i benefici dell'economia di scala, la terra di piccoli proprietari terrieri sarebbe affittata in modo più frequente ai grandi proprietari per consentire un'agricoltura su scala più ampia; accade invece l'opposto: la maggior parte degli affitti avviene riguardo a terreni appartenenti a grandi proprietari da parte dei piccoli.
Il bilancio dei vantaggi tra grande e piccola scala dipende dalla misura in cui il lavoro e gli input sono utilizzati nella produzione e se vengono consumati dalla famiglia o vengono introdotti nelle catene di marketing: si stanno verificando e si sono verificati cambiamenti importanti dal punto di vista delle filiere agricole. Sempre più spesso queste sono organizzate su larga scala da grandi grossisti e catene di supermercati: la concentrazione del potere d'acquisto, l'integrazione verticale e l'aumento degli standard di produzione pubblici e privati sono fattori che stanno prendendo piede anche nei paesi in via di sviluppo. Gli acquirenti di larga scala cercano di acquistare materie prime in grande volume, con consegne ad orari precisi e che soddisfino precisi standard di qualità e sicurezza. Per realtà simili è ovvio come sia conveniente trattare con pochi interlocutori che a loro volta operano su larga scala piuttosto che con molti, operanti su piccola scala. Per ciò che riguarda gli input inoltre il ritiro delle agenzie statali come fornitori di sementi, fertilizzanti, credito e assistenza tecnica ha lasciato i piccoli agricoltori più vulnerabili alle transazioni ad alto costo in questo mercato; a volte tanto da risultare nel fallimento in quanto gli imprenditori non riescono ad accedere a questi input esterni a loro necessari per la sopravvivenza dell'azienda. Per diventare competitive con le aziende più grandi e realizzare i propri vantaggi nella gestione del lavoro, le piccole aziende dovrebbero trovare come superare le suddette difficoltà legate agli svantaggi legati alla modificazione della catena di approvvigionamento [71].
Del resto, sono dieci[16] le big corporations che dominano il mercato agricolo: Archer Daniels Midland, Bunge, Cargill e Louis Dreyfus dominano il mercato delle materie prime agricole (tra il 75 e il 90% di grano, soia e mais; Basf, Bayer, Dupont, Dow, Monsanto e Syngenta detengono il 75% del mercato

[16] Le *Big Corporations* oggi sono diventate 9: nel 2016 Bayer acquista Monsanto, la maggior acquisizione estera mai realizzata da un'azienda tedesca per un valore di 66 miliardi di dollari [223].

dell'agrochimica [72]: i leader della produzione sono al contempo i principali *trader* finanziari e commerciali.
Le fattorie in piccola scala sono infatti le più abbondanti nei paesi dove uno sviluppo in ambito agricolo contrasta in modo efficace la povertà: secondo Irz et al. per ogni incremento del 10% in resa agricola la riduzione di povertà in Africa si attesta al 7% e in Asia al 5%, mentre la crescita per quanto riguarda beni e servizi non porta a nessun effetto significativo in tal senso [73].

Per quanto riguarda le problematiche ambientali, i dubbi sono meno marcati: il paradigma della produzione agricola su scala industriale manifestato tramite unità commerciali di larga scala prevede la dipendenza da macchinari sempre più grandi, fertilizzanti e pesticidi, che sebbene siano i maggiori responsabili dell'aumento delle rese agricole sono i principali attori per le problematiche ambientali e di sostenibilità [74].
Cercando una relazione tra sostenibilità[17] e dimensione dell'azienda agricola, in termini economici e di sostenibilità, si scopre che le aziende con un saldo inferiore ai 50˙000 $ sarebbero quelle più "sostenibili", tra 50˙000 e 99˙999 $ ci sarebbe una certa variabilità e per quelle superiori ai 100˙000 $ i fattori non sono significativi. In particolare per le aziende con saldo inferiore a 50˙000 dollari c'è una maggiore probabilità di adottare pratiche di sostenibilità rispetto alle controparti di grande dimensione [74].
Per quanto riguarda il lato commerciale le grandi aziende agricole sono indubbiamente più "efficienti" in quanto le decisioni son basate principalmente rispetto a considerazioni economiche; le piccole aziende solitamente hanno la tendenza ad adattarsi più lentamente alle "innovazioni" tecnologiche: le aziende di grandi dimensioni sono generalmente le prime ad adottare nuove tecnologie, a causa della maggior facilità di accesso al credito, in particolare relativamente alle tecnologie di maggiori dimensioni. Nonostante i benefici tecnologici ed economici siano immediati, i cambiamenti tecnici possono impoverire la società nel complesso (esternalità incluse) [75]. Un adattamento più lento, da parte di piccoli agricoltori, può diventare un beneficio da un punto di vista sociale in quanto permette un adattamento con un'ottica di continuità e non di rottura, anche se indubbiamente poco conforme alle logiche di produzione dell'attuale sistema economico.
Altri fattori che spiccano nell'analisi relativa alle piccole aziende sono una minore intensità dell'uso del terreno, adibendo a bosco una quota maggiore dei terreni (17% vs 5%), uno sfruttamento più razionale della terra meno coltivabile (80% vs 50%), una percentuale maggiore di terra adibita al bestiame (31% vs 8%) e una coltivazione più varia tenendo conto delle peculiarità specifiche del sito in questione.
C'è inoltre una maggiore tendenza all'affidamento a pratiche di conservazione: le implicazioni di una minore intensità nell'uso dei terreni agricoli diminuisce l'erosione del suolo; anche il terreno coltivato di minori dimensioni è più erodibile a livello intrinseco in quanto per il proprio mantenimento necessita di pratiche pastorali o di copertura per minimizzare l'erosione. A conti fatti il piccolo agricoltore deve essere un miglior amministratore rispetto alla controparte possidente di terreni di maggiori dimensioni, dovendo spendere più tempo per il mantenimento della stessa [76].
Al di là di questioni puramente materiali inoltre ci sono dei valori che difficilmente sono concretizzabili in denaro o produttività, e sono i valori della storia, della tradizione e dell'identità che contraddistinguono le pratiche agricole: il trasferimento transgenerazionale delle pratiche agricole è un elemento maggiormente associato alle popolazioni indigene dei cosiddetti paesi in via di sviluppo ma non per questo inesistente anche nei paesi occidentali; soprattutto in una realtà a densità culturale altissima come l'Europa, ricca di una storia, di saperi, che si collocano ben prima della rivoluzione industriale come ampiamente visto. In questa ottica si considera anche il mantenimento della complessità e continuità ecologica degli ambienti rurali, la complessità delle colture, ma soprattutto lo sviluppo e la riappropriazione dell'identità culturale dei luoghi attraverso una reidentificazione con il patrimonio ambientale [77].

[17] Qui per sostenibilità si intende il termine come definito dagli autori, ovvero l'abilità di un sistema agricolo di mantenere la propria produttività quando soggetto a forze disturbanti (pesticidi, nuovi infestanti, dipendenza dei prezzi dei prodotti petroliferi) [74].

Le parole di D'Souza e Ikerd dell'articolo "Small Farms and Sustainable Development: Is Small more Sustainable?" sono significative:

"We began this analysis by questioning what role farm structure plays in sustainable agricultural development.
To more fully and conclusively understand the role of small farms in sustainable development, we should perhaps begin future work in this area by posing the question differently. For example, what is the best path to sustainable agricultural development? What characteristics must a farm possess for it to be sustainable? What is the optimal size farm-and how should size be measured—in the sustainability era? Can a farm that adopts sustainable practices be sustainable regardless of its size?
Such questions do not have easy answers. They do, however, reveal some of the shortcomings of this analysis and can guide further work in this area [76]*."*

Sicuramente non si possono dare risposte assolute, ma dalle analisi effettuate nei capitoli precedenti è inevitabile collegare il fenomeno di aumento di scala in termini di dimensione aziendale ai paesi del I mondo (in primo luogo gli Stati Uniti d'America che detengono il primato per dimensione aziendale a livello globale) alla maggiore disponibilità energetica dei paesi industrializzati. Sebbene sicuramente non possa essere considerato il fattore unico e principalmente determinante, il maggior uso di fertilizzanti e macchinari di grandi dimensioni è prerogativa dei paesi sviluppati, ognuno con le sue peculiarità.
Come visto la maggior parte della superficie coltivata a livello mondiale appartiene a realtà di piccole dimensioni: il nocciolo della questione è comprendere se attraverso pratiche colturali adeguate si possa garantire la sicurezza alimentare, mantenendo o aumentando la produttività odierna e riuscendo sostenere il tasso di crescita della popolazione.

2.2 Pratiche colturali

Essendo l'agricoltura tra le pratiche più antiche operate consapevolmente dall'uomo in termini di sfruttamento del suolo e risorse, le metodologie adottate dalle varie civiltà nel corso della storia sono molteplici: si potrebbe definire l'agricoltura come la prima scienza empirica applicata dall'umanità [78]. La tappa principale di questo percorso antropologico (figura 26) è rappresentata dal passaggio dallo stato di cacciatore raccoglitore alle prime pratiche agricole del *taglia e brucia*[18] [79]. Questo metodo necessita di un grande quantitativo di terra e lascia spazio col tempo a pratiche più efficienti grazie anche all'introduzione dell'utilizzo della forza animale nelle lavorazioni agricole, quelle che oggi sono conglobate nel nome di *agricoltura tradizionale*. Col passare del tempo, nel corso dei millenni successivi, vengono selezionate piante adatte e animali, domesticandoli e rendendoli parte attiva del processo colturale. Con lo sviluppo dei grandi imperi e regni (Civiltà Cinese, Antico Egitto, Impero Romano), i metodi agricoli vanno sempre più perfezionandosi, con una cooperazione sia nel lato agronomico che meccanico. Con tutte le dovute differenze queste pratiche avevano dei denominatori comuni: si provvedeva allo spargimento di materia organica per reintegrare le sostanze perse dal suolo durante il periodo a coltura, la rotazione e semina di diverse varietà colturali (riso in Cina, grano in Europa). Nel corso di Medioevo e Rinascimento arrivarono in Europa le varietà tipiche dell'Oriente e delle Americhe (riso, pistacchio, agrumi, mais patatata, fagioli, pomodori, ecc…), rimanendo però fondamentalmente inalterate le pratiche a rotazione triennale e a maggese fino al XVII secolo [80]. Da qui in poi si vedrà un progressivo aumento della meccanizzazione: dal XX secolo per mezzo dei combustibili fossili che permisero la creazione e diffusione di motori a scoppio e fertilizzanti, il mondo agricolo, almeno per le nazioni occidentali, vide cambiamenti epocali: da una riduzione esponenziale della forza lavoro a favore dell'industrializzazione e urbanizzazione già cominciata dal XIX secolo, di cui si è già discusso e si parlerà anche nei prossimi capitoli, alla *Rivoluzione Verde*.
È il caso di spendere qualche parola su questo avvenimento che ha condizionato in modo estensivo l'agricoltura moderna e la concezione dell'agricoltura stessa.
La nascita si fa risalire al 1944 in un istituto fondato dalla Rockefeller Foundation [81] che si pone come intento l'aumento dela produttività delle principali colture per mezzo di una vasta operazione volta al

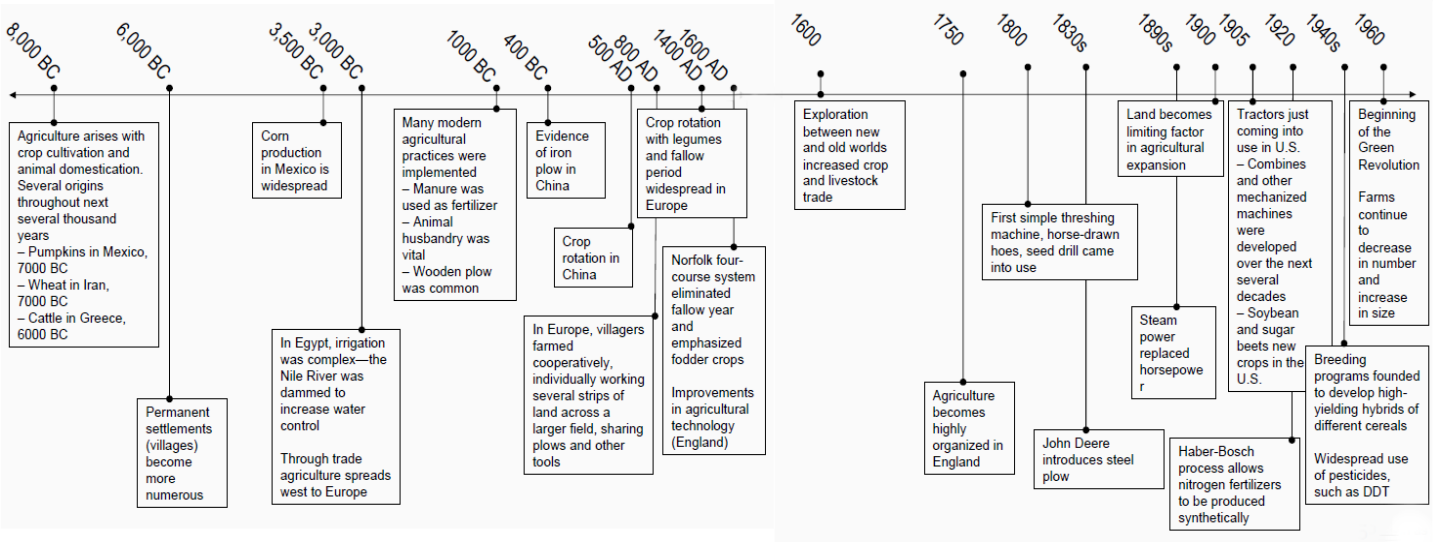


Figura 26 Freccia del tempo con le principali innovazioni agricole nella storia. Elaborazione da darti "The John Hopkins University and Shawn McKenzie" [208]

[18] La tecnica *taglia e brucia* o *slash and burning* è un tipo di agricoltura tipica che rientra nelle pratiche di *shifting cultivation* (paragrafo 1.2). Può essere considerata sostenibile con rotazione ventennale e soddisfa un fabbisogno non superiore a due persone per ettaro. Questo metodo necessita di circa 10 ettari per fornire il fabbisogno di cibo reso disponibile da circa un ettaro di terra coltivata. Una volta sfruttato per un periodo tipicamente pari a due anni, il campo viene abbandonato e la terra lasciata a maggese [79].

miglioramento genetico e l'intensificazione agronomica [82]. Questo "miracolo" fu reso possibile dall'estensione dell'uso di fertilizzanti e pesticidi, l'adozione di varietà colturali ottenute per mezzo di selezione genetica e un'incremento in termini di meccanizzazione; questi metodi furono esportati prima in Europa e poi nel resto del mondo migliorando le rese nei paesi europei e riducendo l'insicurezza alimentare di vaste aree del Sud-Est asiatico, nonostante un minor successo in Africa Subsahariana. Per contro, aumentò notevolmente la dipendenza dai combustibili fossili legati a consumi diretti e indiretti [83]; nel XX secolo la popolazione mondiale crebbe di 3.7 volte, la superficie coltivata aumentò del 40%, i sussidi energetici in agricoltura passando da 0.1 a circa 13 EJ permisero un migliormanento nella resa degli alimenti principali che sfociò in un aumento complessivo di sei volte in termini di energia alimentare raccolta [4]. Quindi se da un lato ci fu un indubbio fattore positivo legato a una maggiore sicurezza alimentare in più vaste aree del pianeta, una maggiore varietà nei cibi consumati, oltre a consentire il progressivo aumento della popolazione, dall'altro si sfocia in problematiche legate alla dipendenza da fonti fossili, quindi fertilizzanti e pesticidi oltre ai mezzi agricoli stessi, erosione e impoverimento del suolo, ciclo dell'azoto, fattori eco-biologici. Alla base paradigmatica della rivoluzione verde il modello di riferimento è quello industriale [82], secondo Giorgio Ferraresi insediatosi come *"un modello vincente di modernità, di industrializzazione e di urbanizzazione crescente e sempre più diffusa che si estende globalmente ad occupare la terra. Questo fenomeno provoca una discontinuità, una rottura di quella lenta e continua riconfigurazione della complessità territoriale, riducendo il territorio stesso a piattaforma dei flussi di merci e funzioni urbane che sono la potenza del modello vincente. È un esito distruttivo del territorio vivente ed è contestuale alla espulsione del mondo rurale dalla modernità: l'agricoltura diviene agroindustria, il settore agroalimentare della produzione di merci* [84]*."*

Una problematica di primaria importanza diventa quella stabilire che cosa possa essere o non essere sostenibile: è ovvio come non ci possa essere definizione ascrivibile a variabili univocamente materiali, ma poste delle adeguate condizioni al contorno si possono effettuare delle analisi significative in termini sia qualitativi che quantitativi: il Professor Tad W. Patzek, seguendo le orme di Odum e Szargut, fornisce un esempio significativo di un'analisi svolta sulla sostenibilità del sistema produttivo ad agricoltura intensiva del mais negli Stati Uniti operata in termini termodinamici [85]. Secondo Patzek la termodinamica provvede a fornire dei validi approfondimenti in termini quantitativi rispetto alla sostenibilità dei sistemi colturali che definisce "permanentemente immaturi", selezionati per la crescita rapida (quindi al massimo rateo di exergia prodotta) in termini di energia edibile fornita da una singola coltura; le monoculture infatti sono soggette ad attacchi di insetti e malattie, caratterizzate da ampi flussi nutrizionali e vengono resettate ogni anno su uno strato di terreno sterile parzialmente coperto coi resti di piante morte. La *Teoria della Successione degli Ecosistemi di Odum*[19] spiega come questi in fase di maturazione sviluppino una strategia di "protezione massima", o meglio, di massimo supporto del proprio complesso strutturale in termini di biomassa in contrasto alle perturbazioni ambientali esterne. Questa teoria causò molto scompiglio nella comunità scientifica; trent'anni dopo Kutsch et al. riprendono il concetto di *maturità* in termini di non equilibrio termodinamico applicandolo e confrontandolo con dati empirici, testandoli su tre livelli: ecosistemi, successione di comunità vegetali e processi microbici, usando particolari indicatori specifici. Giungono alla conclusione che *tutti* i sistemi analizzati supportano le ipotesi iniziali, dimostrando l'esistenza di proprietà degli ecosistemi regolarmente ottimizzate durante un normale sviluppo dell'ecosistema e che tali potenziali indicatori possono essere adottati per dimostrare il significato ecologico del non equilibrio termodinamico [86]. Tali indicatori forniscono una chiave di lettura per quantificare lo stato di maturazione del processo in analisi che viene compiuto considerando sistemi progressivamente più maturi secondo quest' accezione: due sistemi colturali a mais (continuo e a rotazione), un'area a pascolo (*grassland*), una

[19] Lo sviluppo di un ecosistema si può definire come il processo attraverso il quale diverse comunità biologiche raggiungono uno stadio "finale" chiamato *climax*. La termodinamica in questo senso si rende uno strumento funzionale per descrivere lo stato e la direzione di sviluppo degli ecosistemi, valutandoli come sistemi intrinsecamente non isolati in grado di mantenersi in una condizione di non equilibrio termodinamico scambiando flussi di entropia con l'ambiente esterno [224].

faggeta e infine una foresta pluviale di ontani. I campi coltivati rappresentano uno stato pionieristico, le praterie uno stato intermedio, le foreste un ecosistema maturo. In particolare lo stato di "immaturità permanente" del sistema colturale continuo del mais è caratterizzato dal minor numero di specie, l'assenza di fauna al suolo, la inferiore massa microbica al suolo, il minor contenuto di carbonio organico (TSOC[20]), la maggior concentrazione di biomassa senza alberi, il maggior flusso fotosintetico netto, il maggior flusso di produzione netta e di respirazione in relazione al TSOC e un'assenza di produzione di fauna al suolo. Questi sistemi quindi sono contraddistinti da uno *stato perpetuo pionieristico della seconda successione*, quindi guidati da un'alta resa dettata da fonti di energia antropiche esterne e input chimici. Dal momento in cui gli ecosistemi sono intrinsecamente dinamici seguono un ciclo a quattro stadi (figura 27), dei quali i primi due determinano l'evoluzione successiva dell'ecosistema: lo stadio a *Successione o rinnovamento iniziale/intermedio* (1), quello di *Successione o sfruttamento intermedio/tardivo* (2), lo stato *Cilmax* o *di conservazione* (3) metastabile (le foreste tropicali, indisturbate, sopravvivono per diverse migliaia di anni), e l'ultimo stadio rappresentato da un ecosistema discontinuo semplificato chiamato *di distruzione creativa* (4) che può verificarsi ad opera di allagamenti, incendi, agenti patogeni o cambiamenti climatici improvvisi. Prima di tornare allo stato inziale, l'ecosistema si riorganizza attraverso le risorse rese disponibili dall'ultimo stadio (4) rendendosi disponibile per il successivo stato di sfruttamento (2). Questi stadi formano una curva a inviluppo orientata in senso orario reinterpretato in termini di flussi e accumuli di exergia, creando un *quadro termodinamico-ecosistemico di riferimento*. Si nota come nella fase iniziale del secondo stadio, dato un sufficiente apporto di nutrienti e informazioni genetiche, emergono processi dissipativi che assorbono energia dalla luce solare. Il tasso di assorbimento aumenta con l'accumulo di exergia e biomassa, sviluppando un ciclo continuo a feedback positivo che spinge l'ecosistema ad acquisire sempre maggiore struttura e *connessione* e immagazzinare un sempre maggior quantitativo di exergia. Il primo "ramo termodinamico" (fine di 1 -> 2 -> 3) sfrutta l'energia solare come fonte di energia primaria. All'aumentare dell'accumulo exergetico (tradotto in un aumento di immagazzinamento di *biomassa interconnessa*) la probabilità di incorrere in eventi distruttivi aumenta. Al terzo stadio, il sistema è

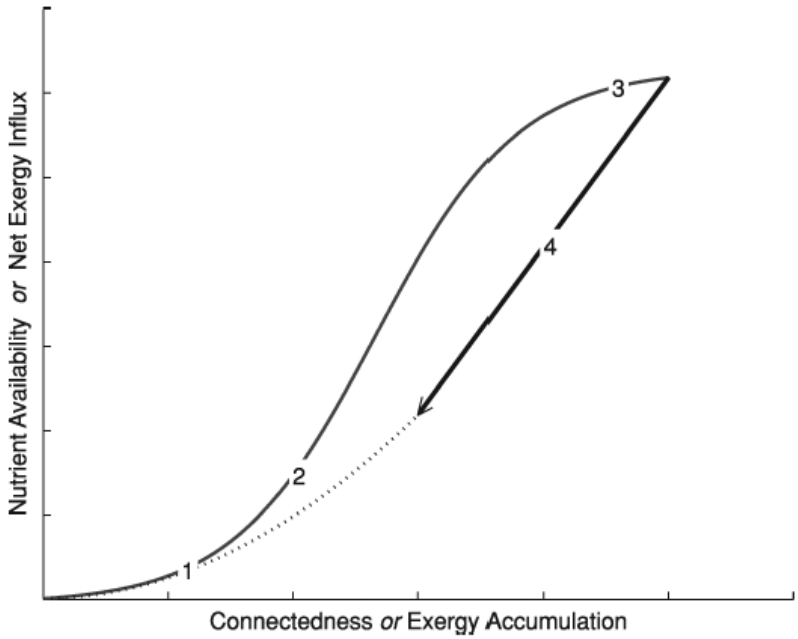


Figura 27 Modello di Odum - Holling rappresentante il quadro di riferimento termodinamico atto a descrivere la dinamica dei cicli ecosistemici [85]

[20] Total Soil Organic Carbon: parametro fondamentale nel ciclo del carbonio e di immagazzinamento dello stesso nel suolo; un basso contenuto indica generalmente scarsa fertilità del suolo, scarsa capacità di ritenzione idrica e resistenza alla compattazione, riduzione della biodiversità e un aumento della suscettibilità del terreno a condizioni acide o basiche [209] [210].

quanto più distante possibile dallo stato di equilibrio, mentre al quarto ritorna al suo stato di equilibrio termodinamico. Maggiore è la densità di interconnessione tra la biomassa, maggiore sarà la probabilità che gli agenti distruttivi si sviluppino simultaneamente operando in concerto.
I sistemi agrari sono guidati artificialmente verso il secondo stadio di massima crescita nel minor tempo possibile grazie a lavoro meccanico, fertilizzanti, pesticidi, ecc. Nel caso particolare di questi sistemi, agenti patogeni particolari intervengono sempre portando il sistema a un'evoluzione del tipo 2 -> 4 -> 1. Questo dimostra anche come sia *impossibile* per un pesticida bloccare l'inevitabile sviluppo di un agente patogeno. Questi agenti andranno a distruggere le "monoculture bersaglio" fino al momento in cui non sarà inventato un nuovo pesticida adeguato (ammesso e non concesso che sia possibile farlo in tempi utili) [85].
Nello stadio di rinnovo, l'exergia immagazzinata nella biomassa "morta" è disponibile per un nuovo utilizzo: gli ecosistemi non solo la riciclano all'interno di ogni stadio 1, 2 e 3, ma lo fanno nel *miglior modo possibile* tra le fasi. Il secondo ramo (3 -> 4 -> 1) sfrutta l'exergia chimica immagazzinata dalla biomassa morta come fonte principale di energia, tramite processi di decomposizione che consumano l'energia immagazzinata nei precedenti processi fornendo così la materia prima per il primo ramo termodinamico.
Rispetto quindi alla *sostenibilità termodinamica locale di un ecosistema* questa può essere definita attraverso la definizione di tre principi:

1. Qualsiasi ecosistema è un sistema termodinamico aperto e scambia massa ed energia con l'ambiente circostante
2. Uno *stato metastabile a massima biomassa* (*climax*) di un ecosistema esiste quando la produzione di entropia interna all'ecosistema è bilanciata dal flusso di entropia uscente dal sistema stesso verso l'ambiente
3. Questo flusso uscente in termini entropici è pilotato da una *pompa a entropia solare* [21]

Dai tre principi seguono tre corollari: primo, perché la "pompa solare" funzioni, solo il calore può essere trasferito dall'ecosistema all'ambiente per essere irradiato successivamente[22]. Secondo, oltre un periodo di tempo sufficientemente lungo, la quasi totalità della massa deve essere riciclata nell'ecosistema mentre il rimanente resta sepolto. Terzo e più importante, *tutte* le monoculture industriali violano la seconda condizione, motivo per cui non sono sostenibili.
Ulanowicz propone una definizione di sostenibilità più accurata e rivista dieci anni dopo [87] basata su metodi di teoria dell'informazione[23]; la capacità di un sistema di subire cambiamenti evolutivi con annessa riorganizzazione viene vista come la somma di due componenti fondamentali che devono verificarsi in un esercizio simultaneo: l'*efficienza* del sistema, ovvero la funzionalità propria dello stesso nell'esercitare un flusso di potenza sufficiente nel tempo e la *resilienza*, ovvero una bastante capacità di esercitare azioni flessibili così da soddisfare le esigenze dovute ai nuovi disturbi. Così facendo la sostenibilità viene definita come la probabilità che il sistema in questione raggiunga un bilancio ottimale tra efficienza e resilienza, per cui un sistema al livello di comunità viene considerato sostenibile al 100%

[21] La "pompa a entropia solare" è un'ipotesi introdotta da Svirezhev: le condizioni climatiche, idrologiche, del suolo e dell'ambiente sono organizzate nel modo che solo un ecosistema naturale specifico per lavorare in queste condizioni possa essere in equilibrio termodinamico (Stato Stazionario). Così facendo, può essere calcolata la produzione di entropia per l'ecosistema causata dall'intervento antropico. Considerando il sistema distante dallo stato termodinamico di equilibrio si dimostra come l'exergia possa essere considerata come variabile di una funzione dissipativa che si spinge lungo una traiettoria da equilibrio termodinamico a dinamico [211].
[22] In termini di bliancio entropico, si considera anche il calore irradiato dall'ecosistema a 300 K verso "l'universo" esterno considerato a 3 K.
[23] Sulla base dello sviluppo teorico della teoria di evoluzione dei sistemi biologici in senso termodinamico, sono state proposte diverse funzioni basate sull'entropia come indicatori i quali puntano a descrivere lo stadio la direzione di sviluppo dell'ecosistema. Ulanowicz et al. per mezzo della teoria dell'informazione sviluppano una funzione di "robustezza" stabilendo un criterio di sostenibilità sulle basi dell'entropia intesa in termini statistici sulle formulazioni matematiche di Boltzmann [87] [225].

quando il bilancio raggiunge un mix ottimale (con l'assunzione che ci sia un singolo stato di mix ottimale); per rimanere tale l'ecosistema naturale necessita di un rapporto favorevole tra ordine e flessibilità.
Un corollario fondamentale a una tale definizione è come sia necessario, per le condizioni poste di ecosostenibilità del sistema, una certa condizione di biodiversità, disordine, una sorta di *inefficienza*. Il che comporta come le monoculture tanto promosse dalla "Green Revolution" siano destinate a un fallimento *certo* nel lungo termine proprio a causa dell'estrema razionalizzazione ed efficienza accoppiata con una mancanza di biodiversità e, quindi, resilienza [85].
La qualità più essenziale della *sostenibilità* non è più quantificabile rispetto a ciò che il sistema *è*, ma cio che *non è*, ovvero l'assenza di informazione: l'*entropia* del sistema.
Ne segue una definizione *globale* di sostenibilità, per la quale si afferma come un processo *ciclico* è sostenibile se e solo se:

1. È capace di essere sostenuto (mantenuto senza interruzioni o perdita di qualità per *sempre*)
2. L'ambiente attraverso il quale viene il processo viene mantenuto e dove il sistema espelle gli "scarti" deve a sua volta essere sostenuto per *sempre*

Questo per sempre viene quantificato in qualche migliaio di anni per la maggior parte dei sistemi antropici e probabilmente a 50-200 anni per i sistemi agricoli tipici della rivoluzione verde negli Stati Uniti. Il risultato rimane il medesimo: un sistema non ciclico non può essere sostenibile, quindi qualsiasi sistema per cui sono necessari input esterni non può essere sostenibile [85]. Si può supporre quindi che le monoculture in questione occupino i punti lungo la parte inferiore del ramo destro della curva di sostenibilità (figura 28).
Per quanto non si possa pretendere, grazie a questi lavori, di dare un significato univoco al termine sostenibilità, indubbiamente si sollevano implicazioni importanti: al di là della minore o maggiore sostenibilità dei sistemi agricoli moderni, sorge una consapevolezza rispetto alla vastità di *non* conoscenza che contraddistingue l'evoluzione dei sistemi naturali, o in generale biologici, nel momento in cui si cerca di seguire un approccio olistico. Si palesa la necessità di unire gli sforzi scientifici in campi quali la termodinamica, la biologia, la genetica e diverse scienze che se prese singolarmente non possono fornire risposte soddisfacenti in quanto nel momento in cui si cerca di descrivere un sistema biologico *vivo* non si possono considerare i diversi contributi con un approccio linare di semplice sovrapposizione degli effetti. La stessa trattazione è stata sviluppata in seguito alla conferma di risultati sperimentali.
Questi metodi non rimangono solo utili a dimostrazioni scientifiche, ma sono stati sfruttati da Pimentel e Patzek, ad esempio, per definire il grado di sostenibilità del sistema di produzione di biocombustibili dal mais negli Stati Uniti.

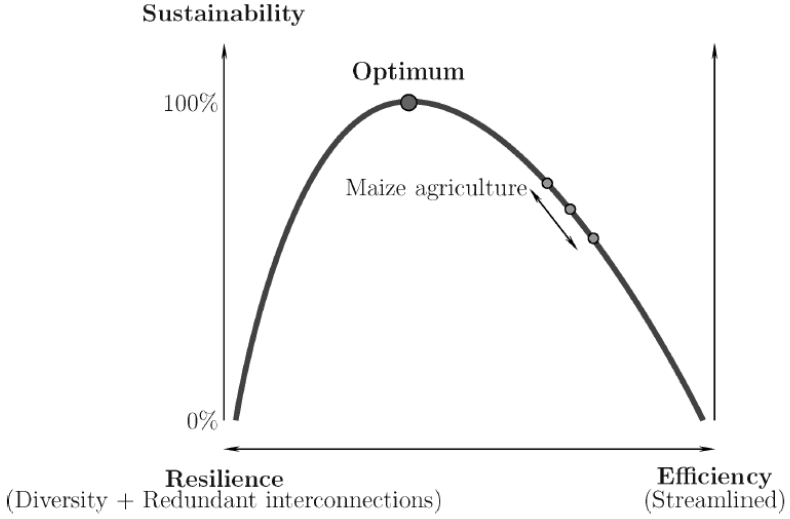


Figura 28 Curva di sostenibilità formulata da Ulanowicz et al. ai cui estremi sono raffigurate Resilienza ed Efficienza [85]

In opposizione alla rivoluzione verde nascono delle pratiche moderne "alternative" all'agricoltura intensiva già nel 1920, in Germania, le prime delle quali dalla figura di Rudolf Steiner attraverso il metodo dell'agricoltura biodinamica. Questa pratica punta principalmente al mantenimento delle proprietà del suolo con mezzi non artificiali.
Negli anni '40 un agronomista inglese residente in India, Sir Albert Howard, cerca di sviluppare le basi scientifiche per la comprensione nella preservazione del suolo e la "salute" delle colture, essendo convinto che la maggior parte dei problemi collegati all'agricoltura dell'epoca derivassero da una cattiva amministrazione del suolo e l'eccessiva fiducia riposta nei fertilizzanti chimici. In particolare esprime il concetto della *Legge di Ritorno*, che enfatizza l'importanza nel riciclo della totalità della materia organica di scarto al fine di mantenere in buono stato la fertilità del suolo [88]. Nella seconda metà del Novecento queste realtà continuano a crescere fino a dare vita a quella che oggi viene denominata *Agricoltura Biologica*, o *Organic Farming*. Precisamente, l'agricoltura biologica rappresenta la contestualizzazione giuridica in ambiente statunitense nel 1990 ed europeo nel 1991 dell'Organic Farming, ovvero una pratica agricola che proibisce l'utilizzo di fertilizzanti e pesticidi di natura artificiale, l'uso di ormoni e antibiotici per l'allevamento, l'utilizzo sia a scopi colturali che di nutrimento del bestiame con prodotti geneticamente modificati (OGM) [89]. A livello internazionale il riconoscimento avviene per mezzo della Odex Alimentarius Commission nel 1999 per quanto riguarda le coltivazioni e nel 2001 per l'allevamento.
L'agricoltura organica si riferisce a un sistema colturale basato sulla massimizzazione della fertilità del suolo attraverso l'uso di risorse locali, il rispetto dei cicli biologici minimizzando l'impatto del comparto industriale alimentare e all'interno di un'ottica di preservazione delle risorse in termini di lungo periodo, in termini sia agricoli che energetici, minimizzando quindi l'utilizzo dei combustibili fossili o non rinnovabili. Tali obiettivi vengono realizzati sfruttando le caratteristiche del suolo: attraverso questo metodo si minimizza l'erosione del suolo aumentando il contenuto di materia organica nello stesso (SOM)[24], migliorandone le caratteristiche biochimiche. Si ricontrano miglioramenti anche in termini di ritenzione idrica del suolo e di immagazzinamento del carbonio (con conseguente abbattimento di emissioni serra) e di biodiversità. L'agricoltura organica se praticata per un periodo adeguato di tempo promuove la massa microbiotica del sottosuolo favorendo il ciclo dei nutrienti e la reistenza agli infestanti (figura 29). L'applicazione di concime naturale aumenta la base di risorse per le comunità

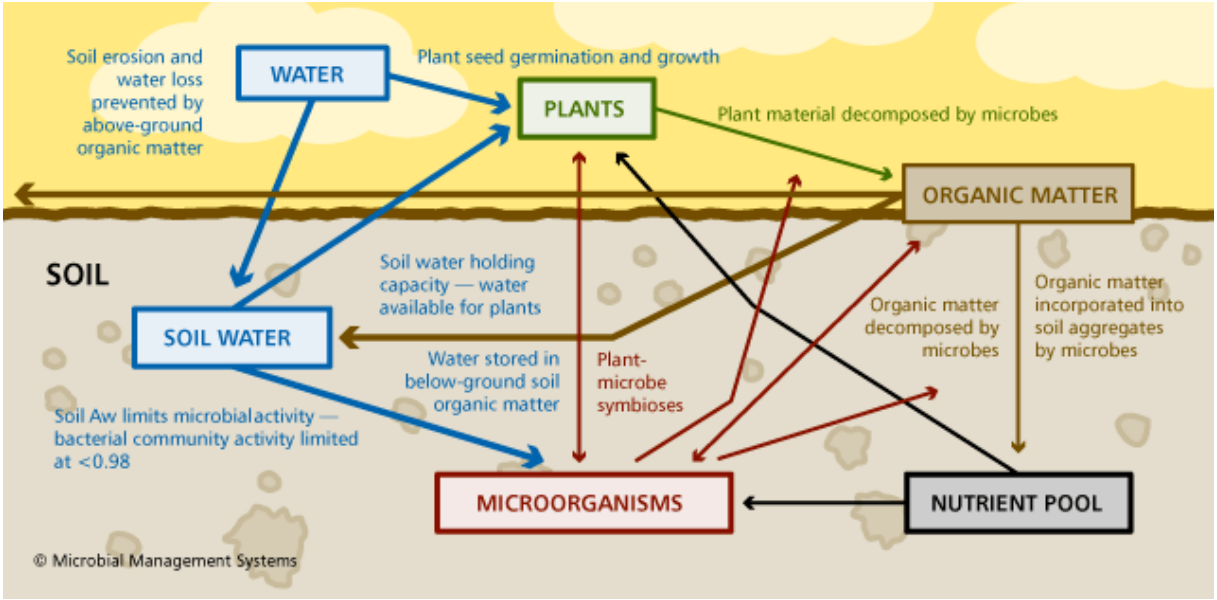


Figura 29 Dinamica della Materia Organica del Suolo (SOM) [207]

[24] La *Materia Organica del Suolo* (SOM) è probabilmente la componente più importante del suolo in quanto ne influenza la struttura, la stabilità, la capacità di ritenzione idrica, lo stoccaggio e il riciclo dei nutrienti, la capacità di trattenimento dell'ossigeno; tutte proprietà fondamentali per il mantenimento e il miglioramento della qualità del suolo [200] e, di conseguenza, la resa agricola.

sottostanti influenzando in modo benefico la biomassa e l'attività dei decompositori appartenenti al bioma. Al contrario, i fertilizzanti e i pesticidi influenzerebbero negativamente il potenziale di controllo dei parassiti abbassando il livello di carbonio organico [90].
L'agricoltura organica è oggetto di studio da una grande varietà di autori e molte analisi sono state compiute per confrontare rese e produttività rispetto all'agricoltura tradizionale. Si è cercato di disporre di una panoramica più ampia possibile partendo prima da analisi puntuali in diversi Stati di diversi continenti [91] [92] [93] [94] [95] [96] [97] le quali, riassumendo, rivelano che il maggior prezzo da pagare per l'adozione dell'agricoltura organica sia un quantitativo in termini di input energetici simili (sebbene diminuisca considerevolmente la dipendenza da fonti fossili) se non superiori all'agricoltura tradizionale e una iniziale diminuzione della resa (mediamente tra il 20 e il 30%); è pero ampiamente confermato come questa dopo un periodo di tempo mediamente di una decina anni si porta a valori pari se non superiori a quelli dell'agricoltura tradizionale, a seconda della coltura.
Pimentel in particolare, in collaborazione con altri autori [98] [99] [100] [101] [102], si spende in numerose analisi in termini energetici, ambientali e di resa. Nei suoi articoli vengono prese in considerazione le problematiche principali dei sistemi agricoli tradizionali e maggiormente diffusi quali

Crop	Technology	Yield (t/ha)	Labor (hrs/ha)	Energy (kcal × 10^6)	kcal output/ (input)
Corn	Organic[1]	7.7	14	3.6	7.7
Corn	Conventional[2]	7.4	12	5.2	5.1
Corn	Conventional[3]	8.7	11.4	8.1	4.0
Soybean	Organic[4]	2.4	14	2.3	3.8
Soybean	Conventional[5]	2.7	12	2.1	4.6
Soybean	Conventional[6]	2.7	7.1	3.7	3.2

Farming System	Reference	Energy Efficiency organic as % of conventional
Analysis for crops under organic and conventional management		
Wheat in USA	Pimentel *et al.* (1983)	+29/+70
Wheat in Germany (various studies)	Stölze *et al.* (2000)	+21/+43
Wheat in Italy	FAO (2002)	+25
Corn in USA	Pimentel *et al.* (1983)	+35/+47
Apples in USA	Pimentel *et al.* (1983)	−95
Potatoes in Germany (3 studies)	Stölze *et al.* (2000)	+7/+29
Potatoes USA	Pimentel *et al.* (1983)	−13/−20
Rotations of different crop systems in Iran	Zarea *et al.* (2000) (in FAO, 2002)	+81
Rotations of different crop systems in Poland	Kus and Stalenga (2000) (in FAO, 2002)	+35
Danish organic farming	Jørgensen *et al.* (2005)	+10
Whole system analysis (Midwest – USA) with comparable output	Smolik *et al.* (1995)	+60/+70
Crop rotations (wheat-pea-wheat-flax and wheat-alfalfa-alfalfa-flax) in Canada	Hoeppner *et al.* (2006)	+20
Apricot in Turkey	Gündomuþ (2006)	+53
Olive in Spain	Guzmán and Alonso (2008)	+50
Crop rotations	Küstermann *et al.* (2008)	+9
Results from Long-Term Agroecosystem Experiments		
Apples in USA	Reganol *et al.* (2001)	+7
Various crop systems	Mäder *et al.* (2002)	+20/+56%
Organic and animals	Pimentel *et al.* (2005)	+28
Organic and legumes	Pimentel *et al.* (2005)	+32
Organic vs. conv. with tillage	Gelfand *et al.* (2010)	+10
Organic vs. conv. no tillage	Gelfand *et al.* (2010)	−30

Figura 30 In alto, una confronto del tasso di rendimento in calorie per combustibile fossile nella produzione da colture di grandi dimensioni: 1) Media tra due sistemi ad agricoltura organica dopo 20 anni in Pennsylvania; 2) Sistema convenzionale dopo 20 anni in Pennsylvania; 3) Valori di resa media del mais negli Stati Uniti; 4, 5, 6 come i primi tre ma rifeendosi alla soia; In basso, un confronto di efficienza in termini energetici per unità di produzione da agricoltura organica espressa in % rispetto ai sistemi agricoli convenzionali [88]

il consumo di suolo, il largo utilizzo di fertilizzanti, l'importanza della Materia Organica del Suolo nella resa della coltura e in particolare la sfida nel trovare un metodo in grado di soddisfare le necessità della popolazione attuale e futura, in costante crescita. Attraverso analisi energetiche in termini input/output (figura 30), biologiche e agronomiche sulla complessità dei fattori influenzanti i sistemi agricoli, questi sostiene come fondamentale il passaggio dall'agricoltura tradizionale a quella organica; ne sono esaltati i benefici in termini di maggiore indipendenza dalle fonti fossili, di sfruttamento meno intensivo delle fonti idriche, maggiore resilienza delle colture a fronte di cambiamenti climatici, miglior conservazione dei nutrienti nel suolo con conseguente capacità di influenza nel ciclo di carbonio ed effetti benefici rispetto all'effetto serra oltre alla minor emissione di gas serra nell processo stesso.
Sebbene l'agricoltura organica venga proposta quasi fosse una panacea, restano ancora diversi problemi da risolvere. Al di là delle complicazioni burocratiche, più o meno influenti a seconda del paese considerato e sicuramente non trascurabili in quanto spesso condizionano l'efficacia del metodo, il problema più oneroso riguarda il ciclo dell'azoto e più in generale l'utilizzo del suolo. Infatti l'agricoltura organica necessita di importanti input esterni in termini di materia organica, una risorsa che non si può definire abbondante. Il punto forte della stessa in termini di gestione del suolo diventa quindi anche il limite; questo problema è analizzato approfonditamente da Smil [103], Tilman e altri.
In particolare, Tilman et Al. offrono una propria visione del problema, analizzato in modo efficace, nell'articolo "Agricultural Sustainability and Intensive Practices" [104] del 2002. Questi focalizzano l'analisi in un'ottica leggermente più ampia, considerando che a un aumento della popolazione del 50% previsto per il 2050[25] il fabbisogno cerealicolo raddoppierebbe. In particolare viene analizzato il consumo di fertilizzanti e il ruolo fondamentale da questi esercitato rispetto all'aumento di resa che ha posto le condizioni per la situazione odierna. Come visibile in figura 31 A e B, in meno di quarant'anni la produzione di cereali è più che raddoppiata, a fronte di un aumento di fertilizzanti di 7 volte per quelli

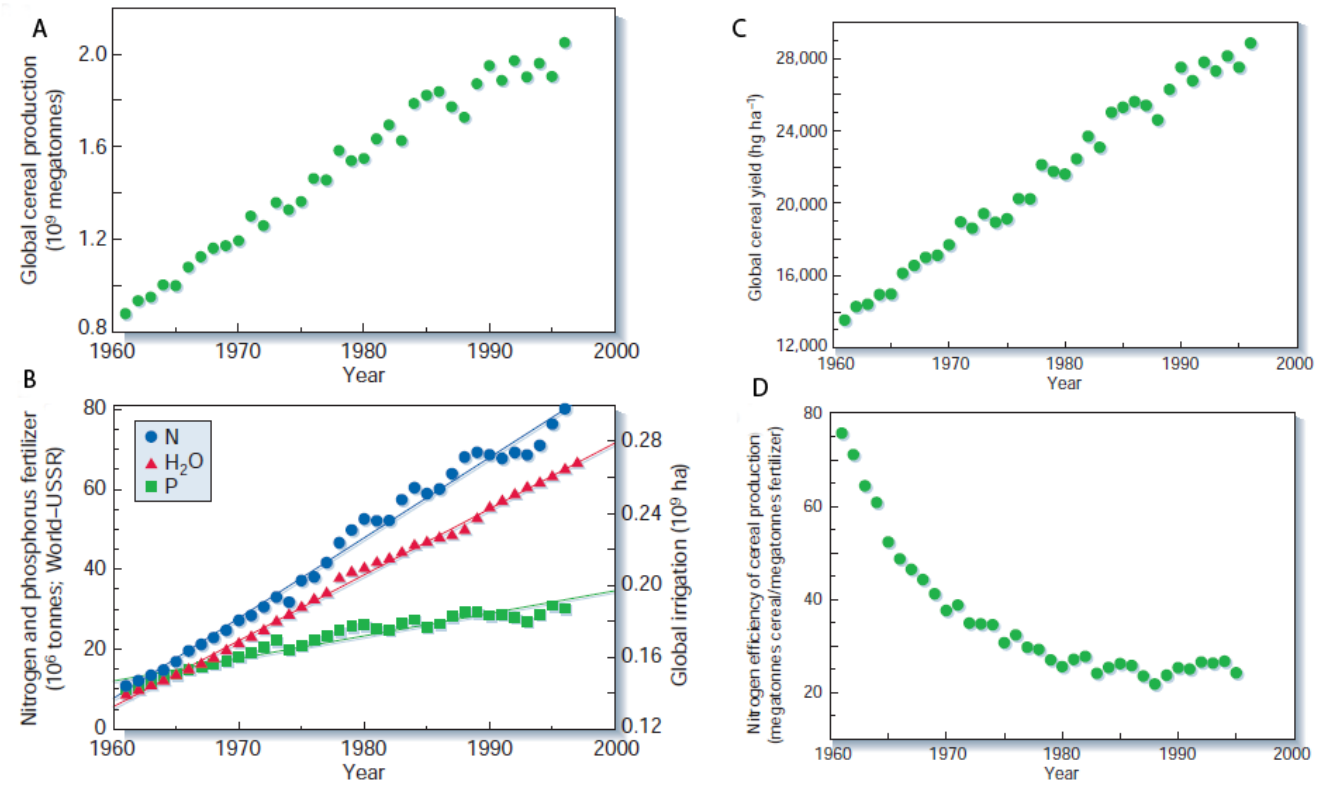


Figura 31 Trend agricoli globali dal 1960 al 1995. A) Produzione di cereali; B) Consumo di fertilizzanti e acqua; C) Resa colturale cerealicola; D) Efficienza dei fertilizzanti nella resa dei cereali [104]

[25] Gli autori nell'articolo considerano un aumento della domanda di cibo legato alle persone che ne dispongono meno del necessario, così da poter coprire il soddisfacimento del fabbisogno minimo individuale e un aumento di consumo di carni [104].

a base azotata e di 3.5 volte per quelli al fosforo: gli autori calcolano un incremento di tre volte per entrambi al 2050. In particolare, gli autori analizzano paesi come Giappone, Corea e Cina (maggiori produttori di riso a livello mondiale) quale esempio di paesi che hanno adottato le tecnologie rese disponibili dalla rivoluzione verde appena possibile in termini temporali. Tilman sostiene come negli ultimi 15-20 anni le rese di questi paesi non siano aumentate, a fronte di un continuo aumento nell'utilizzo dei fertilizzanti: la resa media è pari all'80% del potenziale di rendimento genetico corretto per il clima in questione; questi sostiene quindi come una stagnazione nei potenziali di rendimento sia uno dei principali ostacoli a un'agricoltura sostenibile. Questa stagnazione è efficacemente analizzata anche grazie ai grafici in figura 31, che evidenziano come i fertilizzanti siano efficaci in corrispondenza di un iniziale incremento di sostanza azotata per poi diminuire in efficacia all'aumentare della quantità di fertilizzante adottato: in pratica l'aumento nell'utilizzo dei fertilizzanti atto a un conseguimento di un adeguato livello di crescita della resa porta avviene a discapito dell'efficacia degli stessi. Si sottolinea anche come solo il 20-50% dei fertilizzanti azotati sia effettivamente elaborato dalle colture, contro il 45% di quelli al fosforo: il rimanente viene disperso nell'ambiente circostante causando molteplici problemi a partire dall'eutrofizzazione.
È immediato immaginare come un'applicazione tanto spinta vada a influenzare il ciclo dell'azoto. Lo stesso Smil porta dati molto simili, asserendo come il livello di interferenza dell'uomo nei vari cicli naturali delle sostanze fondamentali per la sopravvivenza degli organisimi eterotrofi sia diseguale [20]. I contributi al ciclo del carbonio di origine antropica, dovuti principalmente alla combustione dei combustibili fossili e l'utilizzo del suolo, non superano il 10% rispetto al tasso di fissazione fotosintetica dell'elemento[26]; per il ciclo dell'azoto il tasso di immissione è pari alla capacità di biofissazione dell'elemento (vedi paragrafo 1.4) [5]. Nel Golfo del Messico ogni primavera l'eutrofizzazione crea una zona ad alta carenza di ossigeno[27] che elimina una varietà di specie viventi in particolare nei fondali e scaccia i pesci. Altre zone marine che recentemente hanno visto l'insorgere di questo problema, unitamente all'alta presenza di alghe, sono il Mar Baltico, il Mar Nero, il Mediterraneo, il Mare del Nord e la Grande Barriera Corallina. Altre problematiche sono legate alle aree urbane, dove gli ossidi di azoto creati dalla combustione sono ingredienti essenziali per la formazione dello smog fotochimico. Le interferenze umane nel ciclo dell'azoto quindi non sono inferiori rispetto a quelle nel ciclo del carbonio, con la differenza che in questo caso il problema di risoluzione dell'interferenza è più delicato rispetto alla decarbonizzazione nella produzione energetica: mentre si può, idealmente e fisicamente, non necessitare delle fonti fossili per la produzione di energia, gli esseri viventi non possono disfarsi della necessità di assimilare l'azoto, il quale è reso fruibile grazie ai vari processi svolti dagli organismi biologici autotrofi e saprofiti [20]. L'aumento continuo della popolazione mondiale porta con sé delle sfide che, per essere affrontate, vanno approfondite nei minimi dettagli; e pensare di mantenere la resa delle colture attuali senza aumentare l'utilizzo di fertilizzanti con i metodi di agricoltura tradizionale, o addirittura ridurlo, non è possibile.
Sicuramente non esiste una soluzione *ad hoc* servita su un piatto d'argento, piuttosto ciò che serve è un maggiore interesse e una più profonda consapevolezza nell'affrontare questi problemi ormai riconosciuti e parte della realtà odierna. La possibilità di studiarli, analizzarli, focalizzando i fattori necessari a preservare l'ecosistema in modo da non influenzare gli equilibri necessari al mantenimento della nostra specie è la sfida principale che ci spetta nei prossimi decenni.

[26] Come acccennato nel aparagrafo 1.4 la biofissazione del carbonio avviene attraverso la fotosintesi: i cloroplasti contenuti nelle cellule vegetali operano le reazioni dalle quali si producono le sostanze costituenti la biomassa. Il fenomeno fu compreso da Calvin nel 1948, scoperta che gli valse il Nobel [2].
[27] Acque anossiche: sono zone di acqua caratterizzate da una forte carenza di ossigeno, fenomeno soprattutto in tempi moderni enfatizzato dall'eutrofizzazione [212]. Questi eventi sono stati osservati in altre ere geologiche a cui corrispondono estinzioni di massa o riduzioni significative della biodiversità marina [213].

2.3 Uno sguardo all'Italia

"*Se la linea di demarcazione convenzionale tra un paese agricolo ed un paese industriale si può porre nel momento in cui il contributo al prodotto interno lordo dell'industria supera quello dell'agricoltura, tale traguardo, per l'Italia, è stato raggiunto già nella prima metà degli anni '30 e, dopo la regressione della guerra, stabilmente a partire dal 1948. La preminenza economica del settore agricolo è, quindi, un dato molto lontano nel tempo per l'Italia e se all'inizio degli anni '50 questo settore incideva ancora per il 31% alla formazione del PIL (contro il 41% di quello industriale) attualmente rappresenta solo poco più del 5%, contro un 34% del secondo* [105]."

Così si scrive in un rapporto dell'Enea di 29 anni fa. Nel 2013 l'agricoltura copre il 2.2% del PIL rispetto al 23.7% di industria e costruzioni mentre la parte rimanente consiste nei servizi (commercio, attività immobiliari, credito, altri servizi) [106]. Il rapporto Enea mette in luce come si sia evoluta la società italiana in questo secolo, il percorso tipico di una nazione industrializzata: in termini agricoli, la rivoluzione verde giunge in Italia nel dopoguerra, permettendo gli aumenti di produttività agricola che consentono urbanizzazione e industrializzazione, per poi giungere ai giorni nostri dove il settore dei servizi fa da padrone, come in tutte le economie caratterizzanti i paesi del I mondo.
L'agricoltura Italiana ha subito forti trasformazioni negli ultimi decenni, soprattutto a causa della spinta nelle politiche agricole da parte dell'Unione Europea, orientate inizialmente a un aumento di produzione e, in seguito, allo stabilimento dell'equilibrio tra consumi e produzione legate ad altri aspetti; in particolare tali politiche riguardano il reddito, il mantenimento sul territorio dell'azienda agricola (quale garante di presenza di un tessuto rurale socialmente vivo) e il rispetto dell'ambiente da ottenere mediante l'adozione di pratiche agricole atte a ridurre la pressione sullo stesso.
Nel 1996 con la Carta Rurale Europea lo spazio rurale è definito come "*il territorio costituito dallo spazio agricolo e non agricolo destinato a usi diversi dall'agricoltura, […] con funzione economica, sociale, ecologica e di tutela del patrimonio rurale* [107]".
Viene quindi accentuato il legame tra territorio e attività svolte in esso conseguite con una coscienza responsabile a livello ambientale, volgendo una particolare attenzione al sostegno di pratiche agricole sostenibili.
Le informazioni statistiche atte a concretizzare simili concetti sono state divise in settori tramite il progetto IRENA (Rapporto sugli indicatori di integrazione delle tematiche ambientali nella politica agricola) e dall'Agenzia Ambientale Europea attraverso gli stati membri ed enti come Eurostat. Questo progetto ha portato alla definizione di 28 fattori agro-ambientali atti a monitorare le politiche agricole europee. Dal 2006 è adottata la strategia *The Renewed EU Strategy for Sustainable Development (EU SDS*), col compito di sviluppare comunità sostenibili per l'uso efficiente delle risorse nelle future generazioni [108].
Dal rapporto ISTAT "*Atlante dell'agricoltura Italiana*":

"L'agricoltura e il territorio, come è stato più volte ricordato in questo testo, sono un binomio imprescindibile che fonda le sue radici negli aspetti più tradizionali del comparto agricolo. Sebbene l'agricoltura italiana abbia modificato profondamente il suo assetto produttivo, innovando e diversificando nel tempo il risultato finale della sua produzione, il legame con il territorio è l'elemento che per ovvie ragioni rimane invariato. La natura produttiva del settore primario e l'utilizzo del territorio è, in primo luogo, il suo elemento distintivo. Ne consegue anche un controllo diretto delle aree gestite dalle aziende agricole, che realizzano implicitamente ed esplicitamente il naturale ruolo di "sentinella" dell'ambiente circostante. Tuttavia, negli ultimi anni, la profonda crisi attraversata anche dal settore primario ha in alcuni casi modificato questo rapporto simbiotico con il territorio."

Nel 2013 le aziende agricole risultano poco meno di 1.5 milioni (9.2 per cento in meno rispetto al 2010), con una dimensione media di 8.4 ettari. Il 54.9% della superficie agricola utilizzata è investita a seminativi, il 18.2% a coltivazioni permanenti e il rimanente 26.9% a prati permanenti e pascoli.

Le aziende che praticano l'allevamento sono il 12.9% del totale, la specie bovina risulta la più diffusa. L'azienda agricola italiana si conferma a carattere prettamente familiare, infatti ben il 77.4% del complesso delle giornate di lavoro della manodopera totale sono prestate dal conduttore, dal coniuge e da altri parenti e familiari. In termini assoluti la maggior parte delle aziende è concentrata nelle regioni del Mezzogiorno; in particolare Puglia, Campania, Calabria e Sicilia sono le prime quattro regioni dove complessivamente è stato rilevato quasi il 48% delle aziende agricole italiane. Tra queste, le regioni che presentano valori con una percentuale superiore al 10% sono Puglia (16.8%) e Sicilia (13.%). La distribuzione territoriale delle aziende agricole mostra una forte polarizzazione tra il Nord e il Mezzogiorno della penisola, rimarcando la diversa vocazione produttiva delle regioni italiane; in particolare l'unica regione del Nord Italia con un numero di unità superiore alle 100 mila è il Veneto (119˙384) [107].
L'ultimo Censimento denota un sostanziale aumento della dimensione delle aziende agricole, che diminuiscono più di quanto non aumenti la loro superficie. La dimensione geografica, inoltre, sottolinea come questo andamento sia estremamente diversificato e più marcato nel Nord; questo nuovo scenario, per altro già evidenziato nel paragrafo 2.1, mostra come si sia evoluto nel corso degli anni l'assetto produttivo del comparto agricolo. Ciò, naturalmente, presuppone anche un diverso paradigma interpretativo che metta in luce i cambiamenti sostanziali che sono avvenuti nell'ultimo decennio: da un lato, ad esempio, la minore vulnerabilità delle aziende agricole grazie all'accresciuta dimensione territoriale (più evidente nel Mezzogiorno piuttosto che nel Nord Italia), ma dall'altro la loro trasformazione verso una concezione più "industriale" del settore primario.

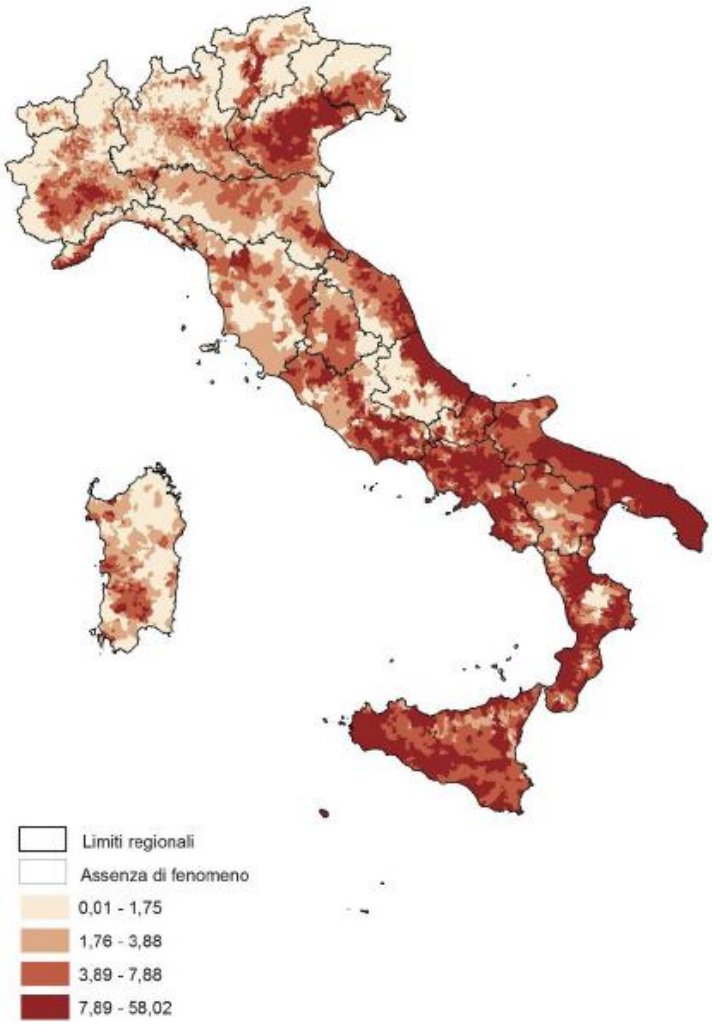


Figura 32 Aziende agricole per comune [#/km2] [107]

In figura 32 si osserva la densità delle aziende agricole esistenti all'interno dei confini italiani, ossia il rapporto tra il numero di aziende e la superficie territoriale. Il numero medio di aziende per km^2 è di 5.4 ed è soprattutto nel Sud Italia che si presentano le regioni con la maggiore densità.
Il censimento del 2010 rivela inoltre le tendenze nella distribuzione territoriale delle aziende, che pur avendo subito modifiche negli ultimi anni risulta ancora essere dominata dall'azienda individuale e dalla conduzione diretta in cui è il conduttore a prestare l'attività di coltivazione o allevamento dell'azienda, da solo o con l'aiuto dei familiari. C'è quindi ancora un forte radicamento della famiglia imprenditrice.
A livello nazionale, infatti, l'incidenza percentuale sul totale del numero delle aziende e della superficie agricola utilizzata con determinate caratteristiche mostra i valori maggiori per l'azienda individuale, con il 96,1 per cento delle aziende che coltiva il 76,1 per cento della SAU (Superficie Agricola Utilizzata).
Le percentuali maggiori si attestano sulle aree montane, fatta eccezione per Trentino - Alto Adige e la provincia del Verbano-Cusio-Ossola [107].

L'Italia è tra i primi dieci paesi nel mondo e seconda in Europa in termini di superficie coltivata a biologico; con i suoi 1.3 milioni di ettari l'agricoltura biologica copre il 6.1% delle superficie agricola, seconda alla Spagna, seguita da Francia e Germania [109]. Le aziende agricole biologiche coprono il 4.4% del totale: va considerato che a differenza di quanto si possa pensare la superficie media di un'azienda biologica si attesta attorno ai 28 ha, più di tre volte superiore alla media nazionale (21.2 ha nel Nord contro i 39.4 del Sud – figura 33) [110]. Le rese delle colture a grano biologico a livello nazionale variano dalle 4 alle 6 t/ha (2016, [111]), quindi non troppo diverse dai dati osservati a livello mondiale in precedenza. La media italiana nel 2016 è pari a 4.2 t ha^{-1}, contro le 3.5 t h^{-1}di quella americana e le 3.4 t ha^{-1} di quella mondiale [38]. Va comunque detto che analizzando gli studi di diversi autori [112] [109] si confermano le parole dette nel paragrafo precedente rispetto alla minore resa iniziale; come visibile nell'esempio di una realtà biologica nella zona di Padova considerato in figura 34, col metodo biologico gli input energetici fossili sono decisamente inferiori rispetto all'agricoltura convenzionale.
A livello regionale il supporto all'organico giunge dai fondi del Programma di Sviluppo Rurale, grazie a un importante ruolo svolto dall'EIP (European Innovation Partnership) nel programma 2014-2020. I programmi di ricerca non sono mancati in questi anni: tra i vari, nel 2013-2015 si è vista la partecipazione italiana al progetto COBRA (Coordinating Organic Plant Breeding Activity for Diversity), un progetto di ricerca sui semi da agricoltura organica: questo progetto era basato sulla consapevolezza che in un'ottica di cambiamenti climatici fattori di minaccia quali infestanti e parassiti possono rivelarsi un

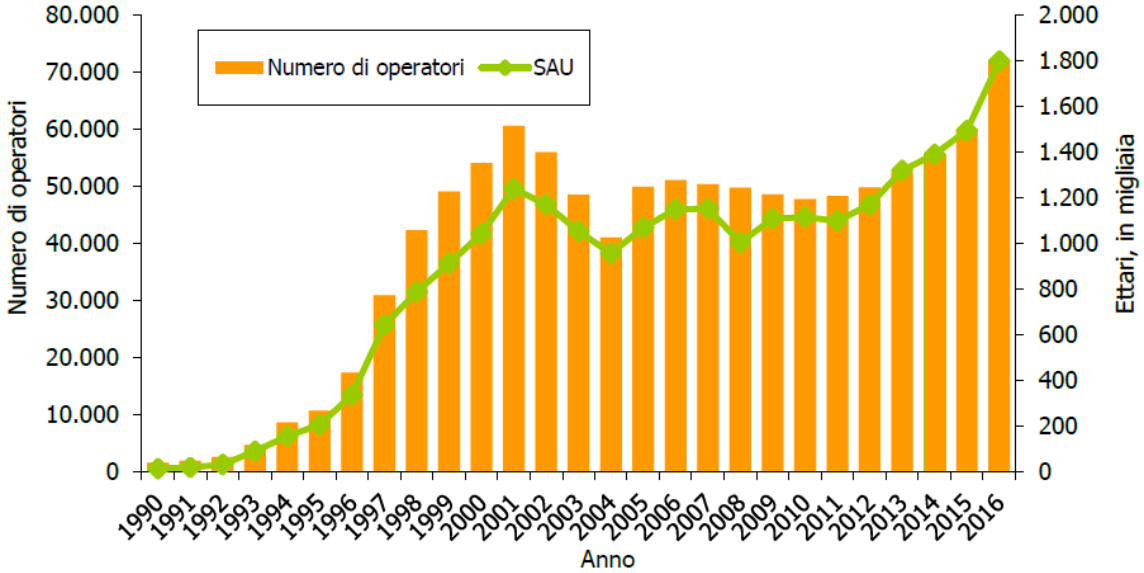


Figura 33 Numero di operatori e Superficie Agricola Utilizzabile nell'agricoltura organica italiana [110]

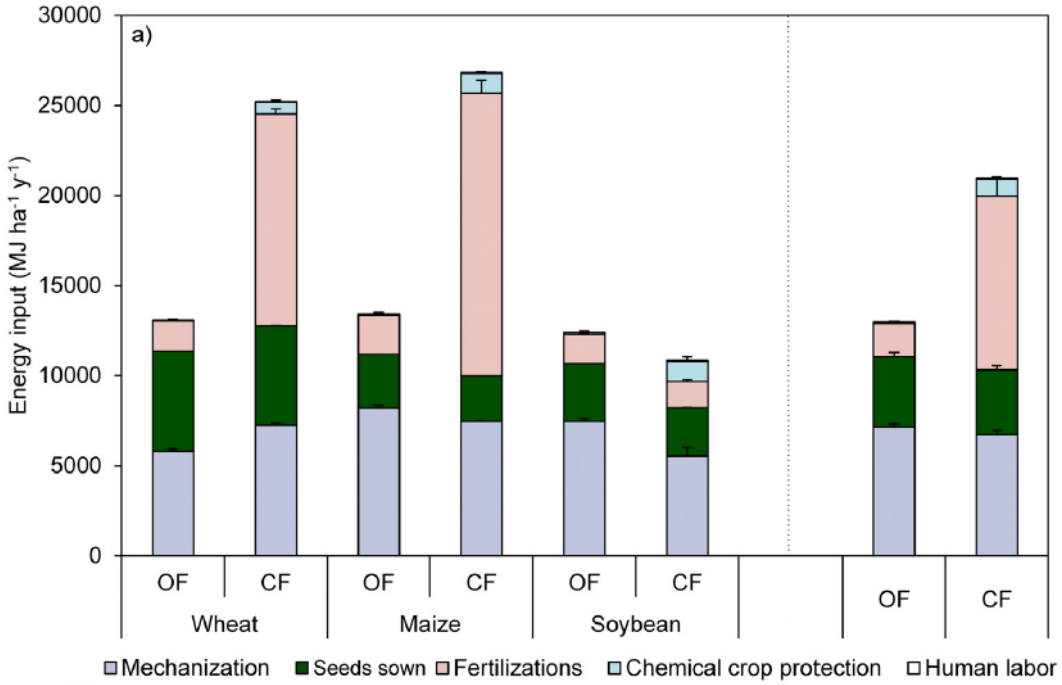


Figura 34 Confronto di Input energetici tra realtà agricola biologica e tradizionale nella provincia di Padova [109]

problema decisamente importante per l'agricoltura nazionale. CORE Organic, un'associazione europea dedita alla cooperazione tra diverse figure nazionali europee ha recentemente valutato quattro temi di ricerca in ambito colturale, di interazione tra suolo e pianta e biodiversità. Di fatto i temi più trattati sembrano essere sul campo della gestione del suolo e fertilizzazione (47%), protezione delle piante (22%), aspetti economici e sociali (12%), produzione e allevamento di animali (11%) e qualità dei prodotti organici (8%). Realtà che consolidano un passo in avanti rispetto ai tempi iniziali nei quali i gruppi di ricerca erano molto frammentati [113]. Un altro importante istituto per la ricerca nell'agricoltura organica è il RIRAB, gli obiettivi del quale sono diffusione e crescita della ricerca scientifica in campo di sviluppo tecnologico in termini dell'agricoltura organica. Questa rete è composta da 300 ricercatori italiani variando il campo di ricerca dalle tecniche agronomiche ai consumi energetici.

3. ENERGIA E MECCANIZZAZIONE

"Ciò che è accaduto nel corso degli ultimi duecento anni alla lotta entropica dell'uomo costituisce una vicenda impressionante. Da un lato, grazie allo spettacolare progresso della scienza, l'uomo ha raggiunto un livello di sviluppo economico che ha del miracoloso. Dall'altro, questo sviluppo lo ha costretto a spingere lo sfruttamento delle risorse terrestri a un grado sbalorditivo. Esso ha altresì sorretto una crescita demografica che ha aggravato la lotta per il cibo, protando in alcune aree questa pressione a livelli critici. La soluzione, invocata unanimemente, è un'accresciuta meccanizzazione dell'agricoltura. Ma cerchiamo di capire che cosa significhi questa soluzione in termini di entropia. In primo luogo, eliminando il partner tradizionale dell'agricoltore – l'animale da tiro – la meccanizzazione dell'agricoltura permette l'allocazione dell'intera superficie alla produzione alimentare […]. Ma il risultato ultimo (e il più importante) è uno spostamento dell'input di bassa entropia dalla fonte solare alla fonte terrestre. Il bue o il bufalo – che derivano la loro energia meccanica dalle radiazioni solari catturate dalla fotsintesi clorofilliana – sono sotituiti dal trattore la cui produzione e il cui funzionamento avvengono con l'aiuto di bassa entropia terrestre. E lo stesso avviene nel passaggio dal letame ai concimi artificiali. Il risultato finale è che la meccanizzazione dell'agricoltura è ua soluzione che, pure inevitabile nella presente impasse*, è a lungo andare antieconomica. In futuro, l'esistenza biologica dell'uomo si troverà a dipendere in misura sempre maggiore dalla più scarsa delle due fonti di bassa entropia. C'è anche il rischio che l'agricoltura meccanizzata finisca con l'intrappolare la specie umana in un cul-de-sac: è cioè possibile che alcune delle specie biologiche legate all'altro metodo di sfruttamento della terra siano condannate all'estinzione* [114]*."*

Nicholas Georgescu-Roegen, "Bioeconomia"

La parola *meccanizzazione* può essere intesa in molti modi: a livello di definizione questa viene intesa come l'attività volta alla trasformazione dell'attività manuale a una che si serve di macchine [115]. In un senso più ampio essa può essere intesa come lo sviluppo di organi esosomatici e il loro miglioramento in un'ottica di maggiore efficienza e produttività.
La parola *esosomatico*[28] viene coniata da Alfred J. Lotka, famoso per i suoi studi sulla dinamica delle popolazioni. In contrapposizione ai fattori *endosomatici*, i quali hanno origine genetica (gambe, mani, piedi…) i fattori esosomatici sono un'estensione delle naturali funzioni umane: le funzioni naturali vengono supportate da organi artificiali prodotti usando materiale, organico e non, dal sistema planetario [116]. Con tale definizione la meccanizzazione risulta qualcosa che potrebbe definirsi quasi insito nell'uomo, una tendenza al miglioramento delle proprie condizioni materiali.
In ambito agricolo la meccanizzazione ha giocato un ruolo fondamentale in particolare a partire dal XIX secolo, molla primaria dell'industrializzazione occidentale. La pratica agricola non può però essere riconducibile a un ambito prettamente industriale, al punto che Crescini paragona l'azienda agricola a "*una cellula vivente, che assorbe, assimila, traspira e respira (consuma), che non vive isolatamente ma in reciprocità di scambi con le altre cellule che compongono tessuti e organi: l'azienda agraria si collega al mondo "esterno" in rapporti di reciproco scambio con l'ambiente e l'umana società* [117]."
Si deve quindi esulare da un contesto prettamente economico, materiale e deterministico, scendendo a compromessi con quello che è il mondo biologico e naturale.
La meccanizzazione gioca un ruolo fondamentale fin dai tempi più antichi, con la comparsa del primo aratro ben 6000 anni fa in Mesopotamia poi diffusosi in Medio Oriente, Europa, Africa e Asia [5]. Nel

[28] Il primo a introdurre questo termine è Alfred J. Lotka, poi largamente usato da Roegen e molti altri. Si riportano le parole di Lotka: "*In place of slow adaptation of anatomical structure and physiological function in successive generations by selective survival, increased adaptation has been achieved by the incomparably more rapid development of 'artificial' aids to our native receptor–effector apparatus, in a process that might be termed exosomatic evolution* [191]."

corso delle varie scoperte agricole le innovazioni non sono sempre state vincolate alla meccanizzazione, si vedano per esempio la rotazione triennale, il maggese o altre pratiche che prescindono dall'uso di determinati strumenti esosomatici (come si vedrà in seguito questa distinzione è perfettamente comprensibile in termini di *produttività della terra* e *produttività del lavoro*). Ciò nonostante è innegabile il contributo apportato dalla stessa: meccanizzazione e innovazione agricola non possono essere svincolate l'una dall'altra.
A partire dal XIX secolo infatti negli Stati Uniti d'America comincia un processo di meccanizzazione teso all'aumento della produttività della superficie agricola senza precedenti nella storia dell'uomo, che porta a una successione continua di innovazioni, per la maggior parte di matrice meccanica.
Si passa infatti a metodi sempre più sofisticati e produttivi, che inizialmente si avvalgono della trazione animale fino al suo limite estremo: si pensi a una delle prime mietitrebbiatrici della "Stockton Works" degli anni '80 del XIX secolo: queste macchine si avvalevano dell'utilizzo di un uso di cavalli variabile tra 16 e 40 [5]! Al di là della difficoltà logistica, i tempi erano evidentemente maturi per un'evoluzione in termini di motore primo: pochi anni dopo compariranno i primi motori a combustione interna che in pochi decenni renderanno i mezzi a trazione animale un mero ricordo.
L'introduzione dei motori a combustione interna si rivelerà una svolta fondamentale in agricoltura (i motori a vapore verranno usati per un periodo limitato precedente ai primi anni del '900 ma senza risultati apprezzabili): la riduzione impressionante del lavoro umano, la maggior velocità nelle operazioni che soficano in un impressionante aumento della produttività. Tutto questo viene reso possibile in termini più specifici grazie all'aumento di *densità di potenza* del motore primo: si passa da 1 W kg^{-1} circa per i motori umano/animale fino a 1 kW kg^{-1} tipico dei motori a scoppio dei primi del '900 [4], con una differenza che si attesta attorno a ben tre ordini di grandezza.
È ovvio come per un'attività quale l'agricoltura che per millenni è fondata su disponibilità e limiti derivanti dalla trazione umana e animale poter disporre di simili densità di potenza non può essere definito in altro modo che rivoluzionario. È infatti con la diffusione di tecnologie quali fertilizzanti e pesticidi che il quadro sarà completo perché si creino i presupposti per l'inizio della cosiddetta rivoluzione verde.

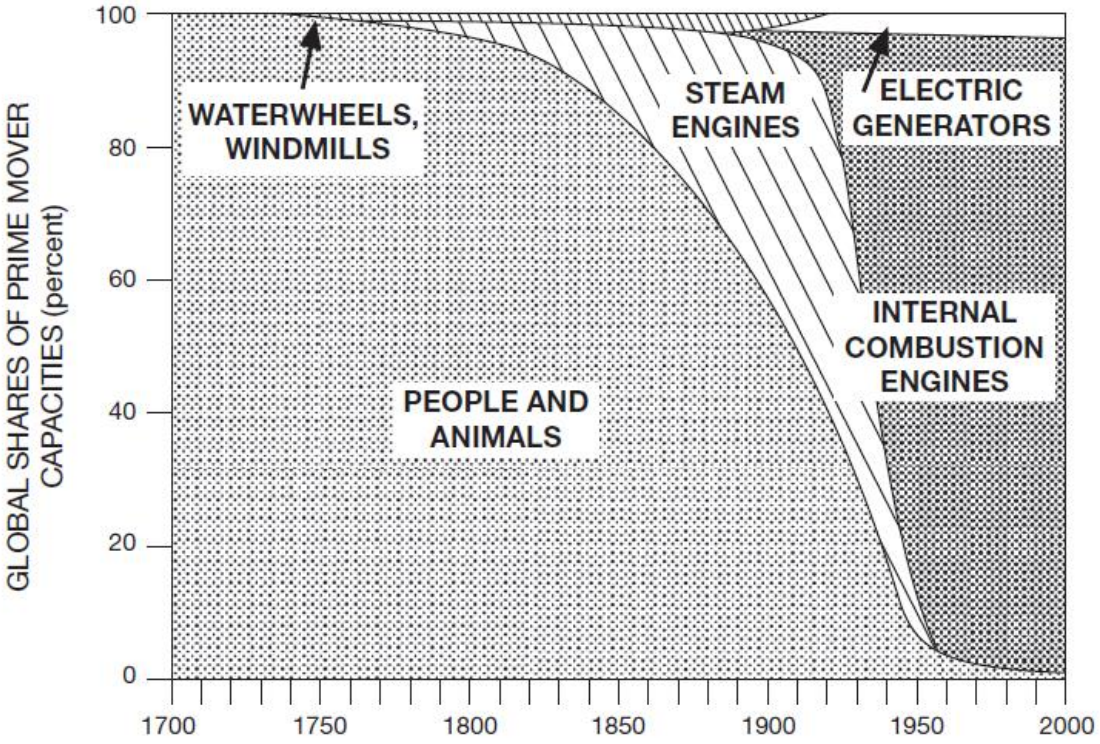


Figura 35 Distribuzione percentuale dei motori primi in utilizzo dal 1700 a oggi [4]

Il progressivo abbandono delle tecnologie a trazione animale (riadattate prima e progettate ad hoc poi) in simbiosi col motore a scoppio, accoppiato all'aumento del fabbisogno di cibo e della popolazione proprio della seconda metà del secolo scorso permette una diffusione capillare delle nuove tecniche agricole.
Solo dopo la crisi petrolifera del 1973 sorgono le prime riflessioni riguardo alle *esternalità* proprie dall'adozione del modello produttivo intensivo. La crisi petrolifera stimola riflessioni più profonde rispetto alla forte dipendenza dai combustibili fossili, la necessità di svincolarsi da una mentalità di estremizzazione della produttività cercando di considerare l'ambiente agricolo nel suo insieme e non solo come "generatore di cibo". A tal proposito P. Bolli e M. Scotton sottolineano la differenza tra un processo tipicamente industriale e il processo agricolo. Nel primo è la macchina a trasformare la materia prima in prodotto finito con prefissate caratteristiche, mentre in agricoltura è la natura, attraverso il lavoro di cellule vegetali e animali, che elabora la materia prima per trasformarla in prodotto finito: la macchina quindi dovrebbe solo creare l'ambiente più favorevole alla vita delle cellule, durante il processo produttivo, e raccogliere il frutto del loro lavoro, in seguito. Sebbene infatti le macchine di moderna concezione permettano una maggiore velocità di esecuzione grazie alle maggiori potenze disponibili, l'altra faccia della medaglia è una minore perfezione nell'esecuzione del lavoro (zappatura, sarchiatura, trapianto, raccolta…) che spesso viene facilitato con specifici trattamenti per minimizzare l'inconveniente. Si fa così ricorso anche a pratiche genetiche per modificare conformazione e disposizione delle piante e persino le caratteristiche dei prodotti per rendere possibile, ad esempio, la raccolta meccanica: una faccenda da svolgere col minimo impiego di manodopera, minima spesa e massima tempestività. A una peggiore qualità dell'operazione quindi si somma anche una peggiore qualità del prodotto [118].
Ultimi ma non meno importanti risultano i fattori ambientali e di modifica dell'ambiente naturale: nelle agricolture ad alta produttività, che necessitano di una meccanizzazione spinta, viene preferita la monocultura, un ampliamento dei campi per massimizzare le dimensioni e ridurre gli ostacoli o rallentamenti. Questo comporta una profonda alterazione dell'ambiente naturale per cui non è per nulla certo che la produttività dei terreni, esaltata in un primo periodo, possa essere assicurata anche in seguito, avendo violato le leggi immutabili e universali che regolano i fenomeni vitali.
Aggiungendo anche il problema dell'erosione il quadro che ne consegue determina inevitabilmente uno squilibrio dei rapporti biologici tra mondo vegetale e mondo animale, poiché il nuovo habitat è causa della scomparsa di alcune specie animali o della maggiore diffusione di altre [118].
Si cita a tiolo di esempio il fenomeno accaduto negli anni '30 negli Stati Uniti d'America denominato *Dust Bowl* (figura 36): una tempesta di polvere di enormi dimensioni avvenuta nelle *Great Plains*[29], in particolare nella zona che comprende Texas, Kansas e Oklahoma. La causa di un simile evento è da imputarsi a un insieme di fattori quali principalmente una siccità prolungata e pratiche agricole poco appropriate che hanno portato a una grave erosione del suolo, che unitamente a ripetute tempeste di vento provocò danni ingenti a tutta la zona lasciando senza casa più di 500˙000 persone [119], oltre ai problemi ecologici ed economici aggravati dal precario periodo storico [120]. A partire da questo evento molti studi sono stati fatti sulle cause[30], soprattutto in un'ottica di resilienza rispetto ai cambiamenti climatici [121]: la Nasa sostiene che un tale fenomeno sia stato possibile a causa di una temperatura inferiore delle acque superficiali dell'Oceano Pacifico e più calde nell'Atlantico a creare le condizioni atmosferiche perché il granaio degli Stati Uniti diventasse un'immensa nuvola polverosa [122].
La meccanizzazione quindi va considerata con pregi e difetti, con la consapevolezza dei limiti a cui è soggetta nell'ottica della protezione e valorizzazione delle componenti naturali di un determinato habitat; non per mettere dei freni al miglioramento della vita dell'uomo, ma per garantire il miglioramento della vita dell'uomo nel tempo [118].

[29] Le Great Plains si estendono per tutta l'America Centrale a Est delle Montagne Rocciose. Dopo aver scacciato i bisonti e le numerose popolazioni indigene che vi vivevano, dal 1870 divennero campo "libero" per qualunque americano volesse aprirvi un ranch [226].
[30] L'erosione del suolo causata da pratiche agricole improprie provoca una diminuzione della qualità della materia organica e della qualità del TSOC. L'argomento verrà approfondito nel paragrafo 5.1 relativo ai metodi di aratura.

Figura 36 Dust Bowl – Tempesta di polvere in arrivo a Stratford, Texas. 18 aprile 1935 [227]

Un ulteriore aspetto della meccanizzazione è legato alle conseguenze sociali: la combinazione di fattori quali industrializzazione e maggiore produttività agricola portano a un processo di migrazione senza precedenti dalle campagne alle città a partire dal XIX secolo; nei paesi industrializzati prima e in quelli in via di sviluppo poi (nei paesi meno industrializzati, tipicamente appartenenti alle regioni dell'Africa Subsahariana e Sudamerica, la meccanizzazione non è ancora diffusa) si verifica un vero e proprio esodo. L'aumento di produttività del lavoro reso possibile dallo sfruttamento delle fonti di energia fossile permette al contadino americano medio di passare da una produzione di 30 ore per tonnellata di grano nel 1800 a meno di 7 h/t nel 1900 e 90 min/t nel 2000. Un processo simile avviene in Unione Europea, in cui ad oggi gli occupati nel campo dell'agricoltura non superano il 5%. Ed è esattamente grazie a questa "disponibilità" di manodopera che si rende possibile il fenomeno dell'urbanizzazione spinta (figura 37).

Nel 1900 solo il 15% delle persone abitava in città, nel 2015 gli agglomerati urbani che superano questo limite sono all'incirca 550 ed è grazie alla maggiore disponibilità di energia che tutto questo è reso possibile: in epoca preindustriale una città di 500˙000 abitanti necessitava di 150˙000 ettari di terreni agricoli e 100˙000 ha di terreni boschivi per il procacciamento del combustibile; città di simili dimensioni per sostenersi necessitavano di aree agricole e boschive da 50 a 150 volte la propria stessa area per il proprio sostentamento. La città moderna, a parità di popolazione, necessita di un'area agricola di non oltre 700˙00 ettari (meno della metà) e può essere alimentata da un impianto di produzione energetica su larga scala ed alta intensità per soddisfare i propri bisogni che per essere alimentato necessita di un'area enormemente inferiore rispetto alle aree boschive precedentemente citate; si calcola che nel 2011 le 27 più grandi città del mondo (abitate da meno del 7% della popolazione mondiale) abbiano consumato il 9% dell'elettricità e il 10% della benzina a livello globale [4]. Un processo senza eguali nella storia dell'essere umano, reso possibile solo grazie alla disponibilità di energia e versatilità di consumo data dai combustibili fossili, petrolio in primis.

A conti fatti una simile densità di popolazione è quindi resa possibile dalla riduzione dei tempi di lavoro per tonnellata prodotta, così che poche persone impiegate nel settore primario possano mantenerne il più possibile impiegate in altri settori, prima industriale poi dei servizi, che trovano massima espressione

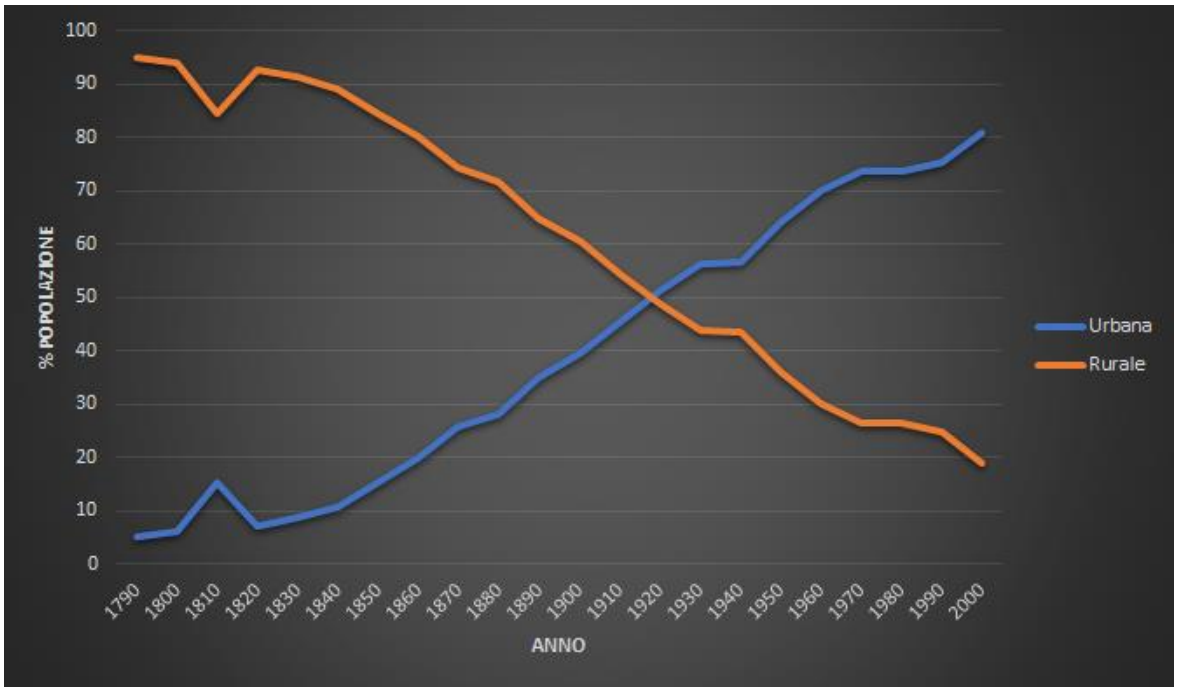


Figura 37 Percentuale della popolazione suddivisa in urbana e rurale negli Stati Uniti dal 1790 [228]

nella realtà cittadina sostenuta da una controparte agricola a intensa produttività, caratterizzata da una meccanizzazione molto spinta che permetta di diminuire al massimo i tempi di lavoro.
Al di là di considerazioni ambientali, la caratteristica di non rinnovabilità intrinseca alle fonti fossili rende un simile sistema di approvvigionamenti strettamente dipendente dalla disponibilità di queste stesse fonti e quindi fortemente vulnerabile. Nell'ottica di una riduzione di tale dipendenza, è fondamentale fare delle considerazioni che permettano di svincolarsi da una realtà tanto delicata; un tale obiettivo può essere conseguito unicamente con una corretta e realistica valutazione rispetto all'utilizzo delle risorse (non solo in campo agricolo) unita alla consapevolezza che un simile sistema produttivo non sarebbe realizzabile in caso di assenza di materie prime di origine fossile. La difficoltà sta proprio nell'identificare il compromesso accettabile tra una determinata tecnologia a cui è associato lo sfruttamento di una certa tipologia di risorse non rinnovabili con un'altra che permetta di mantenere la produttività entro una soglia accettabile senza compromettere la *resilienza* del settore agricolo, principale protagonista della produzione di beni di primaria necessità.
Diviene quindi fondamentale la ricerca, la definizione, di una corretta meccanizzazione: una meccanizzazione *appropriata*, che non sia intrinsecamente dipendente da sistemi di approvvigionamento energetico non rinnovabile e che come obiettivo, oltre alla produttività, tenga in conto anche di parametri quali la sostenibilità ambientale, la disponibilità risorse, lo svincolarsi da una dipendenza di un comparto tecnologico ad alta intensità energetica accessibile solo a una parte della popolazione mondiale.
È impensabile infatti che in uno stato come il Senegal dove un cittadino dispone di 272 kg di olio equivalente in un anno si possa avere una produzione agricola ad intensa meccanizzazione comparabile con quella statunitense dove il cittadino medio dispone di circa 7,2 TOE l'anno, ovvero una quantità superiore di più di 25 volte.
Viste le possibilità tecnologiche e le possibilità alimentari che se ben distribuite potrebbero soddisfare il fabbisogno di tutti, per quale motivo i paesi in via di sviluppo non riescono a godere di tali frutti? E soprattutto, come si distingue un pese in via di sviluppo da uno sviluppato?
A tal proposito Sial propone una distinzione tra paesi del I, II e III mondo, in particolare per quanto riguarda il livello di meccanizzazione: la distinzione per PIL pro capite e quella per occupazione nel settore agricolo [123].
Ma il lavoro più significativo è stato svolto da Giampietro nei suoi numerosi studi, spesso effettuati in collaborazione con Pimentel [124] [125] [126]. Questi fornisce un'analisi precisa ed efficace del sistema

agricolo attuale, considerando dei parametri fondamentali che ne permettono una valutazione adeguata in termini energetici e strutturali. Palrando di sicurezza alimentare e sostenibilità agricola, le costrizioni fondamentali sono dovute a suolo, acqua e le risorse necessarie a generare un adeguato apporto di cibo: è il limite posto da questi parametri a determinare l'apporto tecnico necessario a un determinato sistema agricolo per raggiungere un determinato output, a sua volta riflesso nell'impatto ecologico relativo alla conseguente produzione. Si deve quindi avere un occhio di riguardo rispetto ai trend del progresso tecnologico a livello globale al fine di dare una corretta contestualizzazione delle tecniche alternative atte alla produzione agricola, tenendo sempre ben presente che l'aumento di resa conseguito nel secolo scorso è associato al grande consumo di combustibili fossili a cui sono associate le tecniche moderne. Come arguito precedentemente, anche Giampietro pone l'accento sulle implicazioni derivanti da una riduzione nella disponibilità di queste materie prime, che dovrebbero essere accompagnate da un aumento degli input in termini lavorativi (aumento della forza lavoro agricola) e una diminuzione nei trasporti, stimolando il consumo locale del cibo. La scarsità di risorse comporterebbe un disastro in particolare nei paesi in via di sviluppo dove il fenomeno dell'urbanizzazione è ancora in piena fase di crescita. Si devono quindi adottare input tecnici diversi a seconda dei diversi consumi energetici nel settore agricolo dei diversi paesi.
Il pensiero e le basi poste da Giampietro, in particolare nell'articolo "Food Security and Fossil Energy Dependence: An International Comparison of the Use of Fossil Energy in Agriculture (1991-2003)" [127], in quanto tra i più significativi ed efficaci presenti in letteratura, saranno spiegati ed utilizzati come punto di partenza per introdurre il lavoro svolto in questo elaborato. Attraverso gli studi di Giampietro è infatti possibile delineare il contesto socioeconomico e quindi il contorno dove si svolge l'analisi.
La produzione agricola può essere distinta in due tipologie di flussi energetici: i flussi in *output*, ovvero l'equivalente energetico del cibo prodotto e i flussi in *input* (antropici), associati all'energia fossile incorporata nelle tecniche adottate per la specifica produzione agricola considerata. Questi due flussi non sono direttamente collegati l'uno all'altro in termini di valore relativo alla società: negli ultimi decenni lo sviluppo delle tecnologie ha portato a un peggioramento dell'efficienza energetica nella produzione agricola in termini di output/input (figura 38). Le ragioni che sono alla causa di questo "paradosso" giacciono su forti condizionamenti dovuti all'imposizione di scelte tecniche per il sistema di produzione agricolo guidate dal contesto socioeconomico.
Per avere un maggior discernimento rispetto a una migliore selezione negli input tecnici, a fronte delle considerazioni effettuate, è bene stabilire una relazione tra i cambiamenti nel *contesto socio economico* dell'azienda agricola e quelli che avvengono in un contesto *interno* all'azienda. I primi vanno analizzati con indicatori demografici e in termini di *pressione bio-economica*, i secondi in termini di veri e propri input tecnici (sistemi di irrigazione, fertilizzanti, pesticidi e macchinari).

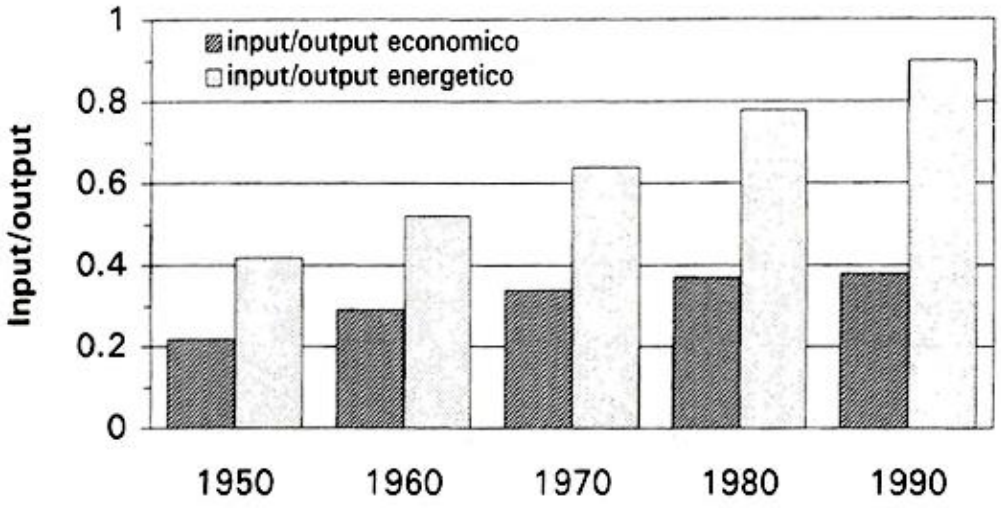


Figura 38 Variazione del rapporto input/ouput in termini economici ed energetici dal 1950 al 1990 [42]

Il progresso tecnico in agricoltura è stato guidato da due principali obiettivi, da cui scaturiscono le precedenti affermazioni:

1. L'aumento della produttività del lavoro nel settore agricolo
2. L'aumento della produttività della terra

I progressi tecnici e la crescita economica hanno portato a un continuo incremento degli input in termini tecnici nei processi agricoli così da aumentare progressivamente *l'offerta netta di cibo per ettaro* (in risposta a un aumento della pressione demografica) e il *cibo prodotto per ora di lavoro* nel settore agricolo (in risposta a un aumento in termini di pressione bio-economica). Queste priorità, spesso confuse in un unico fuorviante termine di *progresso tecnologico agricolo* negli ultimi decenni nelle società industrializzate, sono state guidate da due fattori chiave:

I. Una conversione socioeconomica sul profilo dell'investimento di tempo, lavoro e capitale umano attraverso i differenti settori economici in tempo industriale e moderno: questa trasformazione ha necessitato di una progressiva riduzione dei contadini così da spostare la forza lavoro disponibile nei settori prima industriale e poi dei servizi (descritto nelle pagine precedenti)
II. L'esplosione demografica che ha colpito prima i paesi sviluppati e poi gli altri è collegata al fenomeno caratterizzato come *globalizzazione dell'economia*, che tutt'ora richiede un aumento della resa nei terreni agricoli a causa della progressiva riduzione della superficie agricola disponibile pro capite

Attraverso queste distinzioni è possibile focalizzarsi sui differenti effetti relativi alle pressioni demografica e bioeconomica (che d'ora in poi saranno chiamate PD e PBE), negli sviluppi tenici in campo agricolo a seconda del paese considerato. Le prestazioni in termini di *produttività della terra* (MJ ha^{-1}) saranno collegate alla pressione demografica: a un aumento della PD è associata una diminuzione del terreno disponibile pro capite a causa dell'aumento di popolazione, quindi la necessità di aumentare le rese per ettaro per mantenere un'autosufficienza a livello di produzione di cibo. Le prestazioni in termini di *produttivitò del lavoro* (inteso come la produzione per ora di lavoro allocata all'agricoltura, MJ h^{-1}) invece sarà collegata alla PBE. I collegamenti qui descritti sono confermati da precedenti studi dell'autore stesso, "Socioeconomic pressure, demographic pressure, environmental loading and technological changes in agriculture Environment" [128] e "Fossil energy use in agriculture: an international comparison" [125].

Se messa in relazione alla sicurezza alimentare la PBE indica *il livello di produttività del lavoro da raggiungere per assicurarne il raggiungimento all'interno della società analizzata*: un alto livello di PBE porta allo sviluppo di tecniche spinte verso l'aumento di produttività intesa nei termini definiti in precedenza. È immediato collegare un'alta PBE (definita attraverso l'energia edibile consumata dalla società per ora di lavoro nel settore agricolo) a un'alta produttività del lavoro (intesa come l'energia edibile prodotta per ora di lavoro). Ovviamente nel mercato globalizzato, grazie a importazioni ed esportazioni a livello di commercio, c'è un certo gioco tra queste variabili; problema che decade nel momento in cui queste considerazioni vengono rapportate a una scala globale, essendo la società umana intesa come complesso, in termini di flussi alimentari, evidentemente un sistema chiuso.

Riassumendo e concretizzando, la pressione demografica comporta una certa produttività della terra conseguita attraverso un determinato sforzo in termini principalmente di sistemi di irrigazione e fertilizzanti; la PBE comporta un certo livello di meccanizzazione.

In uno articolo del 2008 Giampietro et al. [127] effettuano una comparazione delle tipologie di input tecnici in relazione al tempo in 21 paesi, considerando una finestra temporale di 12 anni, dal 1991 al 2003, così da dimostrare la correlazione tra PBE e produttività del lavoro, tra PD e produttività della terra. Come Sial, Giampietro divide le nazioni in I (USA, Canada, Australia, Francia, Olanda, Italia, Germania, Spagna, Giappone e Regno Unito), II (Argentina, Messico e Costa Rica) e III mondo (Cina, Bangladesh, India, Egitto)[31] effettuando la divisione in termini di PIL. Identifica poi gli input tecnici (meccanizzazione, irrigazione, fretilizzanti, pesticidi e produzione e consumo di cibo), le produttività

[31] I termini I, II e III mondo si riferiscono rispettivamente alla dicitura *Developed, Intermediate GDP, Low GDP* effettuata da Giampietro.

orarie e della terra, la pressione demografica e bioeconomica, traducendole in termini di densità di energia (GJ ha^{-1}).

La **pressione demografica** (**PD**) viene quantificata calcolando il livello di produttività agricola imposto dalla pressione demografica stessa, ovvero *la produttività della terra in termini di energia edibile che sarebbe necessaria per ottenere una situazione di completa autosufficienza*. Il livello di soglia viene calcolato considerando la richiesta aggregata di cibo della società (dati FAO) tenendo in conto la popolazione, il percorso dei consumi del cibo, le perdite successive alla raccolta. Riguardo alla terra disponibile questa viene calcolata dalla terra arabile e le sue caratteristiche. Alta pressione demografica significa alte rese per ettaro.

La **pressione Bioeconomica** (**PBE**) corrisponde al *livello di produttività del lavoro agricola* (resa di energia edibile per ora di lavoro nel settore agricolo) *richiesta per produrre il cibo consumato nella società*. L'energia richiesta è la stessa usata per la PD, dividendo l'aggregato per il lavoro disponibile nel settore agricolo, ottenuto considerando le dipendenze da forza lavoro, tasso di disoccupazione, frazione di occupati nei settori non agricoli, carico di lavoro medio. A un'alta PBE corrisponderà un'alta produttività del lavoro per i contadini.

Per verificare le loro ipotesi Giampietro et al. graficano i risultati, andando a effettuare un confronto tra il 1991 e il 2003, confermandole. Osservando il grafico di figura 39 a sinistra si nota sia come per paesi con alta PD corrisponda un'alta produttività della terra, ovvero come le prestazioni tecnologiche in termini di resa per ettaro siano condizionate dalla pressione demografica. La stessa analisi viene condotta in termini di PBE in figura 39 a destra, arrivando a conclusioni simili: si nota come a un aumento di PBE corrisponda un aumento nella produttività del lavoro. Si può affermare che la maggiore PD provoca una diminuzione del terreno arabile pro capite per tutte e le 21 nazioni, che però non coincide con una diminuzione di terreno arabile per contadino: la riduzione del numero di contadini nei paesi occidentali infatti compensa la riduzione di terra arabile pro capite grazie a un aumento di PD; questa a sua volta implica un aumento di terreno arabile per contadino dovuto a un aumento di PBE (caso perfettamente illustrato dal percorso degli Stati Uniti, i quali detengono il record di terra lavorata per contadino: 75 ha per contadino contro i 2.7 dell'Italia o gli 0.5 della Cina - dati elaborati individualmente su fonti FAO, [38]) [127]. Questo andamento è confermato in figure successive nello studio degli autori, dove si conferma come la tendenza a una diminuzione di terreno arabile disponibile pro capite comporti un aumento di terreno arabile per contadino.

Attraverso queste ed altre analisi gli autori mostrano come il paradigma della rivoluzione verde dell'agricoltura industriale non possa caratterizzare i paesi del II e III mondo a causa delle non disponibilità in termini di input tecnici, economici, di capitale, le possibilità e diponibilità di urbanizzazione, una mancanza in termini quantitativi di consumatori con la possibilità di acquistare cibo ad alto costo. Il dato di fatto è che trattori, sistemi di irrigazione e fertilizzanti hanno visto un aumento del loro utilizzo a livello mondiale, ma con differenze impressionanti tra Africa e Europa come si vedrà in figura 40 nella pagina successiva. I dati resi disponibili dalo studio infatti sono stati ulteriormente elaborati per farsi un'idea e dare una quantificazione in termini di input e output. Sono state considerate

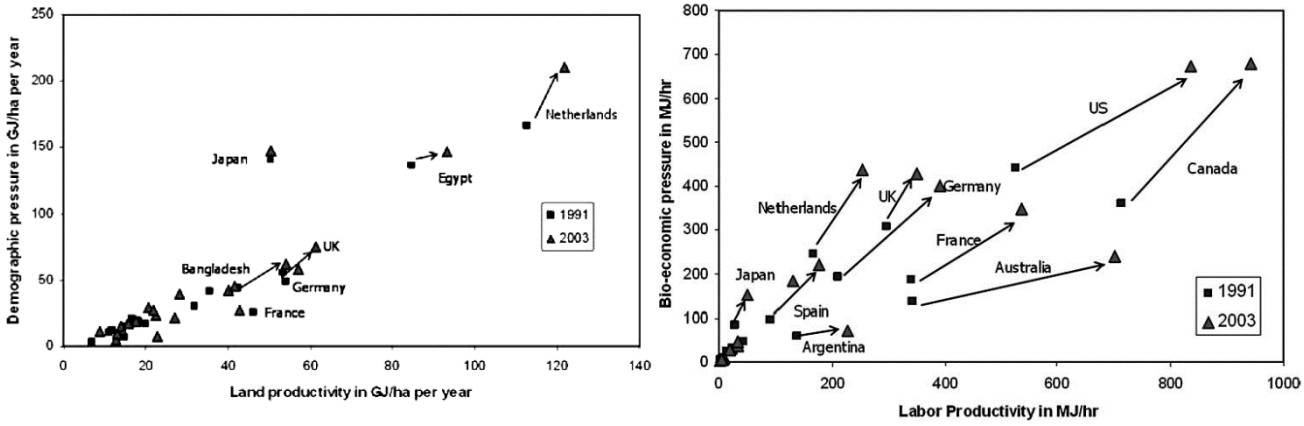


Figura 39 A sinistra, PD in funzione di produttività della terra. A destra, PBE in funzione della produttività del lavoro [127]

quattro nazioni, rappresentative di I, II e III mondo. Si sono messi a confronto parametri quali il numero di trattori e mietitrebbie ogni 1˙000 abitanti, il quale può essere considerato approssimativamente come un indice di meccanizzazione [123]; le tonnellate di fertilizzanti azotati per ettaro coltivato; l'energia totale consumata da combustibili fossili a livello pro capite destinata ad usi agricoli, diretti e indiretti; le ore di lavoro impiegate nel settore agricolo rapportate al numero di abitanti; la resa per ettaro e per abitante considerando per resa l'energia edibile prodotta dalle lavorazioni agricole. Questi valori sono stati considerati per Ghana, Cina, Italia e Stati Uniti. Si é infine considerato il rapporto Output/Input mantenendo l'energia edibile prodotta dalle lavorazioni agricole in termini di output e considerando come input l'energia fossile legata agli utillizzi agricoli diretti e indiretti[32].
Analizzando la figura si nota come in termini di input totali, meccanizzazione e consumo di fertilizzanti azotati ci sia mediamente un ordine di grandezza di differenza tra Ghana e Cina e due ordini di grandezza tra Cina e Italia e Stati Uniti; un divario rappresentativo, soprattutto quando rapportato alle rese. Infatti nonostante gli input energetici presentino sproporzioni fino ai 4 ordini di grandezza tra le nazioni, in termini di resa per ettaro le nazioni si attestano a uno stesso ordine di grandezza (delle decine di PJ all'anno), e valutando la resa in termini output/input si scopre che il Ghana detiene decisamente il primato, seguito da Cina, Stati Uniti e Italia. Questi dati non fanno che confermare le analisi svolte nei capitoli precedenti.

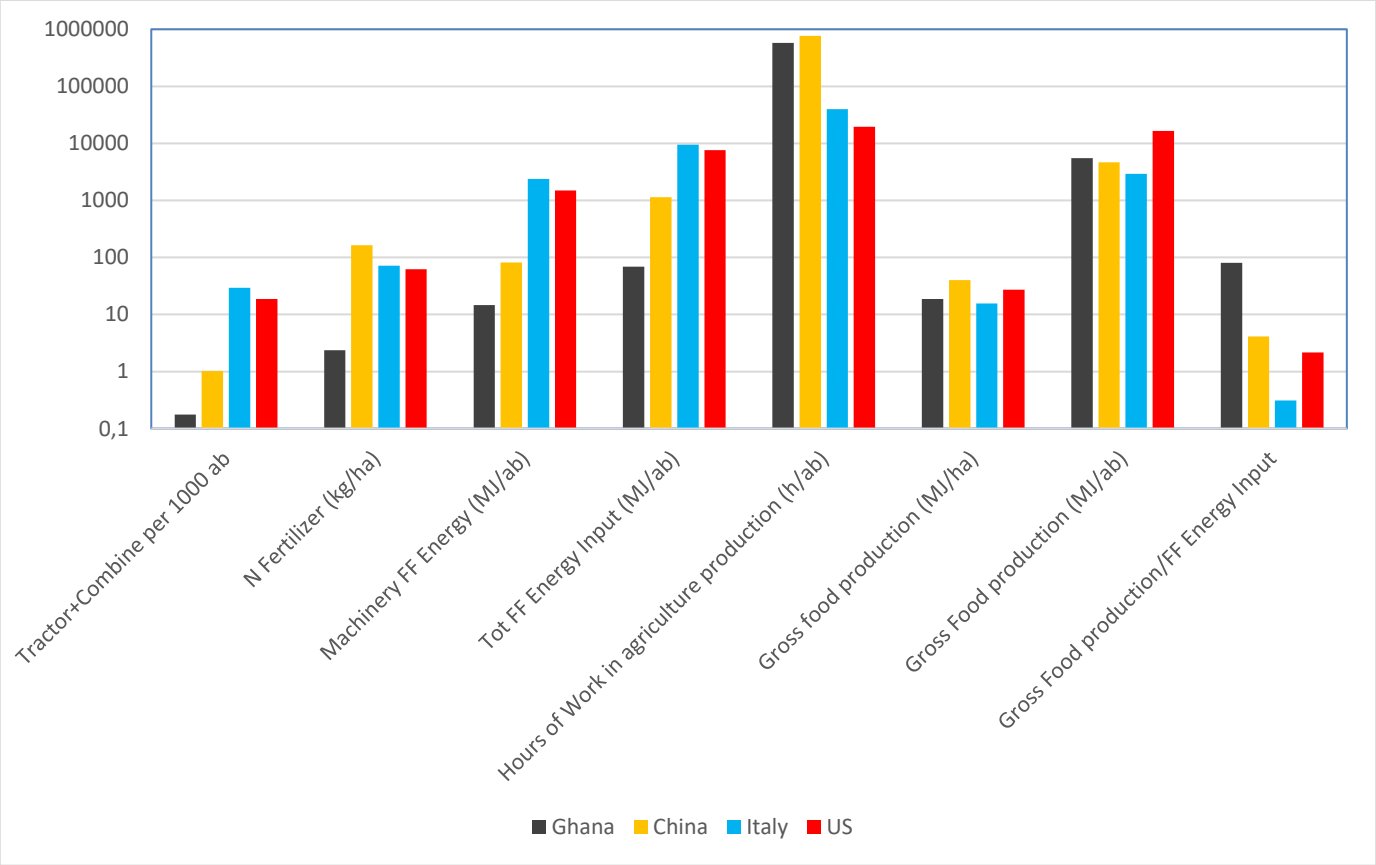


Figura 40 Input diretti, indiretti e rese di Ghana, Cina, Italia e Stati Uniti nel 2003. Elaborazione dati Giampietro (2011)

[32] Mentre le ore di lavoro considerate si riferiscono al contadino, per abitante si intende il singolo membro della popolazione residente nello specifico stato. Sebbene inoltre gli input fossili non rappresentino la *totalità* della produzione di energia primaria per usi agricoli e come questa energia venga prodotta o importata dai singoli stati, confondere l'energia fossile con la totale comporta errori trascurabili, in quanto come visto nei capitoli precedenti rappresenta la quota preponderante dei consumi totali. In particolare, nell'analisi di interesse, conta la visualizzazione comparativa in termini di ordini di grandezza. In diversi studi analizzati l'energia in input viene "confusa" come unicamente da fonte fossile nel caso di colture intensive [79].

Si nota come la Cina adotti largamente i fertilizzanti, cosa che gli consente delle rese per ettaro superiori rispetto agli altri paesi; il lavoro in termini di ore di produzione va a compensare il lavoro svolto dai paesi industrializzati con le macchine: è evidente come Italia e Stati Uniti dispongano di una meccanizzazione più spinta. L'analisi diventa ancora più significativa notando come gli input energetici non siano sinonimo di resa e come gli Stati Uniti siano più spinti verso la produttività del lavoro.
Sfruttando il lavoro di Giampietro è stato possibile andare a fare delle analisi più specifiche, sfruttando i parametri di PBE e PD. Se infatti si rapporta la produttività in termini di terreno con la Pressione Demografica e la produttività del lavoro con la Pressione BioEconomica si può avere una misura di quanto i paesi analizzati siano più o meno prossimi all'autosufficienza. Questi parametri si possono indicare come indice demografico e indice produttivo. A un indice demografico maggiore di 1 corrisponde un'agricoltura che in termini di produttività della terra incontra i fabbisogni realtivi alla pressione demografica. Allo stesso modo l'indice produttivo, quando superiore a 1, indicherà un surplus in termini del lavoro necessario a soddisfare il fabbisogno in termini di produzione oraria. Si nota come per Cina, Ghana e Italia il fabbisogno in termini di produttività della terra incontrino le necessità del paese, si ha l'opposto invece per quanto riguarda l'indice produttivo riferito alla produttività del lavoro (figura 41). La situazione opposta si ha per gli Stati Uniti, i quali producono in maniera più "veloce" ciò di cui dispongono, mentre non sono autosufficienti rispetto all'indice demografico: questo significa che gli aumenti del fabbisogno di resa per ettaro non soddisfano le necessità del paese, mentre questo produce energia edibile a un ritmo ben superiore rispetto a quello che basterebbe per l'autosufficienza.
Queste considerazioni, approfondite grazie al supporto grafico, rendono evidente quanto il paradigma della rivoluzione verde abbia spinto soprattutto da un punto di vista *quantitativo* piuttosto che *qualitativo*, ma essendo in agricoltura necessaria l'intermediazione con l'ambiente che non può essere visto unicamente come risorsa sfruttabile nell'accezione economica industriale. L'aumento di fertilizzanti, macchinari, energia in input, supera di diversi ordini di grandezza i benefici che permette di conseguire.
Il problema è che mentre la produttività del lavoro il limite è relativo alla *velocità con cui viene eseguita l'operazione in questione*, mentre per la produttività della terra il limite è ben più stretto e relativo alla resa della coltura: come visto mentre la produttività del lavoro aumenta anche di due ordini di grandezza negli Stati Uniti, la resa non aumenta di oltre 6 volte.
L'aumento della pressione bioeconomica, a cui è legata una maggior produttività del lavoro, si definisce come la riduzione della forza lavoro contadina (in termini relativi sul totale) associata alla crescita economica. Un aumentro della PBE rende necessario un aumento della produttività agricola per mantenere l'autosufficienza alimentare e il fattore responsabile di questa crescita è principalmente

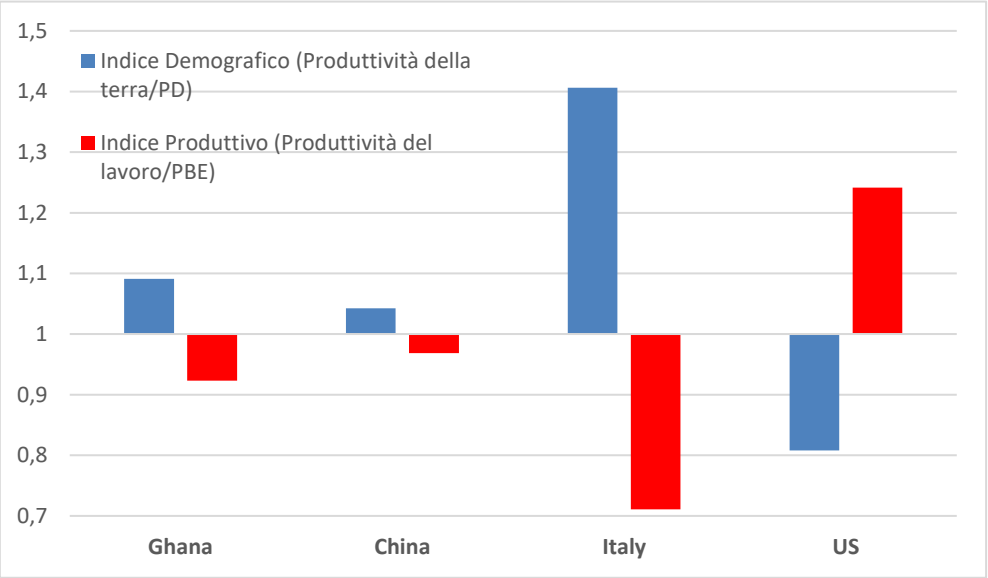


Figura 41 Indice demografico e Indice Produttivo per i 4 paesi considerati. Elaborazione dati Giampietro (2011)

economico più che biologico, che nel gergo economico si tradurrebbe in un'espulsione della forza lavoro dall'agricoltura. La PBE determinata dalla crescita economica può essere descritta come il raggiungimento di un livello di produttività del lavoro in diversi settori economici specializzati incaricati di sostenere la domanda di beni consumati dalla società [129].
Ed essendo la produttività agricola legata a un aumento della produttività del lavoro a causa dell'errata concezione paradigmatica di progresso tecnologico agricolo, a questa corrisponde un aumento in termini di *potenza disponibile*, come sarà dimostrato in seguito tramite il presente elaborato.

L'obiettivo di questo elaborato infatti consiste nela raccolta di dati relativi a potenza e produttività delle singole lavorazioni rispetto a diverse metodologie e colture. Ci si propone, attraverso un'analisi storica e di evoluzione delle diverse tecnologie, di andare a confrontare diverse tecniche produttive relative alla lavorazione del grano a partire dai metodi utilizzati dall'epoca preindustriale fino ai giorni nostri, così da disporre di un'analisi comparata dell'evoluzione delle tecniche agricole in termini energetici. Le tecnologie di epoca precedente non sono state prese in considerazione essendo le evoluzioni tecnologiche in numero ben ridotto rispetto al periodo compreso tra il XIX secolo e i giorni nostri.
La scelta dei parametri è ricaduta sulla potenza assorbita piuttosto che l'energia per due principali motivi: il primo, la maggiore disponibilità di dati in letteratura; il secondo, in quanto la potenza è più rappresentativa del parametro di meccanizzazione, relativamente alla macchina: può essere intuita, in base ad essa, la dimensione del macchinario, la complicazione tecnologica, il tipo di motore primo.
I parametri di produttività ed efficienza sono stati scelti principalmente per una questione di reperibilità di dati, riferiti il più possibile a test effettuati sul campo e pubblicati su riviste scientifiche piuttosto che da dati di schede tecniche di prodotti commerciali, se non in particolari eccezioni.
In questo modo sarà valutata la variazione di produttività legata all'aumento della potenza, considerando come parametro indicativo dell'efficacia di utilizzo della risorsa la *produttività specifica* (ha h^{-1} kW^{-1}) ovvero la produttività esercitata dalla specifica tecnica o tecnologia per unità di potenza. Questa nei termini appena descritti rientra in un'ottica di produttività del lavoro (basta infatti considerare la resa della coltura considerata in kg ha^{-1} associando la corrispondente energia edibile).
La difficoltà maggiore, oltre al recupero dei dati, è stata quella di trovare un metodo di confronto tra i diversi valori, le diverse metodologie e tecniche di valutazione: mentre una mietitrebbia compie il lavoro completo di mietitura, trebbiatura e pulitura, le tecniche preindustriali e in parte anche quelle industriali e moderne, prevedono lo svolgimento di queste operazioni in modo separato.
Saranno quindi esposti i metodi, i calcoli e le assunzioni fatte per ogni processo andando in seguito a confrontare i parametri selezionati tra le diverse tecniche adottate.
Per quanto riguarda i consumi energetici del lavoro manuale saranno considerati tre livelli di intensità del lavoro, considerate le possibilità di potenza esercitabile dall'essere umano per un lavoro continuativo di 8-10 ore, ovvero una giornata lavorativa: bassa, moderata, medio alta e alta intensità, che corrispondono a un esercizio di potenza rispettivamente pari a 40, 75, 100 e 130 W per un individuo di massa pari a 70 kg. Per quanto riguarda la trazione animale si è invece considerato per il cavallo una potenza media esercitata, conservativamente, pari a 750 W[33]. Per quanto riguarda le operazioni svolte a mano o con l'ausilio della forza animale, i calcoli verranno effettuati prima in termini di potenza necessaria allo svolgimento delle differenti operazioni (*Potenza Complessiva*) e poi riferiti al singolo individuo (*Potenza Specifica*), in modo da rendere fruibili i dati in termini di produttività riferiti al lavoro del singolo operatore e quindi alla produttività del lavoro come esposta nell'articolo di Giampietro. In questo modo la produttività sarà valutata in termini di *man h*, ovvero ore di lavoro svolte dal singolo operatore per il conseguimento dell'operazione con la specifica tecnologia.
Riguardo ai tempi di lavoro, per una giornata lavorativa sono state considerate 10 ore.

[33] Per la giustificazione in termini scientifici si consulti il paragrafo 1.5.

4. MIETITURA E TREBBIATURA DEL GRANO

4.1 Il grano e le sue lavorazioni nell'antichità

"*Il frumento era il raccolto per eccellenza ed era il primo dell'anno agrario. Esso aveva cominciato a definirsi con l'avvento dell'estate, ormai le scorte erano finite e non si vedeva l'ora di ottenere pane con farina nuova. I giorni erano i più lunghi dell'anno e tutte le ore di luce disponibili erano impiegate per raccogliere il più in fretta possibile il grano. Le intemperie erano temute e non si smetteva di scrutare l'orizzonte per predire piogge o temporali. I riti propiziatori affondavano le loro origini nella notte dei tempi. Si sfruttava l'umidità mattutina delle paglie per ridurre le perdite. I profumi ed i rumori della primavera erano ancora nell'aria. I nuovi nati degli uccelli cominciavano con i primi voli ad impossessarsi dell'ambiente. La guazza del mattino era abbondante ed al levar del sole evaporava formando come un velo di nebbia ricoprente il terreno* [130]*."*

Tratto da *Il tempo della Mietitura* in *"La vita nei campi",* Alberto Guidorzi

Il grano è una delle piante più coltivate sin dai tempi della Mezzaluna Fertile, considerata la "*culla delle graminacee attuali*" [131]. Dal punto di vista etimologico l'origine della parola stessa riflette le lavorazioni ad esso associate: si pensa infatti che l'origine dal latino *granum* (*gràn* in gaelico irlandese, *kaurna* in gotico, *corn* in inglese) derivi dalla radice indoeuropea *gar* (in sanscrito *g'arati*) che significa sfregare, scorticare [132].
Dal punto di vista della composizione nutrizionale, nella media, il chicco di grano contiene il 12% di acqua, il 70% di carboidrati, il 12% di proteine, il 2% di grassi, il 2% di fibre e l'1,8% di minerali [133].
Il successo di questa graminacea è dovuto alla più alta concentrazione di proteine tra i cereali, la facilità di stoccaggio e trasformazione in pietanze ad alto contenuto energetico, una buona adattabilità a climi molto diversi, caratteristica dovuta anche alla grande complessità genetica: il genoma del grano tenero ammonta a circa 106˙000 geni contro i 20˙000 dell'essere umano.
Fin dall'antichità questo cereale riveste un'importanza fondamentale, testimoniata in particolare dai numerosi riti che in molte popolazioni antiche avvenivano nel periodo di mietitura già in epoca preromana (nelle popolazioni celtiche durante l'equinozio di autunno, tradizioni comuni anche ad Arabi, Slavi e Germani [134] [135]): queste popolazioni celebravano il rito della morte e della rinascita associandolo a quello della mietitura, ai cicli naturali e delle stagioni. Credenze simili si sono perpetrate nel tempo e in alcune realtà vengono ancora celebrati festeggiamenti che si riconducono a questi antichi ancestori.
In occidente le prime testimonianze si verificano con l'agricoltura greca, di cui non si conosce molto ma che sicuramente non reggeva il livello della controparte Medio-Orientale. I Romani avevano elaborato un'agricoltura più evoluta, che comprendeva la rotazione di cereali e legumi, il compostaggio e il riciclo della materia organica e faceva uso di gesso e marna per ridurre l'acidificazione del terreno; veniva mantenuto un terzo delle colture a maggese e si faceva largo utilizzo di animali da traino, solitamente buoi [4].
Le tecniche adottate dai romani per quel che riguarda specificatamente il grano prevedevano la semina a mano, la mietitura a falce e la trebbiatura per mezzo del calpestio degli animali o col correggiato, tecniche che in Europa sono rimaste fondamentalmente le stesse se non retrocesse, su un piano tecnologico, praticamente fino alla prima metà del XIX secolo [4]. Plinio il Vecchio nella sua *Naturalis Historia* narra della "mietitrice gallica" (figura 42), una tecnologia messa a punto dai Galli: questi scrive di "*carretti molto grandi, con denti inseriti al margine e due ruote, spinti attraverso il campo con un giumento aggiogato in senso contrario*" [136]. L'esistenza di questa tecnologia è testimoniata anche su bassorilievi di antichi monumenti funerari ora custoditi nel museo di Arlon, in Belgio. Secondo Peter Chuksin una tale tecnologia è stata dimenticata a causa della drastica diminuzione nella resa delle coltivazioni in seguito alla caduta dell'impero romano: la necessità era sorta infatti con l'adozione della rotazione colturale che rese disponibili delle rese ben maggiori [137].

Le ricostruzioni degli input per la coltivazione e lavorazione del grano durante il I secolo d.C. considerano necessario un lavoro umano dalle 180 alle 250 ore e animale di 200 ore per una produttività di 0,5 t/ha. In termini di rendimento energetico lordo[34] la resa varia tra le 30 e 40 volte [4].
Dopo la caduta dell'impero le innovazioni in ambito agricolo furono molto limitate: in Europa come in Cina periodi di innovazioni tecnologiche in campo agricolo si alternavano ad altri di stagnazione della produttività e le carestie si verificavano anche in tempo di pace. Fino al XVII secolo comunque l'agricoltura occidentale rimane, in generale, meno efficiente rispetto a quella cinese. Si dovrà attendere il XIX secolo perché si manifestino le condizioni per il miglioramento degli strumenti agricoli, grazie anche agli stimoli indotti dall'industrializzazione. Fino a questo periodo la densità di popolazione che poteva supportare l'agricoltura europea non era superiore qulla media del periodo predinastico egiziano (IV millennio a.C.).
Il graduale abbandono del maggese e della rotazione, l'espansione della produzione di bestiame, l'utilizzo regolare della concimazione, permettono a realtà come le Fiandre di detenere il record in termini di resa agricola nel periodo a cavallo tra il XVIII e XIX secolo; il passaggio dal bue al cavallo (che permette una maggiore velocità di avanzamento e quindi di esecuzione risultante in un aumento della produttività), migliori *cultivar*[35] e una maggiore fertilizzazione risultano in una resa ben maggiore rispetto alla realtà medievale.
Sono questi miglioramenti in seguito diffusi anche ad altre regioni europee che permettono all'agricoltura di sostenere i fenomeni di urbanizzazione che hanno caratterizzato le rivoluzioni industriali, permettendo di raggiungere il sostentamento di 7-10 persone per ha di terra arabile nel 1900. Tale livello è reso possibile dai maggiori sussidi energetici derivanti dalla meccanizzazione e i fertilizzanti prodotti a partire dal carbone, trasformando il sistema agricolo che si affaccia al XX secolo il primo ibrido: fortemente dipendente dalla trazione animale ma traente i benefici delle fonti fossili [4].

Figura 42 La mietitrice gallica, bassorilievo custodito nel "Trier Archaeological Museum" [229]

[34] Inteso come output/input in termini energetici: gli output sono calcolati in termini di energia edibile, gli input come spesa in termini di energia.
[35] Varietà agrarie di piante coltivate [192].

4.2 Innovazioni tecnologiche nel “Nuovo Mondo”: evoluzione della mietitura

In questo processo di meccanizzazione la svolta fondamentale è avvenuta indubbiamente negli Stati Uniti d’America, nonostante verso la fine del XVII secolo l’agricoltura americana fosse ben più arretrata della corrispondente europea.
È nel XIX secolo che avviene il primo passo verso un’evoluzione che non si arresterà fino ai giorni nostri: il passaggio dai falcetti di piccole dimensioni alla falce “a culla” (*cradle scythe*, figura 43 a sinistra), che permetteva al contadino di evitare l’operazione della raccolta senza piegarsi.
Il primo strumento di mietitura meccanico viene brevettato da Richard French e T. J. Hawkins in New Jersey il 17 maggio del 1803, ma poche informazioni sono giunte sino a noi a causa della perdita della documentazione relativa ai brevetti. Seguono altri esperimenti che vedono Cyrus McCormick, un fabbro della Virginia di soli 22 anni, sviluppare nel 1831 una mietitrice di nuova concezione migliorando il lavoro già iniziato dal padre [138]. Questa macchina possedeva una lama a coltello collegata alla ruota motrice tramite biella e ingranaggi; la lama oscillando segava gli steli, avanzando. Il grano caduto veniva rastrellato da un uomo che camminava accanto alla macchina. Dopo alcuni miglioramenti la mietitrice fu brevettata nel 1834 e poi distribuita nel 1840 (figura 43 a destra). Nel medesimo periodo Obed Hussey testa una mietitrice in Ohio, brevettata nel 1833; tale mietitrice però risulta più efficace nella falciatura del fieno (e servivano 4 cavalli per movimentarla rispetto ai due necessari per la macchina di McCormick): dopo un periodo di competizione Hussey si ritira dal mercato delle mietitrici lasciando pieno spazio a McCormick.
Rispetto alla mietitura con falce, la mietitrice meccanica consente di raccogliere in campi di dimensioni molto più ampie e con meno lavoro. E dal momento in cui tali macchine non rompevano il grano al di fuori dalla spiga come succedeva con la falce, si avevano anche minori perdite. Nel 1855 tali macchinari erano comuni nei campi americani durante il periodo di raccolta, con più di 80˙000 machine operative nel 1860.
Allo scoppio della guerra civile americana nel 1861, circa il 70% del grano nel “West” veniva raccolto tramite mietitrici meccaniche, nel 1864 ne vengono prodotte e vendute dai 65˙000 agli 80˙000 pezzi.
In questo periodo una macchina necessitava di una squadra di 8-10 persone: una per guidare i cavalli, una per rastrellare il grano, gli altri per legare il grano in covoni; con questo metodo si potevano mietere dai 10 ai 12 acri (circa 5 ettari) al giorno [139].
In questo senso, le mietitrici meccaniche rappresentano la prima di una lunga serie di macchinari che rivoluzioneranno la realtà agricola, scardinando i metodi tradizionali che permanevano da migliaia di anni.
Il passo successivo fu di dotare tali macchine della capacità di legare automaticamente il grano mietuto. I primi tentativi sorgono circa a metà del 1840, ma con diverse difficoltà legate all’automatizzazione dell’azione. Difficoltà ovviate in parte nel 1854 quando la prima mietitrice automatica entra in commercio, basata su un brevetto del 1851 a New York, di Seymour e Morgan. La mietitrice venne chiamata “New York Self-Raking Reaper” (figura 44) o semplicemente “New Yorker”; questa era munita

Figura 43 A sinistra, la "cradle scythe", o falce a culla, che permetteva di raccogliere le spighe senza piegarsi [237]. A destra la mietitrice originale di McCormick, 1831 (74)

di rastrello collegato alle ruote tramite ingranaggi: muovendosi in avanti, a intervalli, il rastrello raccoglieva il grano tagliato depositandolo a terra dove attendeva i legatori. In questo modo un altro lavoratore viene eliminato dalle operazioni.
Nel 1861 anche McCormick dota le sue mietitrici della medesima tecnologia: nel 1864, i due terzi della produzione totale di mietitrici contava modelli "a rastrelli automatici".
Al termine della guerra di secessione (1861-1865) il numero di uomini necessari all'operazione di mietitura sono ridotti a 8 riuscendo a lavorare 15 acri (circa 6 ettari) al giorno.
Il 2 ottobre 1844 George Esterly dal Wisconsin brevetta la prima *Header*, una mietitrice in grado di strappare i grani dagli steli e raccoglierli in una tramoggia; erano necessari quattro cavalli per trainare questo ingombrante macchinario a quattro ruote. Ma saranno i miglioramenti prodotti da Jonathan Haynes, Illinois, a brevettare un macchinario vincente 5 anni più tardi. La "Haines Illinois Harvester" (figura 46) che sostituisce la lama fissa con una falce a taglio alternato dotata di un nastro trasportatore scaricante il raccolto su un carro guidato al suo fianco. Da qui il grano doveva solo essere trasportato al luogo di trebbiatura. Durante gli anni '60 del 1800 questa divenne una delle macchine più utilizzate in California, ma non si diffuse quanto le mietitrici in altri stati in quanto le condizioni atmosferiche e climatiche estere non consentivano la completa maturazione e asciugatura del grano prima che venisse tagliato. Nell'ultimo quarto di secolo queste macchine erano dotate di una barra falciante di 12 piedi (circa 3 metri e mezzo) e per mezzo di quattro cavalli potevano mietere dai 15 ai 25 acri al giorno (dai 6 ai 10 ettari). Il principale vantaggio rispetto alle mietitrici tradizionali era quello di evitare la fase di raccolta, legatura in covoni e trasporto al sito di trebbiatura, riducendo il numero di lavoratori necessari; d'altra parte non era adatta a campi di piccola e media grandezza: una tale tecnologia fu infine sostituita da altre mietitrici più efficienti e legatrici automatiche, tecnologie più mature in questo periodo [139].
Si deve quindi a Charles e Marsh dell'Illinois il brevetto di un nuovo modello di mietitrice nel 1858 con lo scopo di disfarsi definitivamente dell'operazione di legatura, chiamata Marsh Harvester. Questa venne messa in vendita a partire dal 1864: dotata di una barra falciante di 5 piedi (circa un metro e mezzo) di lunghezza tagliava il grano e lo poneva su una piattaforma apposita; due uomini situati sulla piattaforma lo legavano in fasci che venivano fatti cadere a terra. La produttività si aggirava tra gli 8 e i 10 acri al giorno (dai 3 ai 4 ettari): il maggior sviluppo consisteva nel passaggio dai 4-5 uomini necessari al lavoro di legatura soliti per supplire alle produttività delle mietitrici dell'epoca ai due lavoranti nella piattaforma, un'importante passo verso una meccanizzazione più spinta. Alla macchina vennero infatti integrati dopo pochi anni dispositivi di legatura automatica che, seppur arcaici, rendevano automatizzato il processo.

Figura 44 New York Self Reaking Reaper o New Yorker [198]

Nel 1880 il problema della legatura fu completamente archiviato grazie all'utilizzo di macchinari utilizzanti spago e in grado di legare il grano in modo autonomo per opera di Appleby. Il successo di tali macchinari chiamati "Twine binder" permise un abbassamento consistente del prezzo rendendoli accessibili a molti più contadini: alla fine del decennio praticamente la totalità della mietitura veniva eseguita in modo totalmente automatico (figura 45). Tali macchine riuscivano a mietere 10-12 acri (4-5 ettari) al giorno e fino a 15 (6 ettari) se il terreno lo consentiva [139].Queste evoluzioni tecniche più che aumentare la produttività permettevano una riduzione del capitale umano investito in tali operazioni: man mano le macchine divenivano sempre più pesanti, rendendo l'uso della trazione animale sempre più indispensabile.
Sarà con gli anni '50 e l'avvento del motore a scoppio che verrà sostituito il motore animale. Nonostante ciò, le mietilegatrici (semoventi o trainate) rimarranno appannaggio di aree montane e piccole fattorie per essere sostituite nelle operazioni in pianura e nell'agricoltura industrializzata (in particolare con la rivoluzione verde) dalle mietitrebbie.

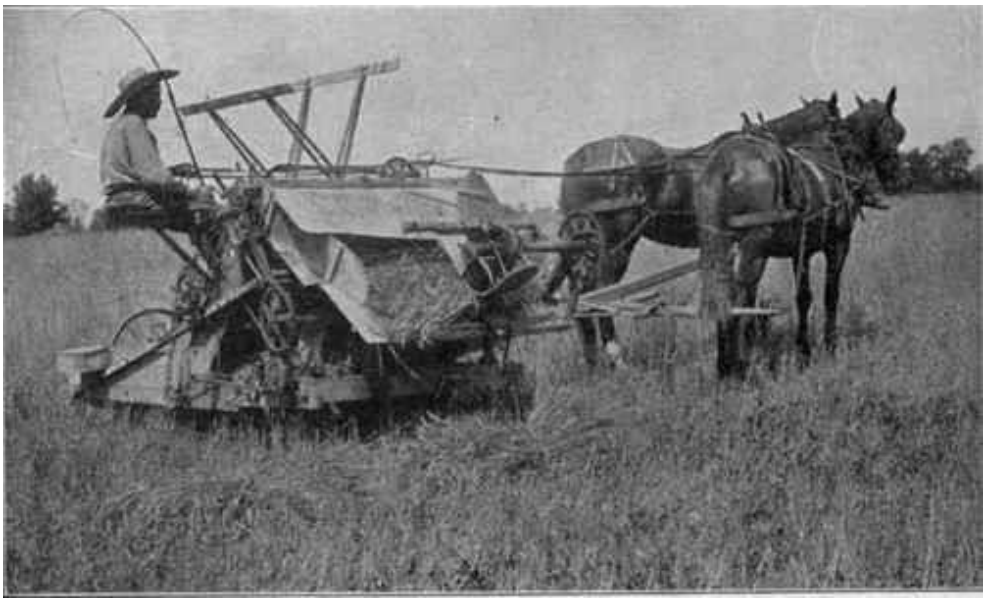


Figura 45 Appleby Twine Binder [230]

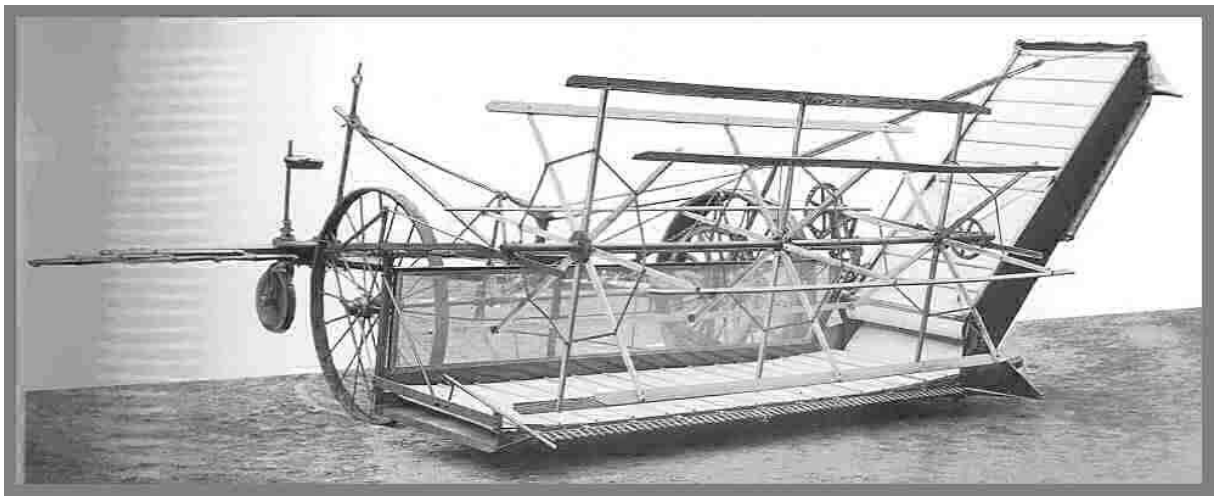


Figura 46 Haines Illinois Harvester, o seplicemente Header [196]

Vista l'evoluzione delle varie metodologie, passiamo ora all'analisi vera e propria dei dati raccolti.
Il primo metodo di mietitura considerato è quello manuale con falcetto, in voga fino al XIX secolo. Questa metodologia prevedeva che le operazioni di raccolta si svolgessero manualmente, normalmente da una squadra di 5 persone: due impiegate nell'operazione di mietitura e tre per la legatura in covoni e il trasporto. La legatura e la preparazione in covoni vengono considerate come operazioni ad intensità alta, la legatura e la preparazione in covoni come attività a intensità media. I dati raccolti sono stati confrontati, valutati e confrontati tra i dati disponibili delle varie fonti. Le tabelle saranno organizzate, per quanto riguarda la fase manuale, specificando in una prima modalità potenza e prouttività legate alla tecnica considerata; in seguito i risultati saranno visualizzati in un'altra tipologia di tabella dove l'operazione verrà considerata nel suo complesso e poi riferita al singolo individuo. Nel considerare il numero di operatori necessari all'operazione si è esplicitato anche il MET relativo all'intensità del tipo di attività. Riferendosi al singolo individuo [139] [4] e una giornata lavorativa di dieci ore:

	SQUADRA		**POTENZA**	**PRODUTTIVITÀ**	**METODO**	**EPOCA STORICA**
TECNICA	**# operatori**	**# cavalli**	**kW**	**ha h^{-1}**	**Denominazione**	**Anno di riferimento**
Falcetto	1 - H	/	0,13	0,03	Mietitura Tradizionale	1800
Falce "a culla"	1 - H	/	0,13	0,09	Mietitura Preindustriale	1850
Legatura	1 - MH	/	0,1	0,1	Legatura Tradizionale	1800-1850
Preparazione in covoni	1 - MH	/	0,1	0,4	Legatura Tradizionale	1800-1850

Tabella 1 Metodi di mietitura e legatura tradizionali

Si considererà quindi l'operazione tradizionale, in voga fino ai primi anni del XIX secolo nei paesi occidentali, di denominazione *antica,* compresa di mietitura a falcetto, legatura e preparazione in covoni. Si considera un utilizzo di manodopera pari a 3 mietitori, un legatore e un addetto alla preparazione dei covoni. Per quanto riguarda la sostituzione del falcetto con la falce a culla si considererà lo stesso numero di operatori nonostante l'aumento produttivo derivante dalla sostituzione della tecnologia. La potenza esercitata nell'operazione verrà calcolata prendendo come riferimento la produttività della mietitura, essendo le altre lavorazioni dipendenti dalla stessa dal punto di vista di processo: in questo modo sono resi compatibili i valori di produttività relativi alla legatura e la preparazione dei covoni. Questa operazione verrà svolta come semplice proporzione tra la produttività della legatura rispetto alla mietitura e la stessa operazione verrà effettuata per la preparazione in covoni. Per normalizzare in seguito i dati e valutare il numero "reale" di operatori, chiamato *normalizzato*, si eseguirà l'operazione come fatto per la potenza, ovvero per confronto tra le diverse produttività: così facendo sarà possibile calcolare la produttività e la potenza propria equivalente del singolo operatore relativa al metodo in considerazione, adottando come peso sempre la produttività riferita alla mietitura (Tabella 3).
Il passo successivo sarà nella selezione dei dati rispetto ai metodi a trazione animale in epoca preindustriale. Sono state selezionate tre tecnologie, che saranno riferiti a diversi anni: 1850, 1870, 1890. La tecnica selezionata per il 1850 è riferita alla macchina di McCormick che necessitava di 9 persone (una per guidare i cavalli, 2 per la raccolta e preparazione in covoni, 6 per la legatura) e due cavalli. Per il 1870 si considererà la "New Yorker" che necessitava di un uomo in meno ed infine per il 1890 la "Appleby Twine Binder", il riadattamento della mietitrice di McCormick con dispositivo autolegante, che ridurrà la necessità a soli due uomini [139]. La guida dell'animale viene considerata come sforzo a bassa intensità (40 W). Nella tabella 2 si considereranno, in base alle nomenclature date ai diversi metodi con associata tecnologia, la composizione dell squadre atte a eseguire l'operazione con le associate potenze e produttività complessive. Nella tabella 3 i dati saranno riferiti al singolo operatore, così da valutare il tempo necessario a svolgere l'operazione riferendosi al singolo individuo. Per la McCormick e la New Yorker nonostante non prevedano la legatura integrata, saranno considerati gli operatori citati nelle fonti mantenendo come riferimento la produttività della macchina.

METODO	TECNOLOGIA	EPOCA STORICA	SQUADRA		POTENZA COMPLESSIVA	PRODUTTIVITÀ COMPLESSIVA
Denominazione	**/**	**Anno di riferimento**	**# operatori**	**# cavalli**	**kW**	**ha h^{-1}**
Mietitura Tradizionale antica	Mietitura + Legatura Tradizionale	1800	5	/	0,503	0,090
Mietitura Tradizionale Preindustriale	Mietitura Preindustriale + Legatura Tradizionale	1850	5	/	0,728	0,270
Mietitura Preindustriale 1850	McCromick Reaper	1850	9	2	2,340	0,445
Mietitura Preindustriale 1870	New Yorker	1870	8	2	2,240	0,607
Mietitura Preindustriale 1890	Appleby Twine Binder	1890	2	2	1,640	0,607

Tabella 2 Squadre, Potenze e Produttività complessive associate ai metodi selezionati

METODO	POTENZA INDIVIDUALE	PRODUTTIVITÀ INDIVIDUALE	OPERATORI NORMALIZZATI	PRODUTTIVITÀ SPECIFICA
Denominazione	**kW $uomo^{-1}$**	**ha man h^{-1}**	**# operatori**	**ha h^{-1} kW^{-1}**
Mietitura Tradizionale antica	0,122	0,022	4,125	0,179
Mietitura Tradizionale Preindustriale	0,114	0,042	6,375	0,371
Mietitura Preindustriale 1850	0,260	0,049	9	0,100
Mietitura Preindustriale 1870	0,280	0,076	8	0,152
Mietitura Preindustriale 1890	0,820	0,304	2	0,376

Tabella 3 Potenze, Produttività e operatori normalizzati al singolo operatore

Analizzando questi primi risultati osservando il grafico in figura 47 si nota come la produttività dei diversi metodi subisca un aumento considerevole nel corso del tempo: l'utilizzo della trazione animale in modo più diffuso rende disponibile un maggior esercizio di potenza, creando le condizioni perché tecnologie più pesanti e complesse possano distribuirsi in modo diffuso e aumentando la produttività: è da questo momento che ha inizio la fase di urbanizzazione tipica di questo periodo (figura 37, capitolo 3).
La mietitura a mano vede un aumento di quasi tre volte in produttività per il solo passaggio da falcetto a falce a culla; un ulteriore aumento della produttività è permesso dall'introduzione delle mietitrici nel campo industriale che consentono di effettuare un ulteriore raddoppio della stessa in soli vent'anni.
Le tecnologie considerate, tra tutte quelle sviluppate in questo periodo preindustriale, sono quelle che hanno visto la maggior diffusione in campo agricolo nei rispettivi periodi, quindi quelle che meglio rispondevano alle esigenze dell'epoca. Soluzioni quali la "Haines Illinois Harvester" non sono state prese in analisi in quanto tecnologie che non sono mai giunte a maturazione; nel caso di questa macchina l'utilizzo di un numero doppio di animali da trazione e la complicazione derivante da scelte tecniche non aderenti alle necessità dell'epoca ne hanno impedito il successo e la diffusione. Un discorso simile si può effettuare per la *Marsh Harvester* il cui dispositivo di auto-legatura doveva ancora essere perfezionato: tale tecnologia doveva ancora essere migliorata per portare a un miglioramento in termini produttivi.
Nel grafico successivo di figura 48, dove sono rappresentate produttività e potenza normalizzate al singolo operatore, si nota come sia la tecnologia della legatura automatica a essere veramente efficace in termini di produttività e potenza in termini individuali, anche se in termini di efficienza questo non è altrettanto vero, in quanto per unità di kW la mietitura tradizionale (falce a culla) eguaglia la mietitura preindustriale del 1890 (figura 49); d'altra parte questo esprime una maturazione della tecnologia: il passaggio da falce a culla a mietitura trainata a cavallo prevede un cambio in termini di motori primi; come sarà visibile anche nelle pagine successive, in rarissimi casi la tecnologia sviluppata a un cambio di motore primo eguaglia la precedente in termini di efficienza, in quanto è normale ci sia una maggiore complessità ad accompagnare la maggiore "densità di potenza" e conseguentemente sia estremaente difficile mantenere un aumento di produttività non solo in termini assoluti ma anche in termini relativi o specifici.

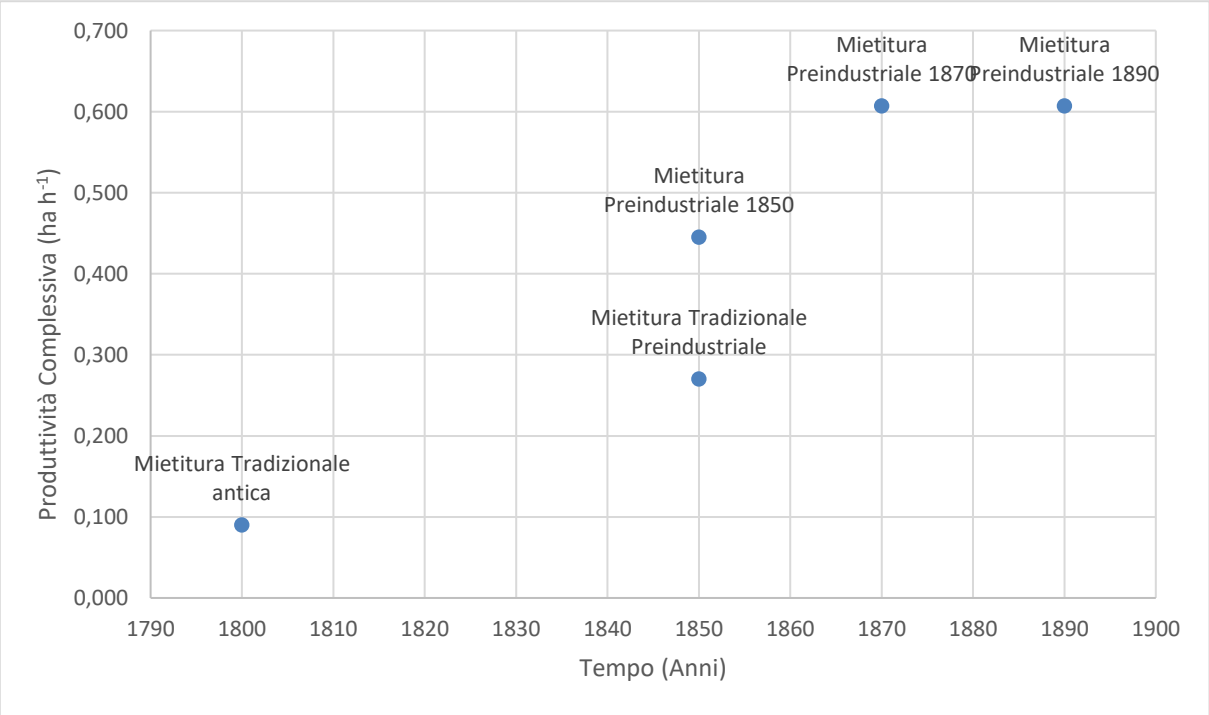


Figura 47 Produttività Complessiva in funzione del tempo per i diversi metodi

Analizzando la produttività specifica (figura 49) si nota come per quanto la produttività aumenti di pari passo con l'evoluzione delle tecnologie, non si può dire lo stesso per la produttività specifica, ovvero la produttività per singolo kW utilizzato: si nota infatti come il passaggio da lavoro manuale a trazione animale sebbene implichi una maggiore capacità di produzione non necessariamente comporti un più efficiente utilizzo della potenza assorbita. Il metodo tradizionale risulta infatti più efficiente in questi termini rispetto alle tecnologie sviluppate nella seconda metà del XIX secolo, che dovranno subire quasi 50 anni di miglioramenti per poter superare il metodo tradizionale e portarsi allo stesso livello della mietitura effettuata con falce.

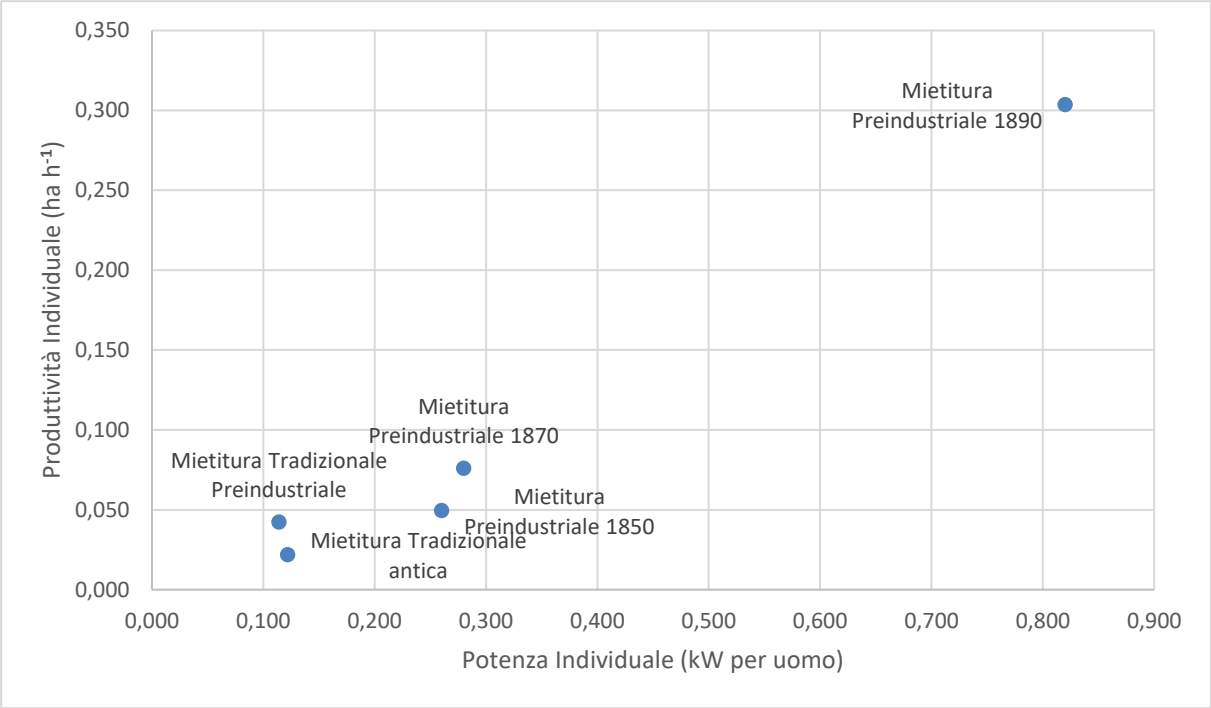


Figura 48 Produttività individuale in funzione della potenza individuale nell'epoca preindustriale

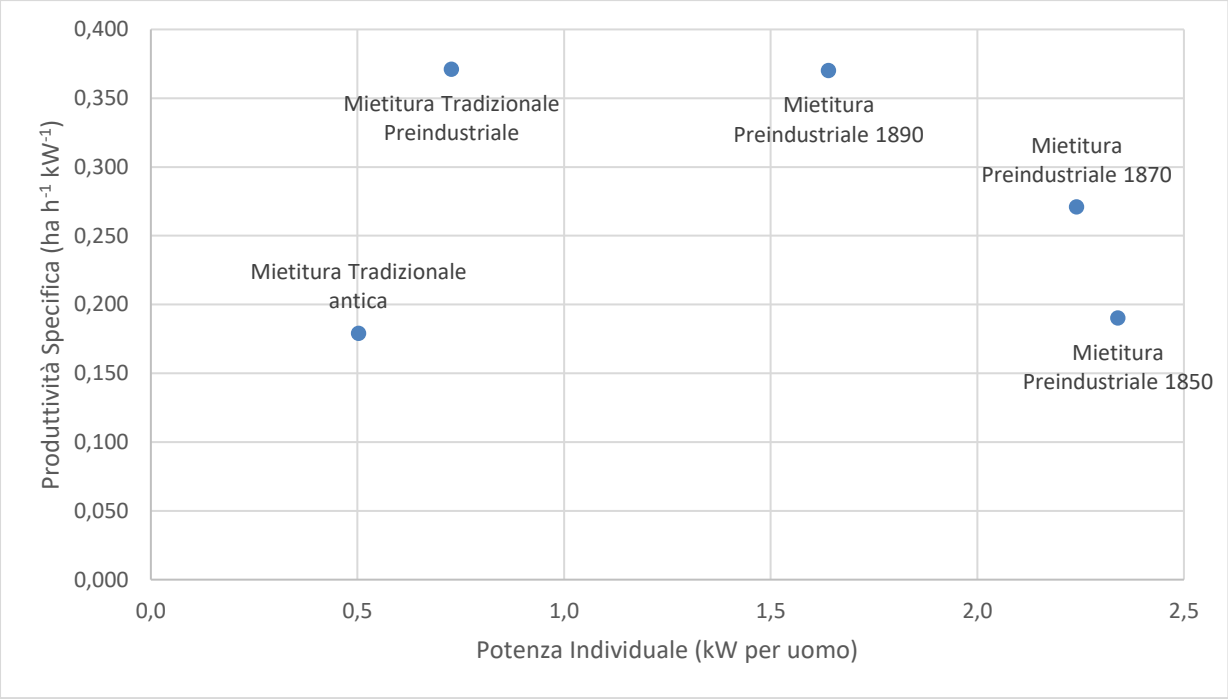


Figura 49 Produttività specifica in funzione della potenza individuale nell'epoca preindustriale

Con l'avvento dei motori a scoppio le mietitrici hanno subito una forte evoluzione anche grazie alle perfezionate tecnologie; la macchina concettualmente lavora allo stesso modo, ma la possibilità di disfarsi della dipendenza degli animali potendosi permettere dei motori a combustione interna, i quali posseggono una densità di potenza decisamente maggiore, permette una maggiore velocità con conseguente maggiore produttività.
Le prime macchine di questo tipo entrano in commercio negli anni '50, dopo la seconda guerra mondiale: infatti nel periodo dal 1900 al 1950 le nuove tecnologie maturate durante le due guerre, anche per stimoli dovuti alla causa bellica, subiscono un forte slancio che però non è accompagnato da una diffusione consona per scopi civili: ci penseranno la *rivoluzione verde* e il *miracolo economico* a colmare questo gap.
Negli anni '50 si diffondono velocemente le mietilegatrici, prima semoventi, poi trainate con la diffusione dei trattori e azionate dalla Presa di Potenza (PDP). Mentre le seconde saranno sostituite con le mietitrebbie, le prime continueranno a essere impiegate in aree declivi, montane e per fattorie con piccoli possedimenti dove l'impiego di macchine ad alta produttività non giustifica l'investimento.
Tra queste macchine sono state individuati dei modelli tipici degli anni '50, su dati raccolti dai manuali di ingegneria redatti da A. Carena [59] e G. Romanello [140] (del tipo in figura 50).
Essendo le potenze da questo momento in poi superiori al kW, ed essendo la potenza esercitata da un uomo durante la guida di una macchina di bassa intensità di due ordini di grandezza inferiore (0.04 kW), tale potenza sarà considerata trascurabile ai fini della trattazione.
Si considerano quindi due macchine degli anni '50, una semovente e una azionata e trainata da trattore. Per gli anni successivi si sono considerate 3 macchine di cui si sono studiate le schede tecniche e in vendita anche attualmente: la "Alvan Blanche" è trainata da un trattore e azionata tramite PDP (come in figura 51), la AMS e la BCS sono semoventi e dotate di motore a combustione interna. Le altre soluzioni considerate riguardano una macchina azionata a motore ma trainata da un bue, in utilizzo in India (SINGH) [141]. Un macchinario di simile concezione, a spinta umana e azionato da un motore a combustione è il Ramiah Reaper Binder [142]. Infine, come soluzione tecnologica a motore completamente manuale, spinta da un singolo individuo, si riportano anche i dati di una mietilegatrice sviluppata dal Politecnico di Sandyip in India [143]. Per le mietilegatrici di Singh e Ramiah si è considerata anche la potenza esercitata rispettivamente da bue e operatore (Tabella 4).
Al fine di una migliore rappresentazione grafica stavolta non si è considerato la produttività rispetto al tempo, ma rispetto alla potenza. Inoltre la mietilegatrice del Politecnico di Sandyip non è stata inclusa per congruenza tra motori primi.

Figura 50 Mietilegatrice trainata Laverda, tipica negli anni '50 [197]

METODO	TECNOLOGIA	EPOCA STORICA	MOTORE PRIMO	POTENZA	PRODUTTIVITÀ	PRODUTTIVITÀ SPECIFICA
Denominazione	**/**	**Anno di riferimento**	**/**	**kW**	**ha h^{-1}**	**ha h^{-1} kW^{-1}**
Mietilegatrice Semovente Intermedia	Ramiah Reaper Binder	1947	Human Work, Combustion engine	1,233	0,200	0,162
Mietilegatrice Trainata Industriale	Mietilegatrice ROMANELLO	1950	PDP, Tractor	16,540	0,525	0,032
Mietilegatrice Semovente Industriale	Mietilegatrice ROMANELLO	1950	Combustion Engine	6,980	0,473	0,068
Mietilegatrice Trainata Intermedia	SINGH Reaper	1995	Bullock, Combustion Engine	4,365	0,270	0,062
Mietilegatice Semovente Moderna 1	AMS-RB100 Reaper Binder	2000	Combustion Engine	7,350	0,190	0,026
Mietilegatrice Semovente Moderna 2	BCS Standard Reaper Binder	2000	Combustion Engine	7,497	0,405	0,054
Mietilegatrice Trainata Moderna	Alvan Blanche TH 1400	2000	PDP, Tractor	22,050	0,800	0,036
Mietilegatrice Semovente Appropriata	Sandyip Polytechnic Reaper	2015	Human Work	0,130	0,055	0,423

Tabella 4 Mietilegatrici industriali e moderne

Figura 51 Mietilegatrice trainata di tipo moderno [144]

Il grafico in figura 52 questa volta non è facilmente interpretabile, ma possono trarsi comunque diverse considerazioni; innanzitutto è evidente come le mietilegatrici trainate e azionate alla macchina trattrice consentano una maggiore produttività, anche se a prezzo di un aumento di potenza da due a tre volte, mediamente, rispetto alle mietilegatrici semoventi. Queste macchine rimangono comunque vincolate ai bassi valori di velocità e larghezza della barra falciante, essendo per natura macchine di dimensioni intermedie e più adatte a piccole fattorie.
Una tale metodologia, per quanto raffinata, evidentemente non permette di esercitare produttività che superino l'ettaro per ora: probabilmente una tra le principali case che hanno spinto verso lo sviluppo delle mietitrebbie.

Nel caso della produttività specifica di figura 53 spicca la mietilegatrice indiana, sicuramente per il basso consumo di energia dovuto all'utilizzo di energia "umana"; lo stesso discorso non può essere fatto per la SINGH, che nonostante sia trainata da un bue monta un motore più potente ma senza grosse variazioni rispetto alla produttività.
Si possono trarre delle conclusioni significative rispetto a tali tecnologie: si nota come queste rappresentino unicamente una transizione dai modelli preindustriali a quelli più moderni per la lavorazione del grano. Non è un caso che con l'avvento delle mietitrebbie queste macchine svaniscano nell'oblio per quanto riguarda l'agricoltura industriale e intensiva.

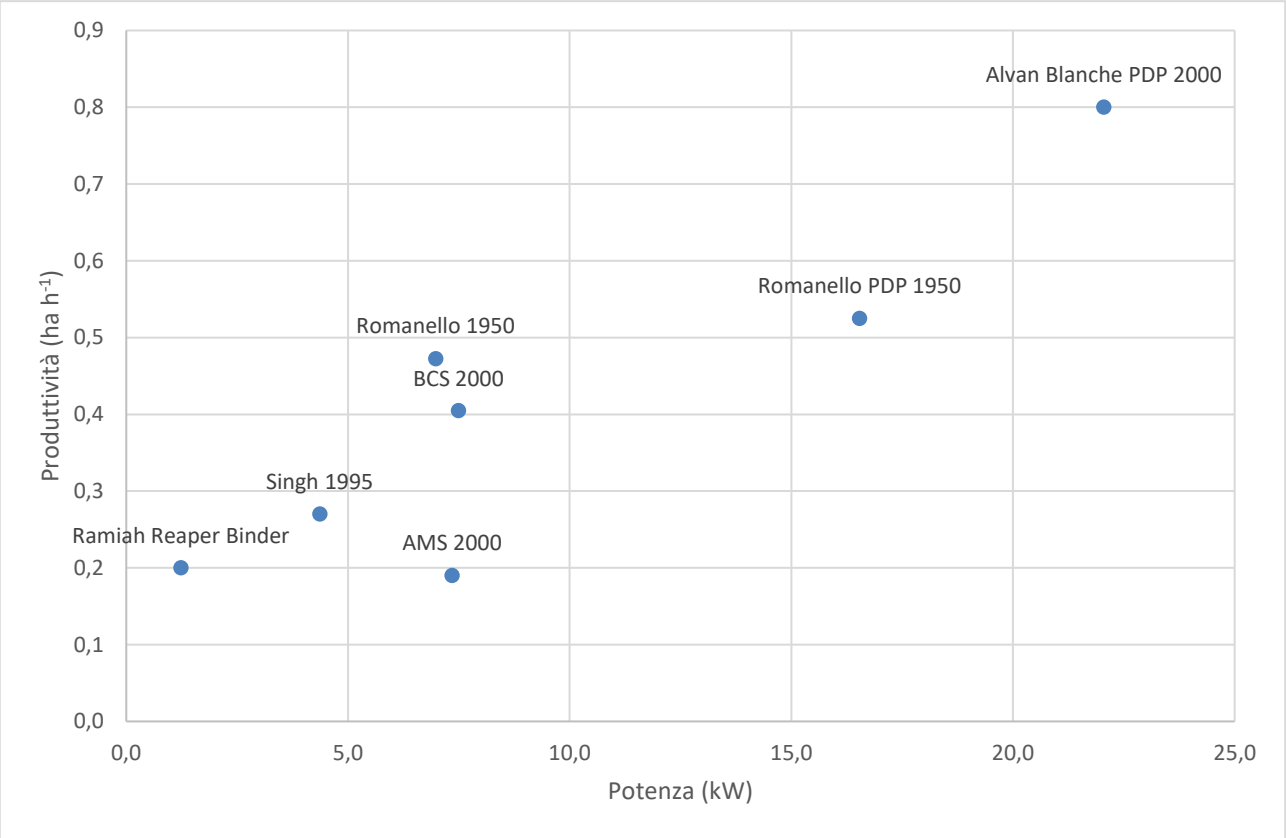


Figura 52 Produttività in funzione della potenza per mietilegatrici dotate di motore a combustione interna

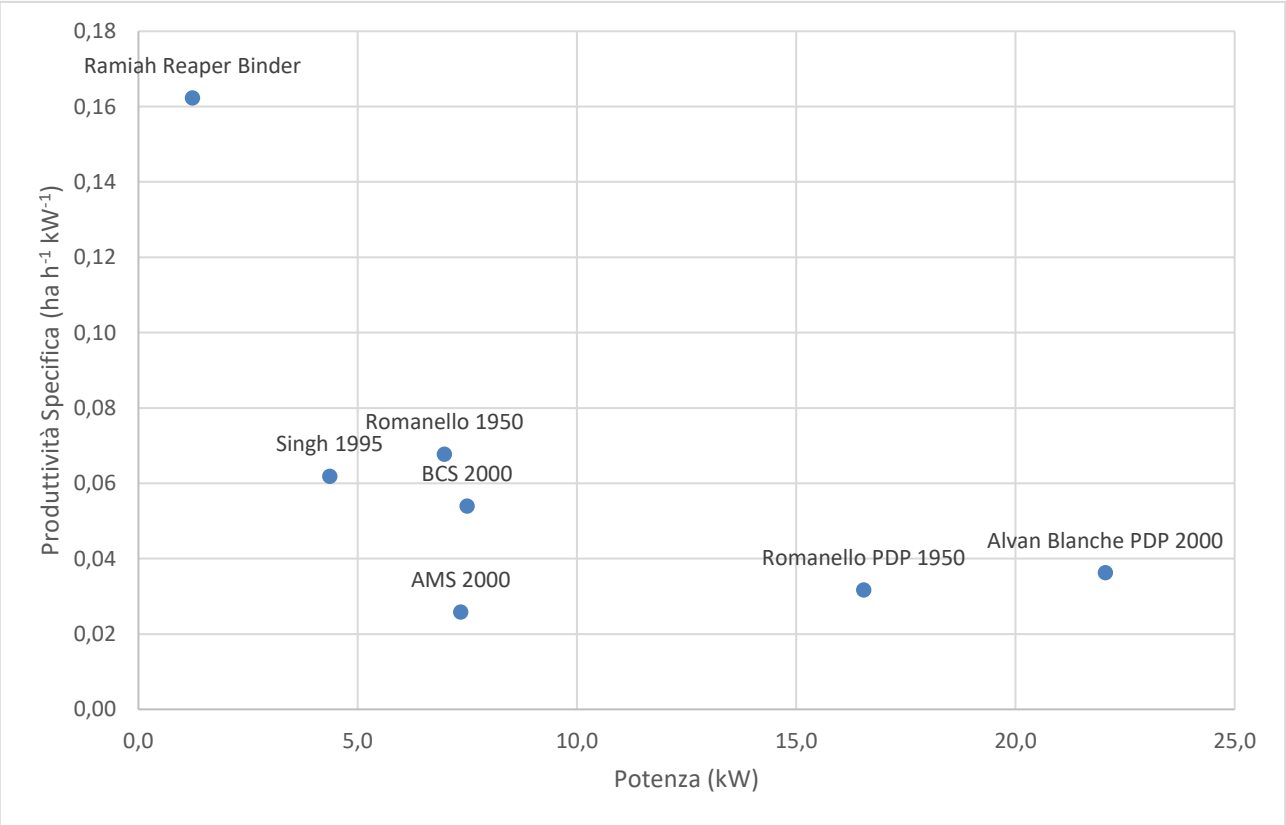


Figura 53 Produttività specifica in funzione della potenza per mietilegatrici dotate di motore a combustione interna

4.3 La trebbiatura

Per quanto riguarda la fase di trebbiatura, questa veniva relegata solitamente al periodo invernale: questa consiste nella separazione dei chicchi dalla spiga e nella successiva pulitura da paglia e pula (winnowing, spulatura o vagliatura). A fronte degli avanzamenti nella mietitura, anche questa tecnica vede un'evoluzione in termini tecnologici.
La tecnica del correggiato permetteva di trebbiare fino a 200 kg di grano in 10 ore lavorative se effettuata da un operatore esperto [145]: non era difficile procurarsi contusioni alle spalle e alla testa nel caso l'utilizzo dello strumento non fosse corretto. Al fine di rendere i tempi più snelli si pensò di fare utilizzo anche in questo caso degli animali, spargendo a terra il grano e facendolo calpestare dagli zoccoli degli stessi. Il calpestio era più produttivo del correggiato: tre cavalli e due uomini potevano trebbiare fino a 800 kg al giorno, due uomini e sei cavalli fino a 2.7 tonnellate. Il problema di questa tecnica era la poca accuratezza nell'esecuzione del lavoro, il che rese il correggiato lo strumento maggiormente in auge fino al 1850. Il passo successivo, la vagliatura, veniva effettuato tramite secchi o setacci.
Successivamente alla rivoluzione americana (1775-1783) si diffuse l'utilizzo dei mulini a vento per ovviare a questa fase di vagliatura: negli anni '30 dell'800 questa tecnologia era in voga in tutto lo stato di New York, espandendosi e rimanendo la tecnologia più utilizzata fino ai primi anni del XX secolo. La produttività di questa tecnologia permetteva la pulitura di 27 kg di grano al minuto o una media di 10-16 tonnellate in una giornata lavorativa di 10 ore (pratica che prevedeva il passaggio attraverso il mulino per due volte, accortezza che ne assicurava la completa pulitura).
Fu nel 1788 che Andrew Meikle, un inventore scozzese, inventò la prima trebbiatrice funzionante a energia idraulica, ma furono necessari ulteriori perfezionamenti per rendere questa tecnica conveniente rispetto all'utilizzo del correggiato. Si deve aspettare il decennio 1820-30 perché le prime trebbiatrici a sforzo animale facciano apparizione sul mercato: Jacob Pope, di Boston, costruì la trebbia col maggior successo del periodo: la "Groundhog machine" (figura 54) era dotata di una cinghia dispensante potenza a un cilindro concavo. Quando il grano cadeva nella trebbia, il cilindro, dotato di denti, ruotava battendo il grano e trebbiandolo. Questi macchinari non eseguivano anche la pulitura che veniva eseguita successivamente; la potenza veniva fornita da un mulino mosso da animali. In questo modo la quantità di trebbiato poteva essere aumentata in modo considerevole, proporzionalmente al numero di animali in utilizzo, che variavano da due a sei.
Fu nel 1837 che Hiriam e Pitts inventarono la prima trebbiatrice, azionata da due cavalli e trasportabile (figura 54), integrante anche l'operazione di pulitura: i fasci di grano venivano spinti nella trebbiatrice che tramite un meccanismo vibrante portava via grano e paglia dal cilindro e li puliva tramite un

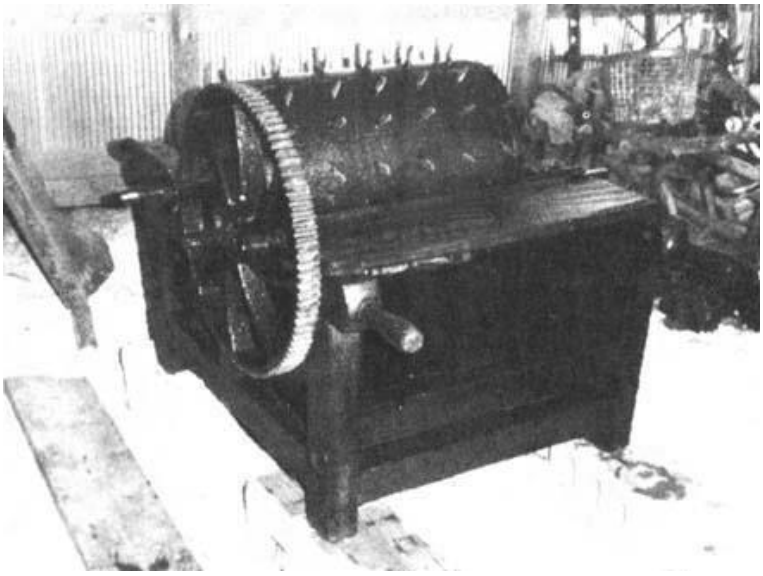


Figura 54 La "Groundhog machine", 1830 [231]

ventilatore. In questo modo quattro uomini riuscivano a trebbiare e pulire fino a 2.7 tonnellate di grano al giorno con l'usufrutto di due cavalli, il doppio rispetto alla groundhog machine.
Negli anni '50 dell'800 le trebbiatrici meccaniche erano di comune utilizzo e produttività tra le 8 e 13 tonnellate al giorno erano abbastanza comuni.
Alla fine del secolo, con l'ingresso dei motori a vapore, vennero utilizzate macchine azionate da questo tipo di energia, arrivando a trebbiare fino a 8 tonnellate di grano al giorno [139]. Queste tecnologie però furono impiegate per un limitato periodo di tempo e non ebbero diffusione: i moti a vapore comportavano un grosso ingombro, pesavano molto e, fondamentale caratteristica che rendeva queste macchina poco affidabili, il grosso rischio di bruciare il raccolto nel caso di errori umani da parte degli addetti alla macchina. Inoltre sebbene si sostituissero agli animali in termini di esercizio di potenza, diversi operatori erano necessari, oltre alle operazioni di trebbiatura in sé, anche a mantenere in esercizio la macchina a vapore: il nuovo motore primo non era ancora tecnologicamente adatto all'uso.

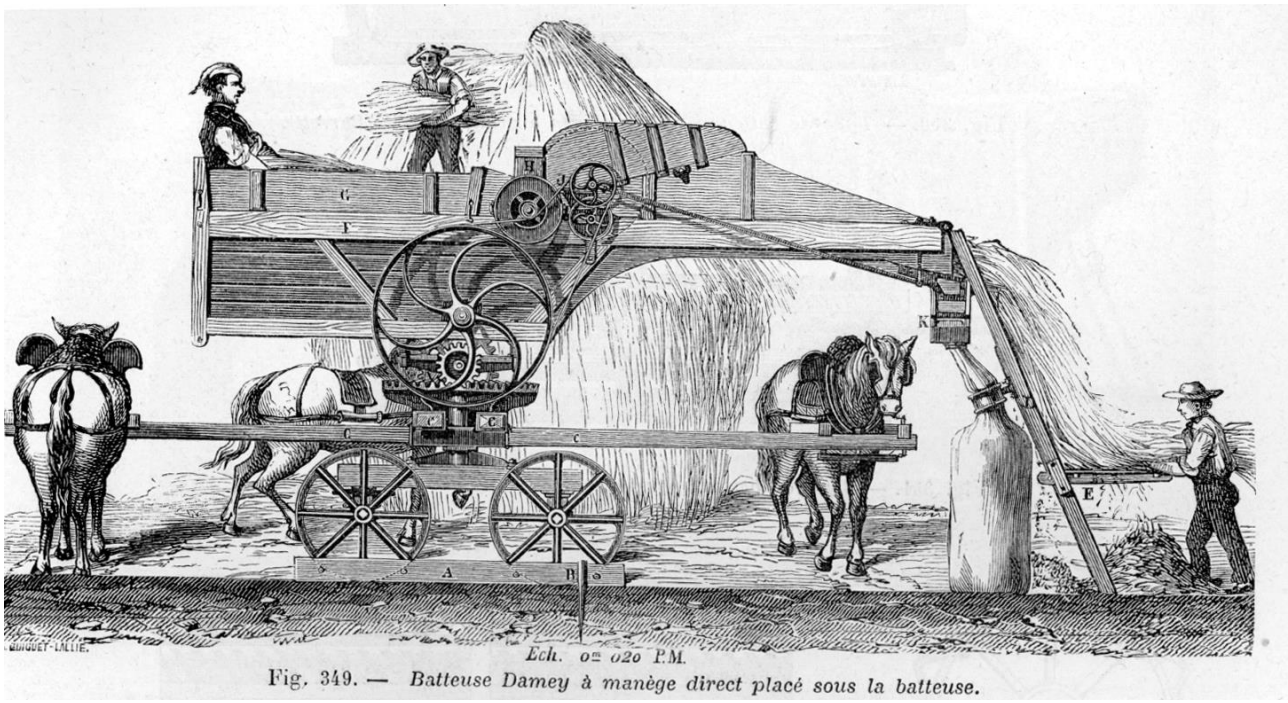


Figura 55 Trebbiatrice azionata a cavallo, tipo Hiriam & Pitt [232]

Per quanto riguarda la trebbiatura, come fatto nel paragrafo precedente, si analizzano per primi i metodi più antichi. Le prime tecniche utilizzate furono la battitura col correggiato e il calpestio utilizzando gli animali, in voga fino al 1800. Va sottolineato che entrambi questi metodi non includevano la fase di pulitura che andava effettuata manualmente con secchi e setacci, quando non si disponesse di mulini a vento che consentivano una pulitura più veloce ed efficace [139] [4].
Il calpestio oltre ad essere decisamente meno efficiente rispetto alla battitura con correggiato esprimeva una qualità di trebbiato decisamente inferiore, con rese in termini di rottura dei grani non trascurabili. Evidentemente una tecnica simile veniva adottata nel caso di necessità di trebbiatura per grandi raccolti o nel caso di necessità dettate da limiti in termini di tempo. O banalmente, in mancanza del correggiato.
Per quanto riguarda la vagliatura invece, quella effettuata tramite mulino a vento è indubbiamente la più conveniente ed efficace; d'altra parte da un punto di vista di onestà di confronto[36] con le successive tecniche questa possibilità non verrà tenuta in considerazione, considerand solo la tecnica manuale.
Per quanto riguarda le prime trebbiatrici saranno considerate la "Groundhog" e la "Miriam & Pitt's Thresher": la prima, diffusasi negli anni '30 dell'800 era pesante e necessitava della successiva fase di vagliatura. La seconda, che prese piede dieci anni più tardi, era decisamente più efficiente e poteva anche essere trasportata. Entrambe queste macchine necessitavano della potenza animale per essere azionate. In tabella 5 sono presentate queste tecniche, indicando come per la mietitura il MET di riferimento, con l'aggiunta delle tecnologie a pedali, più moderne.
Infine è stata inserita nella tabella anche una trebbiatrice di concezione moderna operante a pedali con due operatori [146], uno per l'alimentazione della macchina (MET bassa intensità, 40 W) e uno per l'operazione a pedali (alto MET, 130W). Per rendere confrontabili le tecnologie in termini di potenza è stato selezionato un metodo a pedali di Kachru, selezionato da un articolo scientifico [147], usato in accoppiata con la trebbiatrice a pedali.

	SQUADRA		**POTENZA**	**PRODUTTIVITÀ**	**METODO**	**EPOCA STORICA**
TECNICA	**# operatori**	**# cavalli**	**kW**	**kg h^{-1}**	**Denominazione**	**Anno di riferimento**
Correggiato	1 - H	/	0,130	20,000	Trebbiatura manuale	1800
Calpestio	2 - L	3	2,330	80,000	Trebbiatura animale	1800
Mulino a vento	1 - M	/	0,075	130,000	Vagliatura a mulino	1800
Setaccio/Secchio	1 - MH	/	0,1	33,750	Vagliatura manuale	1800
Groundhog	4 - M	4	3,300	130,000	Trebbiatura meccanica preindustriale 1	1830
Hiriam & Pitt	2 - M	2	1,650	270,000	Trebbiatura meccanica preindustriale 2	1840
POP Thresher	2 – M, H	/	0,205	150,000	Trebbiatura a pedali	2013
POP Cleaner	1 - H	/	0,130	350,000	Pulitura a pedali	1990

Tabella 5 Trebbiatura e pulitura tradizionale e preindustriale

[36] Considerare questa tecnica vorrebbe dire non tenere in conto il lavoro necessario alla pulitura in quanto in quel periodo non c'erano le "necessità produttive" (pressione bioeconomica) come ci sono al giorno d'oggi: ci si poteva permettere di aspettare che la pulitura si facesse quando era disponibile l'energia del vento, cosa che oggi non sarebbe accettabile in un paese industrializzato, porterebbe a far dipendere la produzione da una fonte discontinua e non prevedibile (se non con eccezioni geografiche particolari dove questa fonte è più continua).

Si confronteranno tre tecniche di trebbiatura in epoca preindustriale, ognuna accoppiata con l'adeguato processo di vagliatura del trebbiato: il metodo tradizionale con correggiato, il metodo del calpestio e il metodo della trebbiatura meccanica, che vede utilizzate le due trebbiatrici meccaniche. A parte il caso della "Hiriam & Pitt" che permetteva la vagliatura integrata, agli altri metodi sarà associata la vagliatura manuale.
Per quanto riguarda la trebbiatura a pedali, questa non verrà considerata in termini grafici a causa dei valori significativamente diversi per quel che riguarda la produttività specifica e il periodo storico in cui è stata concepita.
Procedendo con la metodologia adottata per la mietitura, si possono andare ad analizzare i dati raccolti, ma questa volta la produttività viene valutata in kg h^{-1} piuttosto che in ettari; il parametro di riferimento su cui saranno normalizzate potenze e prouttività per accoppiare la fase di trebbiatura a quella di pulitura, quando non inclusa (Trebbiatura manuale, Calpestio, Groundhog Thresher, POP Thresher), sarà la produttività in fase di trebbiatura, in quanto era quest'ultima ad avere la priorità.

METODO	TECNOLOGIA	EPOCA STORICA	SQUADRA		POTENZA COMPLESSIVA	PRODUTTIVITÀ COMPLESSIVA
Denominazione	**/**	**Anno di riferimento**	**# operatori**	**# cavalli**	**kW**	**kg h^{-1}**
Trebbiatura Tradizionale manuale	Correggiato + Setaccio/Secchio	1800	2	/	0,189	20,000
Trebbiatura Tradizionale animale	Calpestio + Setaccio/Secchio	1800	3	3	4,700	80,000
Trebbiatura meccanica 1830	Groundhog + Setaccio/Secchio	1830	5	4	3,685	130,000
Trebbiatura meccanica 1840	Hiriam & Pitt	1840	2	2	1,650	270,000
Trebbiatura Appropriata	POP Thresher + POP cleaner	2010	3	/	0,261	150,000

Tabella 6 Squadre, Potenze e Produttività complessive associate ai metodi selezionati. Trebbiatura

METODO	POTENZA INDIVIDUALE	PRODUTTIVITÀ INDIVIDUALE	OPERATORI NORMALIZZATI	PRODUTTIVITÀ SPECIFICA
Denominazione	**kW $uomo^{-1}$**	**kg man h^{-1}**	**# operatori**	**kg h^{-1} kW^{-1}**
Trebbiatura Tradizionale manuale	0,119	12,558	1,593	105,675
Trebbiatura Tradizionale animale	0,875	14,897	5,370	17,020
Trebbiatura meccanica 1830	0,469	16,557	7,852	35,276
Trebbiatura meccanica 1840	0,825	135,000	2	163,636
Trebbiatura Appropriata	0,107	61,765	2,429	575,342

Tabella 7 Potenze e produttività individuali e specifica, trebbiatura

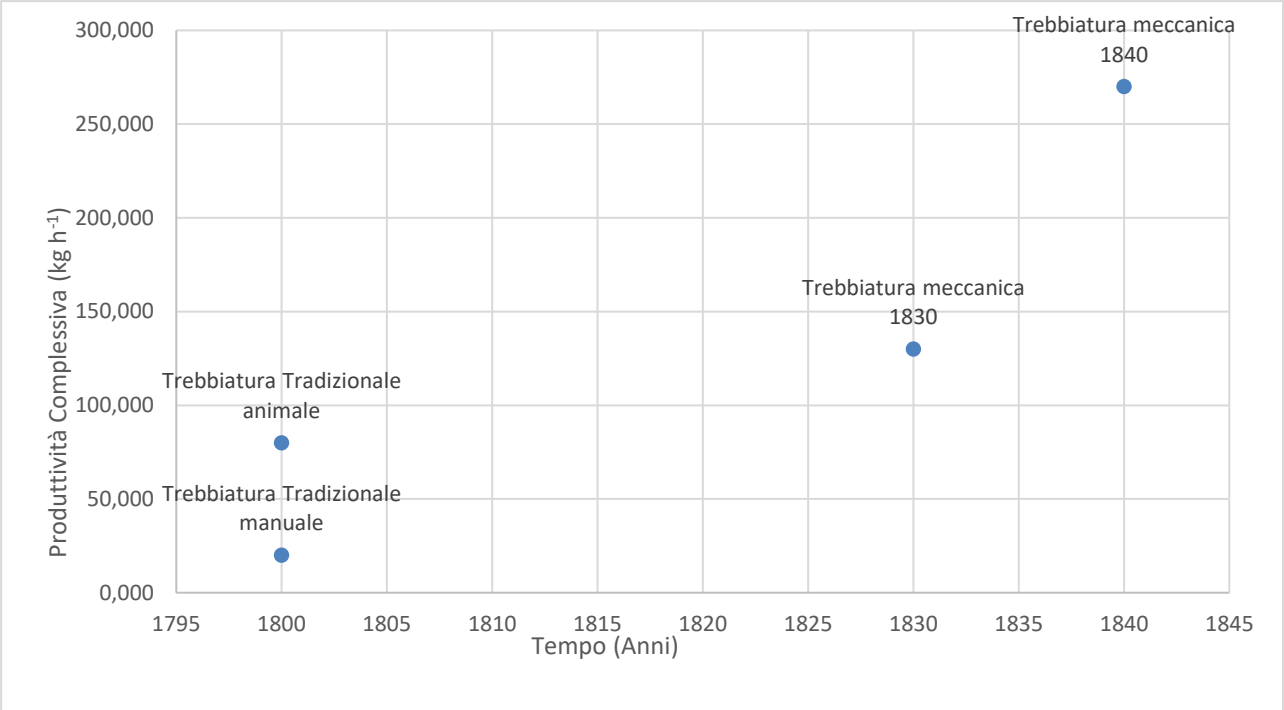


Figura 56 Produttività delle tecnologie di trebbiatura in epoca preindustriale

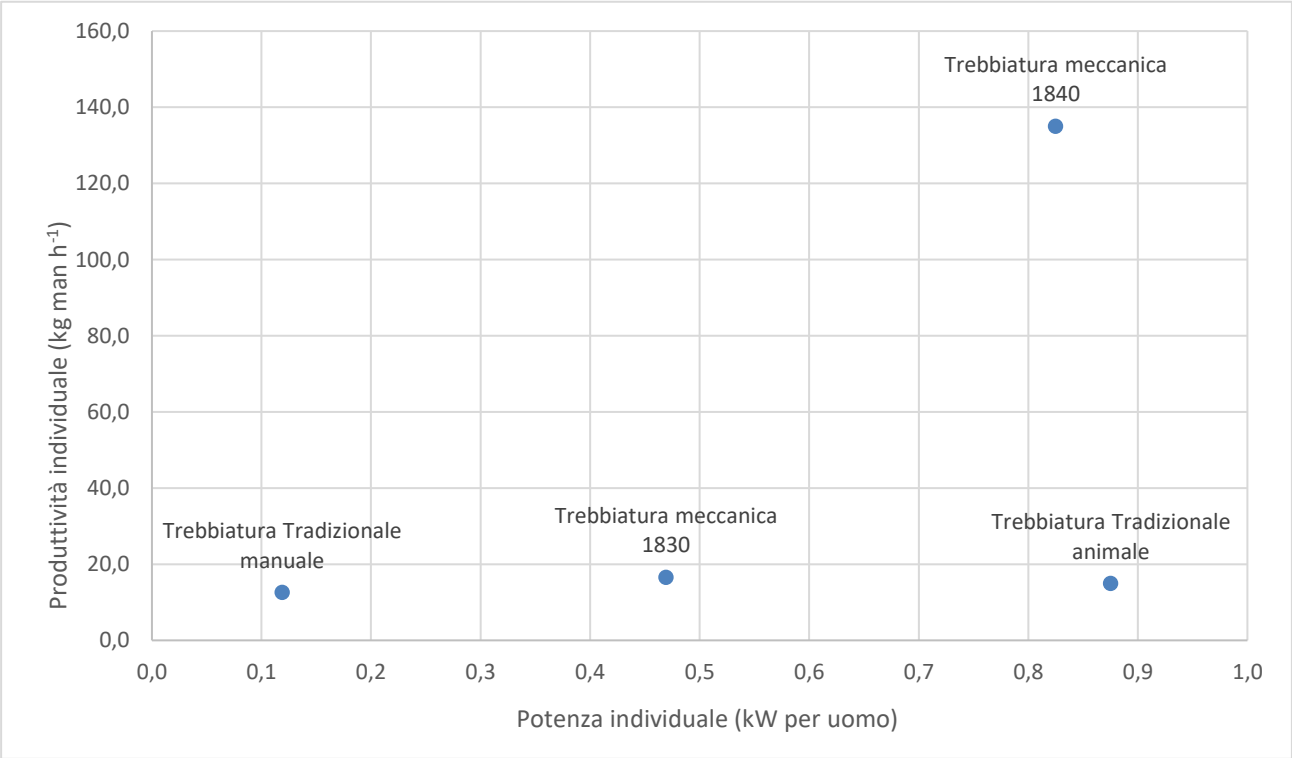


Figura 57 Produttività e Potenza individuale per la trebbiatura preindustriale

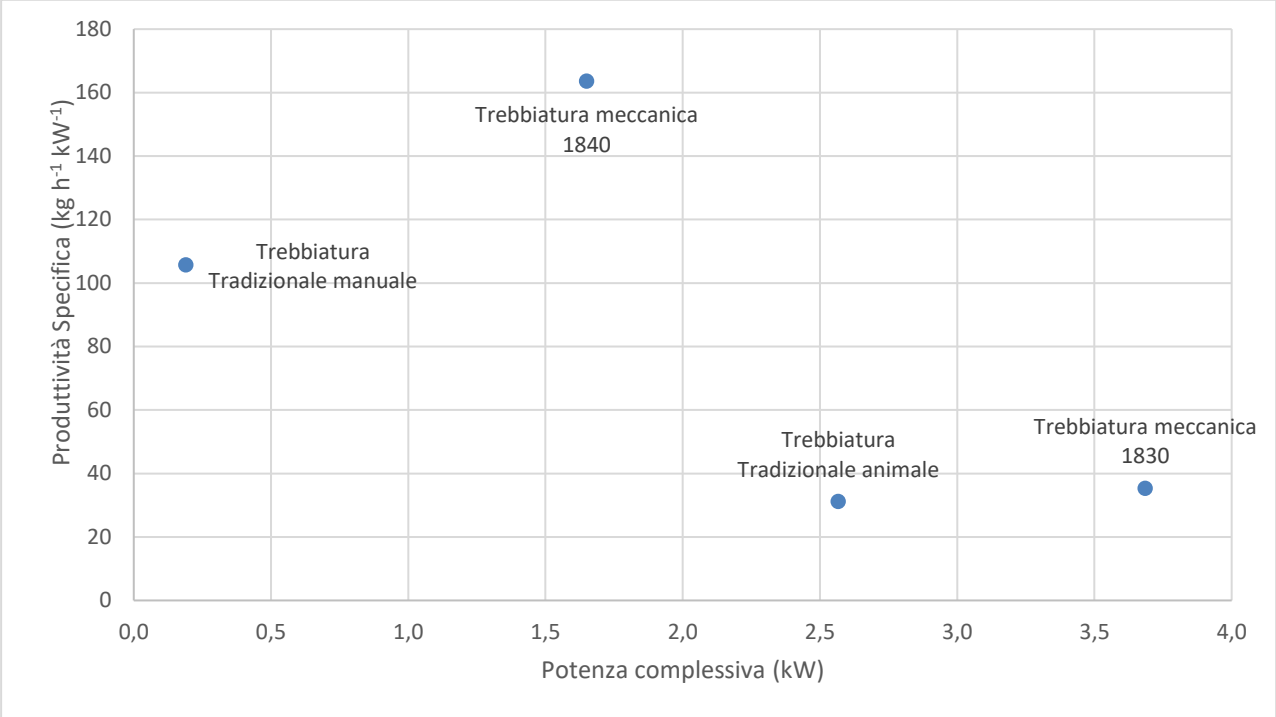


Figura 58 Produttività Specifica in funzione della potenza nell'epoca preindustriale per quanto riguarda la trebbiatura

Come nei casi precedenti la produttività aumenta nel tempo (figura 56). Per quanto riguarda potenza e produttività individuali (figura 57) si nota come fino all'avvento della Trebbiatrice di Hiriam & Pitt, la prima con pulitura integrata, la produttività individuale rimane praticamente costante al variare della potenza, intuendo già prima di osservare il grafico di figura 58 riferito alla produttività specifica come prima della macchina di Pitt questo rimanga il metodo più conveniente.
Per quel che riguarda la produttività specifica qui sono evidenti i vantaggi derivanti dalla trebbiatrice meccanica. Questo significa che una tale tecnologia ha raggiunto uno stato di maturazione considerevole: qualità come la possibilità di essere trasportata, semplici soluzioni tecnologiche, l'integrazione della fase di vagliatura, hanno reso questa soluzione la migliore in termini sia di resa che di produttività. È impossibile non notare le caratteristiche comuni con la mietilegatrice del 1890 osservata nelle lavorazioni di mietitura.

Analizzate le tecnologie preindustriali, si passa a quelle industriali, caratterizzate dalla presenza del motore a combustione interna. Qui si procede come per la mietitura caratterizzata da motori primi a combustione interna. Le tecnologie sono disposte in ordine di potenza assorbita e si sono prese in considerazione macchine a media ed alta produttività.
I dati sono stati recuperati da articoli scientifici quando possibile, per tempi più recenti si è fatta una valutazione sulle schede tecniche fornite dai produttori valutando che i valori fossero coerenti: spesso in commercio i dati non sono espressi in seguito a una reale prova del prodotto sul campo, ma solo teorici.
Si è scelto quindi di considerare la trebbiatrice Cicoria, a postazione fissa [148] e una trebbiatrice moderna per diverse colture [149], entrambe in commercio e di piccola taglia. La "Chaff-cutter" (taglia pula) e la "Straight Beater" (Battitore rettilineo) sono state selezionate da un articolo scientifico scritto da Joshi e Singh [150]; dallo stesso articolo si sono recuperati i dati anche di una trebbiatrice per diverse colture sviluppata ad hoc dagli autori. I dati rispetto alle trebbiatrici Lanz sono stati raccolti dal Carena e si differenziano per la metodologia dello scuotipaglia (a disposizione c'era anche una trebbiatrice con una diversa tecnologia di battitura, non considerata per la resa decisamente inferiore) [59]; il dato riferito allo Stefanelli prende in considerazione gli studi fatti dall'autore che ha valutato i parametri

caratteristici della trebbiatrice media Italiana adottata dai contadini nel 1948 [151]. Le macchine rimanenti (la Alvan Blanche, la Cicoria e la ATX 200 – figure 59 e 60) sono state selezionate da realtà commerciali. La Stefanelli non dispone di dispositivi associati per la pulitura, che si è provveduto ad integrare.
Per quanto riguarda la trebbiatrice media del 1948 si è ipotizzato l'utilizzo di una spesa energetica ulteriore per la pulitura, in termini di potenza, del 20%, conservativamente (con le altre opzioni la potenza necessaria alla lavorazione aumenta solo del 10% ma le tecnologie sicuramente non erano altrettanto efficienti 50 anni prima).

Figura 59 Plot 2735 CICORIA, Motore a combustione interna, Trasportabile [234]

Figura 60 ATX 2000 CICORIA, Mietitrebbiatrice azionata dalla PDP (Presa di Potenza) [233]

METODO	TECNOLOGIA	EPOCA STORICA	MOTORE PRIMO	POTENZA	PRODUTTIVITÀ	PRODUTTIVITÀ SPECIFICA
Denominazione	**/**	**Anno di riferimento**	**/**	**kW**	**kg h^{-1}**	**kg h^{-1} kW^{-1}**
Trebbiatrice moderna CICORIA	PLOT 2735 CICORIA (Postazione Fissa)	1980	Electrical Power	2,200	200	90,909
Trebbiatrice moderna multiicolture RUNWAY	Multi-crop thresher RWT30 RUNWAY MACHINERY	2000	Diesel o elettrico	2,200	300	136,364
Trebbiatrice moderna 1	Chaff-cutter type	1990	Combustion Engine	2,700	220	81,481
Trebbiatrice moderna 2	Straight Beater type 4	1990	Combustion Engine	3,600	230	63,889
Trebbiatrice industriale LANZ Piccola	LANZ, Battitore a spranghe, scuotipaglia continuo	1950	Combustion Engine (PDP)	5,050	495	98,020
Trebbiatrice moderna PDP piccola	ALVAN BLANCHE, Mobile Crop Tresher	2000	Combustion Engine/PDP	5,880	1000	170,068
Trebbiatrice Moderna trasportabile	PLOT 2735 CICORIA (Trasportabile)	1980	Combustion Engine	7,000	200	28,571
Trebbiatrice industriale LANZ Media	LANZ, Battitore a spranghe, scuotipaglia ad elementi	1950	Combustion Engine (PDP)	9,750	1370	140,513
Trebbiatrice Industriale Media 1948	Trebbiatrice 1948 + Pulitura Non Integrata (+20%)	1948	Combustion Engine	13,495	950	70,399
Trebbiatrice Multicoltura Moderna	HOSHI (1990) Multi crop tresher	1990	Combustion Engine	25,725	400	15,549
Trebbiatrice moderna PDP grande	ATX 2000 PTO (PDP)	2000	Combustion Engine, PDP	25,725	2000	77,745

Tabella 8 Metodi di trebbiatura e pulitura del grano

Come per le mietilegatrici il grafico della potenza in relazione al tempo non è così significativo. Si è scelto di valutare invece la potenza in funzione della produttività (figura 61): per le macchine di potenza limitata le prestazioni sono molto simili, tranne per quanto riguarda la trebbiatrice multiuso di Joshi. L'aumento di produttività con la potenza è caratteristica comune delle macchine degli anni '50 quanto di quelle più moderne.
Si osserva che la tecnologia con scuotipaglia ad elementi nelle LANZ richiede un maggior utilizzo di potenza ma aumenta considerevolmente la produttività a parità di tecnica (trebbiatura meccanica). Il basso valore di produttività relativa alla macchina multifunzionale di Joshi è probabilmente dovuto proprio alla possibilità di trebbiare diverse qualità di cereali, andando a perdere in termini di efficienza per le diverse caratteristiche di lavorazione dovute a diverse colture.

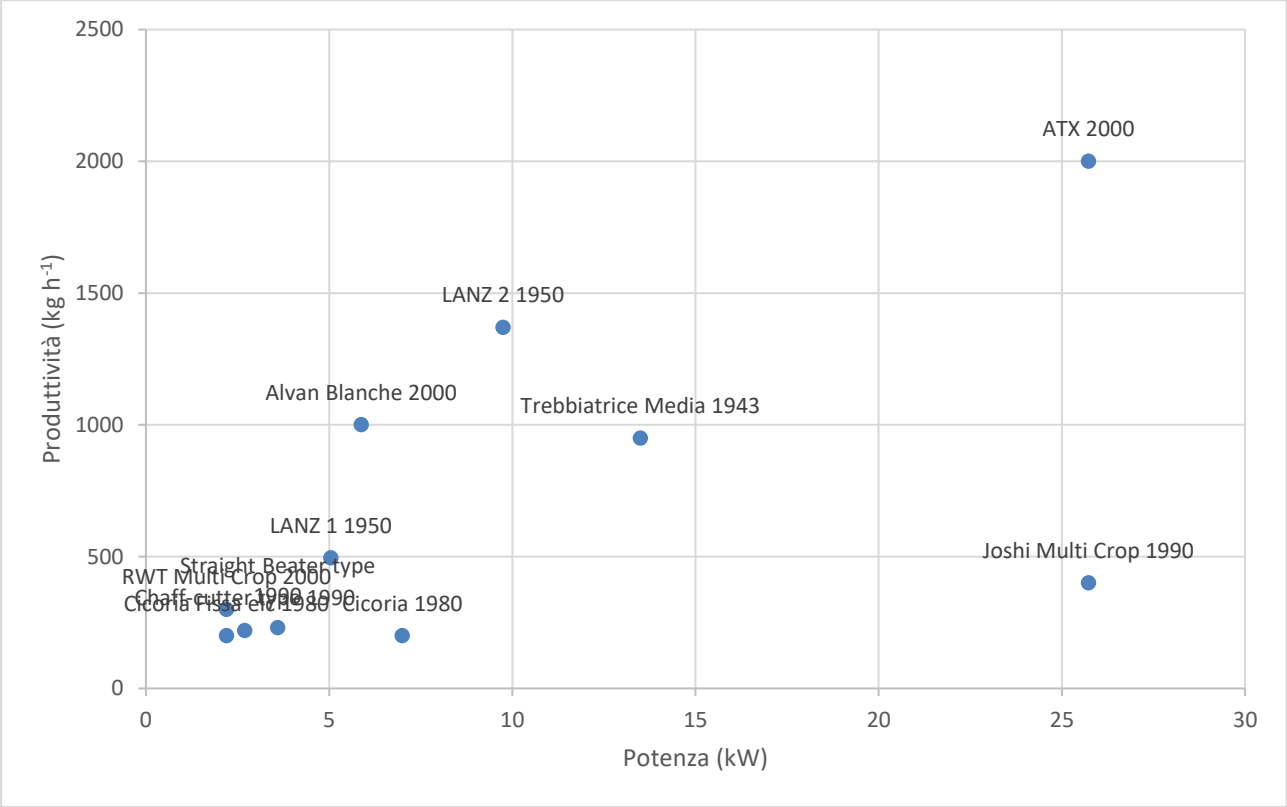


Figura 61 Produttività delle tecnologie di trebbiatura in epoca industriale

Si effettua un ingrandimento per le macchine di potenze inferiori ai 7 kW (figura 62). È interessante notare come la tendenza non si differenzi rispetto al grafico precedente; una tale affermazione, unita alla bassa dipendenza della produttività di tali macchine in riferimento al periodo in cui sono state sviluppate è indice di una maturazione dello stato tecnologico, dal punto di vista meccanico, già precedente al periodo considerato.
Il grafico relativo alla produttività specifica in figura 63 non è indicativo quanto i casi precedenti, dove si notava un andamento che si potrebbe definire asintotico. Ma si nota come nonostante la distribuzione meno omogenea la costante non cambi: all'aumentare della potenza disponibile delle macchine diminuisce l'efficacia di produzione riferita al'unità di potenza considerata.

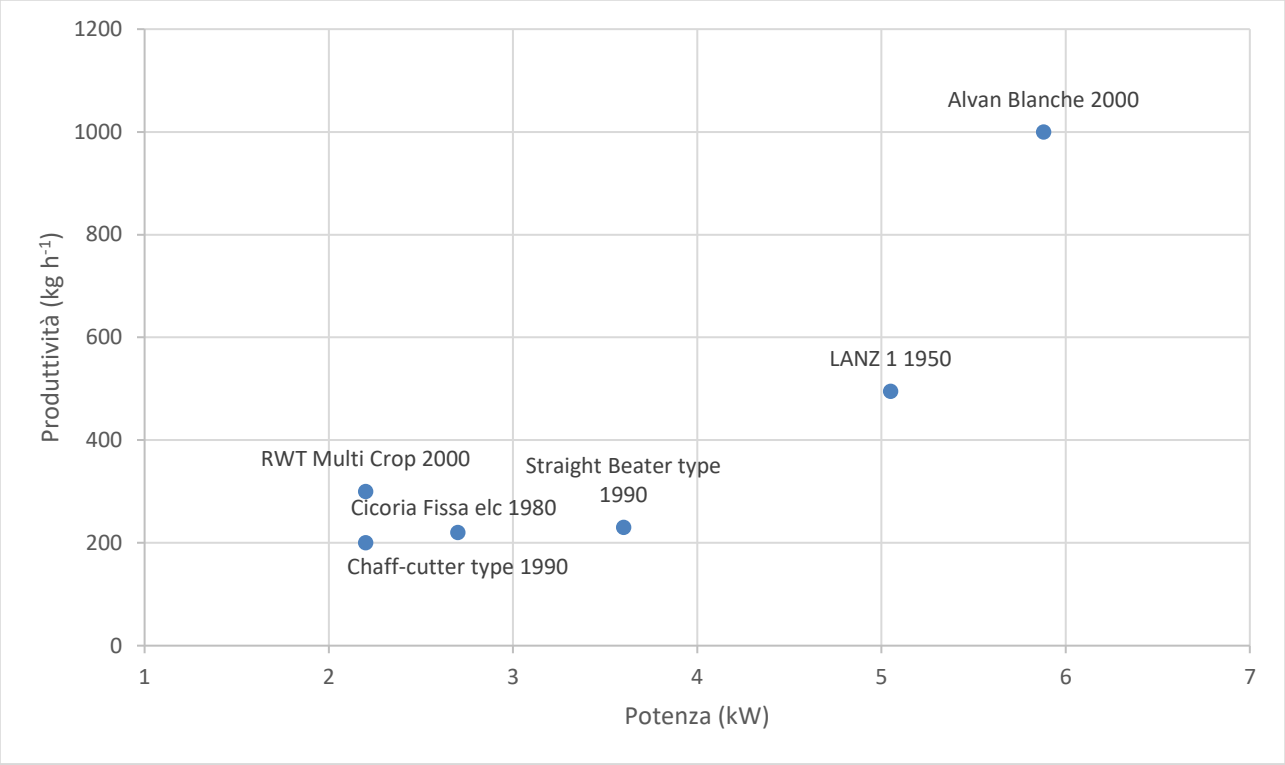


Figura 62 Produttività delle tecnologie di trebbiatura in epoca industriale. Zoom per potenze inferiori ai 7 kW

Figura 63 Potenza in funzione di Produttività Specifica nell'epoca industriale nella fase di trebbiatura

4.4 L'avvento delle mietitrebbie

L'ultimo stadio di meccanizzazione che corrisponde alle metodologie in voga oggi nelle agricolture più meccanizzate è sicuramente la mietitrebbia. Queste macchine nel corso del tempo hanno permesso di rendere la lavorazione completamente automatizzata: chi non immagina queste immense macchine vagare nelle fattorie americane? Sebbene l'aumento di potenza abbia permesso di raggiungere delle produttività un tempo inimmaginabili, il vantaggio nell'utilizzo di queste tecnologie consiste nell'unificare i processi di produzione precedentemente descritti in un'unica macchina in grado di mietere il grano, trebbiarlo e pulirlo in un'unica operazione automatizzata.
Come è stato possibile concentrare tutte queste lavorazioni in un'unica macchina? E a che prezzo? Chiaramente senza lo sviluppo industriale e dei motori a scoppio una tale evoluzione tecnologica non sarebbe stata possibile: è stato necessario un passaggio di motore primo in chiave di densità di potenza per poter finalizzare in modo consono la realizzazione di questa tipologia di macchine.
Ma, come per tutte le tecnologie analizzate finora, per comprendere quest'evoluzione si deve tornare a qualche decennio prima dell'inizio del XX secolo…
Fu Hiram Moore nel 1834 a costruire la prima mietitrebbia, come combinazione semplice di una mietitrice, trebbiatrice e pulitrice. Le macchine che più vi assomigliavano in precedenza erano molto simili alla mietitrice gallica. La mietitrebbia di Moore necessitava però di diversi miglioramenti che non videro soddisfazione fino al 1854, dopo aver messo a punto diversi modelli. La mietitrebbia di Moore ("Moore's combine harvester" – figura 64) era un'enorme mietitrice lunga 6 metri e larga 5. Due ruote di 2 metri di diametro rendevano disponibile la potenza per i meccanismi di mietitura e trebbiatura. La barra falciante consisteva di una barra fissa e una falce a denti di sega oscillante posta superiormente, regolabile, in modo da tagliare le spighe alla giusta altezza a seconda della necessità. Il cilindro di raccolta misurava 1 metro di diametro 4 di lunghezza (intuibile dalla figura).
Il grano quindi veniva trebbiato e poi passato attraverso un contenitore che lo gettava su un setaccio che si occupava della vagliatura. Tale macchina necessitava di 4 uomini per operare, più uno per ogni

Figura 64 Mietitrebbia del XIX secolo di Moore, trainata da 25 cavalli [193]

squadra formata da quattro cavalli e diversi altri per il trasporto del grano nei sacchi. Era trainata da 16-20 cavalli e riusciva a lavorare fino a 10 ettari al giorno [139].
Nonostante i miglioramenti in termini di tempo e produttività un tale macchinario presentava diversi problemi: necessitava di un grande spazio di manovra e fattorie molto grandi, inoltre la gestione di 20 cavalli contro i due necessari alle mietitrici convenzionali rendevano questa macchina decisamente meno appetibile in termini di governabilità e investimento. In più in climi umidi era conveniente lasciare il mietuto ad asciugare prima della fase di trebbiatura e nel caso di campo bagnato e quindi fangoso la movimentazione di una macchina tanto enorme creava delle difficoltà quasi insormontabili per essere manovrata.
La convergenza di questi fattori rese la mietitrebbia una tecnologia non appetibile fino ai primi del '900, essendo i macchinari destinati a mietitura e trebbiatura più convenienti in termini di affidabilità e manovrabilità.
Nel 1884 la "Hainer and Houser Company" avviò una partnership con la "Sheepee", la quale aveva acquistato diversi precedenti brevetti; questa unione diede vita a diverse mietitrebbie che furono introdotte nel mercato con successo. La più popolare fu la "Houser" (figura 65): in due anni ne furono prodotte 280, mietendo 120˙000 ettari l'anno. Queste macchine lavoravano dai 10 ai 14 ettari al giorno ed erano prodotte con pezzi standardizzati, cosa che permise un grande avanzamento in termini di manutenzione.
Il primo implemento in termini di motore primo fu introdotto con la "Mietitrebbia Judson" negli stessi anni, che era azionata a cavalli e motore a vapore da 12 cavalli con combustione a olio, il quale alimentava le operazioni di mietitura, trebbiatura e imballaggio.
Da questo momento in poi altre macchine furono dotate di motore a vapore: la "Mitchell Fisch (1888)" era dotata di due motori a vapore, uno per la trazione da 26 cavalli e uno da 6 per le lavorazioni del

Figura 65 Houser Combine Harvester, trainata qui da 37 cavalli [235]

cereale. La sua produttività raggiungeva i 20 ettari al giorno, essendo dotata di una barra falciante lunga 11 metri.
Fu nel 1904 che la "Holst Company" utilizzò un motore a gasolio e nel 1912 fu dotata di un motore a combustione interna. Le macchine a vapore necessitavano di un gruppo composto da 6 o 7 persone: guidatore, fuochista, un addetto al trasporto dell'acqua, uno alla barra e uno al controllo del grano all'ingresso della trebbia in modo da evitare intasi; altri due uomini erano necessari per il riempimento dei sacchi e il trasporto. Furono costruite macchine enormi da 40 ettari al giorno, ma una tale tecnologia non riuscì mai a giungere a maturazione: il motore a vapore era pericoloso, e la trazione animale era comunque più conveniente in termini economici e di risorse umane [139].

Le mietitrebbie a trazione animale raggiungevano produttività simili senza il pericolo di innescare incendi con conseguente perdita del raccolto: è altresì da dire che condurre i 40 cavalli di cui necessitavano era un'impresa da non sottovalutare. A prescindere dal motore primo, comunque, queste macchine lavoravano bene su terreni regolari e piani; nel caso di discontinuità o tratti collinosi, era necessario adoperare le "vecchie" mietitrici.
Le mietitrebbie di moderna concezione vengono introdotte nel mercato negli anni '20 con l'utilizzo dei trattori ma è solo con gli anni '50 che le mietitrebbie sfondano nel mercato europeo come macchine non utilizzate tramite trattrice ma semoventi [152]. Tali macchine nel corso del tempo hanno subito considerevoli variazioni e miglioramenti: si propone una breve spiegazione sul funzionamento di questa tecnologia.
Le mietitrebbie moderne sono composte da una testa raccoglitrice (*header*), gli organi di trebbiatura e separazione, gli organi di pulizia e movimentazione (vedi figura 66 a pagina successiva).
La **testata** è composta dalla *barra falciante* (2), dotata di lama a movimento rettilineo alternativo e le velocità normalmente sono comprese tra 1.4 e 1.6 m s^{-1}. Questa scorre su un portalama a denti fisso. La lunghezza della barra falciante può variare dai 3.5 a 6 m, a seconda della mietitrebbia; alle estremità della barra sono montati degli elementi detti spartitori, i quali delimitano la larghezza massima di taglio e convogliano le messi verso l'apparato mietente; questi sono regolabili così da adattarsi alle diverse condizioni di raccolta.
L'*Aspo abbattitore* (1) è posto sopra la barra: questo consiste in un rotore a barre orizzontali munite di denti elastici il quale accompagna le piante alla lama e verso l'interno della testata evitando che cadano a terra.
Il *convogliatore a coclea* (3) ha un diametro di 0.5-0.6 metri e ruota tra i 130 e 240 giri al minuto: questo fa affluire le piante prima al centro della testata e poi verso l'interno della macchina.
L'insieme della testata poggia su una piattaforma metallica incernierata al telaio e dotata di pistoni idraulici che ne permettono la regolazione in altezza rispetto al terreno.
Gli **organi di trebbiatura e separazione** sono costituiti da un *battitore a flusso* (assiale o tangenziale - 6) e una serie di *scuotipaglia* (8). Il lavorato dalla testata viene spostato tramite un *elevatore a nastro* (4) di larghezza pari a quella del battitore, il quale è costituito da un rotore all'interno di una griglia o *controbattitore* fisso (7). La trebbiatura avviene principalmente per attrito ed è tanto più intensa quanto minore è la distanza battitore-controbattitore e quanto maggiore è la velocità del battitore; tali parametri vanno regolati in funzione della coltura e dell'umidità della paglia, ponendo attenzione a evitare l'ingolfo dei crivelli. Il trebbiato è composto da cariossidi e pula: il prodotto passa attraverso una griglia e inviato al sistema di pulizia. La paglia e il materiale non trebbiato vengono separati per mezzo di un deflettore e un tamburo spagliatore (o controbattitore) il quale opera una ulteriore separazione tra granella restante e materia organica.
Gli *scuotipaglia* (8) separano la granella dalla paglia e sono formati da una serie di cassetti in lamiera inclinati di 20-30° e rivestiti da griglie. Questi sono fissati da alberi a gomiti che scuotono i cassetti così da rimescolare la paglia, la quale avanza verso la parte posteriore della macchina venendo poi scaricata a terra. La granella dopo essere passata attraverso la griglia scorre lungo i cassetti e viene convogliata al piano preparatore. Mediamente gli scuotipaglia sono in numero variabile tra 4 e 8, a seconda delle dimensioni della macchina, la superficie di scuotimento varia tra i 3.5 e i 4.5 m^2 per metro di lunghezza del battitore. La velocità della mietitrebbia incontra limitazioni legate alla superficie richiesta per la

separazione della paglia, che deve essere congrua alla velocità di avanzamento: si deve quindi trovare un compromesso tra velocità della macchina, efficienza di separazione e suo ingombro viste le superfici necessarie allo svolgimento efficiente di una tale operazione.
Per macchine di potenza superiore ai 200 kW tali soluzioni non permettono una capacità di lavoro adeguata con ingombri accettabili e si adotta un sistema di separazione rotativo: si riducono quindi le dimensioni della macchina pagando il prezzo di una diminuzione di versatilità e un maggiore maltrattamento del grano. Il *battitore assiale* è una soluzione che riunisce all'interno di un elemento unico il battitore assiale stesso e le funzioni di trebbiatura e separazione; l'*alimentazione* al battitore può essere tangenziale o assiale, situazione che condiziona il posizionamento del sistema trebbiante, che risulta trasversale per battitore tangenziale o longitudinale per battitore assiale. Essendo la trebbiatura caratterizzata da meccanismi di attrito piuttosto che impatto, l'ultimo sistema richiede un'energia doppia rispetto a quella necessaria per una trebbiatura tangenziale producendo una maggiore quantità di paglia sminuzzata (con tutti i relativi svantaggi); d'altro canto nei modelli assiali si ha una minore rottura della granella e un'aumentata produttività per unità di volume della macchina rispetto ai modelli convenzionali.

Il sistema classico di **pulitura e movimentazione** ha lo scopo di pulire la granella separata dal controbattitore e gli scuotipaglia. È costituito da un *piano preparatore*, ovvero una lamiera inclinata oscillante col compito di regolarizzare il flusso della granella poi inviata ai *crivelli* (11-12) che possono essere del tipo a fori o a lamelle, vibranti per effetto di un meccanismo ad eccentrici. Tra i due crivelli agisce un ventilatore (10) di tipo centrifugo con portata d'aria regolabile a seconda della velocità (350-1000 giri min^{-1}); questo asporta le particelle più leggere (pula e paglia) separandole dalla granella, più pesante. Le parti non separate nella prima ventilazione vengono raccolte nella *coclea atta al recupero delle mezze spighe* (13) e rigettate nel gruppo battitore-griglia per essere sottoposte a una seconda trebbiatura.
La **cabina** delle moderne mietitrebbie riveste una parte sempre più importante per quanto riguarda la distribuzione dei comandi e il comfort nella guida, oltre i vari sistemi di protezione individuale [153].
Si possono suddividere le mietitrebbie moderne in 3 diverse classi, in accordo coi differenti accorgimenti scelti per la trebbiatura e separazione, i quali dipendono dalla direzione del flusso di materiale attraverso gli organi di trebbiatura. Si possono definire quindi mietitrebbie convenzionali quelle a flusso

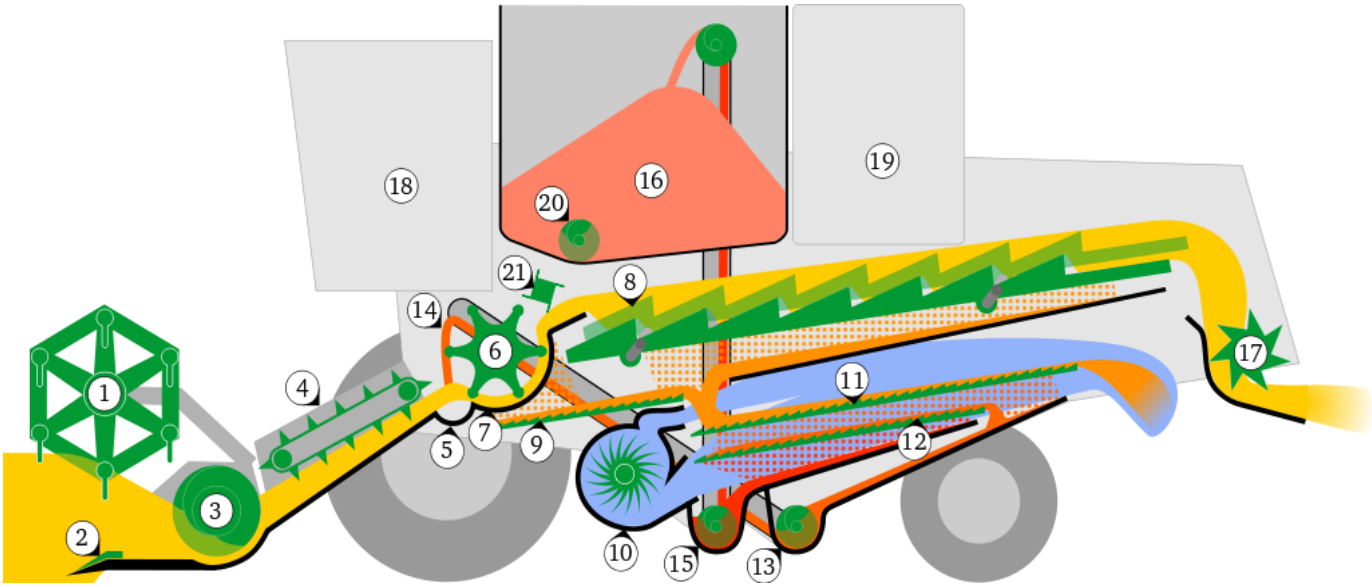


Figura 66 1 Aspo; 2 Barra falciante; 3 Convogliatore a coclea; 4 Elevatore a nastro; 5 Recupero pietre; 6 Battitore; 7 Controbattitore; 8 Scuotipaglia; 9 Recupero pietre; 10 Ventilatore; 11 Primo crivello; 12 Secondo crivello; 13 Coclea recupero mezze spighe; 14 Riciclaggio delle mezze spighe; 15 Coclea raccolta granella; 16 Tramoggia granella; 17 Trinciapaglia; 18 Cabina di guida; 19 Motore; 20 Spandigranella; 21 Lanciapaglia; [194]

tangenziale, non convenzionali quelle a flusso assiale. Il terzo gruppo prevede sistemi a trebbiatura tangenziale ma separazione effettuata da un'unità assiale (a uno o due rotori) [154].
Per farsi un'idea dello stato dell'arte oggi a disposizione si riportano i dati della mietitrebbia New Holland CR 10 90 che con i suoi 653 cavalli (circa 480 kW) stabilisce nel 15 agosto del 2014 il record di produttività mondiale riconosciuto dal Guinnes World Record [155] [156], riuscendo a raccogliere 797˙656 tonnellate di grano in 8 ore, battendo il precedente record di più di 120 tonnellate.
Il raccolto medio della macchina più produttiva del mondo si attesta quindi sulle 99.7 t h^{-1} che con una resa media di 9.95 t ha^{-1} (grano di tipo Santiago) lavora a circa di 10 ha/h.

Figura 67 La mietitrice New Holland CR 10 90 in azione [155]

La mietitrebbia permette di unire tutti i metodi e le tecnologie precedentemente analizzate in un unico macchinario, svolgendo le varie operazioni in successione continua, dalla raccolta al prodotto "finito", in questo caso il chicco di grano pulito. Nonostante le prime mietitrebbie fossero a trazione animale, la sua massima diffusione ha raggiunto l'apice grazie a due fattori fondamentali: l'avvento dei motori a combustione interna e un miglioramento tecnologico e dei materiali (così da ridurre i volumi e l'ingombro di operazioni quali la trebbiatura), divenuto fruibile solo nella seconda metà del '900.
La prima operazione da effettuare è calcolare la potenza impiegata per le mietitrebbie di prima concezione progettate in epoca preindustriale e a trazione animale [5] [139]. Non si sono considerate le mietitrebbie dotate di motore a vapore a causa della scarsa diffusione legata ai motivi già spiegati nelle sezioni precedenti. Per il calcolo della potenza esercitata dagli operatori è stato ipotizzato un esercizio di potenza di media intensità pari a 75 W.
Si possono ora considerare anche le mietitrebbie di più moderna concezione. Le prime mietitrebbie moderne, ovvero dotate di motore a scoppio, prendono piede dagli anni '50. Secondo il Romanello [140] in Italia si è passati dalle 616 unità del 1955 alle 22˙572 unità del 1969. La mietitrebbiatrice del Romanello è dotata di battitore a spranghe, la soluzione più diffusa all'epoca a dispetto del battitore a tamburo (dati medi del periodo). Si parla quindi di mietitrebbiatrice "media", non riferita a un modello specifico. Per quanto riguarda l'altra macchina del periodo immediatamente successivo alla II guerra mondiale, il Carena riporta i dati di una Caterpillar [59]. Dagli autori si evince come il problema primario di queste macchine fosse legato ad imperfezioni concernenti l'avanzamento della paglia negli organi scuotipaglia, vincolato da valori di flusso che non potevano essere eccessivi per evitare inaccettabili perdite di granella. Carena sottolinea che diverse ricerche furono necessarie anche riguardo al gruppo battitore-griglia.
Le macchine successive sono di epoca moderna: i dati riferiti alle Claas non sono stati forniti dalle aziende ma sono frutto di uno studio comparato tra tre diverse mietitrebbie: la Claas Mega 208, la Claas Lexion 600 e la Claas Lexion 770. La Claas Lexion 600 non è stata considerata perché della stessa serie e tipologia della 770. La Claas Mega 208 lavora a flusso assiale, mentre la Claas 770 adotta una tecnica di trebbiatura tangenziale con doppio rotore assiale [154].
L'ultimo modello, la FOTMA, è stato scelto in quanto mietitrebbia moderna di "piccola" taglia, disponibile in commercio [157]. Questa macchina adotta la tecnologia di trebbiatura a flusso tangenziale con rotore assiale.
Nelle tabelle 9 e 10 saranno calcolate potenza e produttività, complessive e individuali, per quanto riguarda le mietitrebbie preindustriali. Questi dati saranno poi confrontati con quelli delle mietitrebbie industriali e moderne, facendo riferimento ai dati relativi al singolo individuo tabella 11.

METODO	TECNOLOGIA	EPOCA STORICA	SQUADRA		POTENZA COMPLESSIVA	PRODUTTIVITÀ COMPLESSIVA
Denominazione	**/**	**Anno di riferimento**	**# operatori**	**# cavalli**	**kW**	**ha h^{-1}**
Mietitrebbiatrice Preindustriale Moore	Moore's Combine	1850	9 - M	20	15,675	1
Mietitrebbiatrice Preindustriale Houser	Houser	1900	18 - M	40	31,35	1,5

Tabella 9 Squadre, Potenze e Produttività complessive associate ai metodi selezionati. Mietitrebbie Preindustriali

METODO	POTENZA INDIVIDUALE	PRODUTTIVITÀ INDIVIDUALE	OPERATORI NORMALIZZATI	PRODUTTIVITÀ SPECIFICA
Denominazione	**kW $uomo^{-1}$**	**ha man h^{-1}**	**# operatori**	**ha h^{-1} kW^{-1}**
Mietitrebbiatrice Preindustriale Moore	1,742	0,111	9	0,064
Mietitrebbiatrice Preindustriale Houser	1,742	0,083	18	0,048

Tabella 10 Potenze e produttività individuali e specifica, mietitrebbie

METODO	TECNOLOGIA	EPOCA STORICA	MOTORE PRIMO	POTENZA	PRODUTTIVITÀ	PRODUTTIVITÀ SPECIFICA
Denominazione	**/**	**Anno di riferimento**	**/**	**kW**	**ha h^{-1}**	**ha h^{-1} kW^{-1}**
MT Preindustriale Moore	Moore's Combine	1850	Human and Animal Work	1,742	0,111	0,064
MT Preindustriale Houser	Houser	1900	Human and Animal Work	1,742	0,083	0,048
MT Industriale Romanello	Romanello	1950	Combustion Engine	16,170	0,175	0,011
MT Industriale Caterpillar	Caterpillar	1950	Combustion Engine	34,900	1,460	0,042
MT Moderna media taglia CLAAS	Claas Mega 208	1993	Combustion Engine	172,725	1,500	0,009
MT Moderna media taglia FOTMA	FOTMA 4LZ-7B	2000	Combustion Engine	91,875	1,500	0,016
MT Moderna New Holland	New Holland CR 1090	2013	Combustion Engine	479,955	10,021	0,021
MT Moderna grande taglia CLAAS	Claas Lexion 770	2014	Combustion Engine	367,500	4,200	0,011

Tabella 11 Tabella riassuntiva mietitrebbie

È molto interessante andare a considerare il grafico che illustra come sia variata la potenza delle macchine con l'avanzare del tempo (figura 68). Si nota che fino agli anni '50 questa rimane piuttosto costante, per poi aumentare in modo praticamente esponenziale, cosa che giustifica le precedenti affermazioni: è stato necessario un adattamento tecnologico (flusso tangenziale piuttosto che assiale, riduzione area dei battitori) perché si potesse aumentare la produttività di queste macchine ai livelli odierni, a spese di un grosso aumento in termini di potenza.
Nel grafico successivo, riferito a potenza e produttività (figura 69, scala bigolaritmica), si nota come i modelli di prima generazione non disponessero di tecnologie efficaci per riuscire a ottimizzare il flusso di trebbiatura in funzione della velocità: il problema di queste macchine infatti non risiede nella velocità di avanzamento, ma nella coordinazione di flusso tra materia mietuta in ingresso al sistema trebbiante e capacità di trebbiatura: alte velocità comportano grossi problemi di controllo dei flussi; d'altro canto basse velocità vanno a incidere per definizione sulla produttività; a livello ideale infatti questa si calcola come [158]:

$$Prod = v * l_{barra}$$

In ultima analisi, quando si osserva il grafico relativo a produttività specifica e potenza (figura 70), si nota come la prima diminuisca costantemente all'aumentare dei kW assorbiti dalla macchina. Questo significa che nonostante l'impiego di tali tecnologie permetta un aumento di produttività, il prezzo da pagare è un aumento in termini di potenza necessaria maggiore rispetto al guadagno conseguito, coerentemente con gli altri casi analizzati in precedenza, nonostante la maggiore complessita in termini tecnologici.

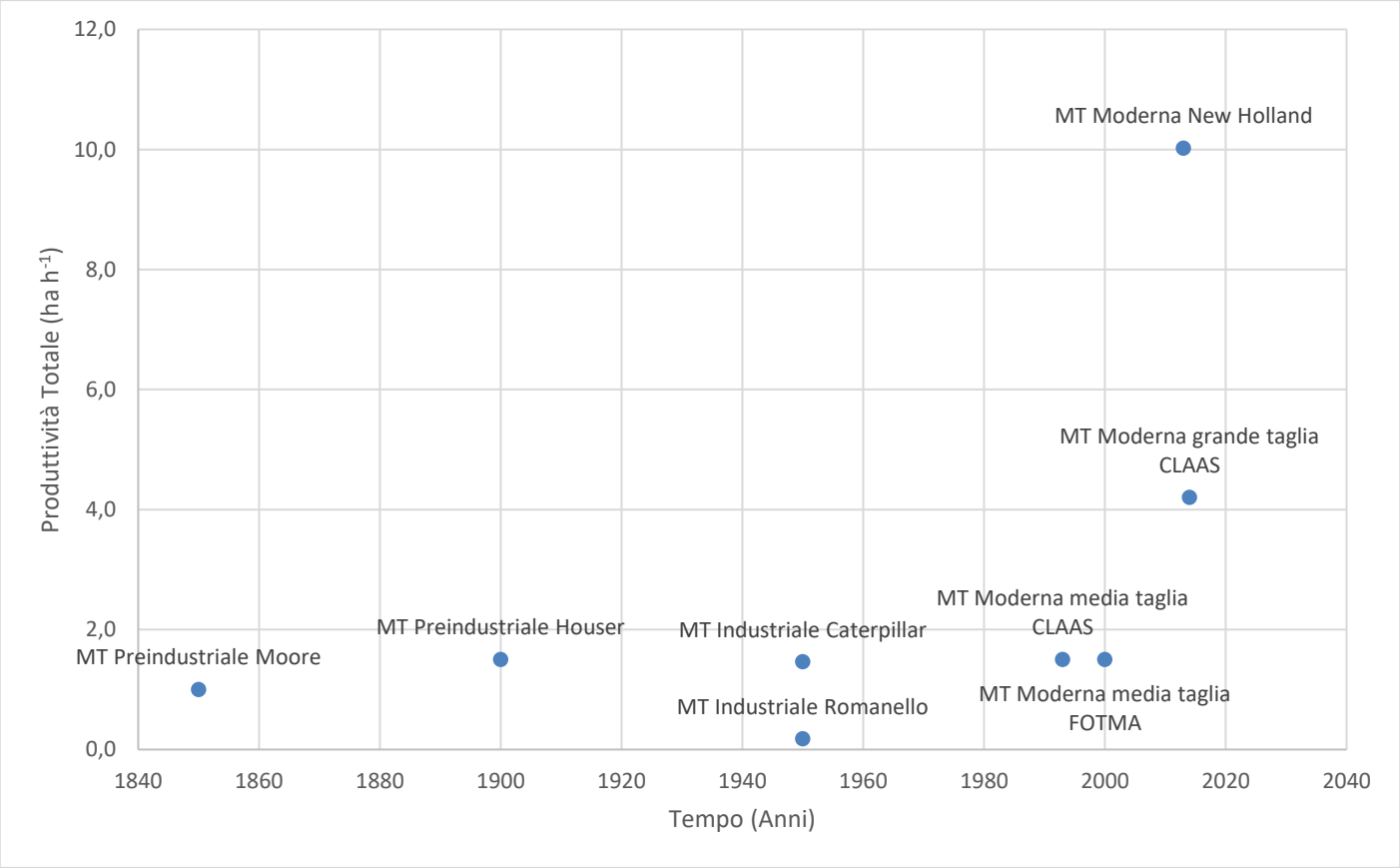


Figura 68 Potenza in funzione del tempo, mietitrebbie

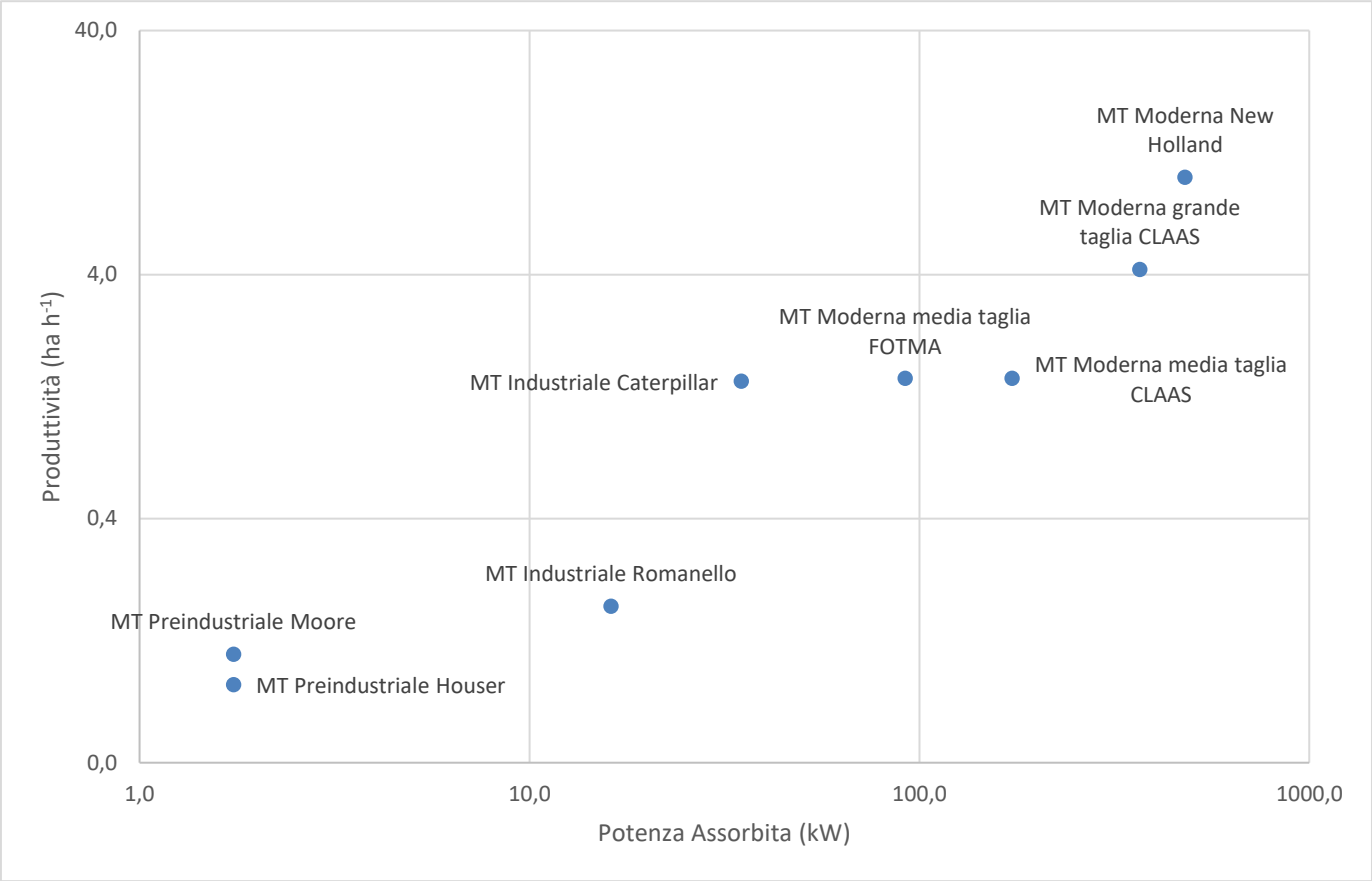


Figura 69 Produttività in funzione di potenza assorbita, scala bilogaritmica. Mietitrebbie

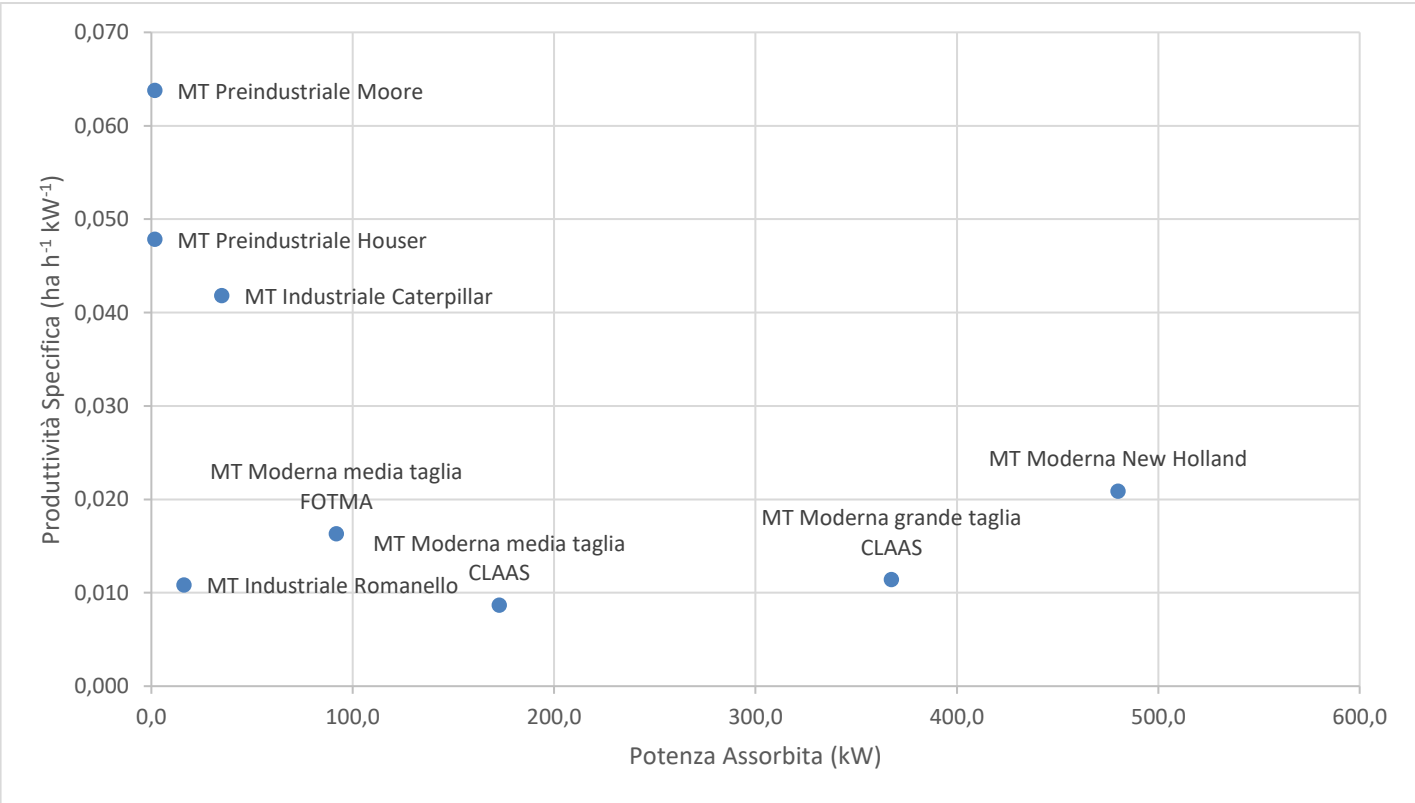


Figura 70 Produttività specifica in funzione della potenza. Mietitrebbie

4.5 L'analisi comparata

Al fine di rendere confrontabili tra loro i diversi metodi di coltivazione, sono stati accoppiati i vari metodi di mietitura e trebbiatura nel modo che più potesse rispettare le caratteristiche temporali, tecnologiche e di disponibilità energetica tra le tecniche di mietitura e quelle di coltivazione. In questo modo sarà possibile effettuare dei confronti tra le tecnologie più antiche e i metodi recenti in funzione di epoca storica considerata, tipo di motore primo, potenza impiegata nella lavorazione, produttività, efficienza. Una volta scelti i metodi con annesso periodo di riferimento, grazie ai dati sulla resa del grano disponibili in letteratura sarà possibile valutare gli "ettari equivalenti" in modo da unire le lavorazioni di trebbiatura e mietitura.

Il primo passo consiste nel valutare le rese per ettaro relative ai diversi periodi storici, così da poter rendere comparabili le fasi di mietitura e trebbiatura. Si è adottata una resa di 1350 kg ha^{-1} per il periodo che va dal 1800 al 1900, tipica degli Stati Uniti in epoca preindustriale [4]. Per i periodi successivi si è invece calcolata la resa come media europea decennio per decennio, adottando i valori mediati per la tecnologia considerata [38].
Si sono poi selezionati i metodi di mietitura e trebbiatura analizzati nei paragrafi 4.2 e 4.3 e accoppiati, definendoli in modo appropriato cercando di trovare congruenze storiche e di lavoro anche in termini di produttività. Si è infatti incontrata una criticità non aggirabile. Come detto, a fini di comparazione si è preso come riferimento la mietitura in quanto è questa l'operazione che a livello agricolo e stagionale ha la precedenza; quindi sono stati normalizzati i dati in termini di potenza e operatori, convertendo le produttività di trebbiatura da kg h^{-1} a ha h^{-1} e ipotizzando dei valori di resa della coltura cerealicola consoni.
Per consoni si intende valori ricavati in letteratura, dando rilevanza al periodo storico e la posizione geografica: in pratica rispetto al luogo di provenienza o operazione del mezzo citato nell'articolo. La criticità, valida in particolare per l'accoppiamento tra i mezzi a motore umano o animale, si rileva in quanto i dispositivi di trebbiatura associati a quelli di mietitura, una volta normalizzati, presentano valori spesso inferiori rispetto a quelli a cui è associata la fase di mietitura. Questa situazione, riflettendoci, è piuttosto logica: mentre la mietitura viene effettuata in un periodo di tempo limitato, la trebbiatura (fino a non molto tempo fa in Italia e in molti luoghi ancora oggi) veniva effettuata nel periodo invernale, così da lasciare il tempo alle cariossidi e le spighe di asciugare, e in più svolgere la lavorazione in un periodo dell'anno meno frenetico in termini di necessità agricole.
Si verificava quindi una "dissociazione" temporale tra le due fasi, che col tempo si è resa controproducente dal punto di vista produttivo: non è un caso che per gli accoppiamenti tra mietitura e trebbiatura moderni questa problematica sia molto meno condizionante. Si tocca l'apice con la mietitrebbia, dove le operazioni sono accoppiate in modo praticamente istantaneo e un efficace accoppiamento tra velocità in mietitura e capacità trebbiante è fondamentale, oltre a considerare che questo implica che la mietitrebbia stessa sia progettata per operare su campi con rese di un certo tipo. Si ricorda che una delle problematiche fondamentali legata alle prime mietitrebbie era appunto la difficoltà legata a una trebbiatura del grano appena raccolto spesso troppo umido.
Di fatto, le tecnologie ad azione umana e animale non sono state pensate per un'operazione combinata, o comunque per necessitare di una produttività simile, soprattutto quelle proprie del XIX secolo. Per fare un esempio, nell'accoppiamento tradizionale preindustriale (falce a culla e correggiato con pulitura a mano) perché la tecnica del correggiato (20 kg/h) si mantenga alla stessa produttività della falciatura a culla (0.27 ha/h) si calcola una resa di 74 kg di grano per ettaro (contro i 1350 degli Stati Uniti dell'epoca). Questo è il caso più assurdo, ma si capisce come sia poco sensato adottare una soluzione simile: essendo il problema non lineare, si dovrebbe calcolare la resa *ad hoc* atta a mantenere in equilibrio le produttività nelle due fasi; ci si troverebbe ad avere a che fare con "metodi colturali immaginari" che non sarebbero realizzabili e la trattazione stessa si porrebbe in un piano scarsa credibilità. Sono decisamente penalizzate anche le tecnologie moderne definite appropriate, mentre per quelle intermedie succede l'opposto.

D'altra parte adottare le rese appropriate porta a un'esuberanza di potenza associata alla trebbiatura: per mantenere adeguata la produttività rispetto alla mietitura adottando la resa tipica del periodo (1350 kg/ha) il rapporto trebbiatori:mietitori è superiore a 4:1. In termini storici analizzando le lavorazioni si nota come il rapporto fosse invece di 1:4 nella realtà. Questo significa che il ragionamento è corretto, ovvero la fase di mietitura è quella che veniva considerata maggiormente e godeva di una maggiore importanza in termini di impiego di forze. È inevitabile che nel momento in cui la si voglia accorpare in modo "istantaneo" per poter essere confrontata con macchine come le mietitrebbie progettate ad hoc per eseguire l'operazione in quel modo questo comporti uno svantaggio per i motori umani e animali con inevitabili peggioramenti dei valori relativi alla produttività specifica.
Mentre da un lato si dovrebbero utilizzare valori di resa non verosimili, dall'altro si confronterebbero tecnologie progettate per scopi *produttivi* (in termini orari e di produttività del lavoro) ben diversi. Un po' per onestà intellettuale, un po' perché i risultati come si potrà vedere nel corso dell'elaborato non perderanno in efficacia in termini di confronto al punto da inficiarne la qualità, è stato scelto di proseguire per la strada più vantaggiosa per le tecnologie recenti: in questo modo si manterrà una visione realistica della problematica, oltre a poter avere lo spunto per riflessioni e miglioramenti una volta analizzato con risultati alla mano, a partire da come si possa collegare l'influenza bioeconomica allo sviluppo delle tecnologie associate per migliorare la produttività del lavoro.

Si sono quindi definite diverse tecnologie, appartenenti a diverse epoche e con diversi motori primi: per quel che riguarda le realtà più antiche gli accoppiamenti sono stati abbastanza automatici, ricavando i metodi colturali chiamati ***Tradizionale Antico*** (mietitura a falcetto, trebbiatura a calpestio) e ***Tradizionale Preindustriale*** (mietitura con falce a culla, trebbiatura al correggiato).
Si considerano in seguito i metodi preindustriali tipici della seconda metà del XIX secolo, mantenendo una nomenclatura che richiama le scelte fatte nei paragrafi precedenti: quindi il ***Preindustriale 1850*** ("McCormick Reaper", "Groundhog Machine"), il ***Preindustriale 1870*** ("New Yorker Harvester", "Pitt's Thresher"), il ***Preindustriale 1890*** ("Appleby Twine Binder", "Pitt's Thresher"). La trebbiatrice di Hiriam & Pitt era in commercio già nel 1840, quindi è stata utilizzata per entrambi i metodi Preindustriali successivi al 1850. Sono stati mantenuti i tre metodi di mietitura in quanto indicativi dei progressivi miglioramenti tecnologici compiuti in questo periodo, fondamentali per le tecnologie che man mano si adattavo l'una con l'altra e ai motori primi, consentendo continui aumenti di produttività.
È importante notare come questi progressi in campo tecnologico siano indicativi del contesto americano, diffondendosi e adattandosi alla realtà europea solo in tempi successivi, in particolare nella prima metà del XX secolo.
In questa macrocategoria dei motori primi a sfruttamento di potenza umana o animale sono state considerate due soluzioni chiamate "appropriate", ovvero basate sull'utilizzo di macchine di moderna concezione ma senza l'utilizzo dei motori a scoppio. In questo senso si sono considerate due tecniche di mietitura: una manuale a spinta e quindi a bassa produttività (***Tecnologia appropriata piccola impresa***), l'altra, vista la mancanza di dati per quanto riguarda mietilegatrici trainate di moderna concezione, è stata accoppiata con l'"Appleby Twine Binder" (***Tecnologia appropriata media impresa)***; entrambe svolgono la trebbiatura con il meccanismo a pedali.
La scelta della seconda tecnologia appropriata è conservativa, in quanto in chiave moderna facilmente si potrebbero apportare modifiche tecnologiche al fine di aumentare le caratteristiche delle mietitrici trainate del 1900; d'altra parte in questo modo si rende possibile l'utilizzo di una metodologia moderna e appropriata che possa avere un confronto in termini di produttività almeno in termini di media impresa (Tabella 12).
Nel caso delle tecnologie relative ai paesi in via di sviluppo la resa è stata assunta come quella media dei paesi in via di sviluppo tra il 1960 e il 1980, ovvero 1050 kg/ha [38]. In questo modo è possibile dare una continuità ed effettuare un effettivo confronto tra queste tecniche e quelle di mietitrebbiatura. Per il calcolo delle potenze impiegate si è preso come riferimento la produttività delle tecniche di mietitura: a ognuna di queste è stata associata la produttività equivalente della tecnica di trebbiatura corrispondente, come già specificato.

Si passa quindi all'era industriale rappresentata dalle tecnologie tipiche degli anni '50: qui la valutazione si divide in due rami: uno tipico del percorso intrapreso dei paesi industrializzati e l'altro dei paesi in via di sviluppo. In questo periodo, coincidente con la diffusione dei motori a scoppio e l'adattamento degli stessi alle tecniche agricole in voga all'epoca, il progresso tecnologico (e quindi la meccanizzazione) non deve essere inteso tanto come evoluzione delle tecniche di mietitura e trebbiatura, ma più come un adattamento dei motori primi a trazione animale: le tecnologie rimangono concettualmente le stesse dell'epoca preindustriale, adattate alla nuova disponibilità energetica. Saranno queste le basi che permetteranno l'ulteriore progressione alle tecniche moderne, essendo le tecnologie (in termini di complessità tecnologica e densità di potenza) mature per una evoluzione e diffusione dei metodi combinati (mietitrebbie).
La classificazione effettuata quindi si divide nelle realtà industrializzate tipiche del dopoguerra: tecnologia ***Industriale piccola impresa*** (mietilegatrice semovente, trebbiatrice meccanica) e ***Industriale media impresa*** (mietilegatrice trainata, trebbiatrice meccanica) con l'intento di dare una classificazione qualitativa in termini di "dimensione aziendale" (tabella 13). Nei paesi in via di sviluppo invece si tratterà con tecnologie cosiddette intermedie (***Intermedio piccola impresa 1*** e ***2***): mietitura a spinta manuale o trazione animale con motore a scoppio per l'esecuzione della lavorazione; tali metodi sono stati accoppiati con trebbiatrici a pedali, in accordo con le disponibilità energetiche e tecnologiche vincolanti questi paesi nell'ottica di una non disponibilità a spingersi a un maggior livello di meccanizzazione.
Per quel che concerne il periodo moderno si accoppiano due mietilegatrici semoventi di concezione moderna con trebbiatrici meccaniche di sviluppo recente (***Moderno piccola Impresa 1*** e ***2***), caratterizzanti le lavorazioni per la piccola impresa di stampo moderno. Per quanto riguarda la media impresa (***Moderno media Impresa***), si è associato a una mietilegatrice trainata una trebbiatrice di maggiori dimensioni. Risulterà evidente quanto le produttività dei metodi separati in chiave moderna non possano competere con le tipiche delle mietitrebbie, a causa di limiti intrinseci rispetto all'operazione combinata.
In questo modo il confronto è possibile sia in termini di superficie che di massa di trebbiato, al pari delle mietitrebbie. Per queste macchine, quando non presente, la resa è stata calcolata tramite dati FAO con le stesse ipotesi effettuate per il caso precedente. Va sottolineato che per quanto riguarda la New Holland CR 10 90 la resa dichiarata è di molto superiore alle altre (più del doppio). Questo è tipico della metodologia agricola americana.
La nomenclatura è stata modificata anche in questo caso nonostante in questi mezzi non siano stati effettuati altri calcoli, associando alla tecnologia (MT – MietiTrebbia) una taglia (media o grande impresa) e il modello o nome di riconoscimento della macchina – tabella 15).

Ricapitolando, in tabella 12 saranno elencati gli accoppiamenti relativi alle tecnologie che adottano motori primi animali o umani, specificando le tecnologie e i parametri complessivi. In tabella 13 saranno fatte delle valutazioni invece in termini individuali, riportando i valori al singolo operatore e ponendo l'accento sulle produttività in termini sia di superficie che di massa. In tabella 14 saranno specificati gli accoppiamenti mietitura – trebbiatura riguardando le tecniche industriali e moderne con motore primo a combustione interna.
In tabella 15 saranno riassunte e confrontate in termini di produttività e potenza tutte le metodologie analizzate.

METODO	TECNOLOGIA		EPOCA STORICA	MOTORE PRIMO			RESA	POTENZA COMPLESSIVA	PROD. COMPLESSIVA	PROD. SPECIFICA
Denominazione	Mietitura	Trebbiatura	Anno	Tipo	# operatori	# animali	kg ha^{-1}	kW	ha h^{-1}	ha h^{-1} kW^{-1}
Tradizionale antico	Falcetto	Calpestio + Setaccio	1800	Animal and human power	12,281	3	1350	7,641	0,090	0,012
Tradizionale preindustriale	Falce a culla	Correggiato + Setaccio	1800	Human Power	35,400	/	1350	4,177	0,270	0,065
Preindustriale 1850	McCromick Reaper	Groundhog + Setaccio	1830	Animal and human power	45,298	6	1350	19,376	0,445	0,023
Preindustriale 1870	New Yorker	Pitt's Thresher	1840	Animal and human power	14,071	4	1350	7,248	0,607	0,084
Preindustriale 1890	Appleby Twine Binder	Pitt's Thresher	1840	Animal and human power	8,071	4	1350	6,648	0,607	0,091
Intermedio piccola impresa 1	Mietilegatrice manuale motore a scoppio	POP Thresher + POP Cleaner	1950	Human Power + Combustion Engine	4,400	/	1050	1,598	0,200	0,125
Intermedio piccola impresa 2	Mietilegatrice trainata motore a scoppio	POP Thresher + POP Cleaner	1990	Animal and Human power + Combustion Engine	5,590	1	1050	4,858	0,270	0,056
Tecnologia Appropriata piccola taglia	Mietilegatrice manuale	POP Thresher + POP Cleaner	2013	Human Power	4,471	/	3897,371	0,503	0,055	0,109
Tecnologia appropriata media taglia	Appleby Twine Binder	POP Thresher + POP Cleaner	2013	Animal and human power	40,305	2	3897,371	5,752	0,607	0,106

Tabella 12 Accoppiamento mietitura – trebbiatura per le tecnnologie a motore umano e animale

METODO	POTENZA INDIVIDUALE	PROD. INDIVIDUALE	LAVORO SPECIFICO		MIETITURA				TREBBIATURA			
Denominazione	**kW uomo^{-1}**	**ha man h^{-1}**	**man h ha^{-1}**	**man h t^{-1}**	**#Uomini**	**%**	**Potenza (kW)**	**%**	**#Uomini**	**%**	**Potenza (kW)**	**%**
Tradizionale antico	0,622	0,007	136,458	101,08	4,125	33,59	0,50	6,58	8,16	66,41	7,14	93,42
Tradizionale preindustriale	0,118	0,008	131,111	97,119	6,375	18,01	0,73	17,42	29,03	81,99	3,45	82,58
Preindustriale 1850	0,428	0,010	101,755	75,374	9	19,87	4,43	12,08	36,30	80,13	17,04	87,29
Preindustriale 1870	0,515	0,043	23,178	17,169	8	56,86	3,99	30,90	6,07	43,14	5,01	69,10
Preindustriale 1890	0,824	0,075	13,295	9,848	2	24,78	1,64	24,67	6,07	75,22	5,01	75,33
Intermedio piccola impresa 1	0,363	0,045	22,000	20,952	1	22,73	1,23	77,15	3,40	77,27	0,37	22,85
Intermedio piccola impresa 2	0,869	0,048	20,704	19,718	1	17,89	4,37	89,86	4,59	82,11	0,49	10,14
Tecnologia Appropriata piccola taglia	0,112	0,012	81,282	20,856	1	22,37	0,13	25,87	3,47	77,63	0,37	74,13
Tecnologia appropriata media taglia	0,142	0,015	66,395	17,036	2	4,96	1,64	28,51	38,31	95,04	4,11	71,49

Tabella 13 Accoppiamento mietitura – trebbiatura: normalizzazioni

METODO	TECNOLOGIA		EPOCA	MOTORE PRIMO		RESA	POT TOT	PROD TOT	PROD SPEC	MIETITURA		TREBBIATURA	
Denominazione	**Mietitura**	**Trebbiatura**	**Anno**	**Mietitura**	**Trebbiatura**	**kg ha^{-1}**	**kW**	**ha h^{-1}**	**ha h^{-1} kW^{-1}**	**kW**	**%**	**kW**	**%**
Industriale media impresa	Mietilegatrice trainata ROMANELLO	LANZ, Battitore a spranghe, scuotipaglia ad elementi (PDP)	1950	PDP, Trattore	Combustion Engine (PDP)	1405,8	21,7	0,53	0,02	16,5	75,9	5,2	24,1
Industriale piccola impresa	Mietilegatrice semovente ROMANELLO	STEFANELLI, Trebbiatrice "Media", 1948	1950	Combustion Engine	Combustion Engine	1405,8	16,4	0,47	0,03	6,9	42,5	9,4	57,4
Moderno Piccola Impresa 1	Mietilegatrice semovente AMS-RB 1000	PLOT 2735 CICORIA (Trasportabile)	2000	Combustion Engine	Combustion Engine	3549,6	30,9	0,19	0,01	7,3	23,7	23,6	76,2
Moderno piccola impresa 2	Mietilegatrice semovente BCS	ALVAN BLANCHE, Mobile Crop Tresher	2000	Combustion Engine	Combustion Engine/PDP	3549,6	15,9	0,40	0,03	7,5	47,0	8,4	52,9
Moderno media impresa	Mietilegatrice trainata ALVAN BLANCHE	ATX 2000 PTO (PDP)	2000	PDP, Trattore	Combustion Engine/ PDP	3549,6	58,5	0,80	0,01	22,0	37,6	36,5	62,3

Tabella 14 Accoppiamento mietitura – trebbiatura per i metodi con motore primo a combustione interna

METODO	EPOCA STORICA	Resa	POTENZA	PRODUTTIVITÀ	PRODUTTIVITÀ SPECIFICA	PRODUTTIVITÀ DEL LAVORO	
Denominazione	Anno	kg ha^{-1}	kW	ha h^{-1}	ha h^{-1} kW^{-1}	man h ha^{-1}	man h t^{-1}
Tradizionale antico	1800	1350	0,622	0,007	0,012	136,458	101,080
Tradizionale preindustriale	1800	1350	0,118	0,008	0,065	131,111	97,119
Preindustriale 1850	1830	1350	0,428	0,010	0,023	101,755	75,374
Preindustriale 1870	1840	1350	0,515	0,043	0,084	23,178	17,169
Preindustriale 1890	1840	1350	0,824	0,075	0,091	13,295	9,848
MT Preindustriale Moore	1850	1250,00	1,742	0,111	0,064	9,000	7,200
MT Preindustriale Houser	1900	1250,00	1,742	0,083	0,048	12,000	9,600
MT Industriale Romanello	1950	1405,83	16,170	0,175	0,011	5,714	4,065
MT Industriale Caterpillar	1950	1405,83	34,900	1,460	0,042	0,685	0,487
Industriale media impresa	1950	1405,83	21,793	0,525	0,024	1,905	1,355
Industriale piccola impresa	1950	1405,83	16,416	0,473	0,029	2,116	1,505
Intermedio piccola impresa 1	1950	1050	0,363	0,045	0,125	22,000	20,952
Intermedio piccola impresa 2	1990	1050	0,869	0,048	0,056	20,704	19,718
MT Moderna media taglia CLAAS	1993	3549,60	172,725	1,500	0,009	0,667	0,188
MT Moderna media taglia FOTMA	2000	3549,60	91,875	1,500	0,016	0,667	0,188
Moderno Piccola Impresa 1	2000	3549,60	30,955	0,190	0,006	5,263	1,483
Moderno piccola impresa 2	2000	3549,60	15,944	0,405	0,025	2,471	0,696
Moderno media impresa	2000	3549,60	58,575	0,800	0,014	1,250	0,352
MT Moderna New Holland	2013	9950,00	479,955	10,021	0,021	0,100	0,010
Tecnologia Appropriata piccola taglia	2013	3897,371	0,112	0,012	0,109	81,282	20,856
Tecnologia appropriata media taglia	2013	3897,371	0,143	0,015	0,106	66,395	17,036
MT Moderna grande taglia CLAAS	2014	3549,60	367,500	4,200	0,011	0,238	0,067

Tabella 15 Definizione metodi: Potenze e produttività associate

Si va ora a valutare graficamente questi risultati; le analisi vengono effettuate e operando una suddivisione in quattro macro categorie. Le *tecnologie a motore animale e/o umano*, dove la potenza è intesa in senso non complessivo dell'operazione ma al singolo individuo o operatore; le *tecnologie intermedie*, a spinta/trazione con motore umano o animale e operazione con motore a combustione interna di piccola taglia; le macchine *semoventi e trainate*, tipiche delle realtà industriali e moderne dotate di motore a scoppio e tipiche di imprese piccole e medie; infine le *Mietitrebbie con motore a combustione interna.*

Il primo grafico da analizzare è relativo all'evoluzione della potenza nel tempo, figura 71, suddiviso per motori primi. È stata adottata una scala logaritmica in base 10 per quanto riguarda l'asse relativo alle potenze.
Si nota come ci sia una netta suddivisone in termini di disponibilità di potenza tra motore umano, animale e a combustione interna; infatti si nota che il motore umano/animale rende disponibili potenze che rimangono sempre inferiori ai 2 kW. Qui si incontrano i problemi relativi a un meccanismo che si può chiamare "saturazione tecnologica", ovvero il limite incontrato dalla tecnologia non tanto fisico quanto pratico: infatti per raggiungere i 40 kW complessivi che corrispondono alla House, la mietitrebbia preindustriale necessitante di 40 cavalli per poter funzionare. È ovvio come non si potesse spingere oltre un tale limite intrinseco al motore primo in termini di "densità di potenza" o "disponibilità di potenza" (intesa come kW di cui può disporre il singolo contadino).
Soffermandosi sui sistemi a combustione, come il motore animale ha permesso lo sfruttamento di potenze maggiori, allo stesso modo il motore a combustione interna (dopo il motore a vapore, che non si accordava alle lavorazioni per problemi tecnologici) permette un salto di un altro ordine di grandezza, sviluppando macchine trainate con trattrice, col limite sui 60 kW di potenza assorbita, un ordine di grandezza superiore. Un altro ordine di grandezza è necessario per giungere alle mietitrebbie odierne (400 kW).
Ciò su cui va posto l'accento è il collegamento tra le potenze associate alle realtà industrializzate, nella quale il processo di crescita tecnologica non si è mai arrestato, e quelle invece delle realtà non sviluppate che si arrestano a sistemi ibridi che dispongono di una potenza molto inferiore.
È inevitabile collegare un tale sviluppo esponenziale in termini di potenza con le disponibilità energetiche dei paesi che hanno potuto permettersi lo studio e l'adozione di tecnologie in continua evoluzione. Gli Stati Uniti nel 1800 consumavano circa 10 MTOE, nel 1900 queste salgono a 240 MTOE per arrivare alle 2.5 GTOE nel 2015 quindi approssimativamente di un ordine di grandezza "per secolo" [159].
Non si può certamente affermare con assolutismo che ci sia un collegamento diretto tra questi dati, ma si può affermare con sicurezza che la crescita dell'uno inevitabilmente condizioni l'altro. Queste considerazioni possono essere confermate e rafforzate dai ragionamenti fatti nel corso dell'elaborato, relativi agli squilibri tra paesi industrializzati e non, collegati al consumo energetico in campo agricolo, il parco macchine disponibile, il Prodotto Interno Lordo.
Quello che è interessante indagare, ad ogni modo, non è tanto la differenza tra i paesi più o meno sviluppati, quanto il legame tra l'aumento di potenza atto all'esercizio di una certa attività agricola in funzione di una corrispondente disponibilità energetica ed eventualmente di potenza del motore primo.

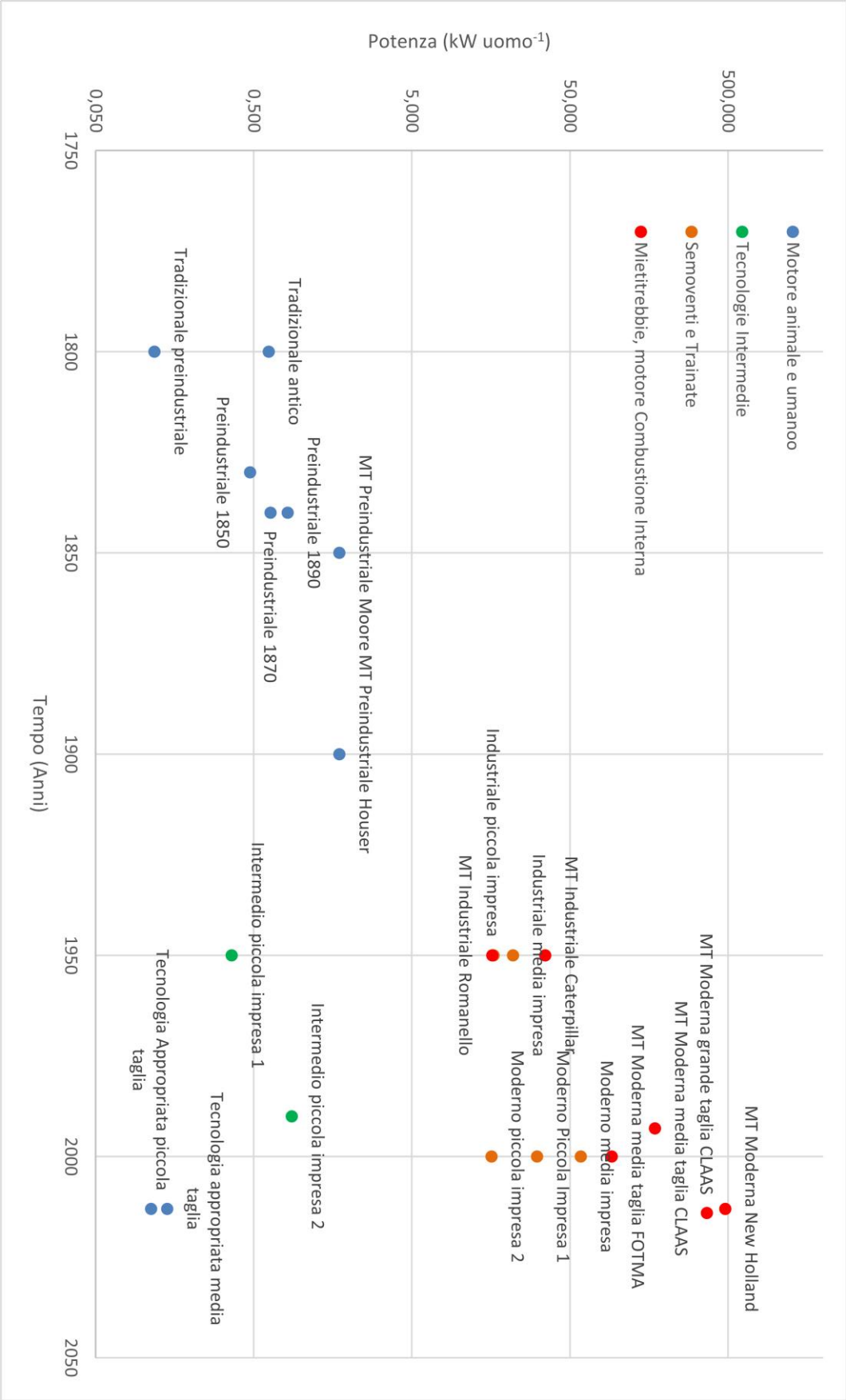


Figura 71 Evoluzione della potenza utilizzata per la lavorazione del grano nel tempo, scala semilogaritmica

Diviene interessante andare a valutare il grafico relativo a potenza assorbita e produttività (ha h^{-1} – figura 72). È immediatamente evidente che anche in questo caso, come nei grafici precedentemente analizzati per mietitura, trebbiatura e operazione combinata, l'aumento di potenza sia accompagnato a un aumento di produttività. A parte la distinzione tra mietitrebbie e macchine a combustione trainate o semoventi questo grafico vede molte similitudini col precedente.
Analizzando i dati con maggiore precisione si nota come le tecnologie relative a un'esecuzione del processo separatamente non superino il valore di 0.12 ettari per ora, quasi il grafico sia diviso in due quadranti.
Allo stesso modo per superare il valore dell'ettaro per ora si dovrà aspettare l'avvento delle mietitrebbie.
Selezionando le tecnologie mature in termini di motore primo si può fare un'analisi interessante, confrontando il salto di potenza necessario per usufruire dell'aumento di produttività messo a disposizione dall'evoluzione fino a maturazione della tecnologia, quindi lo "stato dell'arte" della tecnologia rispetto al motore primo; in questi termini si considera il passaggio dal metodo tradizionale preindustriale con falce a culla e correggiato (considerato come stato dell'arte del motore umano) allo stato dell'arte per quanto riguarda la trazione animale ("Appleby Twine Binder" e trebbiatura meccanica), quindi alla mietitrebbia moderna New Holland caratteristica del motore a combustione interna.
Si dovesse tracciare una curva che unisce questi punti rappresentanti la massima espressione tecnologica delle diverse metodologie si scopre che il coefficiente angolare (rappresentato dalla derivata della produttività rispetto alla potenza) nel primo "salto tecnologico" è pari 0.1, mentre nel secondo caso è di circa 0.02.Nel primo caso infatti la produttività aumenta di 10 volte (da 0.118 a 0.821 ha h^{-1}) mentre la potenza solo di 7 volte (da 0.008 a 0.075 kW), nel secondo caso la produttività aumenta di un fattore 133 (da 0.075 a 10 ha h^{-1}) ma a fronte di un fattore 585 relativo alla potenza (da 0.821 a 480 kW).
Si nota anche come le tecnologie appropriate, sebbene non permettano un'alta produttività, rappresentino le soluzioni più convenienti tra motori primi confrontabili: adottando infatti le tecniche manuali in chiave moderna si riesce a raggiungere una maggiore produttività a fronte di una *diminuzione* di potenza assorbita, cosa non verificata sui motori a scoppio.
L'attenzione va focalizzata nella valutazione del parametro da massimizzare: nel caso in cui questo sia rappresentato dalla produttività (in termini di pressione bioeconomica), la direzione intrapresa dalle tecniche agricole sviluppate tramite una meccanizzazione intesa come figlia della rivoluzione verde e il miracolo economico, è sicuramente la più rappresentativa (in quanto massimizza la produttività del lavoro).

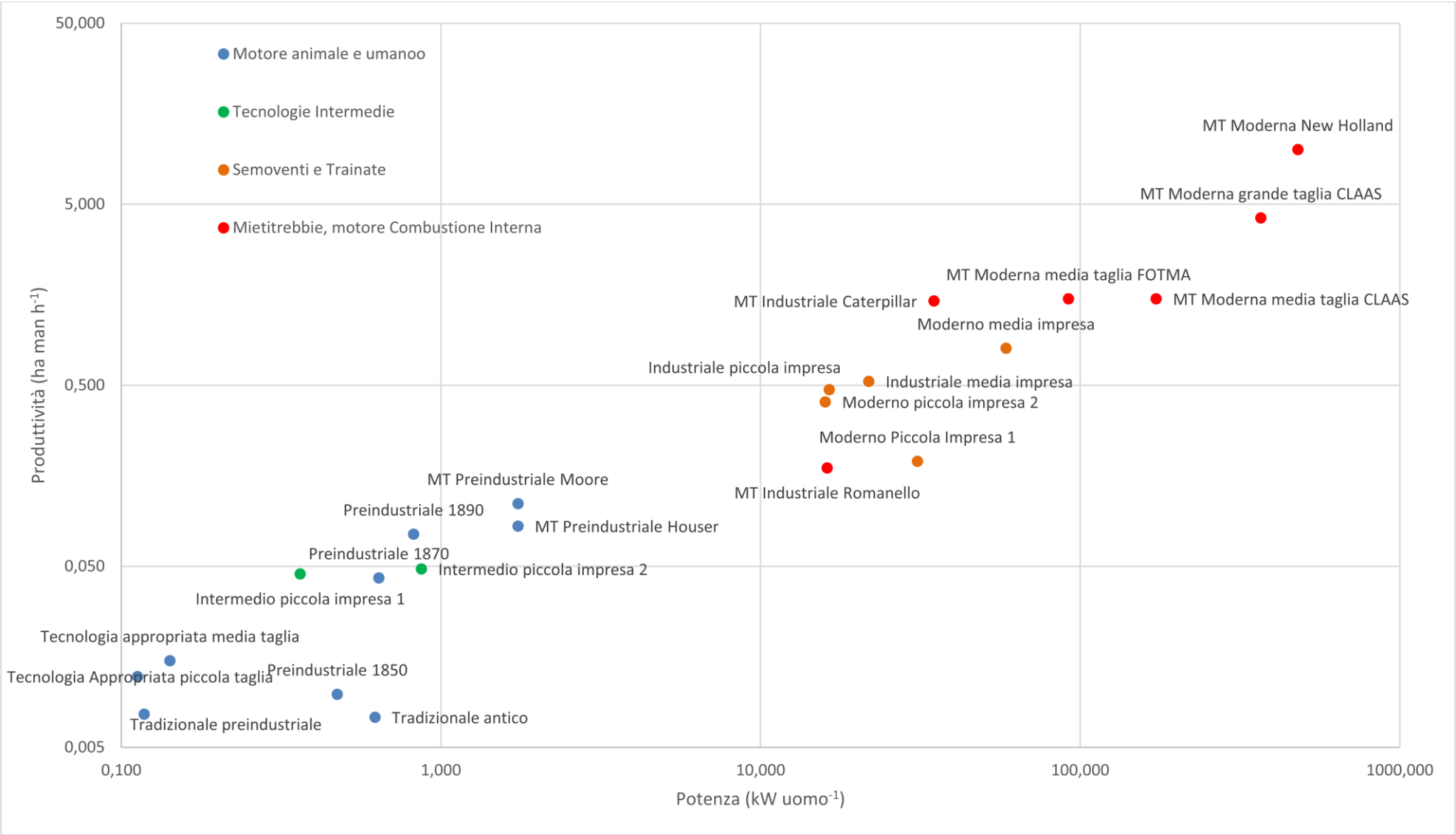


Figura 72 Potenza assorbita e produttività per livello di meccanizzazione nella lavorazione del grano. Scala bilogaritmica

Come si può notare in figura 73, dove si ha considerato il tempo necessario al singolo individuo per lavorare in termini di mietitura e trebbiatura un ettaro di campo, gli ordini di grandezza sono impressionanti. Si passa dalle quasi 140 ore necessarie per il metodo tradizionale antico ai 6 minuti (0.1 ore) della mietitrebbia New Holland, 1˙400 volte di meno! Questo è reso possibile da un aumento in termini di potenza con un passaggio da 0.1 a 480 kW, ovvero 4800 volte di più. L'analisi rientra pienamente nel concetto adottato di produttività del lavoro, rispondendo alle analisi già effettuate da Giampietro in modo positivo e confermando le ipotesi.
Con un discorso analogo al precedente, per una diminuzione in termini di tempo di 10 volte (da 130 ore a 13) dalla tecnologia a mano con falce a culla all'Appleby Twine Binder la potenza assorbita aumenta di 7 volte (da 0.12 a 0.8 kW). Nel passaggio successivo alla mietitrebbia il tempo diminuisce di un fattore 130 (da 13 a 0.1 ore) contro un aumento di potenza di quasi 600 volte (da 0.8 a 480 kW). Indubbiamente la produttività è aumentata a livelli spaventosi per il singolo operatore, in termini di tempo non può essere confrontata una mietitrebbia con i motori animali o umani: il motore a scoppio fornisce una marcia in più, senza alcun dubbio. Ciò che è meno ovvio è come mentre per il passaggio dal motore animale il bilancio tra diminuzione in termini di tempo e aumento di potenza è positivo, dal motore animale ai motori a scoppio non si può dire lo stesso, come per le considerazioni fatte precedentemente per quanto riguadava produttività e potenza: anche in questo caso il grafico sembra suddiviso in due quadranti ben distinti.
Una simile conclusione sia fatta in termini di tecnologie mature, per quanto riguarda i differenti motori primi: il salto tecnologico non è infatti dovuto alla maggiore densità potenza disponibile in maniera diretta; un aumento di densità di potenza ha permesso una maggiore automatizzazione e uno sviluppo ulteriore necessario per effettuare le operazioni combinate con velocità della macchina superiori a quelle raggiungibili sia coi mezzi a trazione animale, che coi semoventi o trainati da trattrice. Questa possibilità è stata realizzataa solo con l'invenzione di una macchina ad hoc che potese svolgere tutte le operazioni in modo praticamente autonomo. Infatti i "salti" tecnologici sono di fatto il passaggio dalla mietitura manuale alla barra falciante, dalla legatura manuale a quella automatica, il passaggio da operazioni separate a combinate. Ognuna di queste evoluzioni è caratterizzata da un passaggio di motori primi: da umano ad animale, da animale a motori a scoppio: in questo si intravede in modo chiaro una dicotomia tra motori primi (e quindi densità di potenza disponibili) e tecnologie adattate ad essi.
Ciò che è interessante notare è che in scala non logaritmica il grafico assumerebbe un'evidente andamento a iperbole, significativo di quanto il parametro di produttività del lavoro a livello tecnologico sia massimizzato a discapito di qualsiasi altro, con tutte le implicazioni dovute esposte nel capitolo 3.

Analizzando il grafico in figura 74 si nota immediatamente come gli andamenti siano invertiti rispetto ai precedenti: questo significa che all'aumentare della potenza impiegata la superficie lavorata per singolo kW diminuisce a parità di tempo. Si possono identificare dei veri e propri "intervalli di tecnologie", con dei limiti superiori netti. Le tecnologie che utilizzano il lavoro umano e animale sono quelle che detengono il primato, seguite da quelle intermedie. Per quel che riguarda le macchine a combustione interna queste non superano il valore di 0.04, con una media molto più bassa che si attesta a circa la metà. Le tecnologie appropriate invece sono prime in assoluto staccando le altre, assieme alla tecnologia intermedia a spinta manuale: in particolare per quella che concerne la trazione animale in fase di mietitura sarebbe interessante disporre di dati riferentesi a tecnologie a trazione animale moderni, che vedrebbero migliorare ulteriormente la prestazione in termini di efficienza, piuttosto dell'utilizzo dell'"Appleby Twine Binder" risalente agli ultimi anni dell'800.
In termini di tecnologia va detto che contano molto le normalizzazioni fatte rispetto ai dati di produttività: i dati delle tecnologie intermedie lavorano su produttività molto inferiori (4 volte di meno rispetto a quelle adottate per le tecnologie appropriate): questo comporta un minor lavoro in fase di trebbiatura a parità di metodo, entrambi adottando la trebbiatura a pedali. Confrontando infatti le produttività specifiche solo per la fase di miettura mentre la mietilegatrice automatica presenta un valore di 0.423 ha h^{-1} kW^{-1}, la tecnologia intermedia solo 0.162.
È evidente come l'attuale modello agricolo adottato nelle società spinga verso una massimizzazione della produttività del lavoro e quindi dei profitti senza badare troppo ad altre variabili; ciò che non è altrettanto chiaro è a chi serva questa produttività e se questo sia davvero l'unico modo per poter soddisfare i fabbisogni alimentari di tutti.

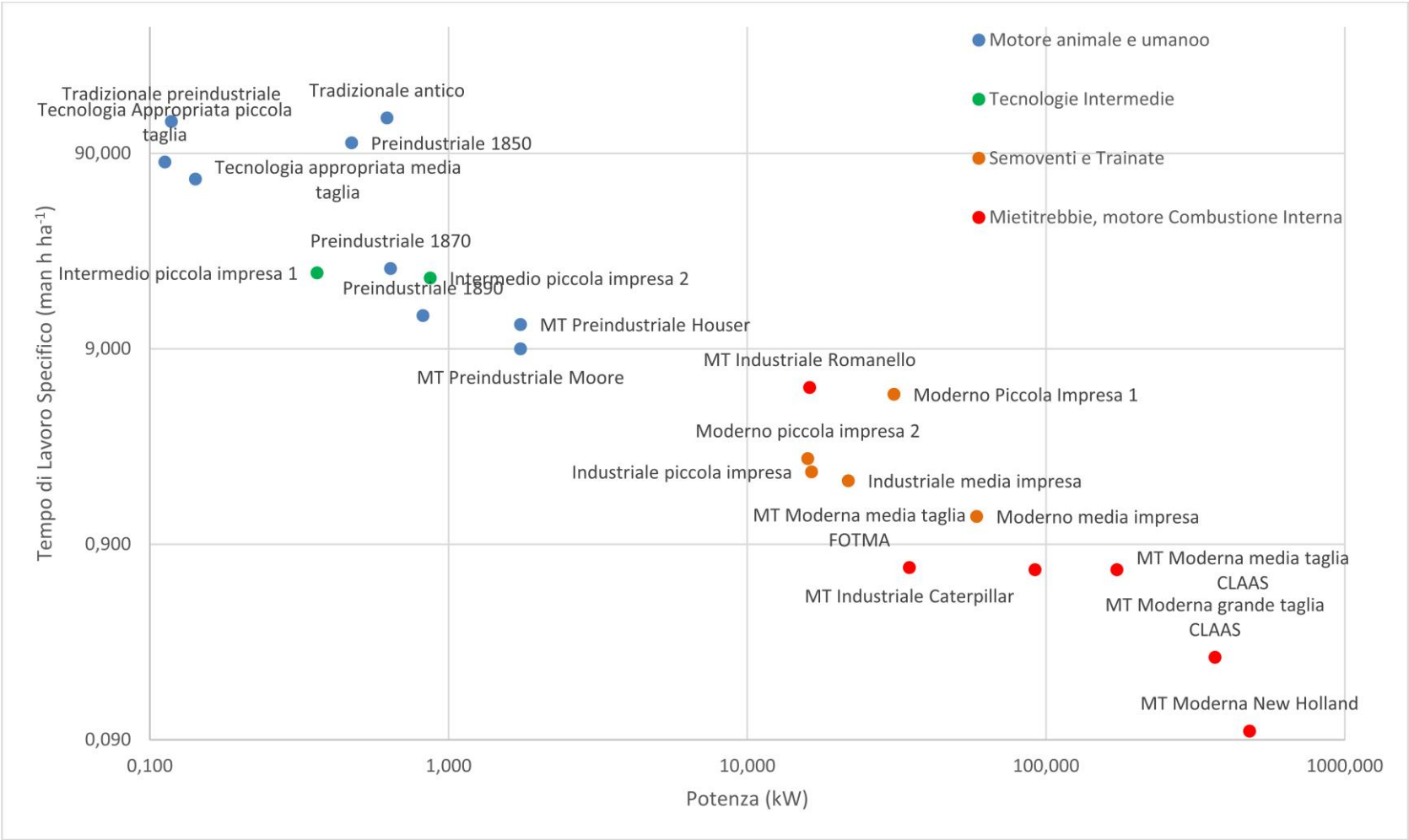


Figura 73 Tempo di lavoro necessario al singolo individuo per lavorare un ettaro di coltura nelle fasi di mietitura e trebbiatura. Scala bilogaritmica

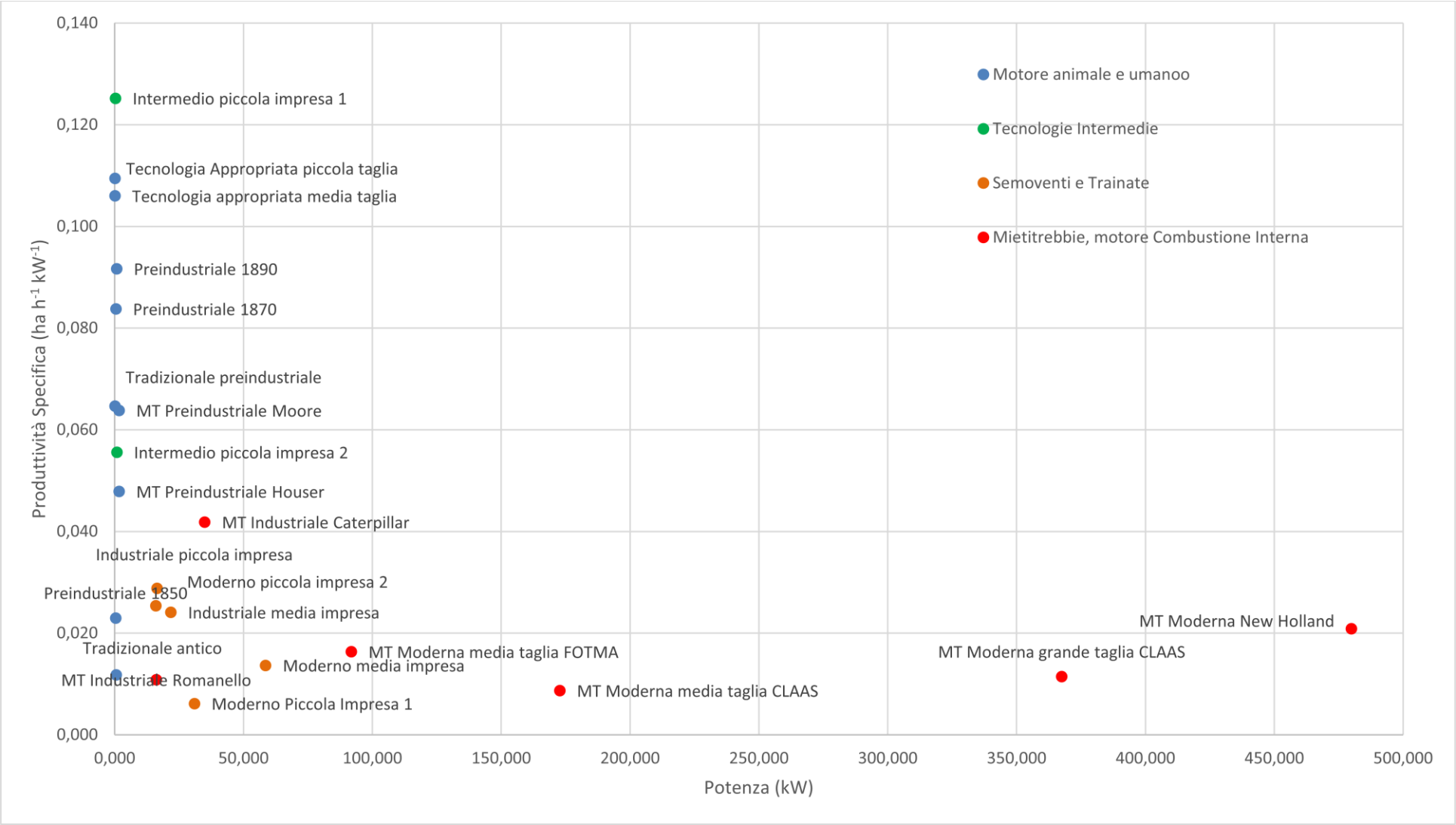


Figura 74 Produttività specifica in funzione della potenza. Lavorazione del grano

5. IL DIROMPIMENTO DEL TERRENO

5.1 Breve storia dell'Aratura

L'aratro è uno dei primi strumenti esosomatici complessi usati in campo agricolo; etimologicamente sembra che i termini più diffusi nel mondo per riferirsi all'aratro (il tedesco *pfug*, l'inglese *plough*, l'inglese-americano *plow*, il russo *plug*) siano tutti derivati dal retico-trentino *pleu-plou* indicante l'aratro a carrello [160].
Alla nascita dell'agricoltura, che come visto si colloca a circa 10˙500 anni fa, corre qualche migliaio di anni prima della comparsa dell'aratro, i cui primi ritrovamenti in Mesopotamia si aggirano attorno ai 6˙000 anni fa. Nel lasso temporale che intercorre fino alla comparsa di questo strumento, i primi contadini si trovavano a disporre unicamente di sé stessi come motore primo. Riguardo il dirompimento del terreno, i primi strumenti furono forme primitive di zappa o vanga, strumenti assolcatori o addirittura in tempi ancora precedenti un semplice bastone da scavo (figura 75 d). Con il primo passo evolutivo in termini di motore primo, quando l'uomo ha cominciato ad utilizzare la forza animale, è sorta la possibilità di creare uno strumento più efficace ma anche più pesante, che potesse sfruttare questa nuova disponibilità in termini di potenza. L'aratro nacque in Mesopotamia, nella zona della famosa "Mezzaluna Fertile", in quanto lì in quell'epoca storica le condizioni erano favorevoli al suo impiego: densità di popolazione, clima adatto, uno sviluppato allevamento di bovini. Si pensa addirittura sia prevalentemente grazie all'aratro che queste popolazioni riuscirono a disporre di una produzione agricola tale da permettersi le eccedenze necessarie allo sviluppo delle prime città e quindi le prime strutture sociali complesse.
Per le popolazioni antiche qualsiasi attività o strumento vedeva un collegamento col misticismo e la spiritualità: l'aratura era inevitabilmente simboleggiata da una fecondazione della Terra, vista come divinità femminile in numerose culture antiche. Per le popolazioni mesopotamiche, luogo d'origine dello strumento, si svolgevano numerosi riti riguardanti l'aratura; i buoi, dal canto loro, erano considerati sacri per le corna a forma di mezzaluna, assimilate alla luna crescente (astro della fecondità) e in quanto procreati da una mucca, il cui latte si credeva fosse bevanda degli dei. L'utilizzo dei buoi come accoppiamento allo strumento di aratura fu un passo breve, tanto che era usanza privarli dei genitali così da diventare portatori dell'organo divino che feconda la Terra [160].

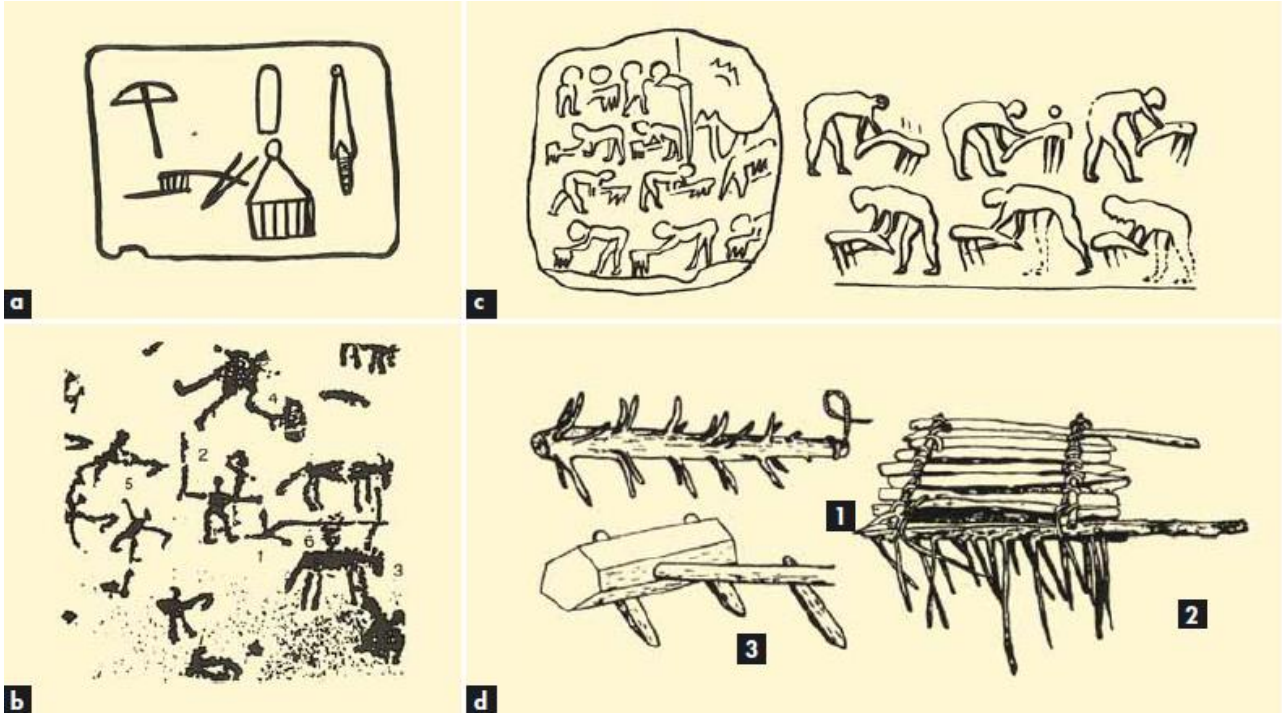


Figura 75 a) Ideogramma di aratro in tavoletta sumerica, 3500 a. C.; b) Scena di aratura del VI secolo a.C. incisa su roccia in Valcamonica; c) Scena di rastratura rinvenuta nel periodo Uruk (IV millennio a.C.) nell'utilizzo del rastro a trazione; d) Raffigurazioni grafiche di oggetti arcaici, i primi due rastri, il terzo un rastro-zappa [160]

La sua importanza è riflessa nei ritrovamenti frequenti rispetto a riferimenti nelle scritture delle civiltà antiche, dall'alfabeto cuneiforme sumero ai geroglifici egiziani. Nel bresciano, in un complesso di incisioni rupestri della Valcamonica sono raffigurati 44 aratri, dall'età del rame a quella del ferro (2500 - VI secolo a.C.); altre rappresentazioni si trovano anche a Monte Bego nelle alpi Marittime e in altre zone della Scandinavia (figura 75 b).
I primi aratri erano molto semplici: non più di un asse di legno con un bastone da scavo al fondo (*digging stick* – figura 76*)*, poi sostituito con altri materiali principalmente metallici; in Occidente questi si sono evoluti principalmente con greci e romani. Nonostante ciò, i primi a introdurre l'utilizzo di materiali metallici per quel che riguarda il *vomere* furono i cinesi prima del I secolo a.C. (figura 77 a - [4]).
Lo scopo dell'aratro è quello di mantenere nello strato attivo del terreno la struttura e le proprietà fisico-meccaniche atte ad assicurare le migliori condizioni della coltivazione [153], in stretta connessione con la tipologia colturale da adottare. Ad oggi, come si vedrà in seguito, la tendenza va verso la minimizzazione nella profondità di lavorazione, diminuendo i consumi in modo considerevole da un punto di vista energetico oltre ai danni dovuti all'erosione del suolo.
I primi modelli di aratro erano direttamente attaccati agli animali, senza disporre di ruote. I primi aratri in ferro appaiono in Europa con l'Impero Romano circa 2000 anni fa, ma si dovrà ancora attenedere per l'introduzione del versoio. Questi aratri erano più pesanti e venivano spinti da squadre dai due agli otto buoi [161].
Nel periodo medievale i pesanti aratri europei disponevano ci un *coltro*, il quale ha la funzione di tagliare verticalmente la fetta di terreno prima del passaggio del vomere. Furono apportate diverse modifiche in particolare ai metodi di aggiogamento, le quali consentirono di migliorare in modo sostanziale lo sfruttamento della trazione animale: col tempo si passò dal semplice giogo dorsale, che provocava non pochi problemi agli animali (la rigidezza e il posizionamento non consentivano un'ottimale distribuzione degli sforzi), a un'imbracatura che coinvolgeva anche il busto degli animali, rimasta in voga fino in era moderna.
Fu con lo svilupparsi delle tecniche di forgiatura che man mano fu possibile realizzare aratri di più pregiata fattura e resistenti, ma solo a partire dal XVIII secolo (figura 77 b). Fu in Inghilterra, Olanda e Scozia che apparirono i primi aratri simili a quello moderno, chiamati *Rotherham Plow*, che a meno di qualche nuovo accorgimento rimarrano molto simili fino ai primi del '900.
Per quanto riguarda gli Stati Uniti, fino al 1800 le tecnologie relative all'aratura rimasero meno sviluppate in confronto ai paesi europei. Nel 1784 Thomas Jefferson disegna un aratro a vomere, brevettato poi da Charles Newfold e sviluppato negli anni '30 del 1800 da John Deere, un fabbro dell'Illinois: un moderno aratro in acciaio

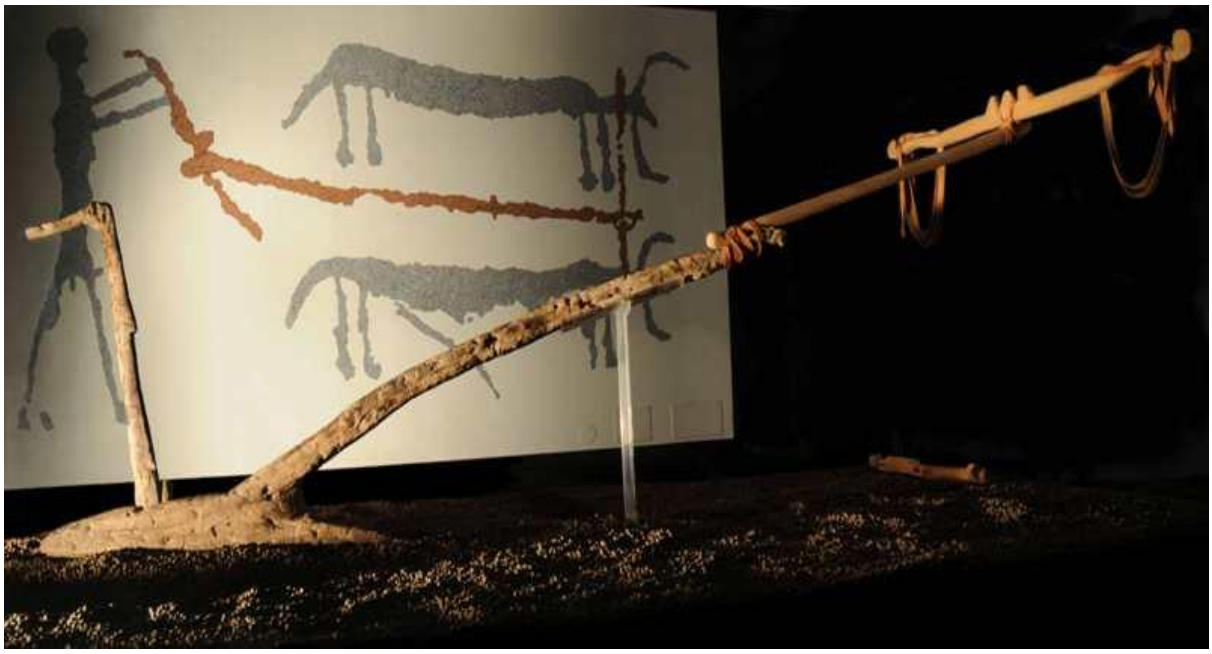


Figura 76 Aratro dell'età del bronzo trovato a Lavagnone (Desenzano del Garda) [199]

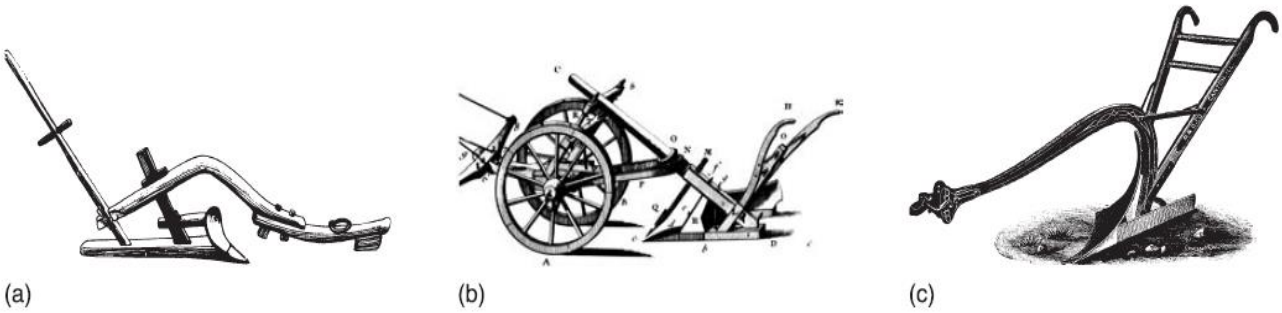


Figura 77 Evoluzione degli aratri a versoio. a) Tradizionale Cinese; b) Francese, XVIII secolo; c) Aratro americano in acciaio, metà XIX secolo [4]

a trazione animale (del tipo in figura 77 c) [162]; questo evento fu favorito dall'utilizzo dell'acciaio, migliore del ferro in termini di prestazioni, in quanto in quegli anni ne aumentò la disponibiltà.
Fu così che si seguì la strada intrapresa per la mietitura, utilizzando i primi aratri multivomere trainati da dozzine di cavalli, strumenti pesanti e ingombranti che vennero ulteriormente sviluppati con l'introduzione dei motori a vapore prima e a scoppio poi [4]. I mezzi a trazione animale furono progressivamente sostituiti con i trattori e gli aratri con strumenti che lavoravano con lo stesso principio ma di dimensioni ben più grandi.
In tempi più moderni si sono sviluppate tecniche alternative di lavorazione primaria, adatte all'utilizzo di trattori e alcune azionate dalla Presa di Potenza: coltivatori (*chiesels*), vangatrici, coltivatori rotativi. Queste tecniche svolgono lo stesso compito ma in modo meno invasivo rispetto all'aratura convenzionale, consentendo anche un risparmio in termini energetici.

La cosa più interessante è che dopo millenni di pratiche agricole supportate dall'aratura, negli ultimi anni si moltiplicano studi scientifici che mettono in discussione questa tecnica, asserendo come diminuendo la profondità di aratura o per mezzo di tecnologie operanti a minor profondità non si perde in prestazioni in termini di resa, ma diminuiscono grandemente i problemi legati all'erosione del suolo; sebbene infatti grazie al rivoltamento del suolo si migliorino fertilità e produttività, queste caratteristiche diventano svantaggiose a lungo termine aumentando la formazione di croste, la compattazione e l'erosione: il fenomeno del *Dust Bowl* avvenuto in America e di cui si è parlato già in precedenza (Capitolo 3), è stato causato tanto da siccità e fenomeni climatici atipici quanto dall'eccessiva lavorazione del terreno [162].
Fu questo fenomeno a rappresentare la miccia che che accese l'interesse per gli studi di pratiche meno invasive per il suolo rispetto all'aratura convenzionale, facendo nascere la realtà dei metodi chiamati *No Tillage* (*NT*). Questo movimento era inizialmente capeggiato da Edward Faulkner, il quale scrisse:

"*The truth is that no one has ever advanced a scientific reason for plowing. […] The entire body of "reasoning" about the management of soil has been based on the axiomatic assumption of the correctness of plowing. But plowing is not correct* [163]."

Per contro Walter Thomas Jack si oppose a questo movimento strenuamente, sostenendo le pratiche che prevedevano l'utilizzo dell'aratro e si basavano sulle osservazioni comuni che indicavano a un aumento della fertilità del terreno nell'utilizzo dello strumento in questione, sostenendo quanto fosse assurdo riprendere pratiche agricole appartenenti a culture primitive. La diatriba si spense anni più tardi a favore di Jack, ma è interessante come il "Time", il primo news magazine settimanale degli Stati Uniti ad oggi tra i più rinomati per politica e economia internazionale [164], descrisse il dibattito come "*l'argomento più caldo dalla sfida tra trattore e cavallo* [165]".
Comunque sia il picco di produzione di aratri negli Stati Uniti si ebbe negli anni '50 e '60, quando ogni anno questo paese ne produceva dalle 75 alle 140˙000 unità. Tra gli anni '80 e '90 del secolo scorso il numero scese a 3˙000, per diversi motivi: la maggiore velocità di tecnologie che andavano a lavorare il terreno meno in profondità, l'incoraggiamento nell'utilizzo di pratiche di conservazione del suolo, il minor costo energetico delle operazioni [162]. Un esempio fra i tanti sono gli studi di Sharma e Jain [166], i quali negli anni '80 confrontano il metodo tradizionale con uno *No Tillage*, che prevede la semina a fila singola tramite una

seminatrice a doppio disco appositamente studiata. Questi trovano che non ci sono differenze singificative in termini di resa mentre in termini energetici l'aratura convenzionale consuma una volta e mezzo di più.
Tutti questi fattori finiscono per diminuire progressivamente l'utilizzo di pratiche invasive a favore di altre maggiormente volte alla conservazione.
Oggi a causa dei problemi relativi al ciclo de carbonio e il riscaldamento climatico (collegati anche a degradazione del suolo, impoverimento del SOM con relativo sbilanciamento dei nutrienti, inquinamento, eutrofizzazione [167] e gli altri problemi a livello di conservazione biologica già descritti), oltre alla conveninenza da un punto di vista economico ed energetico, portano le pratiche di conservazione ad essere sempre più studiate ed utilizzate; continua di fatto un percorso di diminuzione delle pratiche invasive per quanto riguarda l'aratura dei terreni e un approccio sempre più olistico dal punto di vista sia agronomico che agricolo.
Si è visto un aumento della produttività grazie all'utilizzo di queste pratiche anche nelle *Great Plains* degli Stati Uniti e nella *Corn Belt Region* (Regione degli Stati Uniti Occidentali dove si coltiva mais dal 1850), oltre a Brasile e Sud America in generale. È altrettanto vero che in altri casi non è avvenuto lo stesso, subendo quindi una diminuzione della resa dei terreni in seguito all'adozione di pratiche No Till; per questo motivo è di fondamentale importanza una maggiore comprensione delle caratteristiche del suolo dell'ecosistema considerato, così da superare gli ostacoli responsabili della resa limitata [167]. In questo senso si deve considerare che in presenza di suolo degradato questi sistemi non possono intrinsecamente fornire una buona produttività nel primo periodo; allo stesso modo non si può pensare di avere buoni risultati adottando pratiche di conservazione in concomitanza con altre di aratura spinta.
Nel prossimo paragrafo si descriveranno le tecnologie adottate per un'analisi condotta, con le dovute differenze, allo stesso modo di quanto fatto con mietitura e trebbiatura.

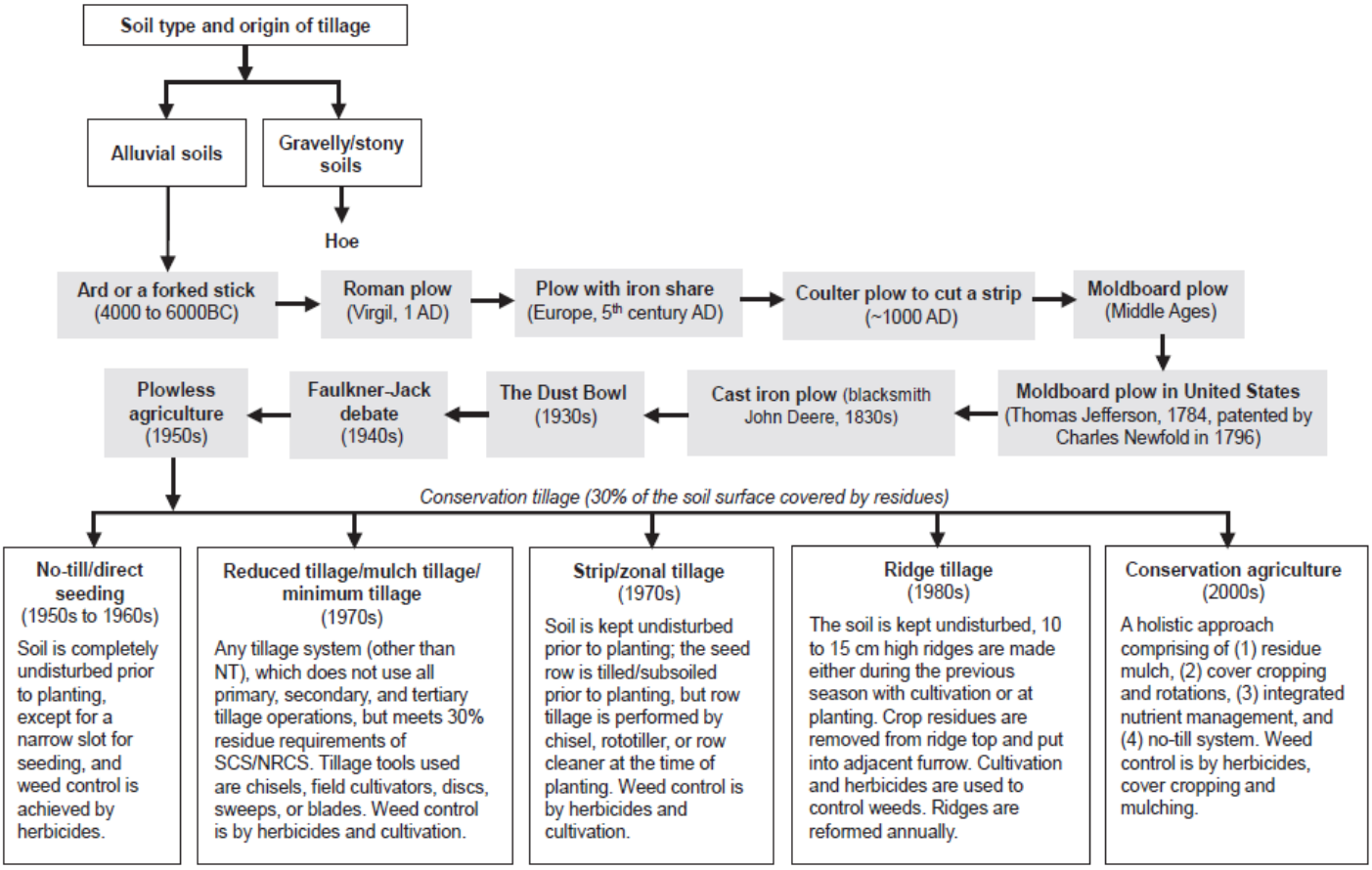


Figura 78 Storia dell'aratura e delle pratiche agricole di conservazione [167]

5.2 Tecnologie di lavorazione primaria del terreno e elaborazione dei dati

Le macchine per la lavorazione del terreno si suddividono a seconda della tecnica utilizzata e la fase di lavorazione considerata. Nella tecnica "convenzionale" (CT – Conventional Tillage) la *lavorazione primaria* o *dirompimento* si effettua con aratri a versoio o a disco, coltivatori (chisels) normali o rotativi, vangatrici. La *lavorazione secondaria* o *preparazione del letto di semina* viene effettuata solitamente con erpici fissi o snodati.
Nella tecnica di "lavorazione in due strati" il dirompimento avviene accoppiando un aratro ripuntatore con uno a versoio mentre la lavorazione secondaria viene effettuata con erpici, zappatrici, rulli frangizolle.
Infine, con la tecnica a "Lavorazione ridotta" le fasi di lavorazione primaria e secondaria si effettuano contemporaneamente per mezzo di erpici combinati, coltivatori, zappatrici.
In questa sede ci si concentrerà sulle operazioni di rottura o lavorazione primaria. Il compito delle lavorazioni di rottura è di ottenere un profilo lavorato con una determinata porosità, che permetta la circolazione dei liquidi e la crescita delle radici, oltre a eliminare la vegetazione infestante. I metodi possono variare considerevolmente a seconda del tipo e l'umidità del terreno, la pratica colturale adottata [153].
Per quanto riguarda i dati raccolti, la selezione è stata condotta principalmente per mezzo di riviste scientifiche e su dati sperimentali. Come parametro di confronto si sono considerate sia la profondità della lavorazione che il tipo di terreno, classificato per tipologia: secondo Pellizzi [42] questo può essere classificato a seconda della composizione di argilla, sabbia e limo in *tenace*, *sciolto* e *medio*, divisione effettuata da un punto di vista meccanico-agricolo:

- Terreno sciolto (*sabbioso* o *sandy*, *sabbioso-limoso* o *sandy loam*): contiene più del 50% di sabbia con una bassa percentuale di argilla. Ha la caratteristica di essere poco deformabile e molto permeabile. Questo terreno offre una bassa resistenza alla lavorazione ed è poco influenzato dalla presenza dell'acqua.
- Terreno di medio impasto (*limoso-sabbioso* o *sandy-loam*, *limoso* o *loam*, *limoso-argilloso* o *silty clay*): la sabbia è presente per meno del 50%, l'argilla tra il 20 e il 10%. Presenta deformabilità media e media resistenza alla lavorazione, ma è abbastanza influenzato dalla presenza di acqua.
- Terreno tenace (*argilloso-sabbioso* o *sandy clay*, *argilloso limoso* o *clay loam*, *argilloso* o *clay*): in questo caso la presenza di argilla supera il 20% e quella di sabbia è inferiore al 30%. Questo terreno è molto sensibili alla presenza di acqua, con caratteristiche cementanti elevate, alta resistenza alla lavorazione e, se umdio, fortemente deformabile.

Grazie alle analisi granulometriche è possibile suddividere i vari terreni in queste tre macrocategorie, potendosi avvalere di rappresentazioni grafiche quali in figura 79:

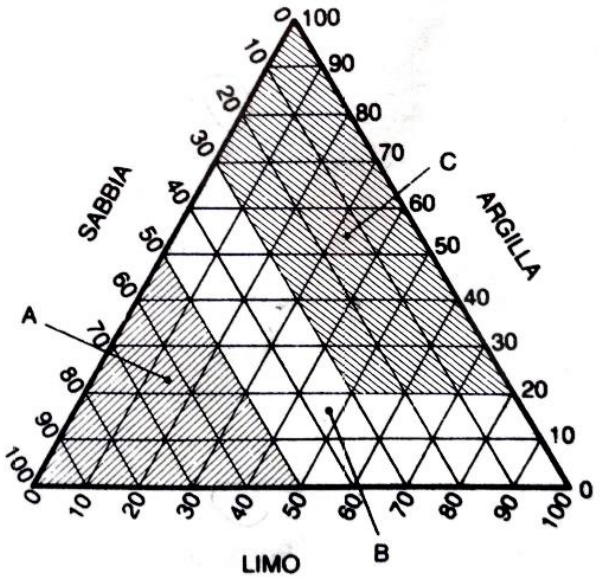


Figura 79 Classificazione dei terreni secondo Pellizzi [42]

In questo caso si è proceduto in maniera leggermente diversa rispetto ad aratura e trebbiatura: un po' a causa delle differenze intrinseche rispetto al tipo di lavorazione, un po' per la natura dei dati a disposizione. L'aratura come tipo di lavorazione è meno dipendente dalla tipologia colturale scellta ma è fortemente condizionata in termini tecnologici dal tipo di terreno e oltre che dalla tecnologia adottata, in termini energetici, dalla profondità operativa selezionata. Per cercare di riprodurre dei confronti significativi è stato scelto di limitare l'analisi alle lavorazioni primarie, quindi alle tecnologie descritte nel capitolo precedente e che rientrano principalmente nel metodo di coltivazione tradizionale: non avrebbe senso confrontare la potenza assorbita da una lavorazione con aratro polivomere con una ad erpice, in quanto il confronto vuole essere in termini tecnologici, indipendentemente dalle differenti soluzioni agronomiche non essendo queste ultime l'oggetto diretto di questa analisi. Inoltre, se non per il caso della zappa, non è mai stata considerata la potenza esercitata dal lavoro umano, in quanto le tecnologie considerate si avvalgono sempre di animali e la potenza esercitata dall'uomo ne differisce, come minimo, di un ordine di grandezza.

Sono quindi forniti gli strumenti per procedere con l'analisi.
Il primo strumento considerato è la *zappa*. A differenza dell'aratro, più pesante e inadatto a colture di piccole dimensioni, la zappa può essere utilizzata da un singolo individuo senza l'ausilio della trazione animale. Secondo Campbell il tempo necessario a zappare un ettaro di campo in condizioni secche con una zappa, per una profondità di 10 – 15 cm, è sulle 300 ore e scende a 150 – 200 in caso di campo allagato [168]. Secondo Carena (prime righe tabella 16) e Nerli (seconde righe), a seconda della profondità, un uomo dotato di *vanga* (strumento maggiormente adatto al dirompimento manuale del terreno), per lavorare un ettaro di terreno impiega i seguenti tempi:

Natura terreno	**A due puntate (0,5-0,6 m)**		**A una puntata (0,3-0,35 m)**		**A una puntata (0,2-0,25 m)**	
Tenace	1600,0	1230,8	551,7	484,8	400,0	363,6
	2000,0	1600,0	695,7	615,4	500,0	444,4
Medio	1230,8	1066,7	484,8	444,4	363,6	320,0
	1600,0	1230,8	615,4	551,7	444,4	400,0
Sciolto	1066,7	842,1	363,6	320,0	320,0	280,7
	1230,8	1066,7	519,5	500,0	400,0	347,8

Tabella 16 Lavoro manuale con vanga, superficie lavorata in h ha^{-1} [59] [169]

Si parla di due puntate per le lavorazioni a terreno profondo (sempre più in disuso), a una puntata con profondità di 30-35 cm per lavorazioni medie e a una puntata (20-25 cm) per lavorazioni superficiali.
Il lavoro a vanga, avendo un MET pari a 8, viene considerato come lavoro pesante (H) e quindi si considererà un esercizio di potenza pari a 130 W per il singolo individuo.
Ai fini della trattazione si sono considerati dei valori mediati per le diverse classificazioni di terreno a una profondità di 20-25 cm. I dati così elaborati saranno confrontati in termini grafici con quelli relativi alle vangatrici e zappatrici (figure 91 e 92).

Passiamo ora all'aratro a versoio, la tecnologia maggiormente usata nella storia dell'aratura. Questo si può differenziare a seconda del sistema di accoppiamento: possono essere trainati, portati o semiportati. Dell'aratro a versoio si possono distinguere tre parti fondamentali (figura 80):

- organi operatori: sono il coltro, il vomere e il versoio.
- organi di regolazione: quando non esercitati da un sistema idaulico, come vale per il caso dei trattori moderni, questi per mezzo di viti e perni permettono di regolare la profondità di operazione, la larghezza di lavoro, l'inclinazione del corpo.
- organi di collegamento, sostegno e guida: si tratta dei componenti situati nella parte anteriore della bure.

Il *coltro* ha la funzione di tagliare verticalmente il terreno prima del passaggio del vomere; i più utilizzati sono a coltello o a disco, e può variare a seconda della natura del terreno. Il compito del *vomere* (*moldboard*) è quello di tagliare orizzontalmente dallo strato non lavorato una linea continua di terra durante l'avanzamento, sollevarla e rivoltarla per mezzo del *versoio*, facendole compiere una rotazione di 135°, lasciandola cadere da un lato con un angolo di 45°. Ovviamente queste considerazioni sono puramente teoriche, ma sono alla base dell'evoluzione tecnica dell'aratro a versoio: questo permette di massimizzare tra le porzioni inferiori di due fette contigue l'immagazzinamento d'aria e la maggior superficie possibile esposta agli agenti atmosferici; questo avviene con un rapporto teorico tra altezza e base di 1:1.41 [153]. Una tale formulazione teorica può essere anche realistica per terreni tenaci, in pratica per terreni sciolti la lavorazione si riduce a un semplice rimescolamento.

Il versoio può essere in forma elicoidale, cilindrica o iperbolica a una falda anche se teoricamente ogni terreno richiederebbe un'appropriata forma di versoio. La scelta di queste tre geometrie nasce da semplificazioni necessarie a una "normalizzazione" produttiva che ha scremato le varie possibilità all'utilizzo del versoio elicoidale in terreni coesivi, il cilindrico a terreni tendenzialmente più sciolti; per quanto riguarda la forma iperbolica, questa svolge una funzione intermedia tra le due precedenti.

Più recentemente si sono introdotte delle nuove soluzioni "non convenzionali" per quanto riguarda il versoio: il modello a *losanga*, che presenta vantaggi in campo sia agronomico in termini di miglior rivoltamento che operativo in quanto richiede uno sforzo minore di trazione. Un'altra soluzione è rappresentata dal versoio *fenestrato*, dotato di una minor superficie che riduce l'attrito tra metallo e terreno; tali soluzioni si differenizano anche per le diverse profondità che ne caratterizzano la lavorazione.

Nei tempi moderni si è sviluppata una vasta varietà di tipologie di aratro, un'esigenza nata da esigenze agronomiche, organizzazione del lavoro e risparmio energetico. Si citano gli aratri *polivomere* (figura 81 A) dotati di più corpi lavoranti (fino a 12) che aprono contemporanemante più solchi nel terreno; questi si distinguono tra trainati e portati; la profondità di lavorazione diminuisce aumentando il numero di corpi. L'aratro *doppio* (figura 81 B), dove gli organi operatori sono disposti simmeticamente e attaccati a un'unica

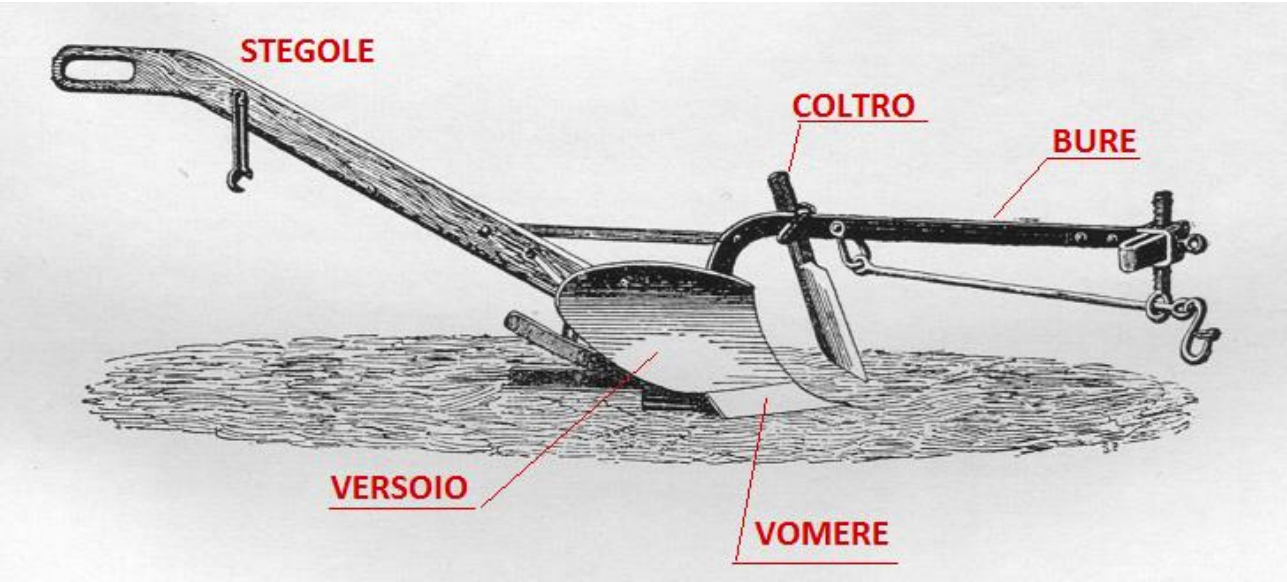


Figura 80 Aratro rovesciatore a vomere e versoio [201]

bure; possono essere da mono- a epta- vomere. Gli aratri *ripuntatori* (figura 81 C) generalmente situati a valle del versoio caratterizzati da organi discissori: nel caso di lavorazione eseguita a medesime profondità alla base dello strumento si crea una crosta compatta chiamata *suola di lavorazione*, problema che viene ovviato con una sua rottura da parte di questi strumenti.
Tutti gli aratri precedentemente citati sono del tipo *autointerrante*, ovvero hanno la caratteristica di affondo nel terreno. Le velocità tipiche di questi strumenti variano dai 4 agli 8 km/h a seconda che il terreno sia leggero o tenace; una maggiore velocità operativa tende a favorire un maggior amminutamento del terreno [153].
Nell'aratura convenzionale lo strato più superficiale del terreno viene rivoltato e collocato in profondità, mentre si porta la parte più profonda in superficie: con gli *aratri a disco* (figura 81 D) il terreno viene sottoposto a sollecitazioni diverse che ne favoriscono la rottura. In questo modo si riducono i consumi energetici aumentando la velocità di avanzamento rispetto all'aratura normalmente adottata.
Queste soluzioni dispongono di dischi a forma di calotta sferica e bordo tagliente che fungono contemporaneamente da coltro, vomere e versoio, occupandosi sia del taglio che del rovesciamento della fetta nella parte concava del disco. Quest'ultimo, essendo libero di ruotare sul proprio asse, nella fase di contatto col terreno trasforma l'attrito da radente in volvente. I dischi possono essere montati in modo indipendente (la tecnologia può contare così da 1 a 6 corpi lavoranti) o montati sullo stesso asse (che consente di sfruttarne dai 4 ai 15); in quest'ultimo caso vengono denominati aratri verticali.
L'aratro a disco è generalmente più pesante del corrispondente a versoio e le profondità di lavoro non superano i 35 cm; il loro utilizzo è vantaggioso in particolare per quanto riguarda i terreni sciolti e asciutti o di medio impasto, meno per i terreni argillosi: mentre queste macchine lavorano molto bene nella fase di frantumazione e rimescolamento, non si può affermare lo stesso per il rivoltamento [153].

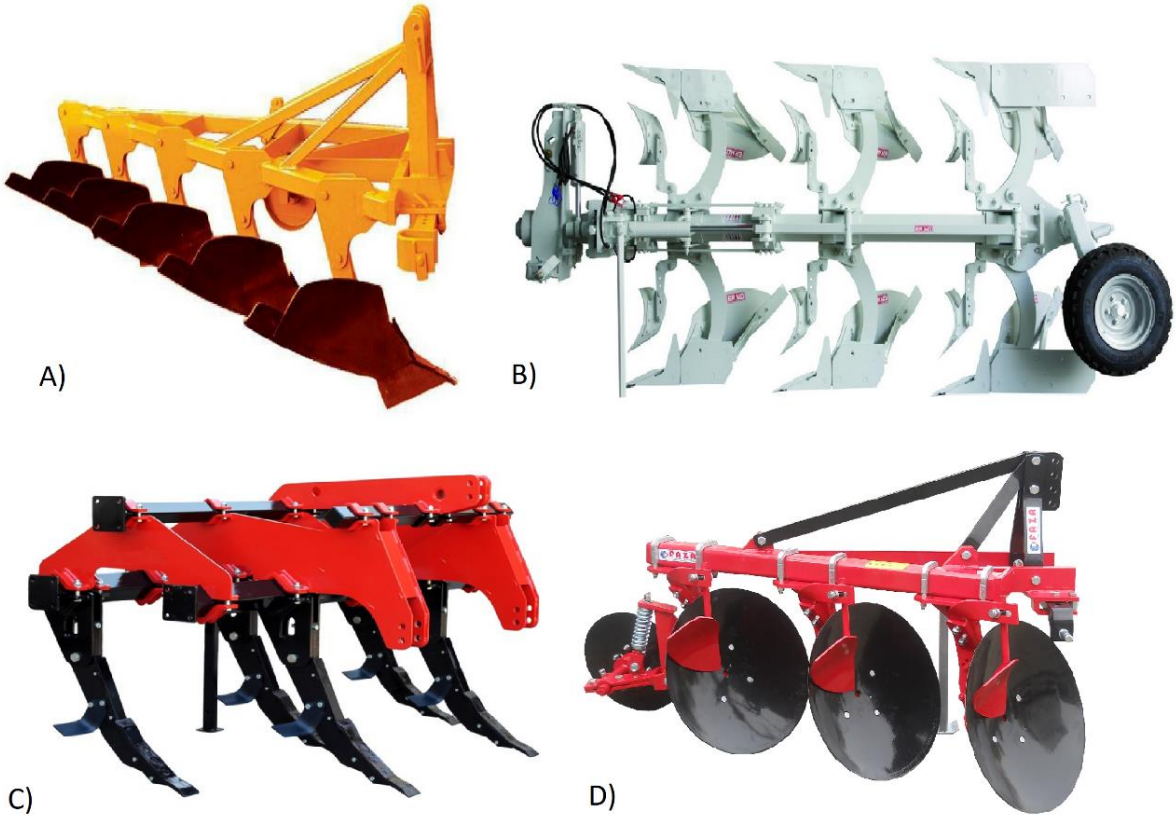


Figura 8152 Diverse tiologie di aratro. a) Multivomere portato b) Doppio trivomere semiportato c) Ripuntatore portato d) A dischi indipendenti [202] [203]

I dati sono stati elaborati per le diverse tecnologie; in primo luogo saranno analizzati i dati, a livello grafico, relativi all'aratro a versoio monovomere. In questa categoria ricadono anche tutti i dati per i quali non sono state espresse specifiche oltre alla definizione di *moaldboard plough.* Come per i casi successivi, la distinzione sarà fatta in termini di motore primo, considerando il lavoro umano/animale (LU o LA) o motori a combustione interna (CI). A questa sigla ne sarà affiancata una seconda relativa alla tipologia del terreno: S per impasto sciolto, T per tenace, M per medio.
A livello grafico si è preferito dare priorità alla profondità dell'operazione, dividendo in Aratura superficiale quella effettuata con una profondità inferiore ai 10 cm, Aratura intermedia con profondità compresa tra i 10 e i 20 cm, Aratura Profonda per profondità superiori ai 20 cm. Nel caso in cui non si siano trovate specifiche rispetto all'una o all'altra caratteristica non è stato aggiunto nulla oltre alla sigla riferentesi al motore primo.

La prima analisi si riferisce ai dati relativi alla tecnologia dell'aratro a versoio monovomere classico. I dati che rientrano nella categoria di aratura superficiale sono elaborati dall'articolo di Senapati e Satpathy [170], un test con diversi aratri a versoio trainati da una coppia di buoi nel Nord Est dell'India. Per quanto riguarda l'aratura intermedia i dati sono stati elaborati da diverse riviste dell'AMA (Agricultural Mechanization in Africa, Asia and Latin America) [171] [172] [173], i primi due riguardanti il traino con uno e due buoi, il terzo con utilizzo di aratri trainati da trattori (Massey Ferguson 135) su diversi terreni. Altri quattro punti sono stati elaborati attraverso dati raccolti da realtà recenti di agricoltura biodinamica che utilizzano la trazione animale e in particolare il cavallo come motore primo (Gruppo di Ricerca "Noi e il Cavallo"), i quali rendono disponibili dati e informazioni riguardo la trazione animale moderna [174]. Quando non disponibili in modo diretto, le produttività orarie sono state calcolate assumendo una velocità del cavallo pari a 1 m s^{-1} (figura 22), che quando confrontate con dati disponibili hanno fornito valori molto simili. Di questi dati non è stato possibile recuperare le specifiche del terreno. Per l'aratura profonda sono stati considerati i dati ricavati da "Noi e il cavallo" per la trazione animale, dal Pellizzi [153] riguardo ad aratri monovomere trainati da trattrice, da altri tre articoli che confrontano l'aratura convenzionale con quella di conservazione [175] [176] [177]: in questi, essendo l'aratro considerato come convenzionale (Mouldboard Plough) è stato assunto si tratti di aratro a versoio monovomere. I dati in cui non è stata specificata la profondità di lavoro provengono da un articolo AMA [178] che considera uno studio di meccanizzazione appropriata e produttività ottimale in funzione delle potenze disponibili nel Nord dell'India (al 1994 erano pari a soli 0.4 kW per ettaro). Lo studio esegue un confronto tra tecnologie a trazione animale e meccanica e fornisce dati interessanti rispetto a macchine di potenza inferiore ai 20 kW.
Il grafico in figura 82 mostra un andamento familiare, descrivendo l'aumento di produttività in funzione della potenza (il cui asse è in scala logaritmica). Innanzitutto il grafico si divide tra potenze inferiori e superiori ai 4 kW, le prime corrispondenti alle tecnologie a trazione animale, le seconde per quelle a trazione meccanica. È evidente come le prime non superino il valore di 0.2 ettari per ora, per superare questo limite è necessaria la trazione con motore primo a combustione interna. Un altro aspetto significativo riguarda la profondità di aratura, superficiale e intermedia per le tecniche a trazione animale e in modo preponderante profonda nel caso di disponibilità di trattori. Più che a una scelta diretta questa differenza è dovuta alle disponibilità energetiche e tecnologiche dei paesi in cui sono stati raccolti i dati, principalmente di II e III mondo: la mancanza di accessibilità per quanto riguarda le macchine di grossa taglia non permette l'utilizzo di tecniche che si basano su un'aratura molto profonda, per la quale è necessaria una potenza superiore (l'unica per quanto riguarda la trazione animale si riferisce a un aratro trainato da tre cavalli). Si può giustificare anche notando che si tratta in modo preponderante di terreni medi o sciolti: l'unico caso di terreno tenace effettuato in modo meccanico prevede comunque un'aratura di profondità intermedia.
Rispetto alla tessitura del terreno, si può notare come in quest'analisi non influenzi in modo macroscopico il confronto tra i risultati, che mantengono una certa continuità di tendenza a prescindere dal tipo di suolo.
Analizzando il grafico in figura 83, il quale tratta di produttività specifica e potenza (sempre in scala semilogaritmica) si nota immediatamente la differenza tra l'usufrutto del motore animale e le tecnologie trainate da trattrice. Le tecnologie più "efficaci" risultano quelle usate nelle realtà non industrializzate e trainate da buoi, seguite da quelle a trazione equina. Il risultato rilevante è comunque la continua tendenza verso la diminuzione di produttività per unità di potenza all'aumentare della potenza stessa, comune alle analisi effettuate nel capitolo precedente relativo a mietitura e trebbiatura.

LA: Lavoro Animale; CI: Combustione Interna. S: Terreno Sciolto; M: Terreno Medio; T: Terreno Tenace.

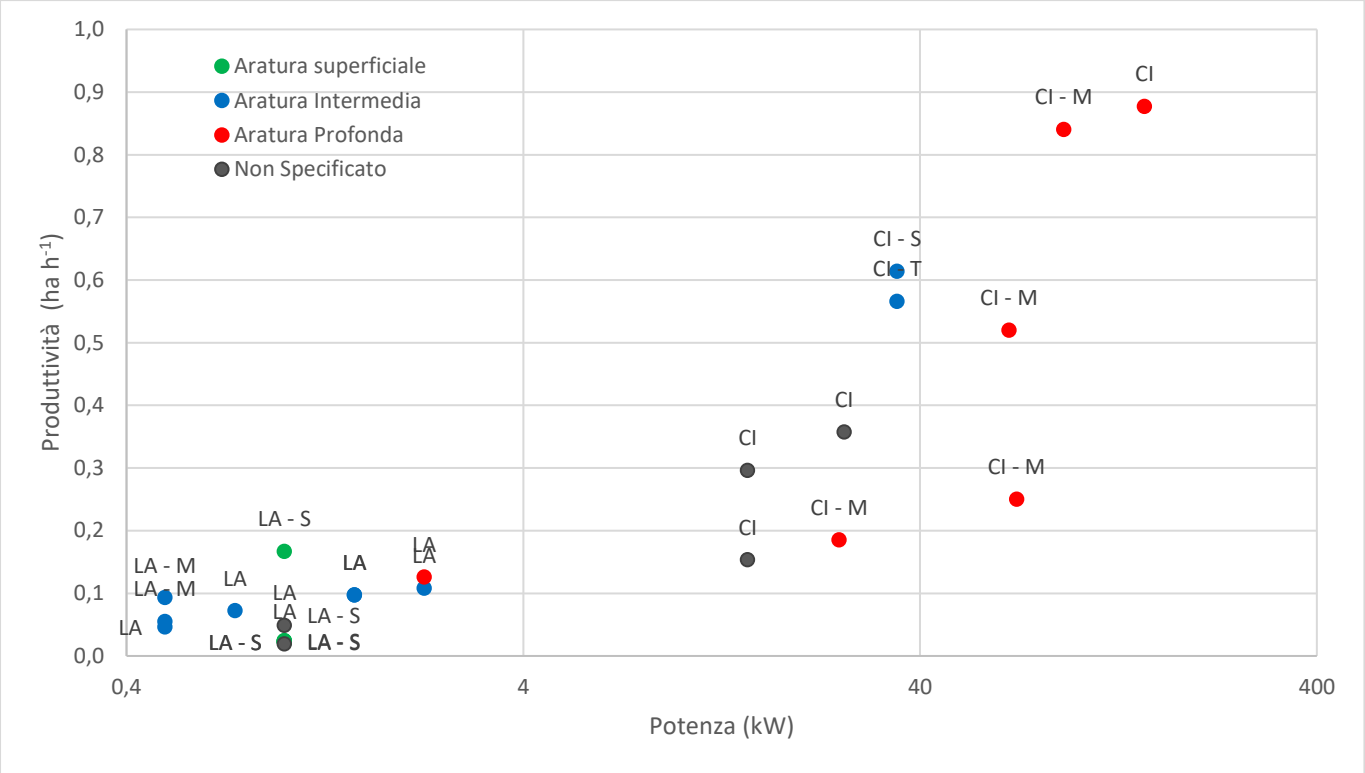


Figura 82 Potenza e Produttività per aratri monovomere a versoio. Scala semilogaritmica per la potenza

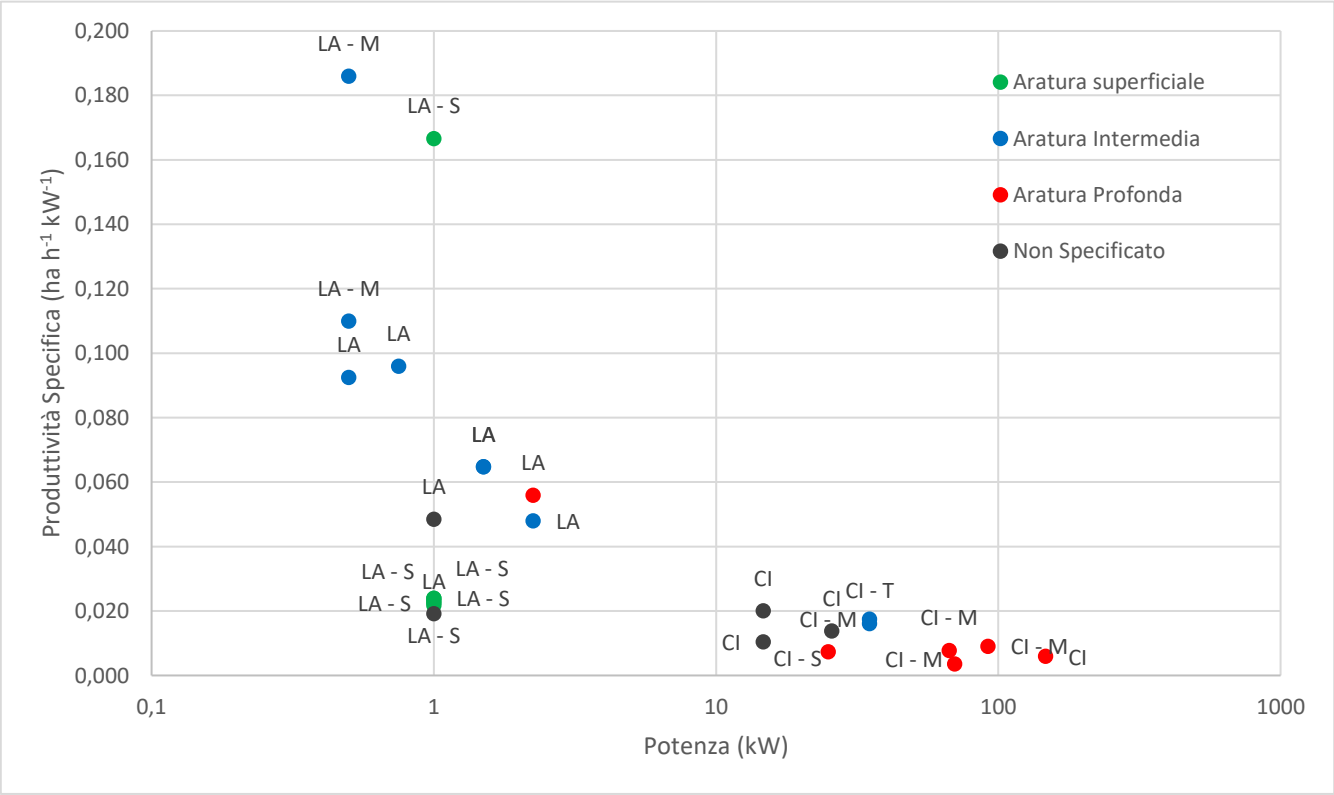


Figura 5383 Produttività specifica in funzione della potenza per gli aratri a versoio monovomere. Scala semilogaritmica per la potenza

L'analisi successiva riguarda le tecnologie di aratura convenzionale con aratri a versoio multivomere e aratri doppi multivomere. In questo caso accanto alla lettera indicante il tipo di terreno sarà accompagnata una cifra corrispondente al numero dei vomeri. In questa circostanza, essendo tutte le tecnologie descritte atte a un'aratura profonda e quindi superiore ai 20 cm (tra i 20 e i 30 cm nello specifico), la distinzione verrà effettuata in termini di tecnologia: si distinguono gli aratri doppi da quelli multivomere.
Per quanto riguarda i dati relativi all'aratro doppio, questi sono stati selezionati da uno studio sui consumi energetici relativi ad aratura profonda [179] riguardante un aratro doppio trivomere portato mosso da un trattore da 54 kW, un aratro doppio pentavomere portato e un aratro doppio a 7 vomeri semiportato entrambi trainati da un trattore da 160 kW. I dati relativi agli aratri multivomere a trazione animale si riferiscono ai dati elaborati da "Noi e il Cavallo" [174], i rimanenti dal Pellizzi [153] e dal già citato articolo della rivista AMA dedicato al confronto su diversi terreni (in questi dati su terreno tenace) [180]. In questo caso è interessante notare, in figura 84, come le tecnologie a trazione animale competano in produttività con gli aratri multivomere. Ciò nonostante, gli aratri doppi consentono di aumentare decisamente la produttività almeno di un fattore due rispetto alle altre tecnologie. Ma a un'analisi più attenta si nota come l'aratro doppio trivomere sia accoppiato con un trattore di potenza simile a quelli multivomere e permetta una produttività dello stesso ordine di grandezza dei monovomere, mentre gli aratri doppi penta- ed epta- vomere sono accoppiati a un trattore tre volte più potente: l'aumento di produttività non va quindi ricondotto a una migliore tecnologia, quanto all'aumento di potenza legato alla macchina trainante. In questo caso si tratta di terreni sempre medi o tenaci: è evidente come queste tecnologie di aratura siano atte a lavorare in terreni compatti.
Il grafico in figura 85 analizza invece l'andamento della produttività specifica all'aumentare della potenza: continua ad essere rispettata la superiorità dei motori animali in termini specifici, e si nota come le tecnologie che prevedono l'utilizzo del trattore come traino continuino su una tendenza negativa. Per quanto riguarda i due punti relativi agli aratri doppi trainati dal trattore di 160 kW, questi rimangono sullo stesso livello di efficienza, seppur leggermente più basso, rispetto ai corrispettivi a potenza minore. Probabilmente in quanto queste tecnologie, decisamente più pesanti, per massimizzare l'effetto utile necessitano di grandi potenze.

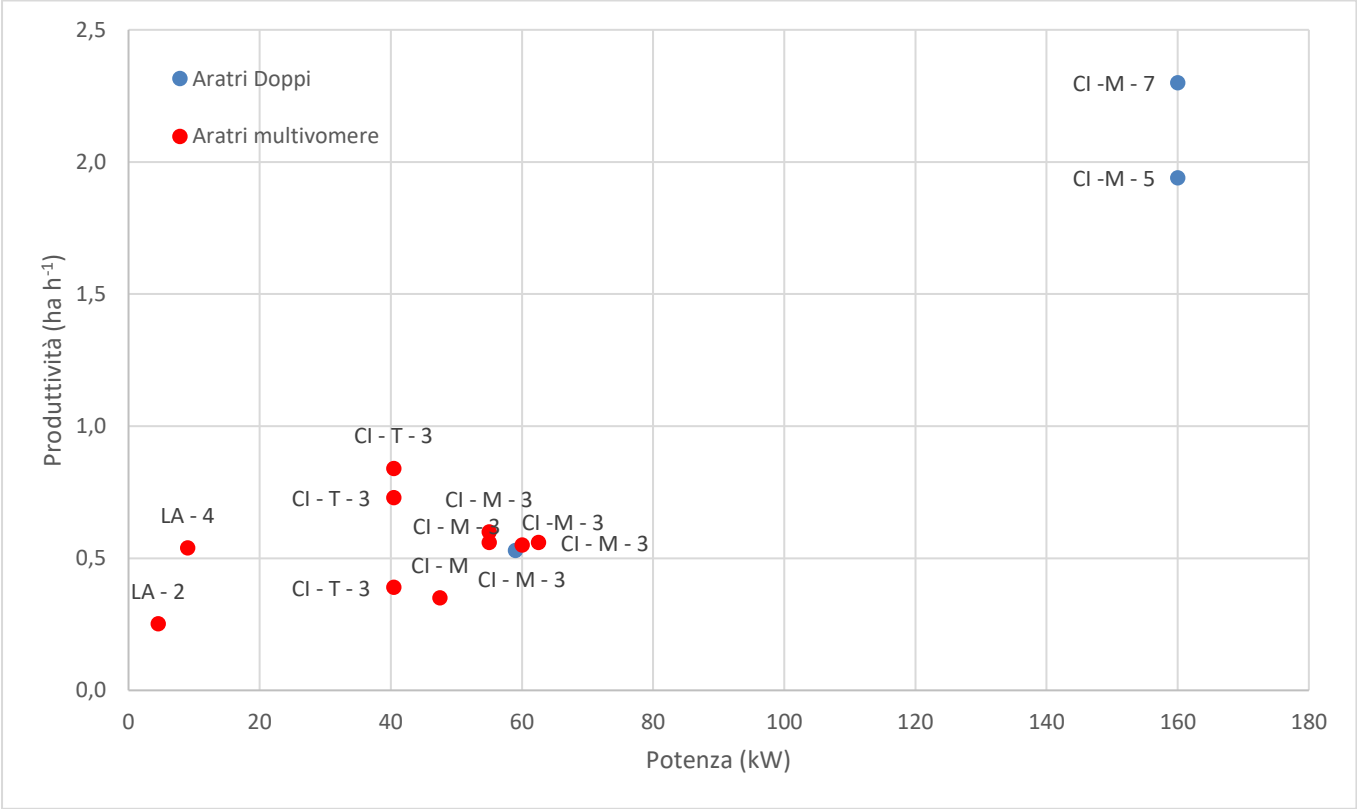


Figura 84 Produttività e potenza per aratri multivomere e doppi.

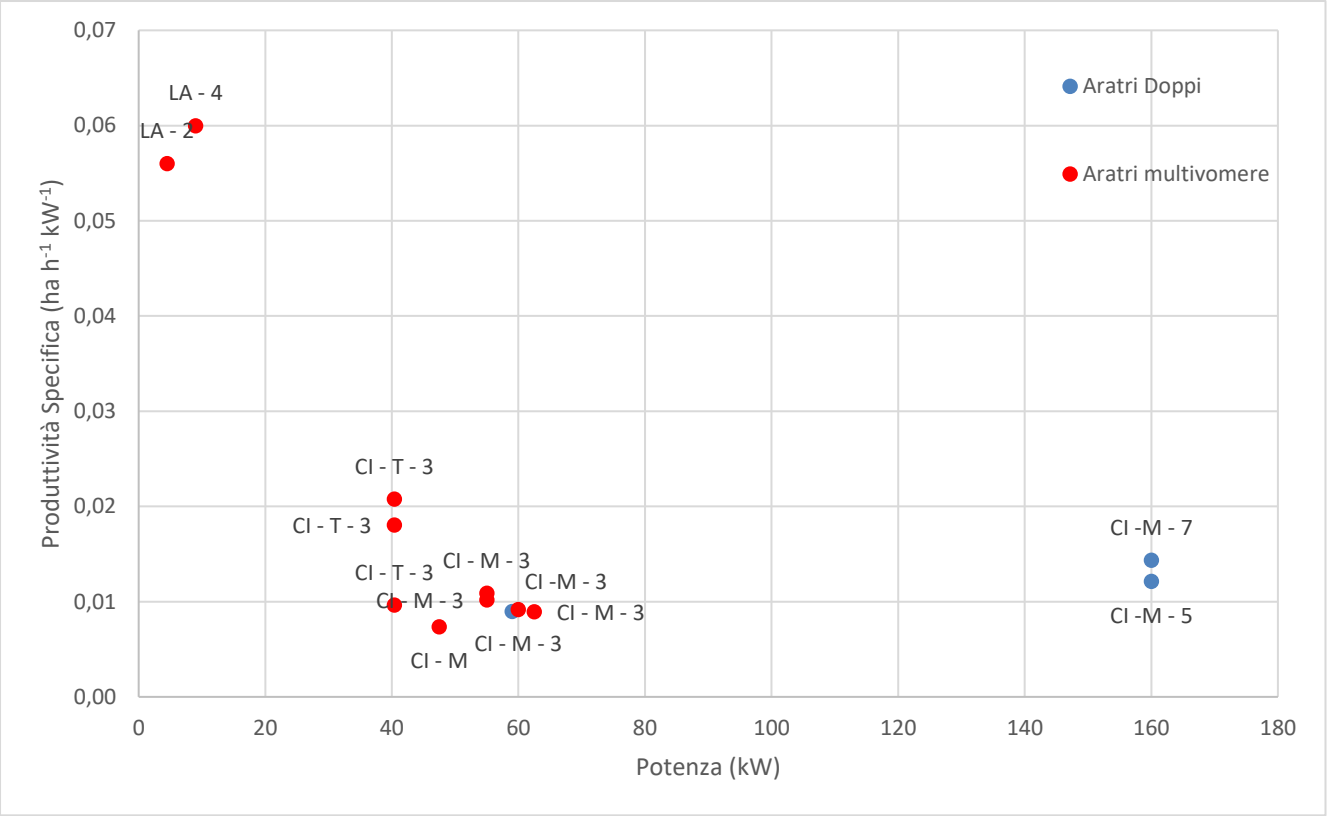


Figura 85 Produttività specifica in funzione della potenza per aratri doppi e multivomere

Per concludere la categoria degli aratri atti allo svolgimento del metodo convenzionale si va ad investigare ora le tecnologie a disco. In questo caso i dati sono stati ricavati da due articoli della rivista AMA, uno già citato sui consumi di combustibile rispetto a differenti metodi di aratura trainata a trattrice [173], un altro articolo che confronta la medesima tecnica di aratura a disco unico trainato da una coppia di buoi comparandola tra terreni a differente contenuto di umidità [181]; infine, un terzo articolo precedentemente citato sui consumi di combustibile con diversi metodi di aratura [175].
Nel grafico in figura 86 relativo a produttività e potenza i punti relativi all'aratura animale sono praticamente sovrapposti e come ci si aspetta a un aumento di potenza corrisponde un aumento di produttività. In questo caso a differenza dei grafici precedenti si nota la predominanza di terreni sciolti, in accordo con le migliori prestazioni di questi aratri in tali terreni. Si può notare inoltre come la tecnologia relativa all'aratro semiportato sia più produttiva a parità di potenza rispetto al portato.
Nel grafico in figura 87 l'andamento conferma le tendenze tipiche precedentemente osservate, potendo fare qualche osservazione in più: nei tre casi di trazione animale la diminuzione in termini di produttività specifica è data dall'utilizzo della medesima tecnologia di lavorazione ma con profondità diverse (rispettivamente 7.5, 8.4, 9.8 cm) a cui corrisponde logicamente una minore produttività non visualizzabile nel grafico precedente. Per quanto riguarda gli altri punti, all'aumentare della potenza impiegata per la lavorazione, la produttività specifica tende a diminuire con un andamento che si potrebbe definire iperbolico. Va anche considerato che tali andamenti pootrebbero essere non altrettanto favorevoli nel caso di terreni a pari tessitura, anche se fin'ora non è stata rilevata un'influenza decisiva della composizione del terreno rispetto ad analisi non puntuali.

LA: Lavoro Animale; CI: Combustione Interna. S: Terreno Sciolto; M: Terreno Medio; T: Terreno Tenace.

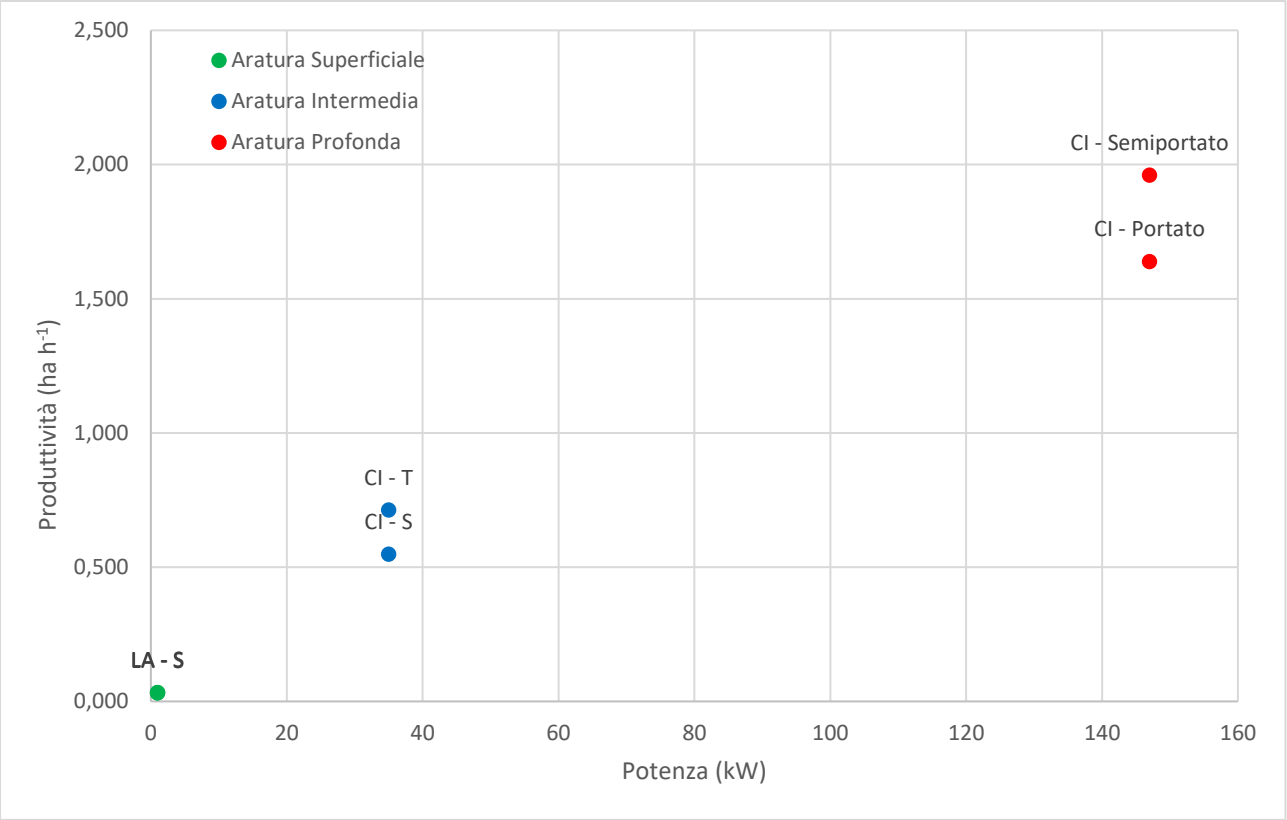


Figura 86 Potenza e produttività per aratri a disco

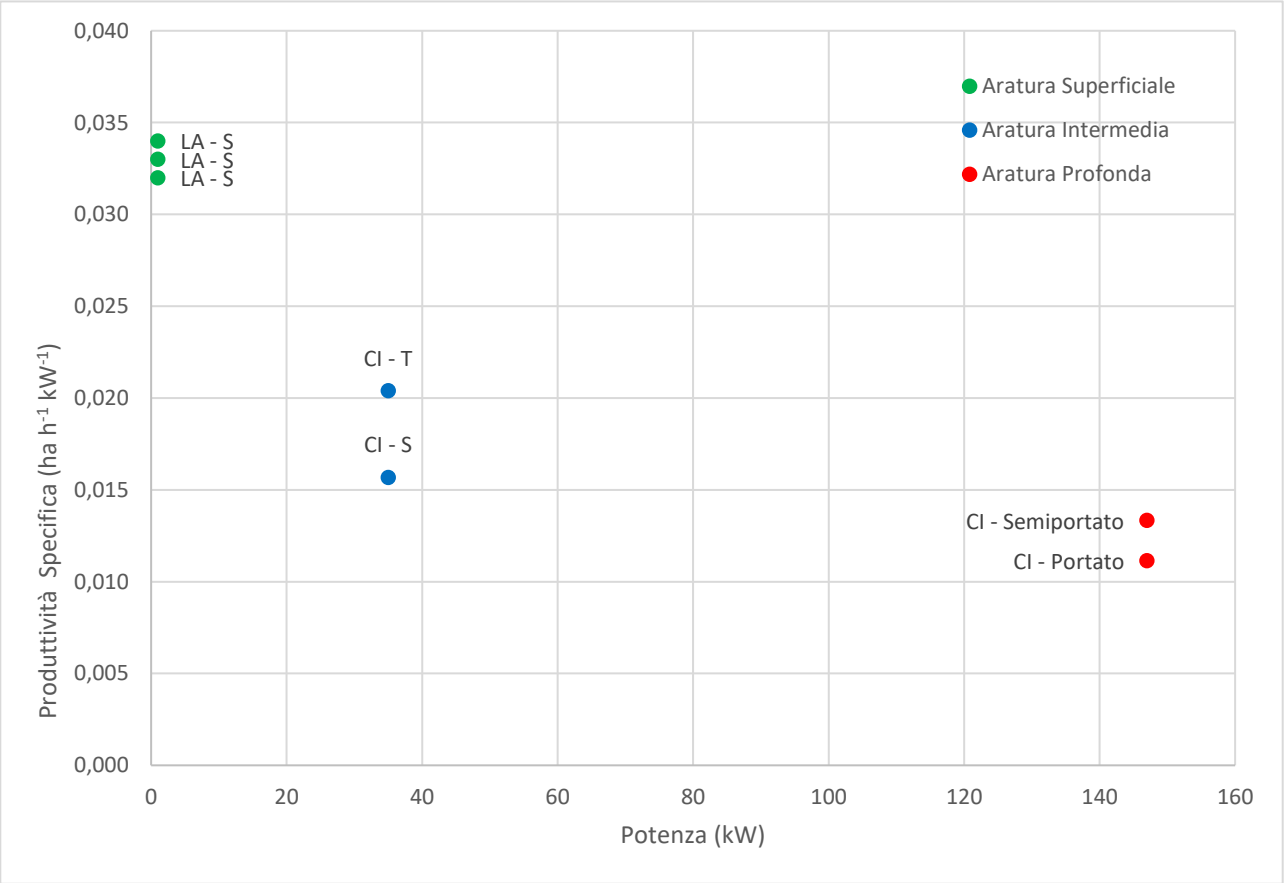


Figura 87 Potenza e produttività specifica per aratri a disco

I *coltivatori* (o *chisel*, figura 88 a sinistra) sono particolarmente adatti ai terreni argillosi: il dente dritto penetra nel terreno con facilità e le alette laterali consentono un taglio orizzontale dello stesso permettenndo così di sollevare lo strato interessato senza rimescolarlo. Questi attrezzi si dicono *discissori*, ovvero eseguono il lavoro del terreno senza spostamenti sensibili [182]. Nonostante questi attrezzi siano usati, solitamente, dopo l'aratura, non si riscontrano differenze in termini agronomici e produttivi nel caso di sostituzione effettiva alla lavorazione completa, mentre consumano molto meno in termini di energia. La larghezza di lavoro varia tra i due e i sei metri e i denti possono essere rigidi o elastici, disposti in uno o più ranghi. Spesso sono associati ad altri utensili destinati a una lavorazione ridotta [153].
Nonostante siano usati convenzionalmente per la tecnica di aratura a due strati, in letteratura in più di qualche occasione si è constatato l'utilizzo di *ripuntatori* (o *subsoiler,* figura 88 a destra) anche in modo autonomo per le pratiche di dirompimento. Questi svolgono un lavoro decisamente diverso dall'aratro: come i coltivatori sono strumenti che tagliano il terreno verticalmente senza alterare eccessivamente il profilo degli strati e sono costituiti da punte in acciaio metalliche, dritte o arcuate. Anche questi strumenti come i coltivatori non eseguono la rivoltatura ma favoriscono invece il sollevamento del terreno lavorato e possono essere responsabili di un'indesiderata zollosità superficiale in terreni tenaci; per questo motivo sono adatti una rottura del terreno che non prevede l'utilizzo dell'aratro.
Sicuramente queste due macchine svolgono un lavoro diverso rispetto all'aratro, meno invasivo: questo significa che tali tecnologie possono sostiture questo strumento solo in un'ottica particolare da valutare singolarmente per ogni situazione, non come norma.
In questo caso i dati sono stati ricavati dal Pellizzi [153], oltre che da articoli già citati in precedenza relativi a macchine trainate da trattrici [176] [179] [177] e animali [174] , a meno di un dato relativo alla valutazione di efficienza energetica di una coltivazione di mais nel Nord Est del nostro paese [183].
Il grafico relativo alla produttività (figura 89) vede le tecnologie a trazione equina arrivare fino a 0.5 ettari per ora, poco meno delle tecnologie a combustione interna di "piccola" taglia (52 e 67 kW). Si nota come ci sia una "biforcazione": una tendenza all'aumento ma con bassa pendenza per quanto riguarda il ripuntatore a maggiore potenza mentre la tecnologia dei coltivatori (chisel) a parità di potenza esercitata delle produttività molto maggiori. Si tratta comunque di un aumento di produttività di un fattore 7 per il coltivatore più produttivo contro una necessità di potenza che aumenta di due ordini di grandezza rispetto alle tecnologie a trazione animale. La differenza di produttività però potrebbe anche essere imputabile alla differenza di composizione del terreno, sciolto quello lavorato dai coltivatori, tenace quello specifico del ripuntatore a maggior utilizzo di potenza; senza considerare la profondità di aratura meno importante per il caso del coltivatore da 160 kW. Queste considerazioni saranno enfatizzate nel grafico relativo alla produttività specifica in figura 90, per il quale si è utilizzata una scala semilogaritmica, questa volta per l'asse della produttività specifica. Qui, come per i casi precedenti, c'è una netta divisione tra i mezzi a trazione animale e quelli trainati da trattrice, che vedono una differenza mediamente di un ordine di grandezza. Non c'è comunque una tendenza visibile per quanto riguarda le tecnologie all'aumentare della potenza, se non un valore di produttività specifica più alto dei coltivatori rispetto ai ripuntatori.

Figura 88 Coltivatore (chisel) a sinistra, ripuntatore a destra [204] [205]

LA: Lavoro Animale; CI: Combustione Interna; S: Terreno Sciolto; M: Terreno Medio; T: Terreno Tenace

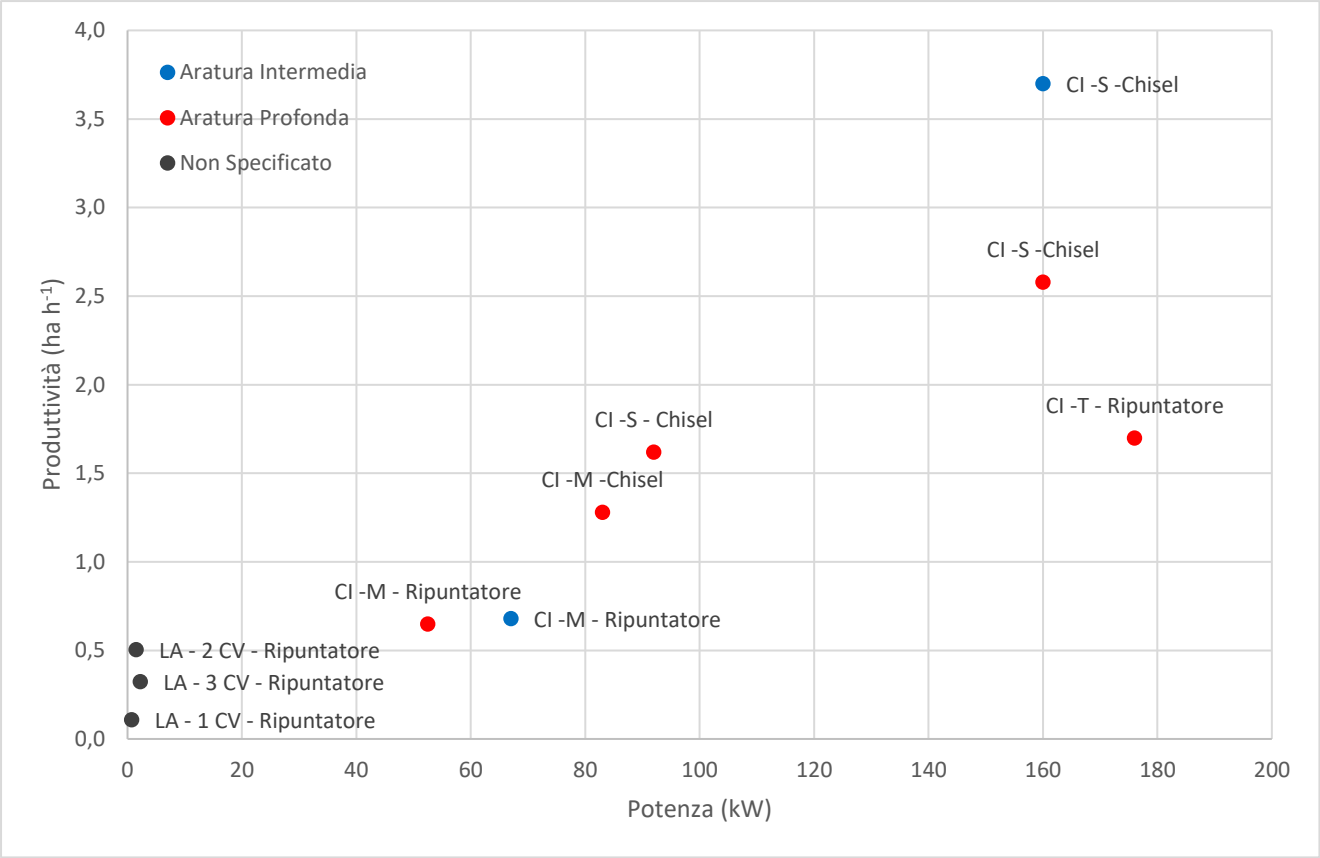


Figura 89 Potenza e produttività per Coltivatori (Chisels) e Ripuntatori

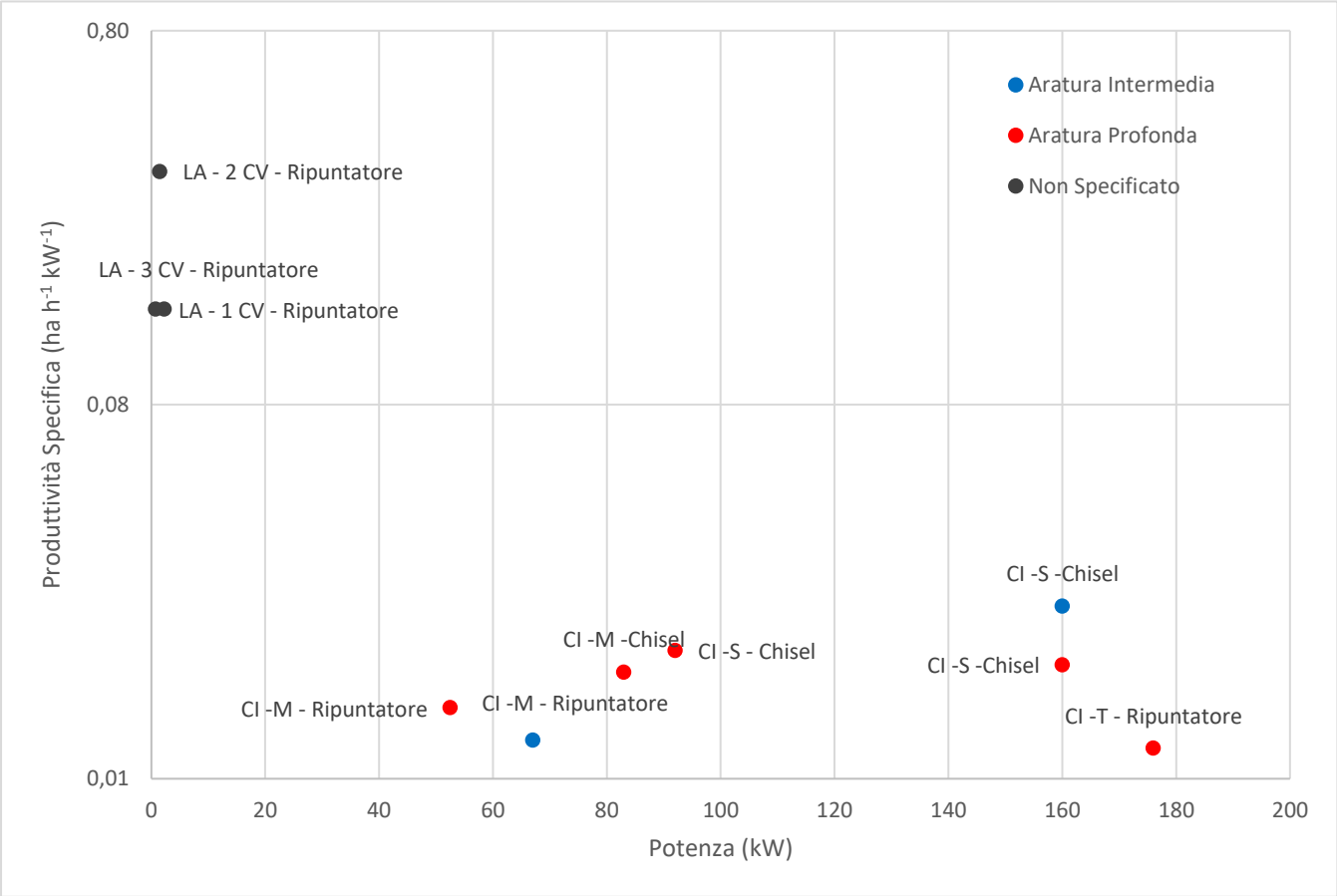


Figura 90 Produttività specifica in funzione della potenza per coltivatori (chisels) e Ripuntatori

L'ultimo strumento riguardante il dirompimento del terreno è la *vangatrice* (figura 91). Questa viene azionata dalla Presa di Potenza a differenza delle precedenti soluzioni; la macchina tende a riprodurre i movimenti manuali nell'utilizzo della vanga. Il funzionamento è strutturato su un quadrilatero articolato e ogni vanga si trova all'estremità di una biella azionata grazie all'energia fornita dalla PDP. Le vanghe penetrano nel terreno, separano la zolla e gettandola in avanti, rivoltandola parzialmente. Queste macchine ovviano all'inconveniente della suola di lavorazione, consentono un miglioramento per quanto riguarda il livellamento superficiale e l'amminutamento del terreno. Nonostante ciò, la bassa velocità di avanzamento determinata dal rapporto tra la velocità di avanzamento del trattore rispetto alla periferica media della vanga è limitata da motivi di equilibrio dinamico; questa caratteristica, unitamente a un rivoltamento delle zolle di scadente qualità, rende queste macchine meno utilizzate rispetto alle altre tecnologie descritte [153].
I dati sono stati ricavati dal Pellizzi [153] e il Romanello [140] e i grafici saranno mostrati in comparazione al metodo manuale a vanga, così da avere un confronto tra le due diverse tecnologie a parità di tecnica di base.
Per riuscire a rendere i dati comparabili con un significato è stata adottata la scala logaritmica per le produttività in figura 92. Si nota quanto siano abissali le differenze in termini di potenza assorbita e quanto anche la produttività aumenti molto grazie alla potenza disponibile superiore. Per quanto riguarda la produttività specifica (figura 93) si è adottata la scala logaritmica questa volta per le potenze. Mentre la diminuzione in termini di produttività specifica dovuta alla differenza di composizione del terreno per il lavoro manuale è visibile, le vangatrici rimangono sullo stesso livello a prescindere dall'aumento di potenza. Nonostante questi grafici possano sembrare poco significativi svelano invece qualche peculiarità: in questo metodo è evidente la mancata evoluzione in termini tecnologici e si nota come debba intervenire il motore primo perché ci possa essere un aumento di prestazioni in termini produttivi, o meglio, come un miglioramento in termini produttivi possa essere conseguito solo con una maggiore potenza a disposizione: il metodo di vangatura della macchina, in termini cinematici, riproduce quello eseguito dall'uomo . In questo caso si palesa la maggiore efficienza del corpo umano rispetto alla macchina, a parità di tecnologia: per un aumento di produttività di un ordine di grandezza, è necessaria un incremento di potenza disponibile di due ordini di grandezza (oltre un fattore che varia da due a sei).
In questo caso non si ha fatto nessuna distinzione in termini di profondità in quanto in entrambe le tecniche si superano i 20 cm, non oltrepassando i 30.

Figura 91 Vangatrice moderna, azionata dalla PDP [206]

LU: Lavoro Umano; CI: Combustione Interna. S: Terreno Sciolto; M: Terreno Medio; T: Terreno Tenace.

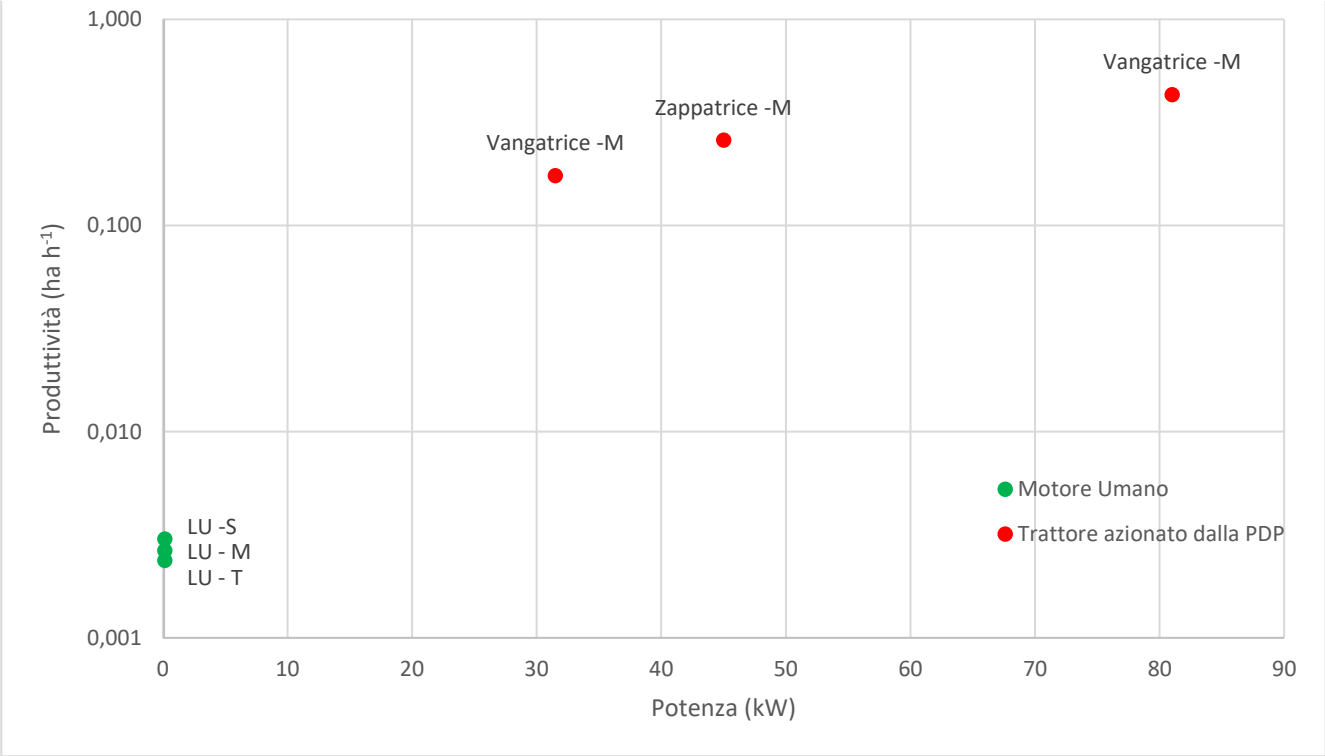


Figura 92 Potenza e produttività per vangatura manuale e meccanica

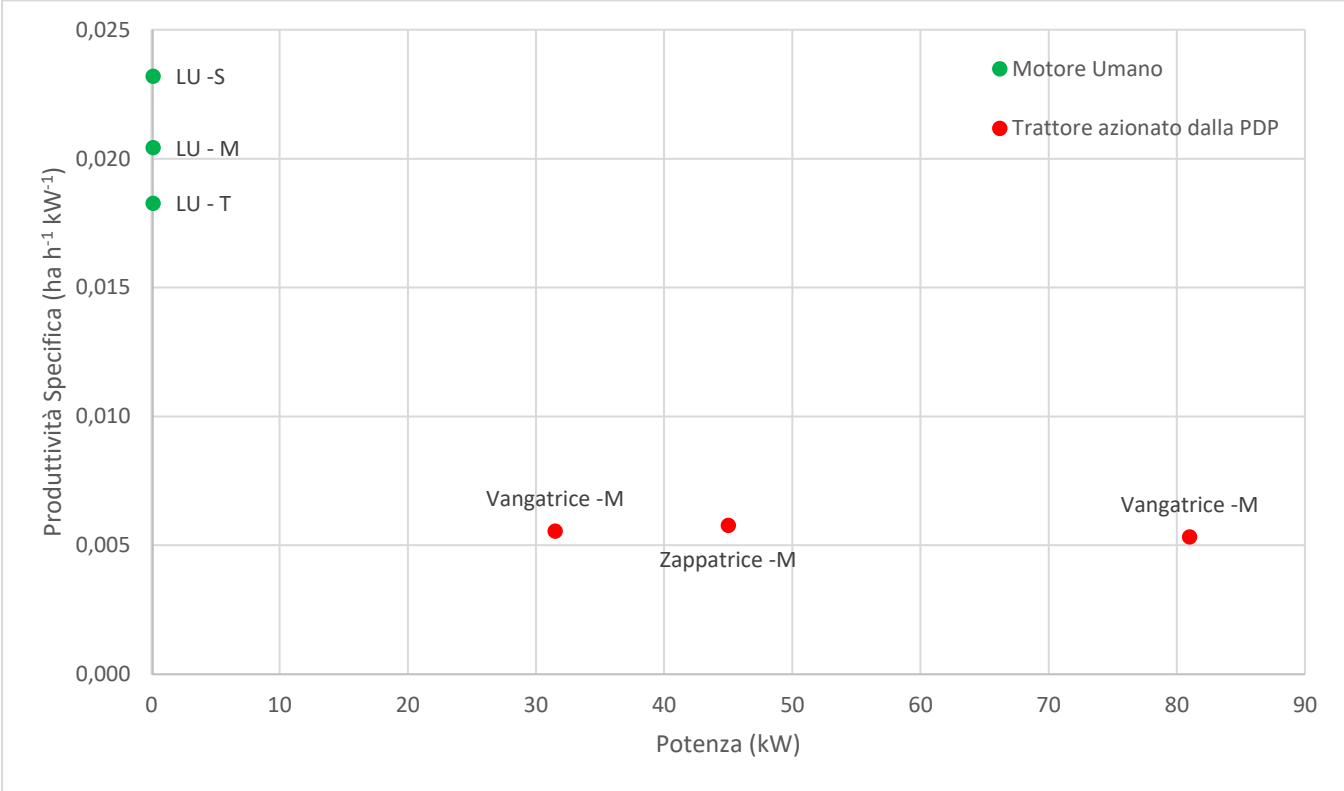


Figura 93 Produttività specifica e potenza per vangatura manuale e meccanica

5.3 L'analisi complessiva

Vista la grande quantità di dati, anche per motivi di lettura dei grafici, è stato scelto di mostrare i grafici comprensivi di tutte le tecnologie studiate prima mantenendo tutti i punti (e a scala "naturale") così da poter avere una visione d'insieme, per effettuare successivamente una selezione dei dati così da mantenere i punti più rappresentativi di ogni tecnologia, focalizzandosi su un livello più specifico.
In figura 94 si è scelto di effettuare una sudddivisione per tecnologie: **aratri a versoio** senza distinzione per numero di vomeri o simili, **aratri a disco**, **ripuntatori e coltivatori**, **vangatura**.
Partendo dalle considerazioni più immediate, il trend di aumento di produttività in funzione della potenza si verifica per tutti i metodi analizzati. Si possono fare sicuramente considerazioni diverse tra le tecnologie, in particolare riferendosi alle pendenze: la pendenza maggiore, quindi quella per cui un aumento di potenza si traduce in modo più efficace in termini di produttività, è quella relativa a coltivatori e ripuntatori, seguita da aratri a versoio e disco, infine vangatrici.
Può essere fatta anche un'altra considerazione che poi verrà approfondità debitamente: essendo le tecnologie a trazione animale non superiori a 10 kW in termini di utilizzo di potenza si nota come in quel punto del grafico le pendenze siano decisamente più spinte: a un aumento di potenza per le tecnologie con motore primo animale corrisponde un guadagno superiore in termini di produttività rispetto a quanto non succeda per le tecnologie che sfruttano un motore primo a combustione interna.
In figura 95, in termini di produttività specifica, tale considerazione si palesa. Si potrebbe definire uno spartiacque pari a 10 kW, rappresentativo del grafico. Per potenze relative alla trazione animale e quindi inferiori ai 10 kW lo sviluppo è "verticale": per piccoli salti di potenza si ottengono grosse variazioni in termini di produttività unendo le considerazioni fatte per il grafico di figura 93 relativo alla produttività. Per le tecnologie dotate di motore primo a combustione interna succede l'opposto: oltre i 10 kW per ottenere piccole variazioni di produttività sono necessari enormi sforzi in termini di potenza, comportando un appiattimento nella curva della potenza specifica.
Questo limite non può essere inteso come assoluto in termini quantitativi, ma ricorrente in termini qualitativi nelle tecnologie considerate fin'ora.
La distribuzione di punti, a prescindere dai precedenti ragionamenti, vede un andamento evidentemente iperbolico che palesa la difficoltà (non ci sono le basi per poter affermare che sia impossibilità), nell'ottica di un cambio di motore per le lavorazioni considerate, della tecnologia nello stare al passo con la *maggior densità di potenza disponibile* in termini di efficienza produttiva o produttività per unità di kW.
In generale si può affermare che in termini di potenza specifica ci sia una differenza di un ordine di grandezza tra le tecnologie a diverso motore primo; si proverà ora a scendere più nel dettaglio, provando a identificare i punti in modo più efficace.
Va comunque sempre tenuto in mente che il confronto tra le diverse tecnologie non può essere condotto puntualmente sullo stesso piano: come già detto precedentemente confrontare la produttività di un aratro bivomere con un ripuntatore non può fornire risultati obiettivi, in quanto tecnologie atte allo stesso scopo ma attraverso specifiche diverse, con effetti diversi: l'analisi non può essere considerata "lineare". Ha invece senso fare dei confronti per evincere sviluppi tecnologici a un livello più ampio, quando queste considerazioni assumono un peso inferiore, o puntualmente per le stesse tecnologie al variare della potenza disponibile.

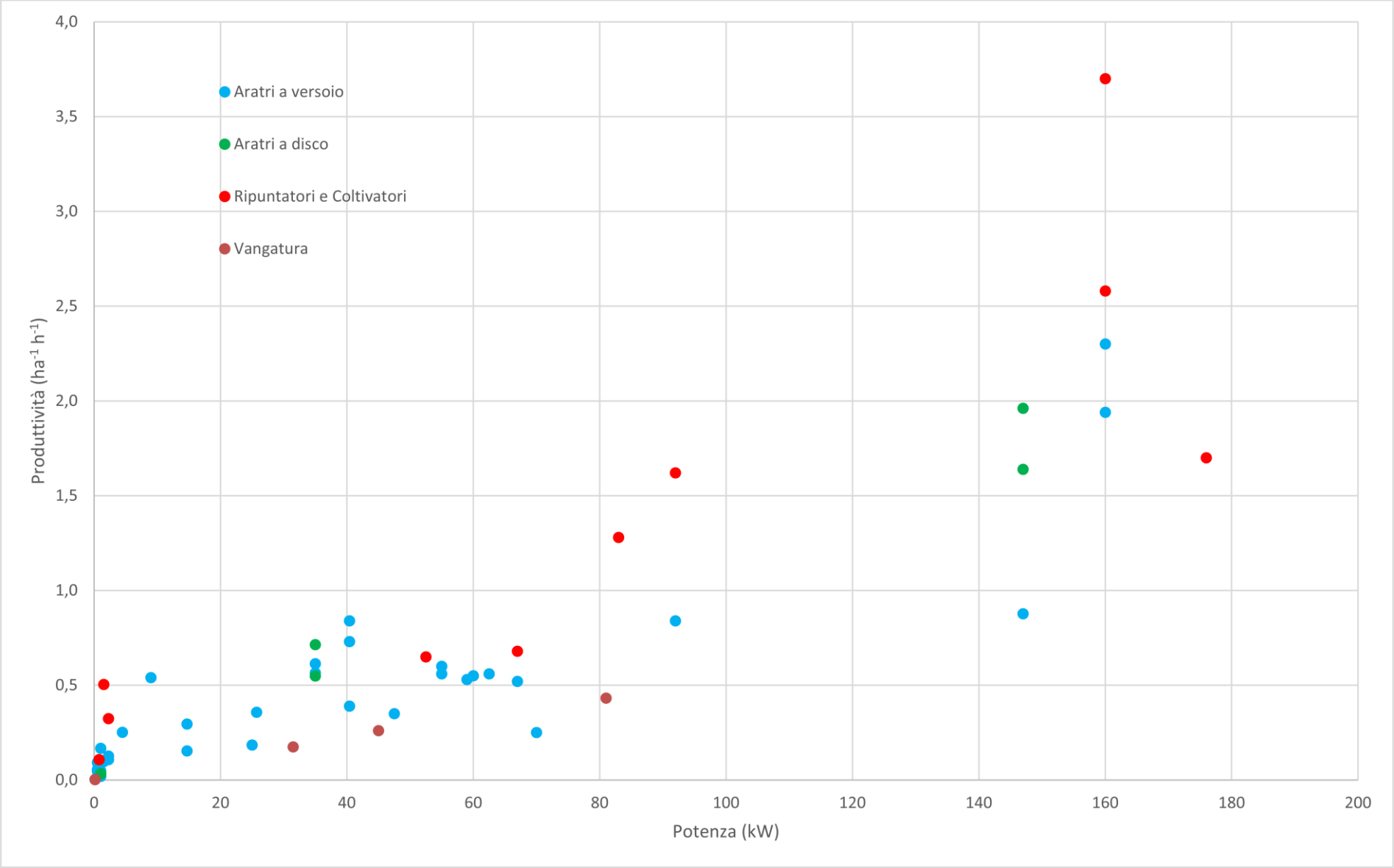


Figura 94 Potenza e produttività per le diverse tecnologie di aratura

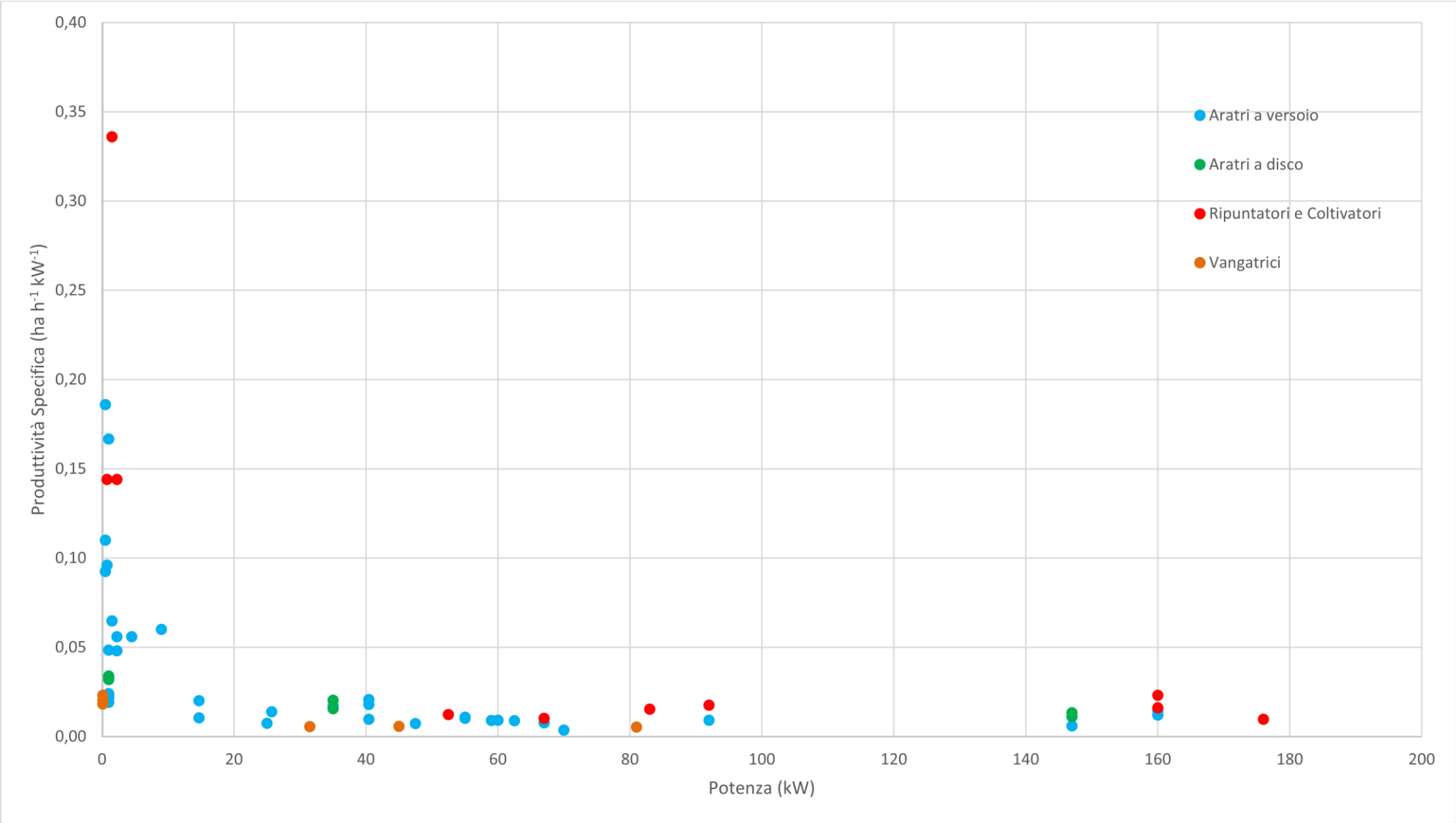


Figura 95 Produttività specifica in funzione della potenza per le diverse tecnologie di aratura

Al fine di effettuare un'analisi il più possibile significativa per quanto riguarda la rappresentazione del grafico della potenza, una volta scremati ulteriormente i dati, si è scelto di fare una divisione nelle figure 96 e 97; nella prima sono stati considerate le tecnologie ache si avvalgono di motore primo a **lavoro umano o animale**; nella seconda si sono considerate le tecnologie **a combustione interna**. In entrambi i casi gli assi sono in scala logaritmica e si sono considerate la profondità di aratura (**Superficiale**, **Intermedia**, **Profonda**, **NS** se Non Specificato nei dati) e il tipo di terreno (**Sciolto**, **Medio**, **Tenace**). Nel caso di aratri multivomere si è indicato anche il numero dei vomeri, in quanto di interesse tecnologico.
Analizzando i due grafici la prima cosa da notare è come siano diverse le pendenze (le scale sono le medesime, cambiano i valori in cui queste sono rappresentate); al di là dei termini relativi, le due curve hanno pendenze diverse: questo significa che le tecnologie si sviluppano in modo "migliore" dove la pendenza è maggiore, ovvero dove a un pari aumento di potenza corrisponde un maggiore aumento di produttività; in altri termini quanto il "progresso tecnologico" stia al passo con l'aumento di potenza; è evidente come la "pendenza media della distribuzione di punti" sia superiore nei mezzi a trazione animale o lavoro umano.
È interessante inoltre come questa osservazione sia generalizzabile anche dalle tendenze relative alle singole tecnologie, oltre che considerandole nell'insieme: questo indica che l'utilizzo del tipo di motore primo gioca un peso macroscopicamente più importante rispetto alla tecnologia utilizzata in questa lavorazione.
Considerando anche la tessitura del terreno e la profondità di lavorazione, si nota come queste variabili non influenzino in modo macroscopico la tendenza dei punti nei due diversi grafici.
In figura 98 e 99 si è proceduto allo stesso modo. In questo caso però ben poco si può dire, in particolare per quanto riguarda i motori primi a combustione interna. Se non per ripuntatori e coltivatori, è difficile individuare un qualche tipo di tendenza. Quello che è significativo è invece la differenza nell'ordine di grandezza delle scale: mentre per i motori a scoppio il valore minimo è pari 0.005 ha h^{-1} kW^{-1} e quello massimo a 0.025, per i motori a trazione animale si parte da un minimo di 0.023 a un massimo di un ordine di grandezza superiore.
Per quanto riguarda i motori animali si nota un andamento meno disperso e una tendenza a diminuire la produttività specifica con l'aumentare della potenza disponibile, fermo restando la presenza in una zona ad "alta" produttività specifica.

Figura 96 Produttività e potenze delle tecnologie di aratura a trazione animale e lavoro umano

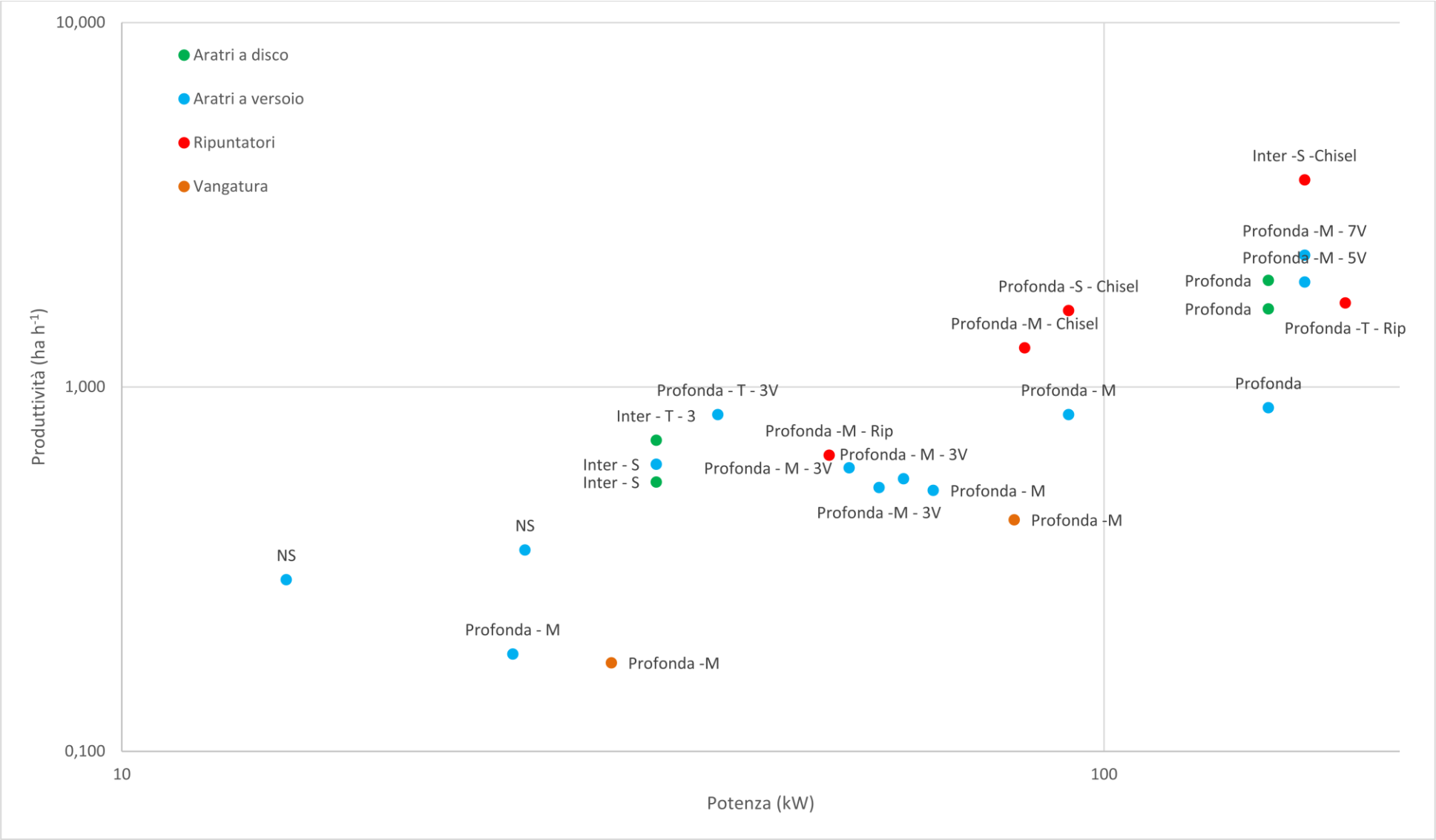


Figura 97 Produttività e potenza delle tecnologie arative con motore primo a combustione interna

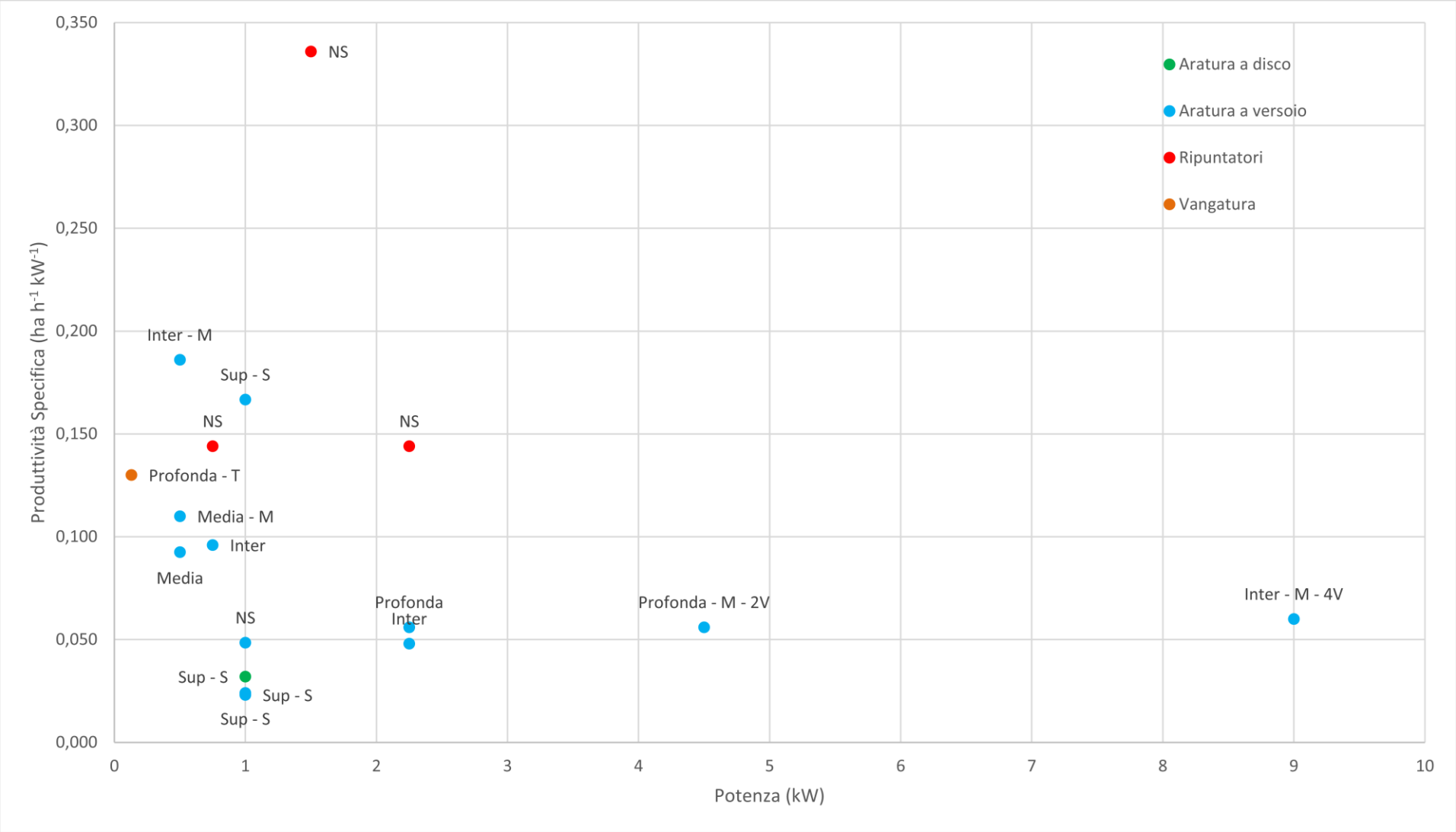


Figura 98 Produttività specifica in funzione della potenza per tecnologie a trazione animale

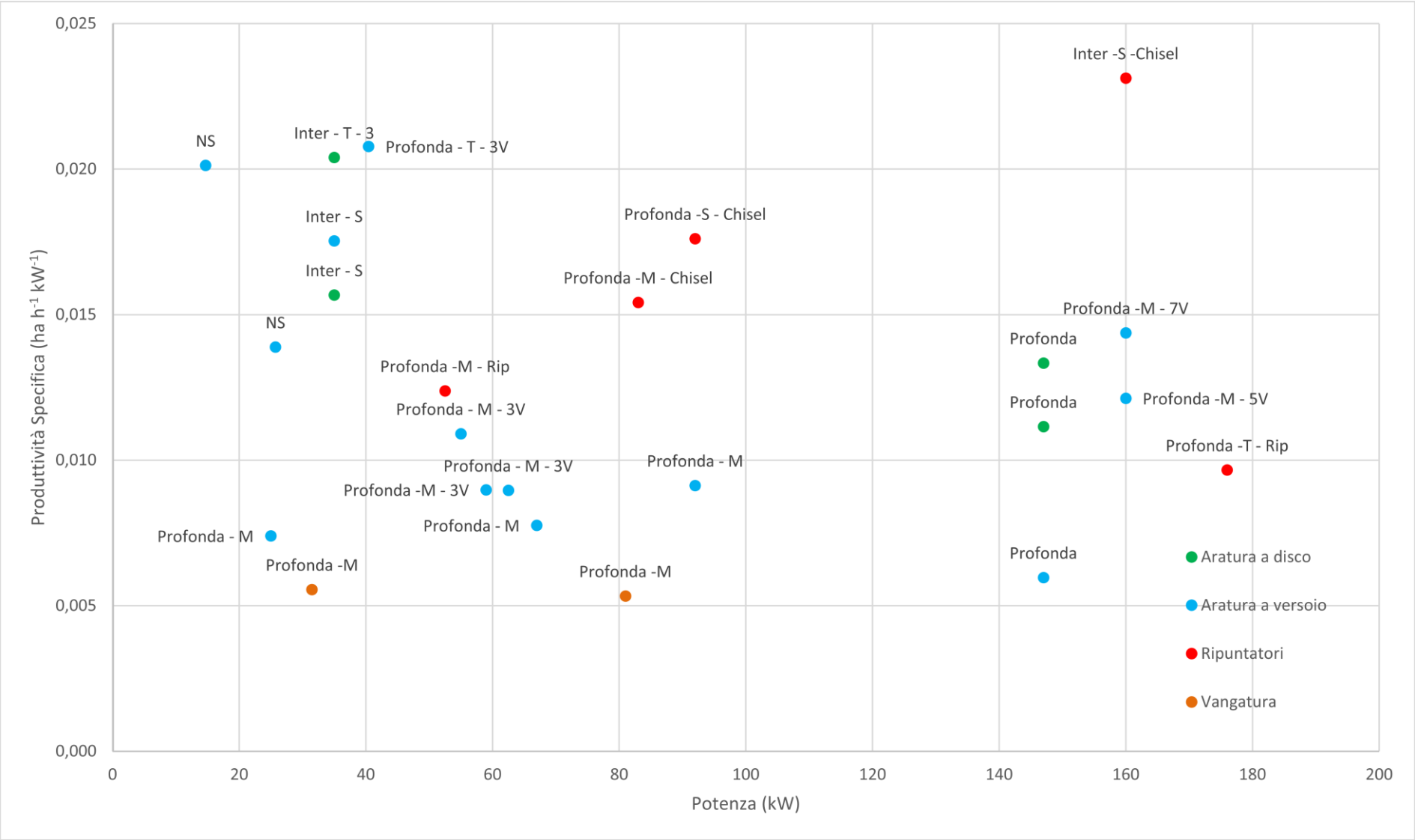


Figura 99 Produttività specifica in funzione della potenza per tecnologie a combustione interna

6. CONCLUSIONI

"L'uomo -per una simbiosi efficiente- deve mettere anche lui le radici nel proprio terreno, immedesimarsi con i multiformi membri della comunità biologica di cui si trova a capo, interpretarne le condizioni di prosperità, prodigarsi senza posa per assicurare tali condizioni. […] L'agricoltore simbionte attende al respiro di ogni organismo che gli è intorno. […] Anche il suolo è membro della comunità che ha bisogno di esser interpretato non meno degli animali e delle piante, ha bisogno di cure amorevoli e intelligenti per farsi fertile dispensatore di raccolti. L'agricoltore simbionte intuisce che tutto, nell'azienda, dipende in primo luogo da questo substrato informe e immobile, il quale pure cela facoltà miracolose, risorse impensate, una vitalità arcana e fragile; e l'uomo si dà da fare, anzitutto, per rinvigorire il terreno, per renderlo sano e fecondo, prima ancora di pensare a sé stesso [184]."

Giovanni Haussmann, "La terra e l'uomo. Saggio sui principi di agricoltura generale"

Alla luce delle analisi effettuate si evince che in una logica di efficienza andrebbero fatte delle analisi ben più approfondite rispetto a un approccio che tenda alla meccanizzazione appropriata.
È stato evidenziato come il percorso svolto nella meccanizzazione agricola non possa esulare dalla dicotomia motore primo-complessità tecnologica. Si è visto come a partire da tecniche utilizzate da millenni si sia passati in due secoli a uno sconvolgimento totale nelle operazioni agricole: i cavalli sono stati utilizzati dall'uomo per migliaia di anni e la mietitrice gallica esisteva tre secoli prima di Cristo, com'è possibile che un livello di produttività pari a un ettaro ora sia stato raggiunto solo con la "Houser", nel 1900? La disponibilità in termini di motore primo non rende automatica la conoscenza della tecnologia adatta a sfruttarlo.
A fine '800, d'altra parte, si rese disponibile un nuovo motore primo, quello a vapore; eppure non è stato possibile, a livello tecnologico, adattarlo a degli utilizzi che potessero essere proficui per la realtà agricola: si dovrà aspettare l'avvento del motore a scoppio perché un motore primo a maggiore densità di potenza sia disponibile per usi agricoli. E si dovrà aspettare qualche altro decennio prima che per le mietitrebbie sia sviluppata la tecnologia a flusso assiale che permette di superare la soglia dei due ettari ora.
Dalle analisi effettuate si nota come le efficienze, ciononostante, diminuiscano con l'aumento della potenza utilizzata. Al di là di analisi puntuali, è evidente come nei motori animati la quantità di energia utilizzata a parità di ettaro (kW h ha^{-1}) tenda ad aumentare progressivamente con l'aumento di potenza, ovviamente parlando

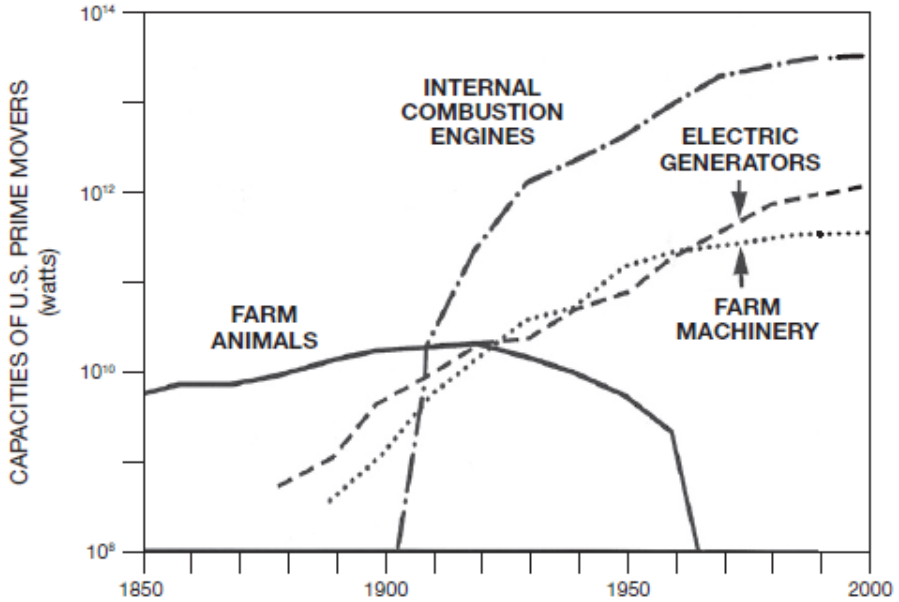


Figura 100 Capacità dei motori primi negli Stati Uniti [4]

di tecnologie mature rispetto al motore primo: è ovvio che la tecnica del correggiato, per quanto utilizzata ancora oggi, non possa competere in questo senso.
Dal grafico in figura 100 è evidente questo passaggio, e ancora più evidente è come siano aumentate le potenze messe in gioco in campo agricolo in modo congruo: in 30 anni dalla loro diffusione i motori a scoppio eguagliano la potenza del parco "animale", decuplicando la potenza utilizzata in altri vent'anni. Ovviamente questo modello è indicativo degli Stati Uniti, ma estendibile anche agli altri paesi del I mondo. Non si può affermare invece sia accaduto lo stesso nei paesi del II e III mondo, anche se in quelli in fase di industrializzazione la direzione verso cui si punta è la medesima.
Facendo un passo indietro, nel 1910 gli Stati Uniti godevano, per quel che riguarda il "parco animale" per uso agricolo, di 24.2 milioni tra cavalli e muli e solo 1'000 piccoli trattori. Nel 1918 gli animali da traino salgono a 26.7 milioni, i trattori a 85'000 elementi. La superficie necessaria al mantenimento di questi animali, in termini di avena e paglia, ammonta a circa 30 Mha sui 125 utilizzati in quel periodo dall'agricoltura americana: questo significa che un quarto delle colture erano destinate a soddisfare il fabbisogno degli animali da traino. Se si volesse rimpiazzare il parco macchine agricole americano attuale con un equivalente, in termini di potenza a trazione animale, si dovrebbe disporre di un numero di animali almeno dieci volte superiore ai numeri appena citati: servirebbero quindi circa 300 Mha solo per nutrirli, ovvero il doppio del terreno arabile utilizzato oggi negli Stati Uniti [4]. Un tale ragionamento si può comprendere con più semplicità analizzando a figura 101: la densità di potenza resa disponibile dai motori a scoppio è di diversi ordini di grandezza superiore rispetto al motore umano e dello stesso motore a vapore dei primi del '900, che necessitava di grosse e ingombranti macchine per funzionare. Un motore a vapore da dieci cavalli dell'epoca abbisognava inoltre di una squadra di addetti al suo funzionamento, inconvenienti che il motore a combustione interna ha permesso di ovviare: si nota come il rapporto peso/potenza diminuisca di diversi ordini di grandezza nel corso della prima metà del '900 per i motori a scoppio, motivo che giustifica ampiamente da un punto di vista ingegneristico il largo utilizzo che ne è stato fatto e ne viene fatto tutt'ora.
Si capisce quindi quanto sia complesso stabilire un compromesso, un limite tra il sostenibile e il non. Sicuramente una meccanizzazione tanto spinta ha anche permesso di ridurre il tempo necessario a produrre

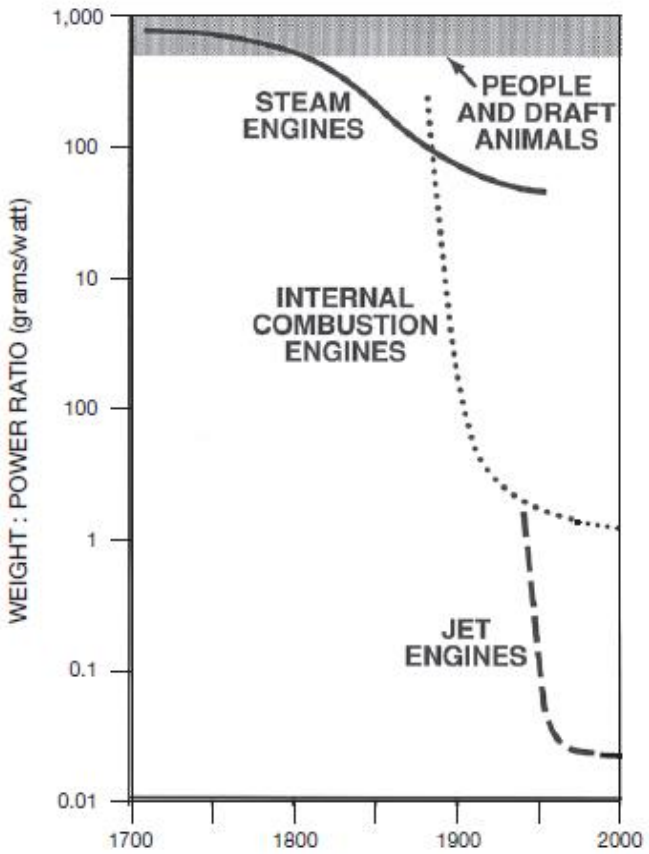


Figura 101 Rapporto massa/potenza di diversi motori primi nel tempo [4]

la singola tonnellata di prodotto agricolo, quindi incrementando la produttività del lavoro: come descritto precedentemente, negli Stati Uniti la coltivazione del grano necessitava di 30 ore di lavoro umano su tonnellata nel 1800, passando a meno di 9 h t^{-1} nel 1900 e a 90 min t^{-1} [4], diminuendo quindi di venti volte. Dai dati calcolati in questa trattazione le ore di lavoro per tonnellata di grano solo per le fasi di mietitura e trebbiatura passano dalle 140 h ha^{-1} del metodo tradizionale antico ai 6 min ha^{-1} della mietitrebbia record della New Holland del guinnes dei primati. Questi valori eludono però dalle logiche di efficienza considerate precedentemente, riallineandosi piuttosto con la mentalità di massimizzazione della produttività come unica variabile considerata.

Per analizzare in modo più completo anche le altre variabili che concorrono a una visione più ampia del problema non ci si può limitare alla meccanizzazione, soprattutto nel momento in cui si tratta di pratiche agricole. Un'analisi più ampia deve convergere anche sui tanti altri sussidi, energetici e non, che concorrono a creare la realtà agricola odierna. L'agricoltura non è surrogabile a un mero modello industriale e non può essere trattata in un'ottica di semplice massimizzazione della produzione; non si tratta di lavorare le macchine, ma la terra: un composto organico vivo, non assimilabile a un corpo inerte, pena l'alterazione di equilibri biologici fondamentali per il sostentamento della specie umana, pensiero perfettamente espresso da Haussman.

Grazie al lavoro eseguito è possibile fare delle riflessioni rispetto al significato di meccanizzazione. L'analisi storica, in particolare, porta a convergere verso la necessità rispetto a una formulazione di nuovi paradigmi in termini di analisi delle tecnologie.

Il primo punto su cui porre attenzione è rispetto al significato stesso di tecnologia. Parlando di tecnologia, questa può essere intesa come l'espressione esosomatica di conoscenze empiriche o scientifiche, più o meno consapevoli, rispetto al conseguimento prima della formulazione di un'attività non realizzabile in assenza dello strumento esosomatico, poi di un'evoluzione della stessa e quindi in termini di miglioramento della tecnologia in funzione dell'operazione da svolgere. È necessario, per completare il quadro, considerare anche un'evoluzione della tecnica per il conseguimento dell'operazione stessa, o una sostituzione con una più efficace per lo strumento in gioco.

L'essere umano senza l'ausilio di strumenti esosomatici, volendo lavorare un terreno al fine di ararlo a mani nude, conseguirebbe dei risultati pessimi al limite della possibilità stessa di poterli eseguire. La semplice sostituzione delle mani come strumento di lavoro con un bastone (il primo strumento esosomatico utilizzato per l'aratura in antichità) consentirebbe già di rendere realizzabile, seppur terribilmente poco efficiente, una lavorazione del terreno. Uno strumento come la vanga rappresenta un vantaggio impressionante. Questo processo rappresenta bene il concetto di evoluzione tecnologica: la *tecnica* (vangatura) consente prima la realizzazione di un'operazione prima impossibile da realizzare, fornisce il metodo. In una fase successiva, l'evoluzione della tecnica intesa come *tecnologia*: un miglioramento dello strumento rendendolo più adatto a quella tecnica tramite una "trasformazione" da parte dell'uomo. Si parla di produttività in questo caso, ma il concetto può essere esteso a qualsiasi lavorazione: può essere considerata la capacità di trasporto per un mezzo di locomozione, il rendimento di un motore endotermico in termini di trasformazione energetica, più in generale una misura di efficacia rispetto a un effetto utile. Si parla quindi di tecnologia come *mezzo che migliora l'esercizio di un'operazione attraverso lo sviluppo di strumenti esosomatici che, mediante una determinata tecnica* (che può prestarsi a un'evoluzione tecnologica, appunto), *permettono di espletare un'operazione in modo più efficiente*. Il tutto a parità di motore primo utilizzato e quindi senza una variazione in termini di disponibilità di potenza diretta (sicuramente saranno necessari degli sforzi esterni affinchè si godere dell'uso di un determinato oggetto, in termini sia di materia che di energia, oltre che di sforzo mentale o ingegno).

Si distinguono quindi tre ambiti ben distinti: il *motore primo*, o sorgente; la *tecnica*, il metodo, che rende possibile l'operazione desiderata. La *tecnologia*, lo strumento, come si mette in esercizio la tecnica.

Mentre il motore primo è "facilmente" quantificabile, non è altrettanto facile quantificare tecnica e tecnologia: la produttività in questo contesto rappresenta una misura di quanto tecnica e tecnologia siano efficaci nell'espletamento di questa o quella operazione; l'aumento di potenza disponibile in senso diretto introduce una variabile fondamentale in termini tecnologici: in tutti i grafici relativi alla produttività specifica, se non per qualche caso isolato, vede un trend negativo nell'aumento di potenza; infatti quando si parla di produttività specifica, non si fa altro che determinare una densità di produttività, in questo caso riferita all'unità di potenza,

ed è interessante notare come nel passaggio dai motori animale o umano ai combustibili fossili questa si renda meno disponibile.
Qui si palesa la dicotomia tra motore primo e tecnica adottata (con corrispondente perfezionamento tecnologico della tecnica stessa): urge la necessità di dividere questi aspetti, così da capire come porsi in modo efficace rispetto ad essi. Quando la medesima tecnica (quella umana di zappatura) viene adottata in modo "rivisitato" per una macchina in termini cinematici e di principio, il risultato è un aumento di potenza necessaria per unità di kW: l'operazione di vangatura è sicuramente efficiente a parità di motore primo per l'essere umano rispetto all'utilizzo di un semplice bastone, ma evidentemente con una disponibilità di potenza maggiore non lo è altrettanto. In questa chiave la produttività specifica ne diventa un indicatore adeguato, in quanto mette in evidenza la necessità di cambiamento o evoluzione della tecnica in rapporto alla potenza disponibile e quindi al motore primo. Questo porta a riflettere su come un aumento in termini di densità di potenza, per mantenere dei livelli costanti in termini di efficacia, produttività specifica o comunque sia effetto utile per unità di potenza, necessiti di un'evoluzione tecnica adeguata piuttosto che un "adattamento" tecnologico.
Invertendo il paradigma, l'inverso della produttività specifica rappresenta una densità di energia (kWh ha^{-1}), ovvero di quanta energia si necessita per lavorare una determinata superficie data quella determinata tecnica con un certo livello tecnologico rispetto al tipo di motore primo utilizzato. In questo passaggio, rispetto alla formulazione precedente, si "perde" l'informazione rispetto alla velocità con cui viene effetuata l'operazione, nel senso che si passa dalla velocità nell'eseguire l'operazione per lavorare il singolo ettaro all'energia sfruttata per lavorarlo. D'altra parte questa rispecchia l'aumento in termini di energia per lavorare quel medesimo ettaro di terreno, quasi il prezzo da pagare per poter disporre di una potenza istantanea disponibile superiore. Con una suddivisione in questi termini si apre la strada per considerazioni ben più profonde rispetto a quelle fatte fin'ora, identificando una strada meno fumosa nell'obiettivo di definire una tecnologia adatta o, meglio, una meccanizzazione appropriata.
Alla luce di un tale cambio di paradigma la prima domanda da farsi è: su che livello di potenza disponibile è bene puntare per ricercare una tecnica efficace e sensata da sviluppare in termini tecnologici? Si può definire un livello di potenza limite? E ancora, l'aumento di potenza disponibile è in qualche modo collegato ad altri parametri (disponibilità di energia, flusso di potenza disponibile in senso macroscopico, livello tecnologico della civiltà, ecc)?
Come visto nel capitolo 4 i paesi che dispongono di una maggiore potenza disponibile sono i paesi industrializzati, potenza collegata a una maggiore meccanizzazione e consumi in termini di energia atta a produrre queste macchine. Inoltre dal lavoro effettuato è ovvio come un aumento di energia per ettaro sia associato a un aumento di potenza per conseguirlo a parità di tecniche.
Una riflessione di questo tipo porta a separare nettamente la meccanizzazione in termini di motore primo da quella relativa all'evoluzione tecnologica della tecnica considerata. In un contesto quale quello agricolo, inoltre, non possono essere trascurate variabili biologiche, agrnomiche e agricole che esulano da una trattazione puramente ingegneristica: la produttività delle mietitrebbie dei campi americani è tale, oltre che per dinamiche relative al motore primo (quindi grande disponibilità di potenza), alla tecnica (mietitrebbiatura) e all'evoluzione tecnologica della stessa (tecnica di battitura a flusso assiale), anche grazie alla resa del campo: se invece di 9 t ha^{-1} ne avessi una, la produttività della macchina sarebbe inevitabilmente diversa; i meccanismi interni di pulitura e trebbiatura non sarebbero adatti a una velocità della macchina 9 volte superiore rispetto a quella di progetto per lo svolgimento delle operazioni di mietitura e trebbiatura associate, senza considerare il minor afflusso di granella in termini di densità. Si torna quindi a riproporre la necessaria separazione tra produttività agricola del terreno e del lavoro ripresa dagli studi fatti da Giampietro, scoprendo che la produttività del lavoro e della terra sono paratemetri interdipendenti, non possono essere completamente scollegate tra loro: per quanto si possa cercare di aumentare la produttività del lavoro, la produttività della terra è caratterizzata da un limite fisico e biologico che nelle monoculture intensive è già stato raggiunto.
Approfondendo questa tematica si possono allora scorgere limiti per ognuno dei tre aspetti (tecnica, tecnologa e motore primo) in senso di pressione bioeconomica, essendo questo il principale oggetto dell'analisi: il limite rispetto alla densità di potenza disponibile e quindi del motore primo è principalmente fisico (materiali, rendimenti di combustione o processo, disponibilità energetica limitata); per la tecnica il limite da un lato non è concretizzabile perché parte dell'ingegno umano, dall'altro principalmente tecnologico se rapportato alla

potenza resa disponibile da diversi motori primi: la tecnica di mietitura e trebbiatura per essere operate nello stesso momento urgono di una tecnologia che nei primi dell'800 non era accessibile principalmente per non disponibilità di potenza, oltre a non essere necessarie in quanto la pressione bioeconomica non era tale da imporre produttività del lavoro tanto intense, quindi impossibilità strutturali. Una maggior disponibilità di potenza in epoca successiva ha permesso lo sviluppo di queste tecnologie, inizialmente con evidenti limiti fisici dettati dal motore primo che nei primi del '900 rimaneva quello animale (la potenza esercitabile da un uomo con motore animale rimane limitata all'ordine del kW). Quindi se nei primi dell'800 il limitte era strutturale, nei primi del '900 lo è in termini tecnologici, ma rispetto al motore primo. Con adeguati perfezionamenti, spinti in particolare dalla maggiore disponibilità di potenza resa fruibile del motore a scoppio, la tecnica si è perfezionata permettendo miglioramenti in termini di produttività, anche se non monotoni (come ad esempio per la mietirebbiatura figura 69); si deve comunque considerare che il limite inferiore relativo alla produttività specifica di qualsiasi macchina per qualsiasi lavorazione, a parità di tecnica, è sempre inferiore rispetto a quello riferito al lavoro umano e animale, e questi miglioramenti non si verificano in tutte le tecnologie. L'aumento di produttività specifica a parità di tecnica si verifica solo nei grafici di mietitura e trebbiatura preindustriale (figure 58 e 49) e per le tecnologie appropriate, ma corrisponde a una diminuzione di potenza a parità di tecnica piuttosto che un aumento.
Si tratta quindi di identificare un "livello" di potenza disponibile, valutare le tecniche conosciute confrontandole in termini di efficienza e sviluppare le più performanti in termini tecnologici. Si può quindi parlare di meccanizzazione appropriata riferita a quella specifica disponibilità di potenza. In questo modo, inoltre, si va a scorporare l'efficienza del motore primo da quella di come viene utilizzato lo stesso (efficienza della tecnica rapportata a quella densità di potenza in funzione del livello tecnologico raggiunto dalla tecnica stessa): si tratta con due materie ben diverse, meccanica e termodinamica.
Attraverso questa distinzione si può indirizzare la meccanizzazione in modo estremamente più efficace: attualmente la prassi è di sviluppare una meccanizzazione indirizzata a tecniche convenzionali spesso riadattate a una maggiore disponibilità di potenza in quanto la produttività, a meno di casi isolati, aumenta sempre con l'aumento di potenza disponibile. Questa sfocia in una pratica poco razionale ed efficace, ragione in parte anche degli immensi squilibri tra paesi in via di sviluppo e sviluppati: non è un caso che nelle riviste AMA gli sviluppi tecnologici si rapportino a densità di potenza decisamente inferiori rispetto alle ricerche scientifiche svolte nei paesi industrializzati. È evidente come la disponibilità di potenza giochi un ruolo fondamentale che va diversificato dal macrotermine meccanizzazione per farne una valutazione adeguata.
Su queste basi è necessaria un'analisi che apre la strada ad approfondimenti rispetto alla disponibilità in termini fisici del motore primo atto a fornire quella determinata potenza, ovvero come viene resa disponbile, da che cosa. Mentre il motore animale e umano, come bene espresso da Roegen, sono trasformatori di energia rinnovabile[37], il motore scoppio produce lavoro meccanico tramite lo sfruttamento di risorse energetiche non rinnovabili.
In più si lascia lo spazio per un'analisi ben più approfondita, rispetto a un'analisi energetica: si potrebbe associare a quel kW, in funzione di come viene erogato, l'energia necessaria perché sia disponibile. Dare quindi un peso anche a come viene resa disponibile una certa densità di potenza (come fosse un LCA): l'energia necessaria per la costruzione di un motore a scoppio in termini di motore primo, o di una mietitrebbia piuttosto che una trebbiatrice a pedali per quanto riguarda la tecnologia associata alla tecnica. In questo modo si estenderebbe l'analisi in senso ben più ampio: per raggiungere alti livelli di produttività come nel modello staunitense non si può scindere l'aumento di produttività legato alla densità di potenza istantanea[38] per il singolo individuo all'energia disponibile; in quest'ottica, qual è la disponibilità energetica necessaria a rendere disponbile questa densità di potenza? È evidente in questo modo come si possa collegare un simile parametro ai consumi di un paese piuttosto che un altro, in cui si riflettono le differenze in termini tecnologici, per come viene intesa e in cosa si traduce la tecnologia oggi: un aumento della potenza resa disponibile dal motore primo usufruendo di metodi che non stanno al passo coi tempi in termini di produttività specifica.

[37] L'affermazione non è assolutamente corretta, in quanto ad oggi gli input antropici alla produzione di cibo provengono praticamente in toto dai combustibili fossili.
[38] Negli USA si passa, dai calcoli fatti per quel che riguarda la lavorazione del grano, da una potenza disponibile per individuo di circa 0.5 kW per persona nel 1800 ai 480 kW della New Holland.

Le società preindustriali sfruttavano flussi di energia rinnovabile in modo praticamente istantaneo mentre la civiltà moderna attinge enormi quantità di energia da uno stock di risorse finito: l'evoluzione della società dal momento in cui queste quantità di energia non rinnovabile sono state disponibili si è basata sullo sfruttamento di flussi sempre maggiori, consentendo in tutti i campi le evoluzioni necessarie per aumentare profitti e produttività del lavoro in modo esponenziale, a livelli praticamente asintotici. Le conseguenze sono quelle descritte in questo elaborato: l'industrializzazione, l'urbanizzazione, i trasporti, progressi tecnici e tecnologici che al di là di considerazioni soggettive hanno portato da un lato a un miglioramento delle condizioni di vita in senso generale; dall'altro la distribuzione delle risorse e dei benefici derivanti da queste innovazioni sono disponibili solo per una piccola parte degli abitanti il globo terrestre: l'affermazione è evidente osservando la curva che descrive l'indice di sviluppo umano[39] di diversi paesi in funzione dei consumi energetici pro capite (figura 102). A parte le disparità tra i consumi quello che è evidente è come oltre un certo livello di consumi l'HDI si attesti a una condizione asintotica, senza che ci sia un miglioramento della qualità di vita.
Le conseguenze più pericolose derivanti dalla dipendenza da grandi flussi di energia sono il degrado dell'ambiente già ampiamente descritto e l'impossibilità di abbandonare i metodi e le pratiche esistenti evolutesi dalla scoperta nell'utilizzo dei combustibili fossili. Il secondo fenomeno è meglio illustrato dall'impossibilità di tagliare i sussidi ad alta necessità energetica nell'agricoltura moderna senza trasformare profondamente l'intera società [4]: il paradosso è perfettamente esemplificato dalla condizione americana per il nutrimento degli animali da tiro nei primi del '900, con la differenza fondamentale che il passaggio da un sistema agricolo all'altro si è fondato sull'utilizzo di motori primi a maggiore intensità energetica e con un peggioramento dell'efficienza produttiva. La sfida odierna comporterebbe invece il passaggio a fonti di energia

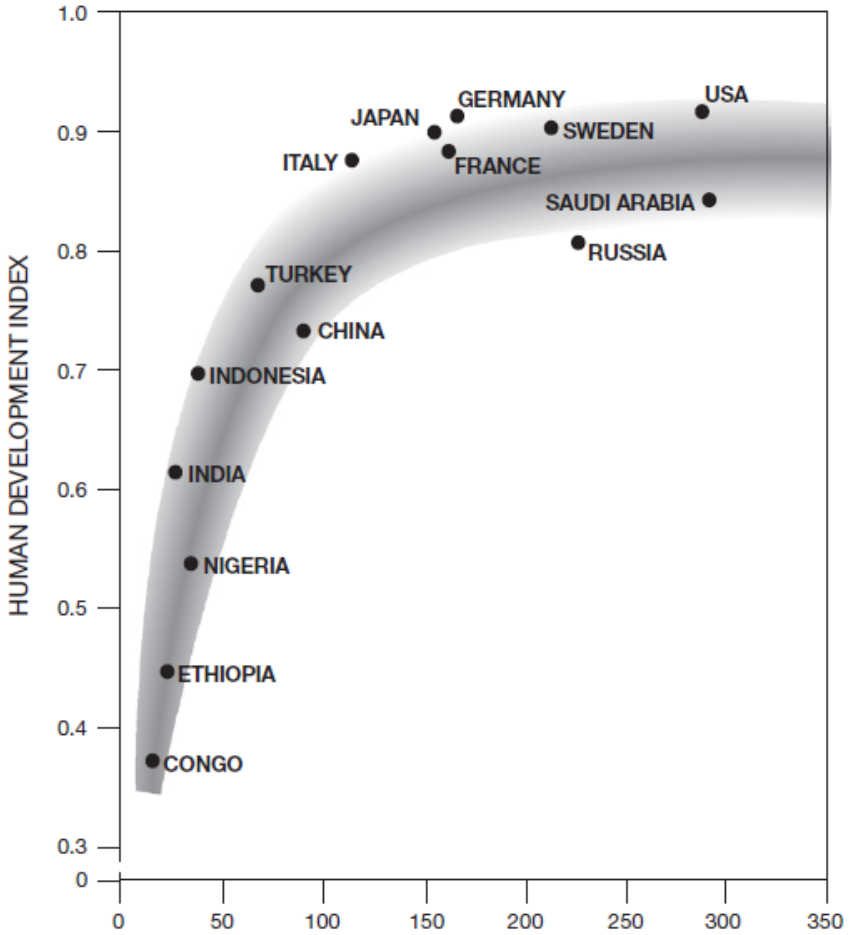


Figura 102 Indice di sviluppo umano e consumi energetici di vari paesi [4]

[39] L'indice di sviluppo umano o Human Development Index (HDI) è un indicatore di sviluppo coniato nell'ultimo decennio del 1900. Al di là del PIL, questo indice considera fattori come l'alfabetizzazione e la speranza di vita e varia tra 0 e 1 dividendo i paesi in categorie a sviluppo umano molto alto, alto, medio e basso [238].

a minore intensità energetica necessitando di un aumento dell'efficienza in termini produttivi che non può tradursi in termini assoluti vista la mancanza di una nuova "tecnologia prometeica". Smil riassume in modo estremamente efficace il quadro derivante nella sua ultima opera:

"[…] E i paesi ricchi non sono gli unici che non possono tornare all'agricoltura tradizionale senza trasformare il tutto secondo l'immagine preindustriale: a causa della più alta intensità del mondo di fertilizzazione e irrigazione, la dipendenza della Cina dalle energie fossili nella produzione alimentare è ancora più alta. La restrizione delle scelte è un risultato paradossale di un mondo dominato da ciò che Jacques Ellul (1912-1994) chiamava, in modo semplice e onnicomprensivo, la tecnique*, "la totalità dei metodi raggiunti in modo razionale e con assoluta efficienza (per un dato stadio di sviluppo) in ogni campo dell'umana attività" (Ellul 1954). Questo mondo ci offre benefici senza precedenti e libertà quasi magiche, ma in cambio le società moderne non devono solo adattarsi ad essa, ma sottomettersi alle sue regole e ai suoi limiti. Ogni persona ora dipende da queste tecniche, ma nessun singolo individuo le comprende nella loro totalità; seguiamo semplicemente i loro dettami nella vita di tutti i giorni. Le conseguenze vanno al di là dell'obbedienza ignorante in quanto il potere di diffusione delle tecniche ha già reso gran parte dell'umanità irrilevante per i processi produttivi, e solo una piccola parte della forza lavoro è ora richiesta (con un crescente aiuto di computer) per progettare e produrre articoli destinato al consumo di massa globale. Di conseguenza, molte più persone sono ora comunemente impiegate nella vendita di un prodotto piuttosto che nel progettarlo, migliorarlo e produrlo. Se classificati in base alla dimensione della loro forza lavoro, nel 1960 11 delle 15 più grandi società americane (guidate da GM, Ford, GE e Stati Uniti) erano produttrici di beni con oltre 2,1 milioni di lavoratori; entro il 2010 solo due produttori di beni, HP e GE, che davano lavoro a circa 600˙000 persone, erano tra i primi 15, e il gruppo è ora dominato da dettaglianti e aziende fornitrici di servizi (Walmart, UPS, McDonald's, Yum, Target). Il prossimo passo logico è vedere questa realtà come parte del processo che porta all'eventuale spostamento della vita basata sul carbonio da parte delle macchine (Wesley 1974). I parallelismi evolutivi tra le due entità sono intriganti. Le macchine sono termodinamicamente vive e la loro diffusione si conforma alla selezione naturale: i fallimenti non si riproducono, le nuove specie proliferano e tendono alla massima massa tollerabile; le generazioni successive sono anche progressivamente più efficienti (ricordate tutti quei rapporti massa / potenza straordinariamente bassi!), più mobili e hanno una vita più lunga. Questi paralleli possono essere liquidati come biomorfismi semplicemente intriganti, ma l'ascesa delle macchine resta un fatto innegabile. Hanno già sostituito enormi aree di ecosistemi naturali con le infrastrutture necessarie per la loro costruzione, il movimento e lo stoccaggio (miniere, ferrovie, strade, fabbriche, parcheggi); il tempo dell'uomo è stato speso sempre più servendole; i loro prodotti di scarto hanno causato un ampio degrado dei suoli, delle acque e dell'atmosfera; e la massa globale di automobili da sola è già molto più alta di quella di tutta l'umanità.* [4]*."*

La meccanizzazione quindi spazia tra due estremi: uno paradigmatico dell'assenza di limite, ovvero lo sviluppo di tecniche e tecnologie associate alle stesse a prescindere dalla provenienza della potenza resa disponibile, senza tenere conto del peso associato al motore primo e sviluppando gli sforzi tecnologici con l'unico obiettivo della massimizzazione della produttività; senza compromessi o valutazioni più ampie, senza soprattutto considerare l'accoppiamento tra tecnica, tecnologia e motore primo riducendo tutto a un denominatore unico che sovrappone delle variabili tra loro indipendenti e non soggette a linearità, oltre a non considerare le diverse realtà esistenti in termini di disponibilità di flussi di potenza. L'esempio di come l'uomo sia sempre più asservito alle macchine è estremamente esplicativo di questa formulazione, assurda al punto da aver reso l'uomo schiavo delle sue stesse opere e costrutti, nati come strumento per rendere più veloci ed efficaci le operazioni confondendosi progressivamente nel mito del progresso: un percorso degenerativo che ha confuso il mezzo col fine.
Dall'altra parte l'estremo è rappresentato da una sostenibilità forte, dove la disponibilità di potenza vede lo sfruttamento di una fonte rinnovabile, quindi garantendo una possibilità di evoluzione idealmente indeterminata in termini di tempo, come del resto nelle realtà preindustriali dove la potenza resa disponibile dai motori primi (per produzione di attrezzi e per le lavorazioni stesse, quindi in termini sia diretti che indiretti) proviene da fonti a bassa entropia, caratterizzate inevitabilmente da una densità di potenza inferiore. Si parla di sostenibilità forte e non ideale, in quanto è comunque necessario l'utilizzo di materie prime, finite per

definizione nel globo terrestre, per la costruzione degli oggetti necessari all'esercizio dell'operazione e per il mantenimento del livello tecnologico di "civiltà" necessario per disporre di una determinata tecnologia in termini diretti e indiretti (nonostante si possa disporre di uno smartphone, non serve a nulla in assenza dei sistemi di rete che consentono di sfruttare la connessione a internet): oltre allo strumento stesso, la comunità in senso più ampio deve rendere disponibile un certo livello esosomatico perché si possa disporre e utilizzare una certa tecnologia.
La sfida diventa quindi determinare un livello di potenza disponibile che garantisca un certo livello di continuità e sicurezza alimentare (nell'elaborato in questione) e al contempo renda disponibili tecniche con ampio margine di miglioramento tecnologico, considerando la produttività specifica come parametro di riferimento nella valutazione di efficacia della tecnologia rapportata al motore primo, e quindi all'utilizzo di quel kW. In questo senso il parametro di produttività specifica può diventare un indicatore della maturazione tecnologica rispetto al livello tecnologico raggiunto da una determinata tecnica associata alla potenza resa disponibile dal motore primo. Identificare un livello di potenza (o energia) disponibile significa esattamente identificare un limite, una parola che nell'attuale civiltà è vista come negativa e riduttiva, nonostante sia e debba far parte della realtà in quanto tale: pensare a un progresso illimitato e un flusso di materia e energia arbitrariamente grande devoluto al soddisfacimento di bisogni spesso superflui per le necessità primarie è pura follia. Sono in questo tema illuminanti le parole di Zoja, nel suo "Storia dell'Arroganza: Psicologia e limiti dello sviluppo", di cui si propone un estratto:

"[…] La corsa verso l'illimitato dell'occidente moderno -la fede in uno sviluppo economico senza limiti, l'idea stessa di un "progresso" senza limiti- sono perversioni moderne: dannose già a livello psicologico, prima ancora di esserlo nelle conseguenze materiali. […] Politica ed economia rappresentano le più preoccupanti patologie del mondo globalizzato. L'autoinibizione non è certo stata inventata dalla civiltà e imposta all'istinto: è vero il contrario. La vita naturale è autoregolata. Gli alberi non crescono fino al cielo. Per lungo tempo l'uomo ha ha naturalmente riprodotto questo bisogno di limite. Lo ha insegnato nei comandamenti delle religioni post-moderne e negli spartiti musicali, senza accorgersi di rendere soltanto palese una necessità della sua anima e del suo orecchio. Anche nel XXI secolo il neonato, e l'animale non pervertito dall'uomo, non rischiano di mangiare troppo. Ma la civiltà ha scardinato la gerarchia degli istinti e la loro regolazione con l'eccesso di cibo e la nausea, nel tentativo di incorporare le infinite beatitudini degli dei. Quella crescita, che crediamo ormai sia la vita, è solo una delle possibili metafore di essa; e la crescita senza fine non è che una metafora ingenua dell'immortalità. […] In fondo avere una forza morale e dei limiti sono proprio la medesima cosa. Non è dunque una coincidenza se la cultura che genera e protegge gli scandali finanziari più grandi di tutti i tempi (esplosi nei primi anni della presidenza di George W. Bush e in ambienti a lui familiari come Enron) è anche la stessa che cancella l'adesione al trattato di Kyoto e alle altre scelte con cui i paesi della terra decidono di autolimitarsi per salvaguardare la Terra stessa.
[…] La novità di oggi non è la cancellazione dei popoli, ma dei riti e dei ricordi. I suoi processi (della società occidentale, ndr) sono lineari anziché circolari, di accumulo anziché di scambio, di significazione anzichè di simbolizzazione. Dove vita e morte sono inconciliabilmente opposte, il valore e il senso dell'esistenza non scaturiscono più da un loro dialogo significativo, ma da un accumulo quantitativo di vita che respinge la morte al di là del visibile. Dietro impegno scientifico e intenzioni generose, l'arroganza dell'uomo ha mostrato una veste integrale, sostituendosi a Dio nel decidere tempi e forme di vita. […] La rimozione della morte, confinata ai pensatoi della filosofia e della teologia, è allora l'estremo prodotto della rimozione del limite. Dio è il limite all'uomo ma, nell'oblio di ogni trascendenza, non si manifesta né si dimostra da solo. Se Dio scompare, l'uomo semplicemente ne occupa il posto: appunto da questa identificazione ha preso le mosse l'idea che tutto è possibile e illimitato. La morte, invece, continua a esistere sia per il credente sia per chi non crede, proponendo una riflessione sulle cose ultime (escatologia) anche a quest'ultimo. Se diventa incompatibile con i valori della cultura in cui dimora, ciò che non può essere abolito va dimenticato: la morte viene rimossa perché è il prototipo stesso del limite che la natura ha inciso nella vita.
L'involuzione della morte si inserisce come conseguenza finale in un edificio le cui fondamenta si perdono nel trapasso del tempo mitico a quello storico. Una civiltà avviata da secoli alla cancellazione del limite doveva prima o poi percorrere una strada che cancella anche la morte. La conquista che vuole ignorare confini si fa ingordigia di acquisizione; l'esistenza che vuole ignorare la morte diventa nevrosi di vita. Nelle ultime

generazioni, l'espulsione della morte dalla coscienza ha affrettato a sua volta l'abbattimento di ogni tabù del limite. Da essa, infatti, prende alimento la figura inconscia dell'illimitato sul terreno della vita: la fantasia dell'immortalità. Freud aveva colto molto bene questo movimento, quando affermava che l'uomo si stava mutando in un dio-protesi.
[…] Poiché la storia non ha precedenti, la nostra civiltà è la prima che si crede immortale, mentre forse è la prima alla quale manchi un consapevole strumento di limitazione. Col passaggio dell'uomo dalla condizione animale a quella storico-civile, le sue forme di vita non evolvono più per selezione naturale -con la scomparsa dei più deboli- bensì, con moto sempre più rapido, per sviluppo culturale e crescita tecnologica. Eppure, fagocitando ogni rispetto del limite assieme a quello per Dio e per la morte, la nostra civiltà sembra aver intrapreso un cammino opposto e regressivo. La sua storia, che inizia con il capitolo altamente civile dell'autolimitazione (per quanto ripresa in qualche forma da meccanismi di autoinibizione dell'istinto) ha poi ceduto alle regole della espansione competitiva, tornando a una selezione Darwiniana tra civiltà. Di fronte a questa carica onnipotente della società tecnologica, ogni altra cultura sta scomparendo [185]."

I mezzi scientifici per far fronte ai problemi nel prossimo futuro sono sicuramente i più validi nella storia dell'umanità; questo elaborato non pretendere di fornire soluzioni che si rivelerebbero poco sensate vista la gravità e l'estensione dei problemi trattati. Sicuramente però si può identificare una direzione, un insieme di azioni che se eseguite con tempestività e costanza possono far intravedere un'uscita che ad oggi sembra totalmente negata: lo spostamento della forza lavoro dai settori secondario e terziario a quello agricolo, la rivalorizzazione e lo studio di tecnologie adatte a realtà locali, la spinta verso una minor dipendenza da fonti ad alta intensità energetica e limitate, la conversione dei metodi di produzione a tecniche meno intensive.
Il tutto si potrebbe riassumere in una riduzione della produttività del lavoro nello specifico e quindi della pressione bioeconomica nei termini di questa tesi, ma per qualsiasi altro processo con uno studio adeguato si potrebbe giungere alla medesima conclusione: l'identificazione di un limite, atto, attraverso le conoscenze a nostra disposizione, a un mantenimento a lungo termine della nostra specie, uno *stato circolare e stazionario*. Un limite che va ricercato in termini ingegneristici in un determinato, prefissato consumo di energia e materia, la cui direzione è chiaramente indicata dal Primo e Secondo Principio della Termodinamica.
In termini umani, nella consapevolezza e nella responsabilità di cosa significhino, che impatto e che conseguenze abbiano le nostre azioni e il nostro vivere quotidiano nella società complessa e globalizzata del mondo odierno.

Appendici

- Joule (J): unità di misura propria adottata dal Sistema Internazionale, corrisponde al lavoro svolto nell'esercizio di una forza di un Newton applicata per un metro di lunghezza [186].
- British Thermal Unit (BTU): quantità di calore necessaria ad aumentare di 1° F la temperatura di una libbra d'acqua pura [187].
- Caloria (Cal): energia necessaria per aumentare di 1° C la temperatura di un grammo di acqua da 14.5 a 15.5 °C. Comunemente usata per indicare il valore energetico degli alimenti [188].
- Tonnellata di olio equivalente (TOE): corrisponde all'energia rilasciata dalla combustione di una tonnellata di petrolio grezzo [189]. Viene utilizzata comunemente per quantificare i consumi energetici su larga scala.
- Watt (W): quantità di energia espressa per unità di tempo (s), adottata nel sistema internazionale.
- Cavallo Vapore (CV in italiano, HP in inglese, PS in tedesco): unità di misura della potenza, comunemente usata per indicare la potenza nei mezzi di trasporto: non a caso indica la potenza sviluppabile mediamente da un cavallo, pari a 735 W.
- Kilowattora (kWh): energia erogata da un generatore di un kW per un intervallo di tempo pari a un'ora. Usato principalmente per quantificare consumo e produzione di energia elettrica [190] .

Di seguito i fattori di conversione tra le misure citate:

	Joule	TOE	BTU	Cal	kWh
Joule	1	$2,3885 \times 10^{-11}$	$9,4832 \times 10^{-4}$	0,2389	2.7778×10^{-7}
TOE	$4,1868 \times 10^{10}$	1	$2,7793 \times 10^{7}$	$7,0019 \times 10^{9}$	8141
BTU	1055	$2,5186 \times 10^{-8}$	1	251,9	2.9292×10^{-4}
Cal	4,186	$9,9981 \times 10^{-11}$	3,9704	1	$1,1628 \times 10^{-6}$
kWh	3.6×10^{6}	$8,5985 \times 10^{-5}$	3414	$8,6001 \times 10^{5}$	1

Tabella 17 Fattori di conversione tra unità di misura per l'energia. Elaboraziona da dati Calì [4]

E i multipli e sottomultipli delle unità di misura:

Prefisso	**Simbolo**	**10n**	**Nome**	**Equivalente decimale**
yotta	Y	10^{24}	Quadrilione	1 000 000 000 000 000 000 000 000
zetta	Z	10^{21}	Triliardo	1 000 000 000 000 000 000 000
exa	E	10^{18}	Trilione	1 000 000 000 000 000 000
peta	P	10^{15}	Biliardo	1 000 000 000 000 000
tera	T	10^{12}	Bilione	1 000 000 000 000
giga	G	10^{9}	Miliardo	1 000 000 000
mega	M	10^{6}	Milione	1 000 000
kilo	k	10^{3}	Mille	1 000
ecta	h	10^{2}	Cento	100
deca	da	10	Dieci	10
deci	da	10^{-1}	Decimo	0,1
centi	c	10^{-2}	Centesimo	0,01
milli	m	10^{-3}	Millesimo	0,001
micro	µ	10^{-6}	Milionesimo	0,000 001
nano	n	10^{-9}	Miliardesimo	0,000 000 001
pico	p	10^{-12}	Bilionesimo	0,000 000 000 001

Tabella 18 Multipli e sottomultipli delle unità di misura

Bibliografia

[1] A. Einstein, «Pensieri di un uomo curioso,» in *Entropia*, Cles (TN), Arnoldo Mondadori, 1982.

[2] M. Calì, Guida all'energia nella natura e nelle civiltà umane, Bologna: Esculapio, 2014.

[3] P. G. Michele Calì, Termodinamica, Bologna: Editrice Esculapio, 2006.

[4] V. Smil, Energy and Civilization: a history, Londra: The MIT Press, 2017.

[5] V. Smil, Energy in nature and society, Londra: The MIT Press, 2008.

[6] R. P. H.T. Odum, «Time's speed regulator. The optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems,» 1955.

[7] E. A. S. Robert H. Lavenda, «Anthropology. What does it mean to be human,» 2014.

[8] W. Behringer, «Storia culturale del clima,» in *Guida all'energia nella natura e nelle civiltà umane*, 2013.

[9] S. N. M. o. N. History, «What does it mean to be human?,» [Online]. Available: http://humanorigins.si.edu/research/climate-and-human-evolution/climate-effects-human-evolution.

[10] Wikipedia, «https://it.wikipedia.org/wiki/Impero_britannico,» [Online].

[11] N. N. C. Marchetti, «The dynamics of energy systems and the logistic substitution model,» 1979.

[12] B. Petroleum, «Statistical Review of World Energy,» 2017.

[13] E. Treccani, «Antropocene,» [Online]. Available: http://www.treccani.it/enciclopedia/antropocene_%28Lessico-del-XXI-Secolo%29/.

[14] I. International Panel on Climate Change, «Fifth Assessment Report,» 2014.

[15] IEA, «World Energy Outlook,» 2015.

[16] S. M. I. Luca Mercalli, *"Riscaldamento Globale, Scenari Futuri e Impatti attesi", Conferenza al Politecnico di Torino,* Torino, 2018.

[17] E. Ente Nazionale Energie Alterneative, «Le parole dell'energia,» [Online]. Available: http://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/fissione-nucleare/riserve-e-risorse.

[18] B. British Petroleum, «BP Statistical Review of World Energy,» 2017.

[19] IEA, «World Energy Outlook,» 2016.

[20] V. Smil, Global Catastrophes and Trends: The next 50 years, Massachusetts Institute of Technology, 2008.

[21] M. E. Assessment, «Ecosystems and Human Well Being: Synthesis,» 2005.

[22] V. Smil, «Science, energy, ethics, and civilization,» 2010.

[23] J. Freidberg, «Plasma physics and fusion energy,» Cambridge.

[24] EUROfusion, «https://www.euro-fusion.org/programme/,» [Online].

[25] FAO, «World Development Indicators,» 2016.

[26] D. G. G. M. L. M. J. B. T. Prior a, «Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management,» *Global Environmental Change,* 2011.

[27] M. B. a. T. E. G. R. B. Gordon, «Metal stocks and sustainability,» 2006.

[28] W. S. Jevons, «The Coal Question,» 1865.

[29] O. W. i. D. Max Roser, «Light,» [Online]. Available: https://ourworldindata.org/light.

[30] V. G. G. ,. B.-L. L. Anastassia M. Makarieva, «Energy budget of the biosphere and civilization: Rethinking environmental security of global renewable and non-renewable resources,» 2008.

[31] P. R. E. A. D. B. A. G. R. M. P. T. M. P. Gerardo Ceballos, «Accelerated modern human–induced species losses: Entering the sixth mass extinction,» 2015.

[32] N. M. S. T. G. O. U. B. S. T. B. Q. C. M. J. L. M. E. L. L. K. C. M. B. M. E. A. F. A. D. Barnosky, «Has the Earth's sixth mass extinction already arrive?,» *Nature,* 2011.

[33] L. M. N. I. S. M. Henrique Miguel Pereira, «Global Biodiversity Change: The Bad, The Good and the Unknown,» *Annual Review of Environment and Resources,* 2012.

[34] W. S. K. N. Å. P. F. S. C. E. F. L. T. M. L. M. S. C. F. H. J. S. B. N. C. A. d. W. T. H. S. v. d. L. H. R. e. a. Johan Rockström, «A safe operating space for humanity,» *Science.*

[35] G. Chen, «Exergy consumption of the earth,» 2004.

[36] M. E. A. Panel, «Ecosystems and Human Health Being,» 2005.

[37] M. H. P. David Pimentel, Food, Energy and Society, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.

[38] FAO, «Databases,» [Online]. Available: http://www.fao.org/statistics/databases/en/.

[39] J.-F. D. I. P. P. V. M. M. B. N. S. H. M. L. C. N. L. P. B. F. Monforti-Ferrario, «JRC Science and Policy Report, Energy use in the EU food sector - European Commission,» 2005.

[40] B. A. Stout, «Handbook of energy for world agriculture».

[41] A. C. S. H. K. R. P. a. A. W. Patrick Canning, «Energy Use in the U.S. Food System,» 2010.

[42] G. Pellizzi, Meccanica e Meccanizzazione Agricola, Bologna: Edagricole, 1996.

[43] Wikipedia, «Processo Haber Bosch,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Processo_Haber-Bosch.

[44] M. P. M. K.-M. David Pimentel, «Energy use in Agriculture: An Overview,» 1998.

[45] EIA, «Petroleum & Other Liquids,» [Online]. Available: http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=pet&s=rbrte&f=m.

[46] FAO, «Food Outlook,» 2013, November.

[47] D. Yerghin, «The Prize: the epic quest for oil, money and power,» in *Energy and civilization: a history*.

[48] C. f. M. History, War in the Persian Gulf: Operations Desert Shield and Desert Storm, 1990.

[49] J. E. S. B. Adam R. Brandt, «The energy efficiency of oil sands extraction: Energy return ratios from 1970 to 2010,» *Energy,* 2012.

[50] C. A. H. P. O. C. C. J. C. Megan C. Guilford, «A New Long Term Assessment of Energy Return on Investment (EROI) for U.S. Oil and Gas Discovery and Production,» *Sustainability,* 2011.

[51] J. G. L. S. B. B. Charles A.S.Hall, «EROI of differen tfuels and the implications for society,» *Energy policy,* 2013.

[52] F. F. Victor Court, «Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of,» *Ecological Economics,* 2015.

[53] M. d. W. Matthew Kuperus Heun, «Energy return on (energy) invested (EROI), oil prices, and energy transitions,» *Energy policy,* 2011.

[54] H. Odum, «Enviironment, Power and Society,» 1971.

[55] E. M. Widdowson, How much food does man require?, 1983.

[56] FAO, «Food energy – Methods of analysis and conversion factors,» 2003.

[57] N. Nerli, Meccanica agraria, 1961.

[58] A. S. University, «Compendium of physical Activities,» [Online]. Available: https://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/.

[59] A. Carena, Tecnologia delle Macchine Agricole, Torino: Unione tipografico-editrice torinese, 1947.

[60] P. P. Poggio, Le tre agricolture: contadina, industriale, ecologica, Jaca Book, 2015.

[61] S. a. T. f. D. (. International Assessment of Agricultural Knowledge, «Agriculture at a Crossroads,» [Online]. Available: http://www.globalagriculture.org/report-topics/industrial-agriculture-and-small-scale-farming.html.

[62] FAO, «The State of Food and Agriculture. Food and Agriculture Organisation,» 2014.

[63] J. S. T. R. Sarah K. Lowder, «The Number, Size, and Distribution of Farms, Smallholder Farms, and family farms worldwide,» Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 2016.

[64] J. W. Moore, «The End of the Road? Agricultural Revolutions in the Capitalist World-Ecology, 1450–2010,» *Journal of Agrarian Change,* vol. 10, n. 3, 2010.

[65] V. R. J. Hayami, Agricultural Development. An International Perspective., 1971.

[66] P. Woodhouse, «Beyond Industrial Agriculture? Some Questions about Farm Size, Productivity and Sustainability,» *Journal of Agrarian Change,* vol. 10, n. 3, 2010.

[67] M. F. B. Christofer B. Barrett, «Reconsidering Conventional Explanations of the Inverse Productivity Size Relation,» *World Development,* vol. 38, n. 1, 2010.

[68] M. Lipton, «Can Small Farmers Survive, Prosper, or be the Key Channel to cut Mass Poverty?,» *Journal of Agricultural and Development Economics,* vol. 3, n. 1, 2006.

[69] D. R. Tasso Adamopoulos, «The Size Distribution of Farms and International Productivity Differences,» *The American Economic Review,* vol. 104, n. 6, 2014.

[70] T. V. Martina Novotná, «The significance of farm size in the evaluation of labour productivity in agriculture,» *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis,* vol. 64, n. 38, 2016.

[71] J. K. L. L. Steve Wiggins, «The Future of Small Farms,» *World Development,* vol. 38, n. 10, 2010.

[72] A. D. Stefano, «Commodities e Player globali,» in *Le tre agricolture: contadina, industriale, ecologica*, Jaca Book, 2015.

[73] L. L. C. T. S. W. Xavier Irz, «Agricultural growth and poverty alleviation,» *Development Policy Review,* vol. 19, n. 4, 2001.

[74] V. T. Edmund M. Tavernier, «Farm Typology and Sustainable Agriculture: Does Size Matter?,» *Journal of Sustainable Agriculture,* vol. 24, n. 2, 2008.

[75] W. J. M. Julian M. Alston, «Reversal of Fortune: Immiserizing Technical Change in Agriculture,» *American Journal of Agricultural Economics,* vol. 77, n. 2, 1995.

[76] J. I. Gerard D'Souza, «Small Farms and Sustainable Development: Is Small more Sustainable?,» *Journal of Agriculture and Applied Economics,* vol. 28, n. 1, 1996.

[77] A. Magnaghi, «Dai paesaggi del cibo, nuove frontiere dello sviluppo globale,» in *Le tre agricolture: contadina, industriale, ecologica*, Jaca Book, 2015.

[78] E. Ferrara, «I frutti della scienza. Il modello americano dell'agricoltura di potenza,» in *Le tre agricolture: contadine, industriale, ecologica*, Jaca Book, 2015.

[79] M. P. M. K. M. D. Pimentel, «Energy use in agriculture: an overview,» 1998.

[80] Wikipedia, «Storia dell'Agricoltura,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Storia_dell%27agricoltura.

[81] Wikipedia, «Rivoluzione Verde,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Rivoluzione_verde.

[82] S. Bocchi, «I sistemi colturali tra tradizione e innovazione,» in *Le tre agricolture: contadina, industriale ed ecologica*, Jaca Book, 2015.

[83] Treccani, «Rivoluzione Verde,» [Online]. Available: http://www.treccani.it/enciclopedia/rivoluzione-verde_(Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica)/.

[84] G. Ferraresi, «Neoruralità, radici di futuro in campo: contadini e complici,» in *Le tre agricolture: contadina, industriale, ecologica*, Jaca Book, 2015.

[85] T. W. Patzek, «Thermodynamics of Agricultural Sustainability: The Case of US Maize Agriculture,» *Critical Reviews in Plant Sciences,* vol. 27, n. 4, 2008.

[86] O. D. W. S. F. M. Werner L. Kutsch, Quantifying Ecosystem Maturity — a Case Study, Springer, 1998.

[87] S. J. G. B. L. R. G. Robert E. Ulanowicz, «Quantifying sustainability: Resilience, efficiency and the return of information theory,» *Ecological complexity,* 2007.

[88] D. P. M. G. P. T. Gomiero, «Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture,» *Plant Scinces,* 2011.

[89] G. u. n. L. 1. d. 2. P. 0. -. 0015, «Regolamento (CEE) n. 2092/91 del Consiglio, del 24 giugno 1991, relativo al metodo di produzione biologico,» 1991.

[90] T. M. B. J. B. M. B. S. C. D. D. F. E. A. F. L. G. K. H. P. M. J. M. C. R. H. S. F. T.-F. W. H. V. d. P. S. S. K. Birkhofer, «Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: Implications for soil quality, biological control and productivity,» *Soil biology and biochemistry,* 2008.

[91] G. J. G. Antonio M. Alonso, «Comparison of the Efficiency and Use of Energy in Organic and Conventional Farming in Spanish Agricultural Systems,» *Journal of Sustainable Agriculture,* 2010.

[92] N. R. J. A. F. Verena Seufert, «Comparing the yields of organic and conventional,» *Letter Research,* 2012.

[93] J. d. H. M. K. H. V. W. V. d. P. M. Schramaa, «Crop yield gap and stability in organic and conventional farming systems,» *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 2017.

[94] S. S. S. G. P. R. I. Gelfand, « Energy Efficiency of Conventional, Organic, and Alternative Cropping Systems for Food and Fuel at a Site in the U.S. Midwest,» *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY,* 2010.

[95] S. M. S. W. E. K. T. G. B. Doreen Gabriel, «Food production vs. biodiversity: comparing organic and conventional agriculture,» *Journal of Applied Ecology,* 2013.

[96] M. L. C. D. S. L. Richard Wood, «A comparative study of some environmental impacts of conventional and organic farming in Australia,» *Agricultural Systems,* 2005.

[97] H. A. F. T. K. Z. K. G. S. V. P. P. L. Zeynab Jouzi, «Organic Farming and Small-Scale Farmers: Main Opportunities and Challenges,» *Ecological Economics,* 2015.

[98] D. P. &. M. G. P. Tiziano Gomiero, «Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture,» *Critical Reviews in Plant Sciences,* 2011.

[99] D. Pimentel, «Food for Thought: A Review of the Role of Energy in Current and Evolving Agriculture,» *Critical Reviews in Plant Science,* 2011.

[100] P. H. J. H. D. D. R. S. D. Pimentel, «Environmental, Energetic, and Economic Comparisons of Organic and Conventional Farming Systems,» *Bioscience,* 2005.

[101] T. G. D. P. Maurizio G. Paoletti, «Introduction to the Special Issue: Towards A More Sustainable Agriculture,» *Critical Reviews in Plant Sciences,* 2011.

[102] M. G. P. D. P. T. Gomiero, «Energy and Environmental Issues in Organic and Conventional Agriculture,» *Critical Reviews in Plant Sciences,* 2008.

[103] D. Connor, «Organic agriculture cannot feed the world,» *Field Crop Research,* 2007.

[104] K. G. C. P. A. M. R. N. S. P. David Tilman, «Agricultural Sustainability and Intensive Practices,» *Nature,* 2002.

[105] V. P. G. P. Paolo Biondi, Le richieste d'energia del sistema agricolo italiano, 1989.

[106] Wikipedia, «Economia d'Italia,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Economia_d%27Italia.

[107] ISTAT, «Atlante dell'Agricoltura Italiana,» 2013.

[108] EUROSTAT, «Farm data needed for agri-environmental reporting,» 2011.

[109] G. Z. M. B. Nicola Dal Ferro, «Crop yield and energy use in organic and conventional farming: A case study in north-east Italy,» *European Journal of Agronomy,* 2016.

[110] L. G. D. D. B. A. G. M. R. N. F. C. A. P. R. M. Fabiana Crescenzi, «Bio in cifre 2017,» 2017.

[111] Sinab, «Rese,» n. http://www.sinab.it/content/rese.

[112] C. G. B. M. S. D. A. F. F. V. Stefano Monaco, «Confronto tra due sistemi colturali cerealicoli in coltivazione biologica ed il sistema convenzionale,» 2003.

[113] S. M. Mauro Gamboni, «Organic agriculture in Italy: challenges and perspectives,» Department of Biology, Agriculture and Food Sciences (CNR), Roma, 2005.

[114] N. Georgescu-Roegen, Bioeconomia, 1989.

[115] Treccani, «http://www.treccani.it/vocabolario/meccanizzare_(Sinonimi-e-Contrari),» [Online].

[116] R. Bobulescu, «From Lotka's biophysics to Georgescu-Roegen's bioeconomics,» 2015.

[117] F. Crescini, «I sistemi colturali tra tradizione e innovazione,» in *Le tre agricolture: condatida, industriale, ecologica*, Jaca Book, 2015.

[118] M. S. Paola Bolli, «Lineamenti di tecnica della meccanizzazione agricola,» Bologna, Edagricole, 1987.

[119] J. Gregory, «James Gregory Interview,» [Online]. Available: http://www.pbs.org/fmc/interviews/gregory.htm.

[120] J. C. Porter, «What was the Dust Bowl? Assessing contemporary popular knowledge,» 2013.

[121] J. D. L. B. F. J. F. K. G. G. M. Robert A. McLeman, «What we learned from the Dust Bowl: lessons in science, policy, and adaptation,» *Springer,* 2013.

[122] NASA, «Nasa explains Dust Bowl Drought,» [Online]. Available: https://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2004/0319dustbowl.html.

[123] F. S. Sial, «Some thoughts on agricultural mechanization,» 1984.

[124] S. G. F. B. D. P. Mario Giampietro, «General Trends of Technological Changes in Agriculture,» 2010.

[125] M. G. Piero Conforti, «Fossil energy use in agriculture: an international comparison,» *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 1997.

[126] M. G. ,. H. C. ,. G. P. S. G. F. B. Maurizio G. Paoletti, «Studying Agricultural Intensification and Sustainability in PR China,» *Critical Reviews in Plant Sciences,* 2010.

[127] M. G. J. R.-M. Nancy Arizpe, «Food Security and Fossil Energy Dependence: An International Comparison of the Use of Fossil Energy in Agriculture (1991-2003),» *Critical Reviews in Plant Sciences,* 2011.

[128] M. Giampietro, «Socioeconomic pressure, demographic pressure, environmental loading and technological changes in agriculture,» *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 1997.

[129] K. M. Mario Giampietro, «Multiple-Scale Integrated Assessments of Societal Metabolism: Integrating Biophysical and Economic Representations Across Scales,» *Population and Environment: A Journal of Interdisciplinary Studies,* 2000.

[130] A. Guidorzi, La vita nei campi, 2007.

[131] Wikipedia, «Triticum,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Triticum#cite_note-3.

[132] V. E. d. Pianigiani, «Grano,» [Online]. Available: http://www.etimo.it/?term=grano.

[133] E. Britannica, «Wheat,» [Online]. Available: https://www.britannica.com/plant/wheat.

[134] A. Kondratiev, «Il tempo dei celti,» 2005.

[135] S. F. James, «Il ramo d'oro. Uno studio sulla magia e sulla religione,» 1915-1922.

[136] P. i. Vecchio, Naturalis Historia, XVIII, 296, 23-79.

[137] P. Chuksin, «History of Gallic Reaper,» 2006. [Online]. Available: http://www.gnrtr.com/Generator.html?pi=208&cp=3.

[138] R. McNamara, «McCormick Reaper,» 2017. [Online]. Available: https://www.thoughtco.com/mccormick-reaper-1773393.

[139] R. D. Hurt, American farm tools - From hand power to steam power, Manhattan: Sunflower University Press, 1985.

[140] G. Romanello, Le macchine operatrici agricole, Edagricole, 1975.

[141] B. S. T.P. Singh, «Design and development of an animal drawn, Engine Operated Reaper,» *Agricultural Mechanization in Asia, Africa, Latin America (AMA),* vol. 26, n. 2, 1995.

[142] R. V. Ramiah, «Design and development of a Reaper for indian conditions,» 1947.

[143] D. .. P. D. .. D. P.B.Chavan, «Design and Development of manually Operated Reaper,» 2015.

[144] M. Agri, «Minos Reaper Binder Machine».

[145] E. Britannica, «Flail,» [Online]. Available: https://www.britannica.com/technology/flail.

[146] M. Makonen, «Design and development of a manually pedal operated grain thresher machine,» 2013.

[147] K. M. S. Rajinder P. Kachru, «Development and testing of pedal cum power operated air screen grain cleaner,» *Agricultural Mechanization in Asia, Africa, South America,* vol. 21, n. 4, 1990.

[148] Cicoria, «Trebbie Cicoria: Una tradizione dal 1927,» [Online]. Available: http://www.cicoria.it/threshers.

[149] R. Machinery, «Runway Machinery Co., Ltd. (Zhengzhou),» [Online]. Available: https://runway.en.alibaba.com/search/product?SearchText=thresher.

[150] K. N. S. Hem Chandra Joshi, «Development of Pantnagar - IRRI multi crop thresher,» *Agricultural Mechanization in Asia (AMA),* 1980.

[151] G. Stefanelli, «Trabbiatrici nazionali nell'annata 1950,» 1950.

[152] CLAAS, «Storia dei Prodotti,» [Online]. Available: http://www.claas.it/curiosita/historie/produkthistorie/maehdrescher.

[153] G. P. P. P. L. Bodria, «Meccanica e meccanizzazione agricola,» Edagricole, 2013.

[154] P. N. T. P. Jiri Masek, «Evaluation of combine harvester fuel consumption and operational cost,» 2015.

[155] Meccagri, «Nuovo record mondiale per la mietitrebbia New Holland CR10.90,» [Online]. Available: http://www.meccagri.it/nuovo-record-mondiale-per-la-mietitrebbia-new-holland-cr10-90/.

[156] «http://www.farms.com/news/new-holland-agriculture-smashes-a-guinness-world-record-82959.aspx,» [Online].

[157] FOTMA, «http://www.combine-harvesters.com/4LZ-7B-Wheat-Combine-Harvester-pd36700.html,» [Online].

[158] P. Piccarolo, «Criteri di scelta e gestione delle macchine e costi della meccanizzazione agricola,» Accademia di Agricoltura di Torino, Torino.

[159] EIA, «Total energy,» [Online]. Available: https://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/showtext.php?t=ptb1601.

[160] O. F. Gaetano Forni, «Come l'aratro trasformò campagna e società».*L'informatore Agrario.*

[161] E. M. Keys, Soil Cutting and Tillage, Elsevier.

[162] D. C. R. J. H. R. Lal, «Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming,» *Soil & Tillage Research,* 2007.

[163] E. Faulkner, Plowman's Folly, 1942.

[164] Wikipedia, «Time,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Time.

[165] Z. M. Jack, «"Dirt farmer" vs "Soil scientist": rapresentative tensions in the constructed identities of farmers-writers "later Thomas Jack and Edward H. Falckner,» *Southern Rural Sociology,* 2007.

[166] L. J. D.N. Sharma, «Evaluation of no tillage and conventional tillage systems,» *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America,* vol. 15, n. 3, 1984.

[167] R. Lal, «Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture,» *Journal of soil and water conservation,* 2015.

[168] J. K. Campbell, «Dibble Sticks, Donkeys and Diesels,» 1990.

[169] N. Nerli, Meccanica Agraria.

[170] D. S. P.C. Senapati, «Testing of bullock drawn ploughs in lateritic soils,» *Agricultural Mechanization in Asia, Africa, Latin America,* vol. 20, n. 3, 1989.

[171] R. K. A. Tajuddin, «An animal drawn Iron Plough as an alternative to the Indigenous Plough,» *Agricultural Mechanization in Asia, Africa, Latina America,* vol. 18, n. 4, 1987.

[172] N. N. S. S. M. F. A. A. Mainul Hussain, «Improved Animal Drawn Moaldboard Plough Utilizing available Draft Power,» *Agricultural Mechanization in Asia, Africa, Latina America,* vol. 16, n. 2, 1985.

[173] J. M. B. S. B. Bukhari, «Fuel consumption of tillage implements,» *Agricultural Mechanization in Asia, Africa, Latina America,* vol. 13, n. 3, 1982.

[174] N. e. i. c. g. d. r. e. sviluppo, «Noi e il cavallo,» Equi idea, [Online]. Available: http://www.noieilcavallo.org/attrezzature/.

[175] D. P. M. D. Z.I. Mileusnic, «Comparison of tillage systems according to fuel consumption,» *Elsevier,* 2009.

[176] S. B. L. M. K. R. D. A. A. S. E. Sarauskis, «Energy balance, costs and CO2 analysis of tillage technologies in maize cultivation,» *Elsevier,* 2014.

[177] D. F. Z. G. S. H. I. K. K. Č. Silvio Kosutic, «Effects of different Soil Tillage Systems on Yield of maize, Winter wheat and Soybean on albic luvisol in North-West Slavonia,» *Journal Central European Agriculture,* vol. 6, n. 3, 2005.

[178] K. N. S. T. N. Mishra, «Norms of draft power sources under agricultural condition,» *American Agriculture in Africa, Asia and Latin America,* vol. 25, n. 4, 1994.

[179] M. H. H. W. J. B. A. G. G. Moitzi, «Energy consumption in cultivating and ploughing with traction improvement system and consideration of the rear furrow wheel-load in ploughing,» *Soil & Tillage Research,* 2013.

[180] J. M. B. G. R. M. A. N. M. A. B. B. M. A. B. S. Bukhari, «Effect of different speeds on the performance of mouldboard plough,» *Agricultural Mechanization in Africa, Asia and Latin America,* vol. 21, n. 1, 1990.

[181] D. K. D. S. K. D. S. K. Mohanty, «Bullock drawn roller type mould board plough for heavy soils,» *Agricultural Mechanization in Africa, Asia and Latin America,* vol. 22, n. 2, 1991.

[182] Treccani, «http://www.treccani.it/enciclopedia/terreno/,» [Online].

[183] B. B. L. S. E. M. M. Bertocco, «Evaluating energy efficiency of site-specific tillage in maize in NE Italy,» *Bioresource Technology.*

[184] G. Haussmann, «La terra e l'uomo. Saggio sui principi di agricoltura generale,» in *Le tre agricolture: contadina, industriale, ecologica*, 1964.

[185] L. Zoja, Storia dell'Arroganza: Psicologia e Limiti dello Sviluppo, Gorgonzola: Moretti e Vitali, 2014.

[186] Wikipedia, «https://it.wikipedia.org/wiki/Joule,» [Online].

[187] ENEA, «http://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/unita-di-misura/british-thermal-unit-btu,» [Online].

[188] ENEA, «http://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/unita-di-misura/caloria,» [Online].

[189] Wikipedia, «https://it.wikipedia.org/wiki/Tonnellata_equivalente_di_petrolio,» [Online].

[190] ENEA, «http://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/unita-di-misura/kilowattora-kwh,» [Online].

[191] F. s. d. s. 11, «A system of integrated agricultural censuses and surveys,» 2005.

[192] A. Lotka, «The law of evolution as a maximal principle,» 1945.

[193] Treccani, «http://www.treccani.it/enciclopedia/cultivar/,» [Online].

[194] «https://kissmytractor.wordpress.com/2015/03/12/tracing-a-harvesters-timeline/,» [Online].

[195] H. Wastlhuber, «https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maehdrescher_schema_nummeriert.png,» [Online].

[196] B. Petroleum, «BP Energy Outlook 2016».

[197] «http://www.hoosickhistory.com/shortstories/WalterWoodPlant.htm,» [Online].

[198] P. Laverda, «Macchine, storie e personaggi di una grande industria italiana,» *Archivio Storico Laverda.*

[199] «https://www.thehenryford.org/collections-and-research/digital-collections/artifact/172615/#slide=gs-221979,» [Online].

[200] Wikipedia, «https://it.wikipedia.org/wiki/Aratro,» [Online].

[201] P. Bullock, Encyclopedia of Soils in the Environment, Elsevier, 2005.

[202] «https://sites.google.com/site/storiagricoltura/risorse-insegnanti/aratro,» [Online].

[203] «http://www.coliameccanicasrl.com/prodotti_scheda.php?p=663,» [Online].

[204] «http://www.aldobiagioli.it/it/prodotti/aratri-disco-tridisco-0,» [Online].

[205] «http://www.tortella.it/?page_id=11932,» [Online].

[206] Volgarino, «Volgarino,» [Online]. Available: http://www.volgarino.com/scheda_prodotto.php?id=47&t=Ripuntatore%20idropneumatico&Cat=16.

[207] Gramegna, «Mondomacchina,» [Online]. Available: https://www.mondomacchina.it/it/le-potenze-differenziate-delle-vangatrici-gramegna-c1122.

[208] M. Man, «Microbial Management Systems,» [Online]. Available: http://www.microbeman.com.au/environment.html.

[209] J. H. B. S. o. P. Jealth, «A Brief History of Agriculture and Food Production: The Rise of “Industrial Agriculture,» 2007.

[210] A. M. C. L. R.-L. M. Rial, «Understanding the spatial distribution of factors controlling topsoil organic carbon content in European soils,» *Science of the Total Environment,* 2017.

[211] E. E. Agency, «Soil Organic Carbon,» [Online]. Available: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/soil-organic-carbon-1.

[212] Y. M. Svirezhev, «Thermodynamics and ecology,» *Ecological Modelling,* 2000.

[213] Wikipedia, «Acque Anossiche,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Acque_anossiche.

[214] Wikipedia, «Evento Anossico,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Evento_anossico.

[215] Treccani, «bioma,» [Online]. Available: http://www.treccani.it/enciclopedia/bioma_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/.

[216] N. Georgescu-Roegen, «Bioeconomia e degradazione della materia. Il destino prometeico della tecnologia umana,» in *Economia dell'ambienete e Bioeconomia*, Milano, 2003.

[217] Wikipedia, «Representative Concentration Pathways,» [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Representative_Concentration_Pathways.

[218] Agraria.org, «Importanza dell'azotofissazione,» [Online]. Available: http://www.rivistadiagraria.org/articoli/anno-2011/importanza-dellazotofissazione/.

[219] Wikipedia, «Azotofissazione,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Azotofissazione.

[220] Treccani, «Eutrofizzazione,» [Online]. Available: http://www.treccani.it/enciclopedia/eutrofizzazione/.

[221] Wikipedia, «Olio di scisto,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Olio_di_scisto.

[222] Wikipedia, «Scisto Bituminoso,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Scisto_bituminoso.

[223] Q. Meng, «The impacts of fracking on the environment: A total environmental study paradigm,» *Science of the Total Environment,* 2016.

[224] M. Valsania, «Il sole 24 ore,» 2016. [Online]. Available: http://www.ilsole24ore.com/art/finanza-e-mercati/2016-09-14/verso-l-accordo-la-fusione-bayer-e-monsanto-124141.shtml.

[225] A. Ludovisi, «Effectiveness of entropy-based functions in the analysis of ecosystem State and Devolpment,» vol. 36, 2014.

[226] Wikipedia, «Teoria dell'Informazione,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Teoria_dell'informazione.

[227] Wikipedia, «Grandi Pianure,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Grandi_Pianure.

[228] Wikipedia, «Dust Bowl,» [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Dust_Bowl.

[229] U. S. History, «U.S. Population, 1790-2000: Always Growing,» [Online]. Available: http://www.u-s-history.com/pages/h980.html.

[230] H. Guru, «Roman Villas in Germany,» [Online]. Available: http://www.historyguru.com.au/Blog/January-2014/Roman-Villas-in-Southern-Germany.

[231] H. Chase, «Development Of The Reaper. Continued,» [Online]. Available: http://chestofbooks.com/reference/Wonder-Book-Of-Knowledge/Development-Of-The-Reaper-Continued.html.

[232] J. C. Galbreath, «The Groundhog Thresher,» 1985. [Online]. Available: https://www.farmcollector.com/steam-traction/the-groundhog-thresher.

[233] K. Shrewsday, «The Turnspit Dogs,» [Online]. Available: https://kateshrewsday.com/2013/02/01/the-turnspit-dogs/.

[234] C. Srl, «ATX 2000 Cicoria».

[235] C. Srl, «Plot 2735 Piccola Trebbiatrice Parcellare».

[236] PJM, «Old Picture of the Day,» [Online]. Available: http://old-photos.blogspot.it/2014/.

[237] J. v. Braun, «Rising Food Prices. What Should Be Done?,» International Food Policy Research Institute (IFPRI) Policy Brief, Washington DC, 2008.

[238] wpclipart, «cradle scythe aka grain cradle,» [Online]. Available: https://wpclipart.com/world_history/agriculture/cradle_scythe__aka_grain_cradle.jpg.html.

[239] Wikipedia, «Indice di sviluppo umano,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Indice_di_sviluppo_umano.