# Leveraging Artificial Intelligence to Manage a Sustainable Transition In Viticulture "STIV"

# MODULO 3: Ecologia e transizione energetica nella viticoltura

Questo modulo approfondisce le principali strategie di sostenibilità nella viticoltura, dalla gestione rigenerativa del suolo e l'efficienza idrica alla conservazione della biodiversità e all'uso responsabile dell'energia. Vengono analizzate tecnologie innovative e pratiche agroecologiche che riducono l'impatto ambientale e aumentano la resilienza dei vigneti ai cambiamenti climatici. L'obiettivo è comprendere come le pratiche ecologiche diventino un pilastro essenziale per una viticoltura competitiva e sostenibile, in linea con il Green Deal europeo.

Avviso legale

Finanziato dall'Unione europea. Le opinioni espresse appartengono, tuttavia, al solo o ai soli autori e non riflettono necessariamente le opinioni dell'Unione europea o dell'Agenzia esecutiva europea per l'istruzione e la cultura (EACEA). Né l'Unione europea né l'EACEA possono esserne ritenute responsabili.

20/02/2026

The STIV consortium

université de BORDEAUX

CROPT

FONDAZIONE COMUNITARIA DI AGRIGENTO E TRAPANI

ESCUELA DE VITICULTURA Y ENOLOGÍA FÉLIX JIMÉNEZ DE REQUENA

LaUNIÓ Llauradora i Ramadera

Erasmus+ Arricchisce la vita, apre la mente.

Co-funded by the European Union

# Contenuto

**1. Pratiche sostenibili in viticoltura: fondamenti e strategie.....3**
1.1. Gestione sostenibile del suolo nella viticoltura..... 3
1.2. Efficienza idrica e tecnologie di irrigazione nella viticoltura sostenibile.....7
1.3. Gestione della biodiversità nel vigneto..... 11
1.4. Uso sostenibile dell'energia nei vigneti.....16
1.4. Valorizzazione dei residui di potatura e della biomassa viticola..... 21
**2. La transizione energetica nel settore vinicolo.....26**
2.1. Integrazione delle energie rinnovabili nel settore vitivinicolo.....26
2.2. Progettazione e realizzazione di impianti energetici nelle cantine.....31
2.3. Strategie per ridurre l'impronta di carbonio nella produzione vinicola..... 34
2.4. Strumenti digitali per il monitoraggio dell'impronta di carbonio e del consumo energetico.....37
**2.5. Il cooperativismo energetico nelle comunità viticole..... 39**
3. Casi di studio sulla viticoltura sostenibile..... 47
3.1. Esempi di successo nella transizione energetica e nella viticoltura sostenibile... 47
3.2. Analisi comparativa dei modelli sostenibili nella viticoltura.....50
3.3. Impatto economico e ambientale della transizione energetica sulle aziende vinicole.....52
**Bibliografia.....56**
**Allegato I – Questioni oggetto di revisione.....60**
**Allegato II – Attività didattica: «Progettare un vigneto sostenibile»..... 62**

# 1. Pratiche sostenibili in viticoltura: fondamenti e strategie

La transizione verso una viticoltura sostenibile richiede una visione globale che abbracci tutte le componenti dell'ecosistema produttivo. Il vigneto, in quanto agroecosistema, dipende dalla salute del suolo, dall'uso efficiente dell'acqua, dalla conservazione della biodiversità e da una gestione responsabile dell'energia. Questi quattro pilastri interconnessi consentono di ridurre l'impatto ambientale della produzione vinicola, aumentare la resilienza ai cambiamenti climatici e garantire la qualità del vino nel lungo periodo.

## 1.1. Gestione sostenibile del suolo nella viticoltura

La gestione sostenibile del suolo è uno dei pilastri fondamentali della transizione ecologica della viticoltura. Il suolo non è solo il supporto fisico della vite, ma anche un ecosistema vivente che regola la fertilità, il ciclo idrologico, la biodiversità microbica e la resilienza della coltura agli impatti dei cambiamenti climatici (Bavaresco et al., 2016). In questo contesto, le pratiche convenzionali basate sulla lavorazione intensiva del terreno, sull'uso eccessivo di fertilizzanti chimici e di erbicidi sintetici hanno dimostrato effetti negativi quali la compattazione del suolo, la perdita di materia organica e la diminuzione della biodiversità (Morlat & Symoneaux, 2008). Di fronte a questo scenario, è necessario attuare strategie rigenerative e sostenibili che ottimizzino la salute del suolo e rafforzino gli ecosistemi viticoli.



### L'importanza della salute del suolo nella viticoltura

Il suolo funge da serbatoio di nutrienti e acqua, regola gli scambi gassosi e ospita microrganismi essenziali per la mineralizzazione e la disponibilità dei nutrienti (Tautges et al., 2019). Studi recenti hanno dimostrato che il degrado del suolo nelle regioni viticole, causato dall’eccessiva lavorazione del terreno e dalla perdita di materia organica, riduce la capacità del suolo di trattenere l’acqua, aumentando la vulnerabilità dei vigneti alla siccità (Van Leeuwen et al., 2019). Inoltre, la sua struttura fisica influenza direttamente il vigore della vite, la qualità delle uve e, di conseguenza, il profilo sensoriale del vino (Bordelon et al., 2020).

## Tetti verdi: una pratica indispensabile

L'introduzione di coperture vegetali nel vigneto rappresenta una delle strategie più efficaci per migliorare la salute del suolo. Le coperture permanenti o temporanee riducono l'erosione idrica, migliorano l'infiltrazione dell'acqua e contribuiscono alla fissazione del carbonio, mitigando il cambiamento climatico (Celette et al., 2008). Inoltre, favoriscono l'aumento della materia organica e dell'attività microbica, elementi fondamentali per la fertilità del suolo (Abad et al., 2021).

Ad esempio, nei vigneti mediterranei, la coltivazione di specie leguminose (trifoglio, veccia) come copertura vegetale ha determinato un aumento significativo del contenuto di azoto disponibile, riducendo la dipendenza dai fertilizzanti sintetici (Ruiz-Colmenero et al., 2013). Inoltre, queste coperture favoriscono la biodiversità funzionale, offrendo habitat agli insetti ausiliari che contribuiscono al controllo biologico dei parassiti (Garcia et al., 2018).



*Figura 1. Copertura vegetale nel vigneto.* *Fonte: La Rioja Alta*

## Lavorazione ridotta del terreno e manipolazione minima

La lavorazione intensiva del terreno provoca la frammentazione degli aggregati, la perdita di porosità e la diminuzione della materia organica, accelerando i processi di erosione (Prosdocimi et al., 2016). Al contrario, le pratiche di lavorazione ridotta o senza aratura si sono affermate come alternative sostenibili che preservano la struttura del suolo, migliorano l'infiltrazione e riducono la perdita di carbonio (Novara et al., 2019).

Uno studio condotto nei vigneti dell'Alto Monferrato (Italia) ha dimostrato che la combinazione di copertura vegetale e lavorazione ridotta del terreno ha ridotto significativamente il deflusso e l'erosione del suolo, migliorando al contempo la stabilità degli aggregati e l'infiltrazione rispetto ai terreni nudi (Biddoccu et al., 2016). Coincidentemente, recenti revisioni sottolineano che l'uso di coperture erbacee nei vigneti può ridurre le perdite di suolo tra il 30% e il 70%, a seconda delle specie utilizzate e delle condizioni climatiche (Abad et al., 2021; SARE, 2022). Allo stesso modo, lavori di sintesi condotti in Europa hanno confermato che la lavorazione minima del terreno non solo contribuisce a preservare la struttura del suolo, ma riduce anche il consumo energetico e le emissioni derivanti dall'uso di macchinari agricoli (López-Vicente et al., 2020).

### Aumento della materia organica e utilizzo di biofertilizzanti

L'incorporazione di compost e biofertilizzanti è uno strumento fondamentale per la rigenerazione dei suoli degradati. L'aggiunta di residui vinicoli, quali vinacce e fecce, al compostaggio può migliorare le proprietà del compost, quali la struttura fisica e l'umidità, contribuendo al riciclo dei nutrienti nel vigneto (Arqueros et al., 2023). La materia organica del suolo è inoltre associata a una maggiore capacità di scambio cationico, a una migliore ritenzione idrica nel campo e alla promozione del microbiota benefico (Ismail, 2025; Lal, 2020; Ankenbauer & Loheide, 2016)

Diversi studi hanno dimostrato che l'incorporazione di compost derivante da scarti vitivinicoli migliora la materia organica del suolo, ne aumenta la capacità di ritenzione idrica e stimola l'attività microbica benefica, favorendo così la fertilità e la resilienza dell'agroecosistema (Lucchetta et al., 2025; Moral et al., 2016). Sebbene gli effetti quantitativi varino a seconda della regione, del tipo di compost e della frequenza di applicazione, i dati indicano aumenti significativi del carbonio organico e della biomassa microbica del suolo dopo diverse campagne di applicazione.



*Figura 2. Utilizzo della vinaccia per la produzione di biofertilizzanti.*

## Pratiche per migliorare la ritenzione idrica

In un contesto caratterizzato da eventi meteorologici estremi e da una ridotta disponibilità idrica, è fondamentale aumentare la capacità del suolo di trattenere l'acqua. L'uso di coperture vegetali nei vigneti migliora la struttura del suolo, ne aumenta la porosità e favorisce una migliore infiltrazione e ritenzione idrica (Morlat & Jacquet, 2003). Allo stesso modo, l'applicazione di pacciamatura organica – come paglia o residui vegetali – aiuta a conservare l'umidità superficiale riducendo l'evaporazione e migliorando la disponibilità idrica, specialmente negli ecosistemi agricoli mediterranei semidesertici (Hueso-González et al., 2016; Wikipedia, n.d.).

## Esempi e certificazioni

Numerose aziende vinicole hanno adottato queste pratiche nell'ambito di certificazioni quali **"Sustainable Winegrowing"** (California) o **"HVE – Haute Valeur Environnementale"** (Francia), che promuovono strategie di gestione sostenibile del suolo. In Spagna, progetti come **"Viñas Vivas"** hanno dimostrato una riduzione del 40% nell'uso di erbicidi grazie all'implementazione della copertura vegetale e della biofertilizzazione (MAPA, 2022).

## 1.2. Efficienza idrica e tecnologie di irrigazione nella viticoltura sostenibile

L'acqua è una delle risorse più limitanti nella viticoltura, specialmente nelle regioni mediterranee dove le precipitazioni sono irregolari e le ondate di calore stanno diventando più frequenti a causa dei cambiamenti climatici (Ollas et al., 2019). In questo contesto, l'efficienza nell'uso dell'acqua non rappresenta solo un requisito agronomico, ma anche un obbligo etico e normativo per garantire la sostenibilità del vigneto (Jones et al., 2010). Una gestione efficiente dell'acqua comporta l'applicazione della giusta quantità d'acqua, al momento giusto e nell'area giusta, evitando perdite dovute all'evaporazione, alla percolazione profonda o al deflusso (Allen et al., 1998).



*Figura 3. Sistema di irrigazione a goccia. Fonte: Lena Ti*

### L'importanza della gestione sostenibile delle risorse idriche

La vite è una pianta considerata moderatamente resistente alla siccità, ma un grave stress idrico durante fasi quali la fioritura e l'allegagione può ridurre drasticamente la resa e la qualità dei frutti (Medrano et al., 2015). Tuttavia, è stato dimostrato che un deficit idrico controllato migliora parametri quali la concentrazione di antociani e l'intensità del colore nel vino (Intrigliolo & Castel, 2011). Inoltre, l'adozione di sistemi di irrigazione intelligenti che combinano tecniche quali l'irrigazione a deficit regolato (RDI), sensori, modellizzazione e tecnologie di telerilevamento sta prendendo piede in aree con risorse idriche limitate, migliorando la gestione idrica e l'efficienza nell'uso dell'acqua (Mirás-Avalos et al., 2021).

### Tecnologie chiave per l'efficienza idrica

#### a) Irrigazione a goccia e sotterranea

L'irrigazione a goccia è la tecnica più diffusa nella viticoltura moderna grazie alla sua elevata efficienza nel convogliare l'acqua direttamente alla zona radicale e nel ridurre al minimo le perdite dovute all'evaporazione, alla percolazione e al deflusso. In paesi come la Spagna, specialmente in zone a bassa piovosità come la Castiglia-La Mancia, l'irrigazione a goccia è ampiamente adottata. Inoltre, l'irrigazione sotterranea (SDI) o varianti come l'irrigazione diretta della zona radicale stanno dimostrando ulteriori miglioramenti nell'efficienza dell'uso dell'acqua e nella resa; ad esempio, lo studio "Optimization of Vineyard Water Management: Challenges, Strategies, and Perspectives" condotto nel 2021 ha riportato aumenti del 9-12% nella produzione e del 9-11% nell'efficienza idrica rispetto all'irrigazione di superficie.

**b) Sensori di umidità e potenziale idrico**

L'integrazione di sensori di umidità del suolo, quali quelli tensiometrici, capacitivi o basati sulla riflettometria nel dominio temporale (TDR), consente di conoscere in tempo reale il contenuto volumetrico di acqua e di migliorare la programmazione dell'irrigazione delle colture. Studi recenti evidenziano che l'integrazione di questi strumenti nei modelli di bilancio idrico contribuisce a ottimizzare l'uso dell'acqua, evitando gli eccessi e riducendo le perdite dovute alla percolazione o al deflusso (Jones, 2004).

Inoltre, le tecnologie fisiologiche, come i sensori di flusso della linfa, forniscono informazioni dirette sul fabbisogno idrico della pianta. Questi sistemi consentono di individuare tempestivamente situazioni di stress prima che si verifichino riduzioni della fotosintesi o della resa, offrendo una base più accurata per il processo decisionale nella gestione dell'irrigazione (Kumar, 2022; Jones, 2004).



*Figura 4. Sensore di flusso della linfa. Fonte: Agronic*

**c) Bilancio idrico e modelli DSS**

L'uso di modelli come il FAO-56 costituisce la base per stimare l'evapotraspirazione dei vigneti, integrando parametri climatici ($ET_0$), coefficienti colturali e fattori di stress idrico (Allen et al., 1998). Modelli avanzati come AquaCrop hanno dimostrato la loro utilità in viticoltura: nei vigneti da tavola in Messico, il modello ha raccomandato volumi di irrigazione inferiori di circa il 50% rispetto a quelli tradizionalmente applicati dagli agricoltori, il che ha portato a un miglioramento di quasi il 45% nella produttività idrica (Er-Raki, 2024).

In modo complementare, strumenti di bilancio idrico come SIMDualKc, basati sul doppio coefficiente colturale, hanno permesso di stimare con precisione l'evapotraspirazione nei vigneti non irrigati, combinando i dati climatici con le

informazioni sul bilancio idrico del suolo, dimostrando un elevato grado di concordanza con le osservazioni reali (Almeida et al., 2024).

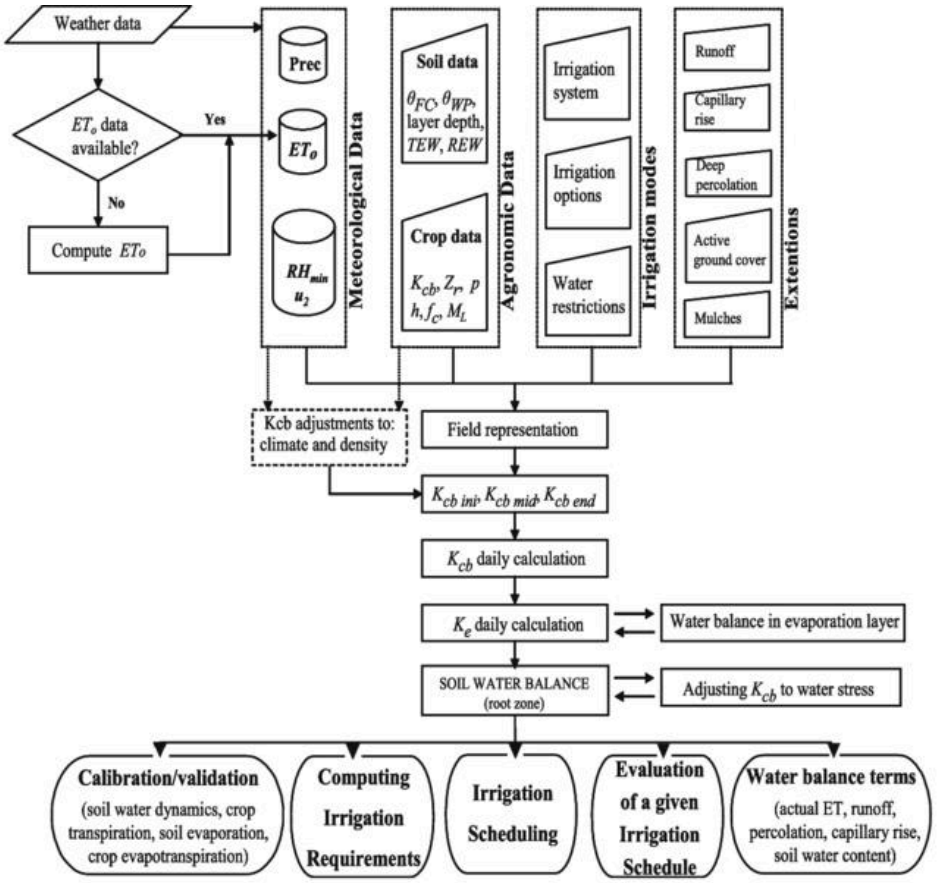


*Figura 5. Diagramma di flusso del modello SIMDualKc. Fonte: Paço et al. 2011*

### d) Irrigazione di precisione con tecnologia IoT

L'Internet delle cose (IoT) ha rivoluzionato la gestione dell'irrigazione in viticoltura grazie a piattaforme digitali che integrano sensori di umidità, stazioni meteorologiche e valvole automatizzate. Un esempio è CropX, che consente di gestire l'irrigazione tramite un'app mobile e di attivare le valvole a distanza grazie all'integrazione con i programmatori di irrigazione (CropX, 2023a; CropX, 2023b). Nelle regioni con connettività limitata, i protocolli di rete a basso consumo come LoRaWAN e NB-IoT sono essenziali, in quanto offrono lungo raggio, basso consumo energetico e trasmissione affidabile in ambienti rurali (Promwad, 2025; Singh et al., 2020; Semtech, 2025).

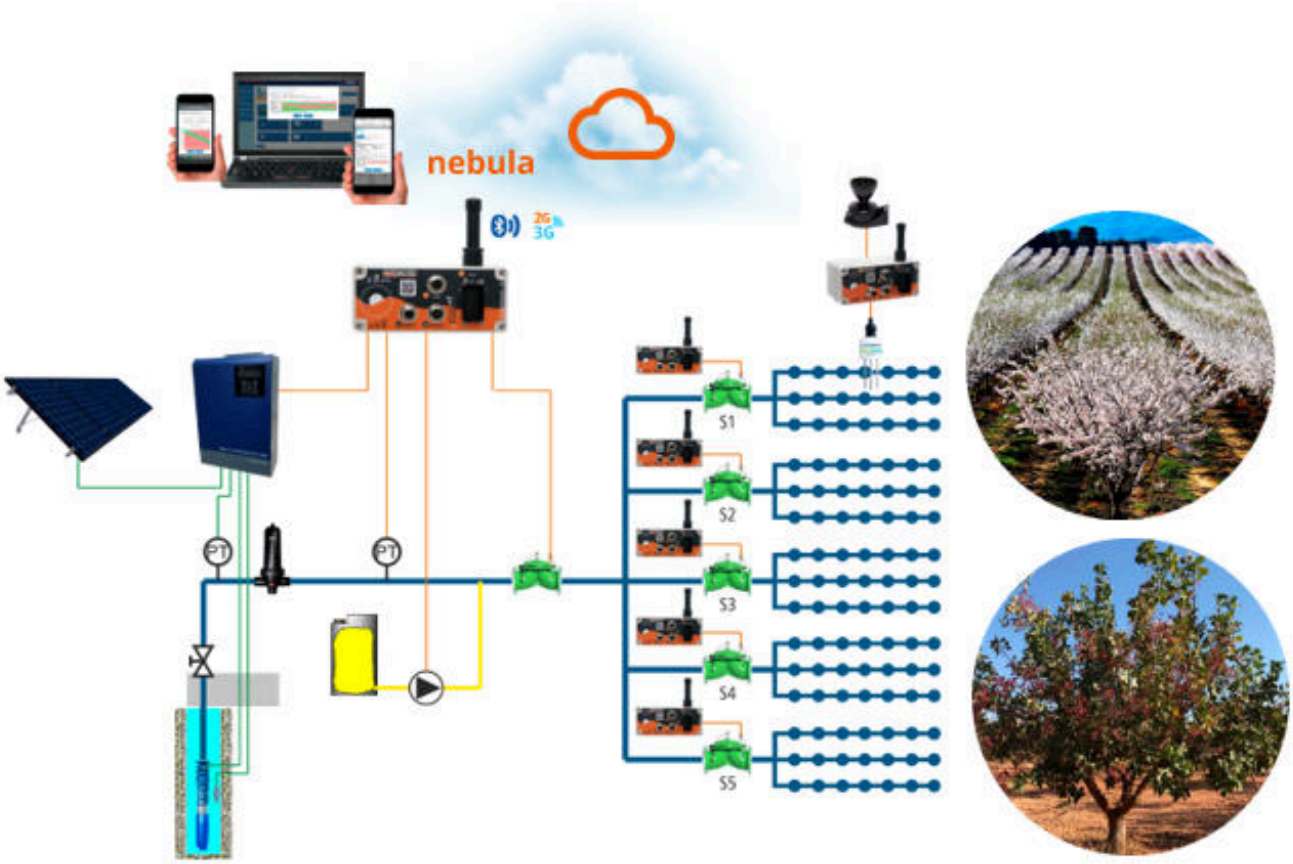


*Figura 6. Irrigazione di precisione con l'IoT.  Fonte: Orionis Smart Water Network*

### Strategie agronomiche complementari

Oltre all'irrigazione intelligente, la gestione del suolo è fondamentale per la conservazione dell'acqua nel vigneto. Le coperture del suolo contribuiscono a ridurre l'evaporazione, ad aumentare l'infiltrazione e a migliorare la disponibilità idrica nel profilo del suolo (Celette, Gaudin e Gary, 2008). Allo stesso modo, la selezione di portainnesti resistenti alla siccità è una strategia efficace per aumentare la resilienza del vigneto alla scarsità d'acqua (Gambetta, Herrera, Dayer, Hochberg e Castellarin, 2020).

### Vantaggi comprovati e ritorno economico

Il risparmio idrico nei vigneti non solo riduce i costi diretti, ma contribuisce anche alla sostenibilità energetica, dato che l'irrigazione meccanizzata e il pompaggio sono grandi consumatori di energia (GESTI, 2025). Inoltre, è dimostrato che l'implementazione di sistemi di irrigazione intelligenti, come il monitoraggio continuo e

l'automazione, può ridurre significativamente il consumo di acqua ed energia, con risparmi riportati tra il 20% e il 50% a seconda della coltura (FreshPlaza, 2022).

D'altra parte, come già accennato, uno stress idrico controllato ha effetti positivi sulla qualità del vino, poiché migliora la concentrazione dei composti fenolici e la complessità aromatica che caratterizzano i vini di alta gamma (Van Leeuwen & Darriet, 2016).

**Esempi di implementazione**

- **California:** E&J Gallo **ha segnalato** una riduzione del consumo idrico in seguito all'installazione di sensori di umidità e di un sistema di supporto decisionale (DSS) collegato all'irrigazione a goccia (Gallo Winery, 2021).
- **Australia:** Alcuni progetti pilota basati sull'**IoT e sulla telemetria** sono riusciti a ridurre il consumo idrico di 1.000 m³/ha senza compromettere la produzione, combinando il bilancio idrico e l'irrigazione a deficit controllato (Progetto SmartAqua, 2020).
- **Spagna (Ribera del Duero):** Il sistema **WANUGRAPE 4.0** ha integrato mappe NDVI, sensori del suolo e un sistema di irrigazione automatizzato, ottenendo un risparmio idrico del 30% e una riduzione dei costi energetici del 20% (WANUGRAPE, 2023).

## 1.3. Gestione della biodiversità nel vigneto

La biodiversità è un pilastro fondamentale dei sistemi vitivinicoli sostenibili. Il mantenimento di un'elevata diversità biologica nel vigneto non solo contribuisce alla salute dell'ecosistema, ma migliora anche la resilienza nei confronti di parassiti, malattie ed eventi meteorologici estremi (Altieri & Nicholls, 2017). La biodiversità funzionale favorisce l'equilibrio ecologico, riduce la dipendenza dai prodotti agrochimici e promuove servizi ecosistemici essenziali quali l'impollinazione, il controllo biologico e il miglioramento della fertilità del suolo (Bàrberi et al., 2010).



*Figura 7. Prevenzione dei parassiti tramite l'uso di coccinelle sui vigneti. Fonte: Familia Torres, 2020*

## L'importanza della biodiversità nella viticoltura

Le monocolture intensive in viticoltura hanno portato a una semplificazione degli agroecosistemi, riducendo la biodiversità e aumentando la vulnerabilità del vigneto a parassiti e malattie (Altieri & Nicholls, 2002). Al contrario, l'adozione di strategie di diversificazione strutturale, come l'inserimento di alberi, siepi o tetti verdi, contribuisce a ridurre l'incidenza dei parassiti, a diminuire l'uso di prodotti agrochimici e a promuovere la fornitura di servizi ecosistemici fondamentali (Favor et al., 2023).

## Strategie per aumentare la biodiversità

### a) Copertura vegetale

Le coperture vegetali permanenti o temporanee rappresentano una pratica fondamentale per promuovere la biodiversità. Queste specie erbacee, intercalate tra i filari, aumentano la diversità floristica, ospitano i nemici naturali dei parassiti e migliorano la struttura del suolo (Celette et al., 2009). Inoltre, contribuiscono a ridurre l'erosione, ad aumentare l'infiltrazione dell'acqua e a migliorare la fertilità organica. Ad esempio, studi condotti nei vigneti della regione Languedoc-Roussillon hanno dimostrato che la presenza di coperture erbacee e leguminose ha ridotto la popolazione di tripidi e acari del 30% rispetto ai terreni nudi (Ripoche et al., 2011).

### b) Corridoi ecologici e siepi

La creazione di siepi perimetrali e corridoi verdi collega il vigneto agli habitat naturali, creando rifugi per uccelli, impollinatori e artropodi utili (Bàrberi et al., 2010). In Toscana, l'inserimento di siepi di specie autoctone nei vigneti biologici ha aumentato la presenza di parassitoidi naturali della Lobesia botrana, riducendo l'uso di insetticidi (Gurr et al., 2017).

### c) Integrazione di policolture e aree di rifugio

La combinazione di vigneti con oliveti, frutteti o piccole aree di vegetazione naturale crea un mosaico agroecologico che favorisce la biodiversità. Questa strategia, nota come viticoltura integrata, è promossa dall'OIV (Organizzazione Internazionale della Vigna e del Vino) come modello di transizione verso sistemi resilienti (OIV, 2020).

### d) Conservazione della fauna ausiliaria

Specie come le crisope, le coccinelle e i ragni sono predatori naturali che contribuiscono al controllo dei parassiti. Ridurre l'uso di insetticidi ad ampio spettro e promuovere la creazione di rifugi per questi organismi è essenziale per mantenere stabile la loro popolazione (García et al., 2018). A Bordeaux, l'installazione di cassette

nido per uccelli insettivori ha ridotto del 50% la pressione della tignola della vite (Lobesia botrana) nei vigneti biologici (Maison & Filaine, 2021).

**I vantaggi della biodiversità nel vigneto**

1. **Controllo biologico naturale:** Minore dipendenza dai prodotti fitosanitari.
2. **Miglioramento della salute del suolo:** Aumento della materia organica e della capacità di ritenzione idrica.
3. **Riduzione dell'erosione:** Le piante tappezzanti proteggono dal dilavamento del suolo.
4. **Resilienza climatica:** I vigneti ricchi di biodiversità sono in grado di resistere meglio alle ondate di calore e alla siccità (Altieri & Nicholls, 2017).
5. **Valore aggiunto e marketing:** Certificazioni quali *la Biodiversity & Wine Initiative* o i marchi di viticoltura rigenerativa sono apprezzati dai consumatori (Stolz et al., 2011).




*Figura 8. Certificati di vino biologico.  Fonte: piece-meal*

## Sfide nell'attuazione

L'integrazione di misure volte a promuovere la biodiversità nel vigneto rappresenta una strategia fondamentale per una viticoltura più sostenibile e resiliente. Tuttavia, la sua attuazione non è priva di difficoltà. Le sfide riguardano sia gli aspetti economici e tecnici che quelli sociali e culturali, riflettendo la complessità dell'integrazione dei criteri ecologici in un settore tradizionalmente orientato alla produzione enologica e alla qualità. A questi fattori si aggiungono l'incertezza climatica, la mancanza di adeguate strutture di supporto e i vincoli di mercato, che possono rallentare la diffusione di queste pratiche. Identificare e comprendere queste sfide è essenziale per offrire soluzioni adeguate a ciascun territorio viticolo.

- **Costo iniziale elevato:** La realizzazione di siepi, fasce florali o tetti verdi comporta un investimento economico significativo, sia in termini di materiali che di manodopera. Inoltre, i benefici ecologici e produttivi derivanti da queste misure si manifestano solitamente nel medio o lungo termine, il che può suscitare riluttanza nei viticoltori che operano con margini ridotti o che cercano un ritorno economico immediato. In molti casi, la mancanza di accesso a incentivi economici o a programmi di sostegno aggrava ulteriormente questo ostacolo.

- **Conflitti agronomici:** La presenza di vegetazione spontanea può entrare in competizione con la vite per l'acqua e le sostanze nutritive, specialmente nelle regioni con clima secco o su terreni meno fertili. Una scelta inadeguata delle specie o una gestione scorretta (ad esempio, la mancata falciatura tempestiva o il mancato adeguamento delle densità) possono aumentare la pressione sul vigneto, ridurre la resa o addirittura favorire la comparsa di parassiti e malattie. Ciò richiede un'attenta gestione tecnica e una pianificazione adeguata a ciascuna parcella.

- **Mancanza di conoscenze tecniche:** L'attuazione efficace delle pratiche volte a promuovere la biodiversità richiede una formazione in agroecologia, ecologia funzionale e tecniche di gestione integrata dei parassiti e del suolo. Molti lavoratori e responsabili sul campo non dispongono della formazione necessaria, il che aumenta il rischio di errori nella pianificazione e nella gestione di tali misure. La mancanza di consulenti viticoli specializzati limita inoltre l'accesso a una guida pratica e su misura.

- **Accettazione sociale e culturale:** Nelle regioni viticole tradizionali, può esserci una certa resistenza a modificare pratiche che si tramandano da generazioni. La percezione che un vigneto "con erbe" o con "aree incolte" sia trascurato può

causare tensioni all'interno della comunità locale, rendendo difficile l'adozione di approcci più orientati alla biodiversità.

- **Vincoli normativi e di certificazione:** Sebbene le politiche agricole dell'Unione Europea o altri quadri normativi offrano incentivi per le pratiche sostenibili, la burocrazia che ne deriva e la mancanza di chiarezza nei requisiti possono scoraggiare i produttori. Inoltre, alcuni sistemi di certificazione potrebbero non riconoscere adeguatamente i benefici di tali misure, riducendo così la motivazione ad adottarle.

- **Monitoraggio e valutazione complessi:** Misurare l'impatto reale delle misure di gestione della biodiversità sul vigneto non è facile. Ciò richiede strumenti di monitoraggio, indicatori di biodiversità e, in molti casi, la collaborazione con istituti di ricerca. Senza questo monitoraggio, è difficile giustificare i costi e gli sforzi investiti o comunicare i benefici ai consumatori e agli organismi di regolamentazione.

- **Rischi climatici e variabilità interannuale:** Fattori quali siccità prolungate, piogge intense o sbalzi di temperatura possono rendere difficile la realizzazione e la manutenzione di siepi o coperture. Negli scenari di cambiamento climatico, queste incertezze aumentano, sollevando dubbi sulla sostenibilità a lungo termine di determinate misure.

- **Mercato e domanda limitata:** Sebbene sempre più consumatori attribuiscano importanza alla sostenibilità e al rispetto della biodiversità, non sono sempre disposti a pagare un prezzo più alto per i vini prodotti secondo questi principi. Questo divario tra l'impegno produttivo e il riconoscimento sul mercato può scoraggiare gli investimenti iniziali.

## Esempi di implementazione riuscita

Nonostante le difficoltà che può comportare in diverse comunità, il potenziale della gestione della biodiversità nei vigneti è dimostrato da numerosi esempi di successo a livello internazionale:

- **Francia (Champagne)** L'introduzione sistematica di coperture vegetali, siepi e corridoi verdi nella regione dello Champagne ha portato a una riduzione del 40% dell'uso di erbicidi in un arco di cinque anni (Comité Champagne, 2022). Oltre ai benefici ambientali, questa strategia ha rafforzato l'immagine della denominazione come punto di riferimento in materia di sostenibilità, generando valore aggiunto sui mercati internazionali.

- **Spagna (Ribera del Duero):** Il progetto «Viñas con Vida» ha creato rifugi per la biodiversità, tra cui alberghi per insetti, cassette nido per uccelli insettivori e la piantumazione di specie mellifere. Di conseguenza, nei vigneti partecipanti si è osservato un notevole aumento della presenza di impollinatori e un rafforzamento dei servizi ecosistemici. Grazie a queste misure, diverse cantine

della zona hanno ottenuto la certificazione Wildlife Friendly Alliance (WFA), che ha rappresentato un elemento di differenziazione sul mercato.

- **Sudafrica** L'iniziativa "Biodiversity and Wine Initiative" (BWI) è uno dei programmi pionieristici a livello mondiale. Grazie ad accordi tra produttori e organizzazioni ambientaliste, sono stati protetti oltre 112.000 ettari di habitat naturali adiacenti ai vigneti (BWI, 2021). Questa strategia non solo ha permesso di conservare specie endemiche di flora e fauna, ma ha anche generato una narrativa di sostenibilità che ha posizionato i vini sudafricani in un mercato globale sempre più sensibile alle questioni ambientali.

- **Italia (Toscana e Sicilia)** Diverse aziende vinicole hanno optato per progetti di agroforestazione nei vigneti, integrando alberi e arbusti tra gli appezzamenti per favorire l'impollinazione e regolare il microclima. Questi sistemi misti hanno dimostrato di migliorare la ritenzione idrica, ridurre l'erosione e aumentare l'attrattiva paesaggistica, con benefici anche per l'enoturismo.

- **Cile (Valle di Colchagua)** In collaborazione con alcune ONG ambientaliste, alcune aziende vinicole hanno creato corridoi biologici che collegano aree di foresta autoctona frammentata. Ciò ha favorito la presenza di fauna selvatica, come volpi e rapaci, contribuendo al contempo alla riduzione dei parassiti nei vigneti attraverso il controllo biologico naturale.

## 1.4. Uso sostenibile dell'energia nei vigneti

L'uso efficiente e sostenibile dell'energia nella viticoltura è un elemento essenziale per ridurre l'impronta di carbonio del settore e progredire verso un'economia a basse emissioni. L'energia viene impiegata in varie fasi del ciclo produttivo, dalla lavorazione del terreno, all'irrigazione e alla protezione fitosanitaria, fino alle operazioni di vendemmia e al trasporto in cantina. Secondo l'*Organizzazione Internazionale della Vigna e del Vino* (OIV, 2021), il consumo energetico nella viticoltura convenzionale può rappresentare fino al 25% dei costi operativi, principalmente a causa dell'uso di combustibili fossili nelle macchine agricole e dell'elettricità per i sistemi di pompaggio e irrigazione.

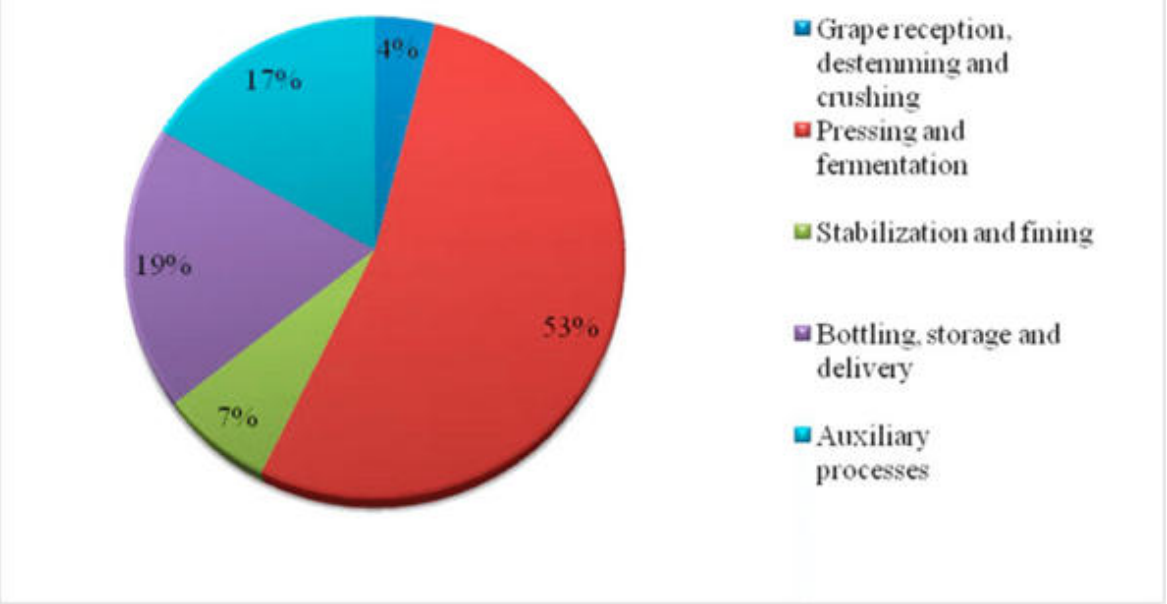


*Figura 9. Distribuzione del consumo energetico nella produzione vinicola in un'azienda vinicola italiana. Fonte: Malvoni et al. 2017*

## L'importanza strategica del risparmio energetico nella viticoltura

L'attuale contesto caratterizzato dai cambiamenti climatici, dalla crisi energetica e dalle politiche di decarbonizzazione (Accordo di Parigi, Green Deal europeo) impone alle aziende vitivinicole di ottimizzare il proprio consumo energetico, integrando fonti rinnovabili e tecnologie efficienti (Commissione europea, 2020). Il concetto di *neutralità climatica* nella viticoltura è sempre più presente, specialmente nelle denominazioni di origine che promuovono marchi di sostenibilità come *International Wineries for Climate Action* (IWCA, 2022).

L'efficienza energetica nella viticoltura è un obiettivo prioritario, poiché i consumi legati all'irrigazione e alla gestione dei vigneti possono rappresentare una parte significativa dei costi operativi e delle emissioni. Gli studi di analisi del ciclo di vita (LCA) hanno dimostrato che la maggior parte dell'impronta di carbonio deriva da fasi quali l'imbottigliamento, il consumo energetico delle cantine e i materiali di imballaggio, piuttosto che dalla coltivazione stessa (Pattara et al., 2012).

L'adozione di pratiche sostenibili e l'implementazione di tecnologie eco-innovative contribuiscono a migliorare la sostenibilità operativa e a rispondere alle esigenze dei consumatori sensibili al cambiamento climatico (Brito et al., 2024).

## Principali strategie per un uso sostenibile dell'energia

### a) Audit energetici e monitoraggio dei consumi

Prima di attuare qualsiasi misura, è fondamentale conoscere il profilo energetico del vigneto. Gli audit consentono di individuare i punti critici di consumo, quali il pompaggio per l'irrigazione, la climatizzazione degli impianti o l'uso dei trattori.

Strumenti come **EnergyCheck Viticulture** o **Intelligent Rural Energy** consentono di monitorare i consumi in tempo reale, facilitando il processo decisionale (FAO, 2020).

### b) Efficienza nelle macchine agricole

L'utilizzo di macchinari più efficienti e ben mantenuti è una pratica fondamentale. Sostituire i trattori diesel con trattori ibridi o elettrici, come il modello New Holland T4 Electric Power, può ridurre le emissioni dirette fino al 90% e i costi del carburante del 50% (New Holland, 2022). Inoltre, i sistemi di guida GPS e l'agricoltura di precisione riducono gli spostamenti superflui, ottimizzando i consumi (Matese & Di Gennaro, 2015) .

### c) Ottimizzazione dell'irrigazione

L'irrigazione rappresenta dal 40% al 60% del consumo energetico dei vigneti (Allen et al., 1998). Tecnologie quali i convertitori di frequenza nelle pompe, i sensori di umidità del suolo e l'integrazione dell'energia solare per il pompaggio fotovoltaico sono fondamentali. In Spagna, il progetto Solarwine è riuscito a ridurre il costo energetico del pompaggio del 70% installando pannelli solari nelle cooperative vinicole (IDAE, 2021).

### d) Integrazione delle energie rinnovabili

L'installazione di impianti fotovoltaici è la soluzione più diffusa. Nei vigneti della Rioja e di Bordeaux sono stati realizzati tetti solari sui magazzini e strutture leggere lungo i filari, che generano energia per i sistemi di pompaggio e di monitoraggio. Nelle regioni ventose si ricorre anche all'energia eolica come fonte complementare per alimentare le stazioni meteorologiche e i sistemi di monitoraggio (Bindi & Olesen, 2011).

### e) Recupero e stoccaggio di energia

L'uso di batterie di accumulo e di sistemi ibridi garantisce la continuità dell'approvvigionamento nelle zone rurali con connettività limitata. Inoltre, sono state realizzate micro-reti che collegano diverse aziende agricole, riducendo il costo unitario dell'energia rinnovabile (Kamilaris et al., 2017).

### f) Digitalizzazione e gestione intelligente dell'energia

Il concetto di vigneto intelligente si applica anche al consumo energetico. Piattaforme IoT come **VitiEnergy** integrano i dati dei sensori, le previsioni meteorologiche e algoritmi di ottimizzazione per attivare automaticamente l'irrigazione, l'illuminazione e i processi di vinificazione nei momenti in cui il costo dell'energia è più basso (Wolfert et al., 2017). Ciò consente di spostare la domanda verso i periodi di minor consumo e di ridurre al minimo i picchi di consumo.

## I vantaggi dell'efficienza energetica nei vigneti

- **Riduzione dei costi operativi:** L'adozione di misure di efficienza energetica – quali l'ammodernamento dei sistemi di irrigazione, la sostituzione degli apparecchi di illuminazione con tecnologia a LED o l'integrazione di energie rinnovabili – può comportare un risparmio compreso tra il 20% e il 40% sul consumo energetico complessivo di un vigneto e della relativa cantina. Questi risparmi sono particolarmente significativi nelle regioni in cui l'elettricità rappresenta una parte significativa dei costi di produzione e consentono di liberare risorse economiche che possono essere reinvestite nell'innovazione, nella qualità enologica o nella gestione ambientale.
- **Minore impronta di carbonio:** La riduzione del consumo di combustibili fossili e l'ottimizzazione dell'efficienza nei processi chiave (irrigazione, pompaggio, refrigerazione, trasporto interno) consentono di ridurre in modo significativo le emissioni di gas serra. Ciò non solo contribuisce al rispetto di normative ambientali sempre più rigorose, ma facilita anche l'ottenimento di certificazioni di sostenibilità (IWCA, WFA, ecc.), che sono diventate un valore strategico nei mercati internazionali sensibili alle tematiche di sostenibilità.
- **Resilienza energetica:** La diversificazione delle fonti energetiche attraverso l'integrazione di energia solare, eolica o da biomasse riduce la dipendenza dai combustibili fossili e dalle fluttuazioni del mercato energetico globale. In un contesto caratterizzato dalla volatilità dei prezzi dell'energia, disporre di impianti propri consente alle aziende vitivinicole di proteggersi da aumenti imprevisti e di garantire la continuità delle attività, anche in caso di crisi energetica.
- **Valore aggiunto nel marketing:** L'efficienza energetica non solo genera vantaggi interni, ma può anche essere comunicata come parte integrante dell'identità del marchio. Concetti quali il vino a impatto zero o la cantina a impatto zero offrono un chiaro elemento di differenziazione in un mercato sempre più competitivo. Per il consumatore attento, un vino prodotto con un basso impatto energetico trasmette un impegno concreto nei confronti dell'ambiente, il che ne accresce l'attrattiva e può giustificare un valore percepito più elevato.

## Le sfide della transizione energetica nei vigneti

- **Elevato investimento iniziale:** L'installazione di impianti fotovoltaici, microturbine eoliche o batterie di accumulo richiede un notevole investimento in conto capitale, soprattutto nelle aziende viticole di piccole o medie dimensioni, dove i margini di profitto sono ridotti. Sebbene la redditività si raggiunga nel medio e lungo termine, l'esborso iniziale può rappresentare un ostacolo per i produttori che non hanno accesso al credito o a finanziamenti specifici.
- **Manutenzione e aggiornamento tecnologico:** Le tecnologie per la produzione di energia rinnovabile e l'efficienza energetica richiedono controlli periodici, ricambi e aggiornamenti software. Nelle zone rurali, dove l'assistenza tecnica specializzata è limitata, queste attività possono causare tempi di inattività o costi aggiuntivi. Inoltre, il rapido progresso tecnologico fa sì che le

apparecchiature installate appena 10 anni fa siano già meno efficienti o non dispongano di un'assistenza tecnica adeguata.

- **Mancanza di incentivi chiari:** Sebbene siano disponibili aiuti nell'ambito della PAC, dei programmi europei (Orizzonte Europa, LIFE) o delle iniziative nazionali di transizione energetica, l'accesso a tali aiuti è spesso ostacolato da una burocrazia complessa, da lunghe scadenze e da requisiti tecnici difficili da soddisfare. Ciò scoraggia la partecipazione dei piccoli e medi produttori, che spesso non dispongono del personale amministrativo necessario per gestire le richieste.
- **Divario di competenze:** La digitalizzazione e l'automazione dei sistemi energetici (sensori, software di gestione, pannelli intelligenti) richiedono un livello di formazione tecnica che non sempre è presente nelle squadre di lavoro dei vigneti. Senza una formazione specifica, si corre il rischio di un utilizzo inefficiente o addirittura errato delle tecnologie, con una conseguente riduzione dei benefici attesi. La mancanza di programmi di formazione adeguati al settore vitivinicolo continua a rappresentare una sfida da superare.

**Esempi di implementazione riuscita**

- **Familia Torres (Spagna):** Questa cantina si è impegnata con determinazione nella transizione energetica, installando impianti fotovoltaici che coprono circa il 25% del proprio fabbisogno elettrico e investendo in trattori elettrici per sostituire progressivamente la propria flotta a combustione. Grazie a queste misure, ha ottenuto una riduzione del 30% delle proprie emissioni totali di $CO_2$ (IWCA, 2022). Inoltre, ha integrato queste azioni con progetti di cattura del carbonio attraverso il rimboschimento e la rigenerazione del suolo.



*Figura 10. Impianti fotovoltaici della famiglia Torres. Fonte: Famiglia Torres*

- **Jackson Family Wines (USA):** Con sede in California, questa azienda ha attuato un ambizioso piano di energia rinnovabile che comprende microturbine eoliche, pompe solari e sistemi di accumulo di energia. Di conseguenza, ha ottenuto un risparmio annuo di oltre 2 milioni di kWh, rafforzando la propria resilienza alle siccità e alle frequenti interruzioni di corrente nella regione

(Sustainable Winegrowing Alliance, 2021). Il suo modello è stato replicato come punto di riferimento nella viticoltura americana.

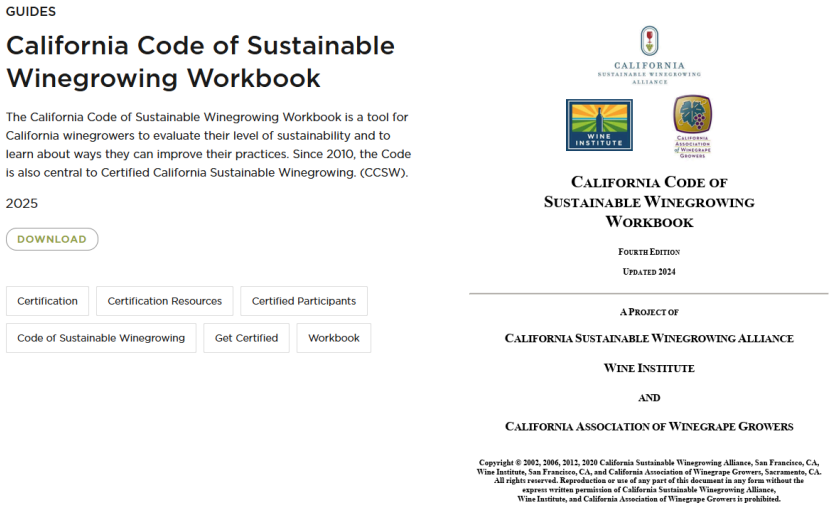


*Figura 11. Manuale del Codice di viticoltura sostenibile della California. Fonte: California Sustainable Winegrowing Alliance*

- **Château Smith Haut Lafitte (Francia):** Questa tenuta vinicola bordolese ha adottato un approccio sostenibile esemplare, che coniuga biodiversità, economia circolare ed efficienza energetica. La tenuta è stata pioniera nella cattura della $CO_2$ rilasciata durante la fermentazione e nel suo riutilizzo per la produzione di bicarbonato di sodio, un'innovazione unica nel mondo del vino, nell'ambito di una cantina sotterranea a basso consumo energetico nota come "Stealth Cellar". Inoltre, questo progetto integra anche elementi quali l'energia solare, lo scambio termico geotermico, la raccolta dell'acqua piovana e l'utilizzo di materiali locali per mantenere una temperatura stabile senza la necessità di sistemi di raffreddamento meccanici intensivi. L'iniziativa va oltre l'efficienza energetica: favorisce un modello di economia circolare, in cui i rifiuti agricoli e i sottoprodotti della cantina vengono utilizzati in molteplici modi. Ad esempio, per la produzione di prodotti di bellezza, rafforzando un modello sostenibile all'interno dell'azienda agricola.




*Figura 12. Collettore di $CO_2$ per processi di fermentazione. Fonte: Château Smith Haut Lafitte*

## 1.4. Valorizzazione dei residui di potatura e della biomassa viticola

La gestione dei residui di potatura e della biomassa legnosa prodotti nei vigneti rappresenta una componente strategica della transizione verso sistemi di produzione più circolari e resilienti ai cambiamenti climatici. Tradizionalmente, i residui di potatura della vite e altri residui legnosi vengono rimossi dal campo o bruciati in loco. Queste pratiche generano emissioni dirette di gas serra, inquinamento da particolato e la perdita di risorse organiche potenzialmente preziose.

Nel contesto della viticoltura sostenibile, questi materiali vengono sempre più riconosciuti come fattori strategici in grado di migliorare la fertilità del suolo, aumentare la capacità di ritenzione idrica e contribuire al sequestro del carbonio a lungo termine. Questo cambiamento di prospettiva — dallo smaltimento dei rifiuti alla gestione delle risorse — pone il viticoltore come attore attivo nei cicli biogeochimici all'interno del sistema agricolo.

La Commissione europea e la FAO hanno sottolineato che l'aumento del carbonio organico nel suolo costituisce una delle misure più efficaci per migliorare la salute del suolo e l'adattamento ai cambiamenti climatici (Commissione europea, 2021; FAO, 2017). In questo contesto, il reimmissione della biomassa viticola nel suolo rappresenta una pratica con un elevato potenziale ambientale e agronomico.

### Dai rifiuti alle risorse: i principi dell'economia circolare nel vigneto

La valorizzazione dei residui di potatura si basa sui principi dell'economia circolare applicati all'agricoltura: chiudere i cicli dei nutrienti all'interno dell'azienda agricola. Anziché fare affidamento esclusivamente su fertilizzanti minerali esterni, i vigneti

possono riutilizzare parte della biomassa generata ogni anno per mantenere o migliorare le proprietà fisiche, chimiche e biologiche del suolo.

La letteratura scientifica dimostra che i sistemi agricoli che integrano residui organici tendono ad aumentare progressivamente i livelli di carbonio organico nel suolo, migliorandone la struttura e la stabilità degli aggregati (Lal, 2004; FAO, 2017). Nelle regioni mediterranee, dove i suoli presentano spesso un basso contenuto di materia organica e sono altamente vulnerabili all'erosione, questa pratica riveste particolare importanza.

Da un punto di vista economico, il riutilizzo interno della biomassa riduce la dipendenza da fattori esterni e rafforza l'immagine ambientale dell'azienda vinicola — un fattore sempre più importante nei mercati internazionali e nei sistemi di certificazione di sostenibilità.




*Figura 14. Adesione dei residui di potatura al suolo*

## Percorsi di valorizzazione

L'attuazione pratica del riutilizzo della biomassa può seguire diversi approcci a seconda delle condizioni del suolo, del clima, delle attrezzature disponibili e degli obiettivi di produzione.

- **Sminuzzamento e incorporazione diretta:** I residui di potatura vengono sminuzzati meccanicamente e distribuiti sulla superficie del suolo oppure incorporati leggermente. Ciò accelera la decomposizione e contribuisce alla formazione di humus. Studi condotti sulla viticoltura mediterranea hanno evidenziato un aumento del carbonio organico nel suolo e un miglioramento della stabilità strutturale grazie a pratiche di sminuzzamento sistematiche (Martínez-Casasnovas et al., 2012).

- **Compostaggio:** Il compostaggio stabilizza il materiale organico e produce un ammendante più omogeneo. Riduce i rischi sanitari e consente un migliore

controllo dell'equilibrio carbonio-azoto, prevenendo l'immobilizzazione temporanea dell'azoto (FAO, 2017).

- **Pacciamatura o copertura del terreno:** La biomassa sminuzzata lasciata in superficie funge da pacciamatura protettiva, riducendo l'evaporazione, inibendo la crescita delle erbacce e proteggendo il terreno dall'erosione idrica. Ciò risulta particolarmente efficace nei vigneti in pendenza soggetti al ruscellamento.

- **Produzione di biochar:** Attraverso la pirolisi, i residui legnosi possono essere trasformati in biochar, un materiale carbonioso altamente stabile in grado di permanere nel suolo per decenni. Il biochar migliora la struttura del suolo e la ritenzione idrica e presenta un notevole potenziale di sequestro del carbonio (Woolf et al., 2010). Sebbene richieda investimenti tecnologici, la sua capacità di mitigazione climatica a lungo termine è considerevole.

### Benefici agronomici osservati

Le ricerche condotte in Europa e nel Mediterraneo evidenziano costantemente diversi effetti positivi quando i residui di potatura vengono reimmessi nel terreno per diverse stagioni:

- Aumento del contenuto di carbonio organico nel suolo
- Miglioramento della stabilità degli aggregati e della struttura del suolo
- Maggiore infiltrazione e ritenzione idrica
- Aumento dell'attività microbica
- Riduzione dell'erosione nei vigneti in pendenza

La FAO sottolinea che l'aumento della materia organica nel suolo rafforza la resilienza alla siccità e agli eventi climatici estremi (FAO, 2017). Inoltre, alcuni studi indicano che la combinazione dell'incorporazione di biomassa con le colture di copertura amplifica i miglioramenti delle proprietà fisiche del suolo e delle dinamiche idriche (Martínez-Casasnovas et al., 2012).

### Considerazioni tecniche e limitazioni

La valorizzazione dei residui di potatura offre evidenti vantaggi agronomici e ambientali, ma il suo successo dipende da una corretta attuazione. Il reimmissione della biomassa legnosa nel sistema viticolo deve essere pianificata con attenzione per evitare effetti indesiderati dal punto di vista nutrizionale o fitosanitario.

Una delle principali preoccupazioni riguarda i **rischi fitosanitari**. Il legno di potatura può contenere spore fungine o agenti patogeni risalenti alle stagioni precedenti. Nelle zone soggette a elevata pressione patogena, i residui dovrebbero essere sminuzzati finemente per accelerarne la decomposizione, mentre il materiale visibilmente infetto non dovrebbe essere reimmesso nel terreno. Un adeguato monitoraggio e un supporto consultivo sono essenziali per prevenire il trasferimento dell'inoculo (Rossi et al., 2012).

Un altro fattore chiave è il **rapporto carbonio-azoto (C/N)**. I residui legnosi sono ricchi di carbonio e possono immobilizzare temporaneamente l'azoto del suolo durante la

decomposizione. Sebbene questo effetto sia solitamente di breve durata, i piani di concimazione dovrebbero prevedere possibili carenze temporanee, in particolare nei terreni a bassa fertilità (FAO, 2017).

La **velocità di decomposizione** dipende dalla qualità della triturazione, dall'umidità, dalla temperatura e dall'attività biologica del suolo. Una granulometria più fine e condizioni ambientali favorevoli favoriscono la decomposizione e l'integrazione in materia organica stabile (Lal, 2004).

**Occorre inoltre tenere conto di alcuni aspetti operativi**. La triturazione richiede macchinari e manodopera aggiuntiva, il che può rappresentare un ostacolo per le piccole aziende viticole. I sistemi cooperativi di condivisione delle attrezzature possono ridurre questo ostacolo e favorire l'adozione di questa pratica.

**L'incorporazione dei residui deve essere compatibile con altre pratiche di gestione del suolo**, comprese le colture di copertura e le operazioni meccaniche. Una pianificazione integrata della gestione del suolo massimizza i benefici e riduce i conflitti (Martínez-Casasnovas et al., 2012).

Infine, **il miglioramento del suolo è un processo graduale**. Per valutare l'impatto a lungo termine è necessario monitorare indicatori quali la materia organica del suolo, la capacità di infiltrazione e le prestazioni delle viti (Commissione europea, 2021).

Se gestita correttamente, la valorizzazione dei residui di potatura rafforza la resilienza del suolo e contribuisce al raggiungimento degli obiettivi di mitigazione dei cambiamenti climatici. Se pianificata in modo inadeguato, può comportare rischi agronomici evitabili. Il successo dipende dall'integrazione, dal monitoraggio e dall'adattamento alle condizioni locali.

### Dimensione economica

Sebbene i benefici ambientali siano ampiamente documentati, i viticoltori devono valutare anche le implicazioni finanziarie. Potrebbero essere necessari investimenti iniziali in attrezzature per la triturazione o in manodopera aggiuntiva. Tuttavia, è stato dimostrato che le pratiche di gestione rigenerativa del suolo riducono i costi a lungo termine di concimazione e irrigazione, migliorando al contempo la resilienza (FAO, 2017).

La redditività economica raggiunge il massimo livello quando la valorizzazione della biomassa si inserisce in una strategia di sostenibilità globale, in cui i miglioramenti ambientali si traducono in una differenziazione sul mercato e in un valore aggiunto per il marchio.

### Casi di successo:

- **VineAdapt (Spagna):** Il progetto LIFE VineAdapt ha valutato le misure di adattamento climatico nei vigneti spagnoli. L'uso di residui triturati come pacciamatura superficiale ha dimostrato una riduzione dei tassi di evaporazione e un miglioramento della ritenzione idrica del suolo, contribuendo a ridurre il fabbisogno irriguo in condizioni di siccità.

- **VITIREG (Spagna, Portogallo e Francia):** Il progetto VITIREG si è occupato di promuovere pratiche rigenerative nei vigneti, tra cui la triturazione dei tralci di vite e il loro reimmesso nel terreno come strategia per aumentare la materia organica e migliorare la struttura del suolo.

  Gli studi hanno dimostrato che l'apporto continuo di biomassa favorisce l'attività biologica e contribuisce ad aumentare la resistenza alla siccità, soprattutto nelle zone mediterranee caratterizzate da una scarsa fertilità naturale.




*Figura 14. Consorzio VITIREG*

- **Institut Français de la Vigne et du Vin (Francia):** L'IFV ha condotto programmi sperimentali a lungo termine sull'incorporazione dei residui di potatura sminuzzati. I risultati indicano un aumento progressivo del carbonio organico nel suolo e una maggiore stabilità strutturale, in particolare se abbinata alla coltivazione di colture di copertura permanenti.

## 2. La transizione energetica nel settore vinicolo

La transizione energetica rappresenta una delle sfide più grandi e, al tempo stesso, una delle principali opportunità per il settore vitivinicolo nell'attuale contesto di crisi climatica e di transizione verso un'economia a basse emissioni di carbonio. Il settore vitivinicolo, tradizionalmente ad alto consumo energetico in fasi quali la vinificazione, lo stoccaggio, la climatizzazione e il trasporto, deve affrontare la necessità di ridurre la propria dipendenza dai combustibili fossili e di orientarsi verso modelli di produzione in linea con il Green Deal europeo e gli impegni internazionali per mitigare il cambiamento climatico (Commissione europea, 2020).

In questo contesto, l'integrazione delle energie rinnovabili, l'ottimizzazione dell'efficienza energetica e l'adozione di sistemi di gestione digitale diventano pilastri strategici. Queste misure non solo riducono le emissioni di gas serra (GHG), ma contribuiscono anche a migliorare la competitività, a ridurre i costi operativi e a rafforzare la reputazione delle aziende vinicole in materia di sostenibilità agli occhi di consumatori sempre più attenti (OIV, 2021).

La transizione energetica nel settore vitivinicolo non dovrebbe quindi essere intesa solo come un obbligo ambientale, ma come un cambiamento strutturale che stimola l'innovazione tecnologica, promuove l'economia circolare e apre nuove opportunità di differenziazione in un mercato globale altamente competitivo.



*Figura 15. Installazione del sistema di "ombreggiatura intelligente" della cantina San Gabriel. Fonte: Laura Cano Liébana, 2022*

### 2.1. Integrazione delle energie rinnovabili nel settore vitivinicolo

L'obiettivo principale della transizione energetica nel settore vitivinicolo è quello di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e minimizzare l'impronta di carbonio, in linea con gli impegni internazionali in materia di cambiamenti climatici e con le linee guida del Green Deal europeo (Commissione europea, 2020). L'integrazione delle

energie rinnovabili nelle cantine e nei vigneti non risponde solo a un'esigenza ambientale, ma rappresenta anche un'opportunità economica, poiché riduce i costi energetici nel lungo termine, garantisce l'autonomia energetica e migliora l'immagine di sostenibilità agli occhi di consumatori sempre più consapevoli (Stolz et al., 2011).

L'Organizzazione Internazionale della Vigna e del Vino (OIV) ha individuato nell'energia un fattore chiave nella strategia di sostenibilità del settore, promuovendo l'integrazione di sistemi basati sulle energie rinnovabili come pilastro fondamentale per raggiungere la neutralità climatica (OIV, 2021). Tra le principali fonti rinnovabili che possono essere integrate nell'industria vinicola figurano:

### a) Energia fotovoltaica ed energia solare termica

L'energia solare è la fonte rinnovabile più diffusa nella viticoltura e nelle cantine, grazie all'abbondante irraggiamento solare nelle regioni vinicole del Mediterraneo, dell'America Latina e della California (FAO, 2020). Esistono due tecnologie principali:

- **Impianti fotovoltaici (PV):** Trasformano la radiazione solare in energia elettrica tramite pannelli installati sui tetti delle cantine, dei magazzini o persino sui filari dei vigneti (*agrivoltaico*). Questa energia alimenta le pompe per l'irrigazione, gli impianti di refrigerazione della cantina e i macchinari elettrici. Studi condotti nei vigneti di Castilla-La Mancha e Bordeaux mostrano una riduzione fino al 70% delle bollette elettriche grazie alla combinazione dell'autoconsumo fotovoltaico con le batterie (IDAE, 2021).
- **Energia solare termica:** Utilizzata principalmente per riscaldare l'acqua nei processi di pulizia delle botti, nei serbatoi e negli impianti di climatizzazione delle cantine. Un caso emblematico è quello di **Bodegas Torres (Spagna),** che ha installato collettori solari termici, riducendo del 30% il consumo di gas per l'acqua calda (IWCA, 2022).

**Vantaggi:**

- Riduzione delle emissioni dirette e della dipendenza energetica.
- Possibilità di ricorrere all'*agrivoltaico*, che riduce l'evaporazione nel vigneto e crea un'ombra benefica nei climi caldi (Ravi et al., 2022).
- Resilienza energetica di fronte alle crisi e alla volatilità dei prezzi.

  Valore aggiunto nel settore del marketing (vino a impatto zero) grazie all'accesso a finanziamenti verdi e incentivi fiscali, sempre più legati a progetti sostenibili.
- Maggiore tracciabilità e trasparenza, grazie alla possibilità di monitorare i consumi in tempo reale.

**Sfide:**

- Elevato investimento iniziale e necessità di spazio per l'installazione.
- Produzione intermittente che richiede sistemi di accumulo o di connessione alla rete.

- Manutenzione e aggiornamento tecnologico nelle zone rurali.
- Mancanza di incentivi chiari e burocrazia complessa.
- Lacune nelle conoscenze tecniche.
- Condizioni geografiche e climatiche.
- Ritorno sull'investimento nel medio-lungo termine.
- Eventuali incompatibilità paesaggistiche o patrimoniali, in particolare nei vigneti storici.
- La dipendenza da fornitori di tecnologia esterni, che può comportare costi aggiuntivi o una mancanza di autonomia.



*Figura 16. Agrivoltaico. Fonte: Iberdrola*

**b) Biomassa viticola: recupero delle vinacce e dei tralci**

La viticoltura genera ogni anno grandi quantità di rifiuti organici, tra cui vinacce, raspi, fecce e tralci. Tradizionalmente, questi sottoprodotti erano considerati a basso valore aggiunto e, in molti casi, destinati allo smaltimento o a un uso limitato come ammendanti agricoli. Tuttavia, nel quadro dell'economia circolare e della transizione energetica, questi rifiuti sono stati rivalutati come fonti strategiche di energia rinnovabile e come input per migliorare la sostenibilità nei sistemi vitivinicoli (Pérez-Pérez et al., 2021).

La biomassa viticola può essere valorizzata attraverso diverse tecnologie: combustione diretta, gassificazione, digestione anaerobica per la produzione di biogas o pirolisi per la produzione di biochar e biooli. Queste applicazioni consentono di trasformare i rifiuti in energia termica ed elettrica, riducendo la dipendenza dai combustibili fossili ed evitando le emissioni associate al trasporto e allo smaltimento finale dei rifiuti. Inoltre, l'uso della biomassa contribuisce a chiudere il ciclo produttivo

del vigneto, restituendo al suolo sostanze nutritive e carbonio stabile sotto forma di biochar, con benefici per la fertilità e la capacità di ritenzione idrica.

- **Vinaccia:** Residuo della vinificazione composto da bucce, semi e resti di polpa. Può essere essiccata e utilizzata come biomassa solida oppure trasformata in pellet per caldaie a biomassa. Nella Rioja, il progetto Biovino è riuscito a coinvolgere diverse cantine che coprono il 100% del loro fabbisogno termico invernale con vinacce essiccate, evitando l'emissione di circa 1.500 tonnellate di $CO_2$ all'anno (González et al., 2022).
- **Tranci di vite:** Scarti della potatura della vite che, una volta triturati ed essiccati, vengono utilizzati come biomassa per le caldaie o come materia prima per la produzione di biochar. Quest'ultimo non solo genera energia durante il processo di produzione, ma, una volta applicato al suolo, migliora la ritenzione idrica e quella dei nutrienti e funge da serbatoio di carbonio nel lungo periodo (Lehmann & Joseph, 2015).

**Vantaggi**

- Riduzione dei rifiuti e riduzione dei costi di gestione.
- Sostituzione parziale o totale dei combustibili fossili.
- Sinergia con la concimazione del terreno in caso di produzione di biochar.
- Utilizzo locale delle risorse, riduzione dei costi di trasporto e aumento dell'autonomia energetica della cantina.
- Contributo alla mitigazione dei cambiamenti climatici, attraverso il sequestro del carbonio e la riduzione delle emissioni rispetto all'uso del gasolio o del gas naturale.

**Sfide:**

- Necessità di un sistema logistico per la raccolta, l'essiccazione e lo stoccaggio dei rifiuti.
- Requisiti specifici delle attrezzature per la pellettizzazione o il condizionamento del materiale.
- La variabilità stagionale nella disponibilità di biomassa, che impone di pianificare l'accumulo e lo stoccaggio in modo da coprire il fabbisogno annuale.
- Possibili emissioni di particolato derivanti dalla combustione, che richiedono sistemi di filtraggio e il rispetto delle normative ambientali per il loro controllo.



*Figura 17. Raccolta del tralcio di vite per il suo recupero. Fonte: John O'Ryan*

### c) Microwind and Geothermal

Although less widespread than solar and biomass, these technologies are emerging in pilot projects, especially in wineries with high thermal demand or located in windy regions.

- **Micro-eolico:** Turbine su piccola scala (potenza inferiore a 50 kW) installate in zone caratterizzate da venti regolari. Vengono utilizzate per alimentare impianti di refrigerazione, illuminazione o per ricaricare macchinari elettrici. Il gruppo **Jackson Family Wines** in Oregon ha integrato microturbine in combinazione con pannelli fotovoltaici, generando il 40% di energia rinnovabile in loco (Sustainable Winegrowing Alliance, 2021).



*Figura 18. L'energia eolica nei vigneti. Fonte: Diario de Jerez.*

- **Energia geotermica:** Consiste nello sfruttare l'energia termica del sottosuolo tramite **pompe di calore geotermiche**, che estraggono calore in inverno e lo dissipano in estate. Questa tecnologia è ideale per le cantine, poiché consente di mantenere una temperatura stabile nelle sale di invecchiamento, riducendo il consumo di energia elettrica per la climatizzazione fino al 50% (FAO, 2020). A Bordeaux, la cantina **Château Smith Haut Lafitte** combina l'energia geotermica e la biomassa per coprire il proprio fabbisogno termico, ottenendo una riduzione di 180 tonnellate di $CO_2$ all'anno (Bindi & Olesen, 2011).




*Figura 19. Impianto geotermico presso la cantina Château Smith Haut Lafitte  Fonte: VitiViniCultura*

**Vantaggi:**

- Elevata efficienza energetica (COP compreso tra 3 e 5 nelle pompe di calore geotermiche).
- Tecnologia silenziosa che occupa poco spazio.
- Una significativa riduzione delle emissioni di $CO_2$ rispetto ai combustibili fossili.
- Complementarità con altre fonti rinnovabili, come il solare o la biomassa, al fine di diversificare il mix energetico.

**Sfide:**

- Necessità di disporre di strutture logistiche per la raccolta, l'essiccazione e lo stoccaggio dei rifiuti.
- Requisiti specifici delle attrezzature per la pellettizzazione o il condizionamento del materiale.
- La variabilità stagionale nella disponibilità di biomassa, che impone di pianificare l'accumulo e lo stoccaggio in modo da coprire il fabbisogno annuale.
- Possibili emissioni di particolato derivanti dalla combustione, che richiedono sistemi di filtraggio e il rispetto delle normative ambientali per il loro controllo.

## 2.2. Progettazione e realizzazione di impianti energetici nelle cantine

La transizione energetica nel settore vitivinicolo non si limita all'adozione di tecnologie rinnovabili, ma comporta un processo globale di analisi, pianificazione, realizzazione e monitoraggio. Tale processo deve essere adattato alla realtà specifica di ciascuna azienda vinicola, tenendo conto di fattori quali le dimensioni, l'ubicazione,

la capacità produttiva, il clima e il budget a disposizione. L'obiettivo è massimizzare l'efficienza energetica e ridurre le emissioni di gas serra senza compromettere la qualità del vino, l'operatività aziendale o la redditività (Finger et al., 2019).

### 1. Diagnosi energetica iniziale

Il primo passo consiste nell'effettuare una verifica energetica per individuare i punti critici di consumo. Secondo gli studi condotti dall'OIV (2021) e dall'Istituto per la diversificazione e il risparmio energetico (IDAE), in una cantina tipica le principali fonti di consumo sono:

- **Processi di vinificazione:** pompe, presse, sistemi di fermentazione controllata.
- **Climatizzazione e refrigerazione:** mantenimento della temperatura nei serbatoi e nelle sale di allevamento (può rappresentare fino al 50% del consumo totale).
- **Illuminazione e uffici amministrativi.**
- **Irrigazione e pompaggio nel vigneto.**

Una diagnosi accurata consente di calcolare l'indice energetico per litro di vino prodotto, confrontarlo con gli standard del settore (benchmarking) e definire gli obiettivi di riduzione (IDAE, 2021).

### 2. Elaborazione del piano energetico

Una volta individuato il modello di consumo, viene elaborato un piano energetico globale, che deve includere:

- **Definizione degli obiettivi strategici:** riduzione dei consumi del X% in 5 anni, neutralità carbonica entro il 2030, ecc.
- **Scelta tecnologica ottimale:** basata su un'analisi di fattibilità tecnica, climatica ed economica.
- **Analisi del ciclo di vita (LCA):** per stimare l'impatto ambientale complessivo delle soluzioni proposte.

Si raccomanda di applicare metodologie quali l'analisi multicriteriale (CMA) per stabilire le priorità degli investimenti (Pardo et al., 2019). Questo approccio consente di ponderare criteri quali il costo dell'investimento, i risparmi previsti, l'impatto ambientale, la facilità di integrazione e la vita utile.

### 3. Implementazione di tecnologie e soluzioni ibride

In pratica, la maggior parte delle aziende vinicole opta per **combinazioni ibride** che integrano diverse tecnologie rinnovabili insieme a sistemi ad alta efficienza energetica. Esempi:

- **Ibridazione solare + biomassa:** pannelli fotovoltaici per coprire il consumo di energia elettrica diurno, biomassa per il riscaldamento invernale.

- **Geotermico + Solare termico:** per un clima stabile nelle sale di invecchiamento e per ridurre il consumo di energia elettrica nella refrigerazione.
- **Sistemi di accumulo di energia:** batterie al litio o tecnologie emergenti come le batterie a flusso, per migliorare l'autonomia e la gestione della domanda.

In California, la *Robert Mondavi Winery* ha installato un sistema ibrido che combina un impianto fotovoltaico (1 MW), batterie Tesla Powerpack e caldaie a biomassa, riducendo la propria dipendenza dalla rete elettrica del 35% e ottenendo un risparmio annuo di oltre 300.000 dollari (IWCA, 2022).

### 4. Gestione digitale e automazione

La transizione energetica nel settore vitivinicolo è strettamente legata alla **digitalizzazione**. Le **piattaforme di gestione energetica (EMS)** consentono di:

- Monitorare i consumi e la produzione in tempo reale.
- Prevedere i picchi di domanda utilizzando algoritmi predittivi.
- Automatizzare il funzionamento degli impianti, ottimizzando il rapporto tra produzione e consumo.

Un caso pionieristico è quello di **SmartVitis** in Italia, che integra dati relativi all'energia, all'irrigazione e al clima per programmare le operazioni agricole in base alla disponibilità di energia rinnovabile (Moriondo et al., 2020).

### 5. Finanziamenti e incentivi

Una delle principali sfide per l'implementazione di sistemi energetici sostenibili è rappresentata dall'**elevato costo iniziale**, che può variare da **50.000 a 500.000 euro**, a seconda delle dimensioni e della tecnologia scelta (Boraud et al., 2022). Per superare questo ostacolo, sono state sviluppate le seguenti soluzioni:

- **Sovvenzioni pubbliche:** come gli aiuti previsti dal Programma di sviluppo rurale (PSR) dell'UE e **i fondi del Green Deal**.
- **Modelli di finanziamento innovativi:**
    - **Leasing energetico**: l'azienda fornitrice installa l'impianto e il viticoltore paga un canone mensile inferiore alla precedente bolletta energetica.
    - **Accordi di acquisto di energia (PPA):** contratti a lungo termine per l'acquisto di energia rinnovabile senza un investimento iniziale.
    - **Sistemi cooperativi:** diverse cantine si uniscono per condividere le strutture e ridurre i costi unitari.

### 6. Monitoraggio e miglioramento continuo

La pianificazione energetica non si esaurisce con l'installazione; è necessario disporre di un **sistema di monitoraggio e valutazione continui**. Gli indicatori più comunemente utilizzati sono:

- **kWh di energia rinnovabile generati all'anno.**
- **Riduzione in tonnellate di $CO_2$ equivalente.**
- **Costo energetico per litro di vino prodotto.**

La tendenza attuale è quella di ottenere la certificazione secondo standard quali **ISO 50001 (Gestione energetica)** e **ISO 14064 (Impronta di carbonio)**, che non solo garantiscono la conformità normativa, ma apportano anche un valore aggiunto nella commercializzazione del vino (González-Fernández et al., 2022).

## 2.3. Strategie per ridurre l'impronta di carbonio nella produzione vinicola

La riduzione dell'impronta di carbonio nel settore vitivinicolo rappresenta uno degli assi strategici più importanti nell'ambito della **transizione energetica e della sostenibilità**. Il settore vitivinicolo, sebbene meno intensivo in termini di emissioni rispetto ad altri rami agroindustriali, genera $CO_2$ e altri gas serra (GHG) in tutte le fasi del ciclo produttivo: dal vigneto alla distribuzione del vino (Jones et al., 2010). Questo impatto è dovuto principalmente a:

- **Consumo energetico nelle cantine:** climatizzazione, refrigerazione, pompaggio, imbottigliamento.
- **Uso di fertilizzanti e prodotti fitosanitari:** che emettono $N_2O$ e $CO_2$.
- **Operazioni meccanizzate:** lavori sul campo, trasporto interno e distribuzione.
- **Gestione dei sottoprodotti e dei rifiuti:** fermentazione, vinacce, germogli.
- **Imballaggio e logistica:** produzione di bottiglie di vetro e trasporto internazionale.

La strategia volta a ridurre tale impatto ambientale prevede un approccio globale e sistematico, con azioni coordinate nei settori dell'energia, dei processi produttivi, dei materiali e della logistica.

### 1. La misurazione dell'impronta di carbonio come punto di partenza

Per ridurre le emissioni nel settore vitivinicolo è necessario, come primo passo, una **quantificazione precisa dell'impronta di carbonio** della cantina e del vigneto. La misurazione ci permette di comprendere la portata del problema, identificare le principali fonti di emissioni e stabilire una **linea di riferimento** rispetto alla quale valutare i progressi futuri.

Esistono diverse metodologie di misurazione riconosciute a livello internazionale:

- **ISO 14064**: Norma internazionale per la quantificazione e la rendicontazione delle emissioni e delle riduzioni di gas a effetto serra (GHG).
- **GHG Protocol**: metodologia che classifica le emissioni in tre ambiti:
    - *Ambito 1*: emissioni dirette (combustibili, processi interni).
    - *Ambito 2*: emissioni indirette associate all'energia acquistata.
    - *Ambito 3*: emissioni della catena del valore (trasporti, imballaggi, distribuzione).
- **Equivalente di $CO_2$ ($CO_2e$):** indicatore che consente di uniformare l'impatto climatico dei diversi gas serra ($CO_2$, $CH_4$, $N_2O$).

Nel settore vitivinicolo, la misurazione deve comprendere sia la **fase agricola** (lavorazione del terreno, fertilizzanti, prodotti fitosanitari, irrigazione, macchinari) sia la **fase di vinificazione** (energia impiegata nella fermentazione, climatizzazione, imbottigliamento, stoccaggio) e la **fase logistica** (trasporto e distribuzione).

L'**OIV (2021)** e organizzazioni quali l'**International Wineries for Climate Action (IWCA)** raccomandano di definire questo valore di riferimento e di ripetere la valutazione **ogni annata vinicola**, poiché le variazioni climatiche, di produzione e di consumo energetico incidono in modo significativo sulle emissioni.

Un esempio calzante è quello di **Bodegas Torres (Spagna**), che ha calcolato la propria impronta di carbonio e ha stabilito che:

- **Il 40%** delle emissioni proveniva dalla **produzione di bottiglie di vetro**,
- **il 24%** del **consumo energetico della cantina**,
- **il 16%** dei **trasporti**.

Grazie a questa analisi, l'azienda vinicola ha potuto dare priorità alle misure relative a **imballaggi più leggeri e riciclabili** e all'**utilizzo di energie rinnovabili**, il che ha permesso di ridurre in modo sostanziale la propria impronta ecologica negli ultimi anni (IWCA, 2022).

### 2. Ottimizzazione energetica e utilizzo delle energie rinnovabili

Il consumo energetico rappresenta tra il 20% e il 40% dell'impronta ecologica complessiva (Pardo et al., 2019). Alcune strategie chiave:

- **Installazione di pannelli solari fotovoltaici** per l'autoconsumo di energia elettrica, riducendo la dipendenza dalla rete elettrica e le emissioni associate ai combustibili fossili.
- **Utilizzo della biomassa viticola** (tralci di vite, vinacce) per il riscaldamento e la produzione di energia termica, riducendo il ricorso al gasolio o al gas naturale (Brunori et al., 2020).
- **Recupero di calore** nei processi di fermentazione e distillazione per ridurre l'uso delle caldaie.

- **Illuminazione a LED e convertitori di frequenza** nelle pompe e nelle apparecchiature, per ottimizzare i consumi.

Jackson Family Wines (USA) combina l'energia solare (6,7 MW installati) e l'efficienza dei sistemi di refrigerazione, ottenendo una riduzione del 33% delle emissioni nella propria cantina (IWCA, 2022).

### 3. Gestione del suolo e sequestro del carbonio

Il vigneto può diventare un **pozzo di assorbimento del carbonio** se si adottano pratiche rigenerative che favoriscono la fissazione della $CO_2$ nel suolo:

- **La copertura vegetale permanente:** aumenta la materia organica e sequestra il carbonio (Chirivella et al., 2021).
- **Riduzione della lavorazione del terreno:** per evitare il rilascio di carbonio dal suolo.
- **L'applicazione di compost organico e biochar:** migliora la fertilità e funge da serbatoio stabile di carbonio.

Studi condotti a Bordeaux e in Toscana indicano che queste pratiche possono compensare tra l'8% e il 12% delle emissioni annuali del vigneto (Brunori et al., 2020).

### 4. Riduzione delle emissioni nel settore della logistica e dei trasporti

Il trasporto del vino in bottiglia verso i mercati internazionali rappresenta un fattore rilevante nell'impronta di carbonio. Alcune soluzioni adottate sono:

- **Utilizzo di imballaggi leggeri**: ridurre il peso delle bottiglie di 100 g può comportare una riduzione delle emissioni del 6% (OIV, 2021).
- **Alternative al vetro tradizionale**: bottiglie in PET riciclato, alluminio o confezioni Bag-in-Box per i mercati locali.
- **Ottimizzazione dei percorsi e raggruppamento dei carichi**: grazie a strumenti digitali per ridurre al minimo i viaggi a vuoto.

Concha y Toro (Cile) ha ridotto il peso delle proprie bottiglie di 400 g, ottenendo una riduzione del 13% delle emissioni legate al trasporto (IWCA, 2022).

### 5. Economia circolare e recupero dei sottoprodotti

I rifiuti organici, come le vinacce e le fecce, possono essere trasformati in fonti energetiche o in materie prime per altri settori:

- **Produzione di biogas** tramite digestione anaerobica.
- **Estrazione di polifenoli e antiossidanti** per l'industria alimentare e cosmetica.

- **Pellets da biomassa** destinati al riscaldamento interno e alla vendita a terzi.

Nella Rioja, il progetto **VINySOST** ha sviluppato sistemi per trasformare gli scarti della vinificazione in biomassa e biofertilizzanti, riducendo l'impronta ecologica complessiva del 20% (AENOR, 2022).

**6. Certificazione e comunicazione dell'impegno per il clima**

Sempre più consumatori apprezzano i vini dotati di certificazioni ambientali, quali:

- **Vino a impatto zero** (certificato ISO 14064).
- **IWCA Gold Standard**.
- **Certificazione biologica e biodinamica**.

Yealands Estate (Nuova Zelanda) è stata la prima azienda vinicola a ottenere la certificazione *"Carbon Neutral",* grazie all'integrazione di energia solare, biomasse e alla riduzione dell'uso di bottiglie pesanti. Una comunicazione trasparente sulle etichette e sui canali digitali rafforza il marchio e consente l'accesso a mercati di fascia alta sensibili alla sostenibilità.

## 2.4. Strumenti digitali per il monitoraggio dell'impronta di carbonio e del consumo energetico

La trasformazione digitale applicata alla viticoltura non si limita al monitoraggio agronomico, ma svolge un ruolo essenziale nella **gestione della sostenibilità e della transizione energetica**. La riduzione **dell'impronta di carbonio** e l'ottimizzazione dell'uso dell'energia richiedono **sistemi di monitoraggio in tempo reale**, analisi predittive e piattaforme integrate che trasformino i dati in decisioni strategiche (Wolfert et al., 2017; Verdouw et al., 2021). Questa sezione esplora gli strumenti e le tecnologie più rilevanti per il controllo e il monitoraggio dell'impatto ambientale nei vigneti e nelle cantine.

**1. Piattaforme digitali per la gestione dell'impronta di carbonio**

I sistemi di monitoraggio delle emissioni consentono alle aziende vinicole di calcolare e rendicontare il proprio impatto climatico secondo protocolli internazionali quali **ISO 14064**, **GHG Protocol** o **PAS 2050**. Questi strumenti si integrano con i dati relativi all'energia, alla produzione e ai trasporti per generare rapporti certificati.

- **Esempi eccellenti:**
    - **SustainaWine®**: una piattaforma sviluppata nell'Unione Europea che integra indicatori relativi all'impronta di carbonio, idrica ed energetica, fornendo raccomandazioni automatiche per ridurre le emissioni (CORDIS, 2021).

- **Calcolatore delle emissioni di carbonio nel settore vinicolo (California Sustainable Winegrowing Alliance):** calcola le emissioni dall'inizio della produzione fino all'imbottigliamento e alla logistica, includendo scenari ipotetici per pianificare eventuali miglioramenti.
- **Strumento IWCA**: strumento ufficiale dell'*International Wineries for Climate Action* per la misurazione e la verifica delle emissioni secondo la metodologia **Scope 1, 2 e 3** (IWCA, 2022).

Queste piattaforme non solo quantificano le emissioni, ma integrano anche **moduli di simulazione di scenari**: ad esempio, calcolano l'impatto della sostituzione del vetro tradizionale con imballaggi leggeri o dell'installazione di pannelli fotovoltaici.

### 2. Sensori IoT e monitoraggio in tempo reale dei consumi energetici

L'introduzione dell'**Internet delle cose (IoT)** nelle cantine e nei vigneti ha rivoluzionato la capacità di misurare e ottimizzare il consumo energetico:

- **Sensori di flusso elettrici e termici**: misurano l'energia consumata da pompe, impianti di refrigerazione, presse e impianti di climatizzazione.
- **Contatori intelligenti** collegati a piattaforme cloud: generano avvisi in caso di picchi anomali di consumo.
- **Integrazione con i sistemi di gestione degli edifici (BMS)** per ottimizzare il raffreddamento nelle sale di fermentazione e di stoccaggio.

**Château Larose-Trintaudon (Francia)** ha installato sensori IoT collegati alla piattaforma **Wattsense**, ottenendo una riduzione del 18% del consumo di energia elettrica grazie ad algoritmi di ottimizzazione della climatizzazione (Commissione europea, 2022).

### 3. Gemelli digitali e analisi predittiva

Il concetto di **Digital** Twin applicato alle aziende vinicole consente di simulare scenari energetici, ottimizzare i processi e valutare l'impatto delle decisioni strategiche. Questi modelli integrano dati in tempo reale con algoritmi predittivi per:

- **Prevedere il consumo energetico** in base al carico di lavoro (campagna di raccolta, imbottigliamento).
- **Simulare l'integrazione delle tecnologie rinnovabili** e calcolare il ritorno sull'investimento (ROI) e la riduzione delle emissioni.
- **Ottimizzare la programmazione dell'irrigazione e del pompaggio**, sincronizzandola con le fasce orarie in cui il costo dell'energia è più basso e l'impatto ambientale è minore (Verdouw et al., 2021).

Il progetto **VitiGEOSS** (Horizon 2020) utilizza i gemelli digitali per integrare energia, risorse idriche e logistica nelle aziende vitivinicole dell'Europa meridionale, anticipando gli scenari climatici e di mercato (CORDIS, 2022).

## 4. Intelligenza artificiale e big data per l'efficienza energetica

L'intelligenza artificiale applicata alla transizione energetica nella viticoltura si concentra su:

- **Previsione della domanda energetica** tramite reti neurali che integrano dati storici, condizioni meteorologiche e pianificazione dei processi.
- **Analisi del rapporto tra energia, produzione e qualità**: correlazione dei dati per individuare il consumo ottimale per litro di vino prodotto.
- **Rilevamento automatico delle inefficienze**: algoritmi che confrontano i consumi effettivi con i valori di riferimento e propongono misure correttive.

Il software EnergyMind® utilizza l'apprendimento automatico per individuare modelli di spreco energetico nei magazzini, regolando il funzionamento delle apparecchiature in tempo reale.

## 5. La blockchain per la tracciabilità e la trasparenza nel settore energetico

Sempre più aziende vinicole cercano di **comunicare il proprio impegno in materia di sostenibilità** con dati verificabili. La tecnologia blockchain viene utilizzata per:

- Certificare l'origine dell'energia rinnovabile utilizzata nella cantina.
- Garantire la trasparenza nella catena del valore.
- Fornire dati sulle etichette intelligenti che indicano l'impronta di carbonio per bottiglia.

Il progetto **GreenChain Wine** in Italia integra la tecnologia blockchain per certificare l'uso di energia rinnovabile e la riduzione delle emissioni, mettendo a disposizione dei consumatori i dati tramite codici QR presenti sull'etichetta.

## 6. Integrazione nelle piattaforme di gestione integrata (ERP agronomico)

La sfida non consiste solo nel misurare, ma **nell'integrare** le informazioni energetiche con il resto dei processi di vinificazione:

- I sistemi ERP come **AgriWebb, Farm360 e Vite.net®** integrano moduli dedicati all'energia e alla sostenibilità.
- Le aziende vinicole leader utilizzano dashboard unificate che consentono loro di visualizzare in tempo reale i consumi energetici, le emissioni, gli indicatori agronomici e la situazione finanziaria.

Ciò consente di **prendere decisioni basate sui dati** anziché sull'intuizione, conciliando l'efficienza energetica con la qualità e la redditività.

## 2.5. Il cooperativismo energetico nelle comunità viticole

La decarbonizzazione della viticoltura non dipende esclusivamente dalle pratiche agronomiche applicate in vigna. Il consumo energetico legato all'irrigazione, alle macchine agricole, alla refrigerazione e alle operazioni di vinificazione rappresenta una quota significativa dell'impronta di carbonio e dei costi di produzione del settore. In questo contesto, il cooperativismo energetico si è affermato come un percorso strategico per le comunità viticole che intendono aumentare l'autonomia energetica, ridurre i costi e accelerare la transizione verso le fonti rinnovabili.

Le cooperative energetiche sono iniziative collettive in cui i produttori investono congiuntamente in infrastrutture per le energie rinnovabili — in genere impianti fotovoltaici — e condividono la produzione, i costi e i benefici. Questo modello è in linea con le politiche europee di transizione energetica che promuovono i progetti energetici dei cittadini e delle comunità come strumenti per sistemi energetici decentralizzati e democratici (Commissione europea, 2019).



*Figura 19. Soci della Cooperativa Solare Westmill  Fonte: Cooperativa Solare Westmill*

Nel settore vitivinicolo, dove molti produttori operano in aree geograficamente concentrate e spesso collaborano già attraverso cooperative agricole tradizionali, il cooperativismo energetico rappresenta una naturale estensione delle strutture collettive esistenti.

### Motivazioni strategiche

L'energia è diventata una variabile strategica per i territori vitivinicoli. Oltre a rappresentare un semplice costo operativo, l'elettricità e il carburante influenzano sempre più la competitività, l'esposizione al rischio e la fattibilità dell'adattamento ai cambiamenti climatici. Ciò è particolarmente rilevante nella viticoltura poiché la domanda di energia non è costante: essa si concentra tipicamente in periodi specifici dell'anno (irrigazione in estate; raffreddamento e lavorazione intorno alla vendemmia e

alla vinificazione), il che può amplificare l'impatto dei picchi di prezzo e delle limitazioni nell'approvvigionamento.

Nei vigneti, la domanda di energia elettrica è spesso determinata dal pompaggio per l'irrigazione, specialmente nelle regioni più calde dove la siccità e le ondate di calore hanno reso più frequente l'irrigazione supplementare. Nelle cantine, la domanda si concentra sul raffreddamento e sul controllo della temperatura (gestione della fermentazione, stabilizzazione a freddo, stoccaggio) ed è accentuata dalle linee di imbottigliamento e lavorazione, dagli impianti ad aria compressa e dai carichi generali degli impianti (illuminazione, sistemi di pulizia, motori ausiliari). Con l'avanzare della digitalizzazione, cresce anche il consumo energetico dovuto ai sistemi di monitoraggio e controllo (apparecchiature di connettività, sensori, automazione, registrazione dei dati e, occasionalmente, dispositivi edge), il che aumenta il valore di una fornitura di energia elettrica stabile e prevedibile.

Questo contesto è rilevante perché la redditività delle attività ad alto consumo energetico è estremamente sensibile alla volatilità dei mercati. L'AIE ha documentato come la crisi energetica globale si sia tradotta in forti picchi dei prezzi e in una maggiore volatilità (soprattutto nei mercati del gas e dell'elettricità), incidendo direttamente sull'accessibilità economica e sulla pianificazione delle imprese. Analisi più recenti dell'AIE evidenziano inoltre cambiamenti strutturali nei mercati dell'energia elettrica (tra cui un aumento della frequenza delle ore con prezzi all'ingrosso negativi in alcuni sistemi europei a partire dal 2022), illustrando come le dinamiche dei prezzi dell'elettricità stiano diventando più complesse e meno prevedibili, rafforzando il valore delle strategie di copertura e di autoconsumo.

In questo contesto, il cooperativismo energetico (o modelli energetici cooperativi) offre una risposta concreta: consente alle comunità viticole di investire collettivamente nella produzione di energia rinnovabile — solitamente quella solare fotovoltaica — e di gestire l'energia come una risorsa strategica condivisa. Quando i produttori collaborano, possono in genere beneficiare di una migliore progettazione dei progetti, di economie di scala, di un maggiore potere contrattuale e di competenze condivise di cui le singole aziende agricole potrebbero non disporre. A livello territoriale, ciò può inoltre rafforzare la coesione attraverso la creazione di beni comuni, risparmi condivisi e una governance condivisa.

Gli investimenti collettivi nelle energie rinnovabili possono offrire quattro vantaggi strategici:

- **Ridurre i costi energetici a lungo termine,** sostituendo parte dell'energia acquistata dalla rete con quella autoprodotta per tutta la durata di vita dell'impianto.
- **Maggiore stabilità dei prezzi,** poiché una parte dell'approvvigionamento energetico risulta meno esposta alle fluttuazioni del mercato (un vantaggio fondamentale in contesti di mercato volatili).
- **Miglioramento delle prestazioni ambientali,** attraverso la riduzione delle emissioni operative e il sostegno alla rendicontazione di sostenibilità e alle descrizioni relative alle certificazioni.
- **Una maggiore coesione territoriale,** poiché il modello si basa su un processo decisionale condiviso e sulla creazione condivisa di valore piuttosto che su investimenti isolati.

Infine, questi progetti sono in perfetta sintonia con gli obiettivi dell'UE in materia di clima ed energia. La legislazione dell'UE ha introdotto e rafforzato il ruolo delle comunità energetiche — in particolare delle «comunità energetiche dei cittadini» e delle «comunità energetiche rinnovabili» — come pilastro della transizione energetica decentralizzata. Ciò è particolarmente rilevante per le regioni vinicole, dove la cooperazione è già una realtà grazie a cooperative, associazioni di viticoltori o strutture interprofessionali.

## Modelli tecnici e organizzativi

Il cooperativismo energetico nel settore vitivinicolo può essere attuato attraverso diverse configurazioni pratiche. Il modello più efficace dipende dai vincoli locali (tetti/terreni disponibili, allacciamento alla rete elettrica, opzioni normative, profilo della domanda) e dal modo in cui la comunità intende gestire gli investimenti e la ripartizione dei benefici.

### 1) Impianti fotovoltaici in condivisione

Questo è l'approccio più diffuso e di facile comprensione: i produttori finanziano congiuntamente un impianto fotovoltaico situato sui tetti delle cantine cooperative, su strutture condivise, su terreni idonei o in prossimità di infrastrutture di irrigazione. L'energia elettrica può essere utilizzata per l'autoconsumo collettivo, ripartita tra i soci secondo una regola di distribuzione concordata, oppure impiegata per compensare parte del consumo di rete di ciascun socio.

Ciò che rende fattibile questo modello è la combinazione dei seguenti fattori: (a) una produzione solare prevedibile; (b) una domanda energetica spesso significativa durante le ore diurne (sistemi di pompaggio, impianti di raffreddamento, attività operative generali); e (c) la possibilità di distribuire i benefici tra più soci. In pratica, la cooperativa deve definire: chi investe, come vengono assegnate le quote di partecipazione, come viene distribuita l'energia elettrica e come vengono misurati e comunicati i risparmi.

Un riferimento operativo rilevante è costituito dalle linee guida pratiche e dalla progettazione dei servizi offerti da Som Energia per i modelli di autoproduzione collettiva (compresa la gestione del quadro normativo relativo all'autoconsumo collettivo). Pur non essendo specifico per il settore vitivinicolo, questo esempio mostra come gli attori cooperativi strutturino i modelli collettivi e riducano la complessità delle transazioni per i partecipanti.

### 2) Comunità energetiche nell'ambito del quadro dell'UE

Nell'ambito del pacchetto «Energia pulita per tutti gli europei», l'UE ha formalmente sancito il riconoscimento delle comunità energetiche nella legislazione — in particolare attraverso i concetti di comunità energetiche dei cittadini e comunità

energetiche rinnovabili — consentendo agli attori locali di produrre, consumare, immagazzinare e vendere energia rinnovabile in modo collettivo.

Per i territori vitivinicoli, questo aspetto è importante perché fornisce una base programmatica per modelli che vanno oltre il principio «un impianto per un sito». Le comunità energetiche possono integrare più utenti e utilizzi (aziende vinicole, enti di irrigazione, edifici comunali, PMI locali) e possono potenzialmente combinare la produzione di energia con altri servizi quali il monitoraggio condiviso, la gestione della domanda e lo stoccaggio futuro.

In Spagna, il contesto istituzionale ha sostenuto sempre più lo sviluppo dell'energia comunitaria attraverso la pianificazione nazionale e programmi specifici (ad esempio, il quadro PNIEC e le linee di sostegno alle comunità energetiche). Ciò è importante per i vigneti, poiché i progetti cooperativi spesso migliorano la redditività se accompagnati da un sostegno pubblico e da un quadro giuridico chiaro.

### 3) Integrazione tra irrigazione ed energia

In molte regioni vinicole del Mediterraneo, l'irrigazione rappresenta al tempo stesso uno strumento di adattamento ai cambiamenti climatici e un fattore di aumento dei costi. Gli impianti di pompaggio alimentati ad energia solare — siano essi gestiti da una comunità di irrigatori o da una cooperativa di viticoltori — possono ridurre la dipendenza dalla rete elettrica nei periodi di picco dei prezzi e possono anche diminuire la dipendenza dal gasolio laddove questa persiste.

Il pompaggio solare collettivo diventa particolarmente interessante quando i viticoltori condividono stazioni di pompaggio, bacini di accumulo o programmi di irrigazione coordinati. Poiché la domanda di irrigazione raggiunge spesso il picco nei periodi soleggiati, in molti giorni la produzione di energia solare e il fabbisogno di pompaggio possono coincidere, migliorando i tassi di autoconsumo (e quindi i rendimenti economici). L'approccio cooperativo aiuta inoltre a gestire la complessità: invece che ogni viticoltore installi piccoli impianti, è possibile progettare un impianto condiviso in base al profilo di carico effettivo del territorio.

### Vantaggi ambientali ed economici

I vantaggi dei modelli cooperativi basati sulle energie rinnovabili dovrebbero essere presentati in modo che risultino comprensibili ai viticoltori e alle cantine: non come astratte dichiarazioni di sostenibilità, ma come miglioramenti concreti in termini di controllo dei costi, pianificazione operativa e riduzione dei rischi.

Da un punto di vista ambientale, sostituire l'energia elettrica della rete con l'autoconsumo da fonti rinnovabili riduce le emissioni operative e contribuisce al raggiungimento degli obiettivi di mitigazione dei cambiamenti climatici. L'AIE ha

ripetutamente sottolineato il ruolo delle energie rinnovabili come elemento stabilizzante e in espansione nell'approvvigionamento energetico durante il recente periodo di crisi. Per le aziende vinicole, l'impatto è particolarmente evidente quando la produzione solare coincide con la domanda diurna (pompe, impianti ausiliari di raffreddamento, carichi di lavorazione), cosa che si verifica comunemente durante l'estate e la vendemmia.

Da un punto di vista economico, l'effetto più apprezzato è spesso la prevedibilità. Gli investimenti cooperativi possono ridurre l'onere finanziario a carico di ciascun membro (investimenti condivisi anziché duplicati), migliorare l'accesso alle competenze tecniche e rafforzare l'accesso agli incentivi pubblici o a programmi dedicati alle comunità energetiche. In Spagna, ad esempio, l'IDAE dispone di programmi di incentivazione specifici per progetti pilota di comunità energetiche, a dimostrazione dell'orientamento politico verso modelli collettivi.

La governance cooperativa può inoltre distribuire il rischio in modo più efficace. Anziché lasciare che un singolo impianto si assuma l'intero peso dell'incertezza legata alle prestazioni tecnologiche, alla manutenzione e ai cambiamenti normativi, la cooperativa condivide le responsabilità e può rendere più professionali le operazioni (contratti di manutenzione, procedure di monitoraggio, conformità). Nel tempo, ciò tende a rafforzare la resilienza locale, poiché i risparmi energetici rimangono sul territorio e possono essere reinvestiti in ulteriori misure di adattamento (efficienza idrica, salute del suolo, strumenti digitali).

## Caso di successo: modelli energetici cooperativi nelle regioni vinicole europee

Il cooperativismo energetico nel settore vitivinicolo non è un fenomeno nazionale isolato, ma fa parte di una più ampia transizione europea verso sistemi rinnovabili decentralizzati e basati sulla comunità. In diversi paesi produttori di vino, le iniziative energetiche cooperative e comunitarie hanno dimostrato che gli investimenti collettivi nelle infrastrutture rinnovabili possono ridurre i costi, aumentare la resilienza e rafforzare la coesione territoriale.

Sebbene i quadri normativi differiscano da uno Stato membro all'altro, il principio di fondo rimane lo stesso: gli attori locali — tra cui cantine, associazioni di viticoltori, consorzi di irrigazione e comuni — collaborano per produrre, gestire e consumare collettivamente energia rinnovabile nell'ambito del quadro normativo previsto dal Pacchetto «Energia pulita» dell'UE.

### 1. Francia – Cooperative territoriali per le energie rinnovabili nelle regioni vinicole

In Francia, le cooperative nel settore delle energie rinnovabili sono sempre più integrate nelle strategie di sviluppo rurale. Nelle regioni viticole come l'Occitania e la Nuova Aquitania, sono stati realizzati progetti fotovoltaici collettivi attraverso strutture cooperative quali le SCIC (Sociétés Coopératives d'Intérêt Collectif). Queste iniziative

vedono spesso cantine, cooperative agricole ed enti locali investire congiuntamente in impianti solari installati sui tetti delle cantine o degli edifici agricoli.

Il modello francese mette in evidenza la dimensione territoriale del cooperativismo energetico: i progetti si inseriscono in strategie climatiche regionali più ampie, collegando l'autonomia energetica allo sviluppo rurale e alla sostenibilità agricola. Per i vigneti che devono far fronte a un aumento della domanda di irrigazione e raffreddamento, la produzione solare condivisa ha contribuito a stabilizzare i costi operativi e a rafforzare il posizionamento ambientale nei mercati di esportazione competitivi.

### 2. Italia – Comunità per le energie rinnovabili nei distretti agricoli

L'Italia ha promosso attivamente lo sviluppo delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER), in particolare nei territori agroalimentari. Nelle regioni vinicole come l'Emilia-Romagna e il Veneto, alcuni progetti pilota hanno collegato aziende vinicole, consorzi di irrigazione e impianti agroindustriali all'interno di impianti fotovoltaici condivisi.

L'esperienza italiana dimostra come i cluster agricoli possano mettere in comune i tetti e le risorse fondiarie per creare sistemi energetici distribuiti a vantaggio di molteplici soggetti. È importante sottolineare che questi progetti sono spesso sostenuti da incentivi nazionali e da procedure amministrative semplificate, a dimostrazione di come le direttive dell'UE possano tradursi in concrete realizzazioni nelle zone rurali quando sono in linea con i quadri politici nazionali.

### 3. Germania – Cooperative energetiche di lunga tradizione nelle zone rurali

La Germania vanta una delle tradizioni più consolidate in materia di cooperative energetiche (Energiegenossenschaften). In regioni vinicole come il Baden-Württemberg e la Renania-Palatinato, le cooperative hanno finanziato impianti solari sui tetti delle cantine e sugli edifici agricoli condivisi, integrando talvolta sistemi di monitoraggio energetico e soluzioni di accumulo.

L'approccio tedesco pone l'accento sulla trasparenza finanziaria, sulla partecipazione dei soci e sulla pianificazione a lungo termine. Dimostra come i modelli energetici cooperativi possano evolversi in piattaforme di innovazione, combinando la produzione di energia rinnovabile con strumenti di gestione digitale per ottimizzare i modelli di consumo e aumentare i tassi di autoconsumo.

### 4. Portogallo – Soluzioni solari nei vigneti irrigati

Nella Valle del Douro e nell'Alentejo, in Portogallo, dove la domanda di irrigazione è elevata e la minaccia della siccità è in aumento, i sistemi collettivi di

pompaggio solare si sono affermati come soluzioni concrete al problema dell'aumento dei costi dell'energia elettrica. Le associazioni agricole e le cooperative locali hanno investito in impianti fotovoltaici condivisi per alimentare le infrastrutture di irrigazione e gli impianti vinicoli.

Questi progetti dimostrano l'allineamento strategico tra l'adattamento ai cambiamenti climatici (gestione delle risorse idriche) e la transizione energetica, in particolare negli ambienti mediterranei dove la disponibilità di energia solare e le esigenze di irrigazione coincidono stagionalmente.

### 5. Spagna – Cooperative energetiche dei cittadini e partecipazione agricola

Anche la Spagna offre esempi significativi grazie alle cooperative rinnovabili gestite dai cittadini e alle iniziative di autoconsumo collettivo. In diverse zone rurali, gli impianti fotovoltaici installati sui tetti delle cantine cooperative o su strutture agricole condivise hanno permesso ai soci di ridurre gli acquisti di energia elettrica dalla rete e di aumentare l'autonomia energetica.

Le esperienze spagnole dimostrano l'importanza delle organizzazioni intermediarie che forniscono consulenza tecnica, assistenza in materia normativa e strutture di governance. Questi attori riducono la complessità amministrativa e aiutano i viticoltori a orientarsi nei quadri normativi relativi all'autoconsumo collettivo. Le strategie nazionali volte a promuovere le comunità energetiche dei cittadini e la transizione energetica rurale hanno ulteriormente favorito questi sviluppi.

## Sfide e requisiti

Nonostante il suo potenziale, il cooperativismo energetico non è un processo «automatico». Il successo dipende dal considerare il progetto sia come un sistema tecnico che come un sistema di governance.

Un primo **requisito è una governance chiara:** regole trasparenti in materia di partecipazione, quote di investimento, ripartizione dei benefici, processi decisionali e risoluzione delle controversie. Ciò è fondamentale perché i soci devono poter contare sul fatto che la cooperativa sia equa e gestita in modo professionale, soprattutto quando i tempi di recupero dell'investimento si estendono su diversi anni.

In secondo luogo, **i progetti richiedono capacità normative e amministrative.** Le comunità energetiche operano all'interno di quadri giuridici che definiscono diritti e obblighi, e i progetti cooperativi devono occuparsi delle autorizzazioni, della connessione alla rete, delle strutture contrattuali e della conformità. Gli orientamenti e la legislazione dell'UE inquadrano esplicitamente le comunità energetiche nell'ambito della struttura del mercato dell'energia elettrica e delle norme sulla tutela dei consumatori, rafforzando la necessità di una governance chiara e di una protezione dei consumatori.

In terzo luogo, vi è la **sfida rappresentata dalla mobilitazione del capitale iniziale e dalla fattibilità tecnica.** Anche quando i costi sono ripartiti, le cooperative devono

elaborare progetti finanziabili: stime realistiche della produzione, scelta accurata del sito e pianificazione finanziaria prudente. I programmi di sostegno pubblico possono migliorare la fattibilità, ma non sostituiscono una progettazione rigorosa.

In quarto luogo, **i progetti richiedono un coordinamento a lungo termine**. Gli impianti energetici necessitano di manutenzione, monitoraggio, controllo delle prestazioni e processi decisionali periodici (reinvestimenti, aggiornamenti, cambiamenti nella composizione dei membri). Senza un coordinamento costante, il sistema tecnico potrebbe non funzionare al meglio e la fiducia dei membri potrebbe diminuire.

Infine, **le cooperative devono affrontare il problema della stagionalità e della variabilità:** la produzione solare è elevata in estate, ma i picchi di domanda possono variare a seconda delle attività delle cantine (vendemmia/lavorazione) e dei programmi di irrigazione. Alcune regioni registrano inoltre una crescente complessità nell'andamento dei prezzi all'ingrosso (comprese ore con prezzi negativi più frequenti), il che rafforza la necessità di una programmazione intelligente, della gestione della domanda e, ove possibile, di strategie di stoccaggio o di integrazione flessibile nella rete.

# 3. Casi di studio sulla viticoltura sostenibile

## 3.1. Esempi di successo nella transizione energetica e nella viticoltura sostenibile

La transizione energetica nel settore vitivinicolo non è più una moda passeggera, ma è diventata un asse strategico che determina la competitività e la sostenibilità del settore vinicolo a livello globale. Sempre più aziende vinicole, consapevoli dell'impatto dei cambiamenti climatici e dei requisiti normativi, stanno adottando energie rinnovabili, soluzioni digitali per l'efficienza energetica e modelli circolari volti a ridurre la propria impronta di carbonio, ottimizzare l'uso delle risorse e garantire la propria sostenibilità a lungo termine (Organizzazione Internazionale della Vigna e del Vino [OIV], 2021; IWCA, 2022).

Questa sezione analizza casi reali in Europa, America e Oceania, nonché l'integrazione dell'**agrivoltaico**, una tecnologia rivoluzionaria che combina la produzione agricola con la generazione di energia solare, ridefinendo la gestione dei vigneti.

**1. Spagna: all'avanguardia nella decarbonizzazione e nell'agrivoltaico**

Familia Torres, una delle cantine più rinomate della Catalogna, si è affermata come leader mondiale nella lotta contro il cambiamento climatico nel settore vinicolo. Attraverso il suo programma **Torres & Earth**, lanciato nel 2008, l'azienda ha messo in atto una strategia globale di decarbonizzazione basata su tre pilastri: efficienza energetica, energie rinnovabili e rigenerazione ecologica del suolo. Tra le sue azioni principali vi è l'installazione di **12.000 m² di pannelli fotovoltaici** in grado di generare **2,5 GWh all'anno**, che coprono circa il **30% del fabbisogno elettrico** delle sue cantine. Questa produzione è integrata dall'uso di **caldaie a biomassa che sfruttano i tralci di vite e i residui di potatura**, creando un sistema circolare che sostituisce i combustibili fossili. Inoltre, Torres ha investito in **progetti di cattura della $CO_2$ atmosferica** e nel recupero dei suoli degradati attraverso pratiche rigenerative, ottenendo una **riduzione cumulativa del 34% delle proprie emissioni di gas serra dal 2008**. Questo impegno ha permesso loro di ottenere il riconoscimento come **membri Gold dell'International Wineries for Climate Action (IWCA)** e un risparmio energetico annuo stimato di **450.000 euro**.

Anche in Spagna, la storica azienda González Byass ha assunto un fermo impegno a favore dell'energia pulita nelle sue cantine di Jerez de la Frontera (Andalusia). L'azienda ha installato **impianti fotovoltaici sui tetti con una potenza di 2 MW**, che coprono una parte significativa del proprio fabbisogno energetico. Allo stesso tempo, ha realizzato un'automazione completa dei propri sistemi di climatizzazione e ventilazione, che ha portato **a una riduzione di circa il 40% del consumo di energia fossile** (Commissione Europea, 2022). Queste misure fanno parte della sua strategia aziendale volta a raggiungere la neutralità climatica entro il 2040.

La Spagna si sta inoltre affermando come uno dei paesi pionieri nell'applicazione dell'**agrovoltaico nei vigneti**, grazie a progetti promossi da enti quali Repsol, il progetto SMART PVwine e SOLARWINE. Queste iniziative combinano **pannelli solari bifacciali e semitrasparenti installati nei vigneti**, gestiti da **digital twin e sistemi di controllo intelligenti**. Gli obiettivi sono ambiziosi: **ridurre l'impatto climatico sul vigneto, generare reddito aggiuntivo dalla vendita dell'energia in eccesso** e **convalidare modelli agronomici compatibili con il cambiamento climatico** (Ministero dell'Agricoltura, della Pesca e dell'Alimentazione, 2023). I risultati preliminari indicano notevoli riduzioni dello stress termico e del consumo idrico nei vigneti sotto i pannelli, il che indica un percorso di sviluppo strategico per il Paese.

## 2. Francia: neutralità carbonica e tecnologie agricole all'avanguardia

Château Larose-Trintaudon, situato nella regione di Bordeaux, è uno dei vigneti più estesi della zona con **190 ettari** e ha recentemente ottenuto la **certificazione di neutralità carbonica**. Questo risultato è stato possibile grazie a un approccio innovativo basato sul **monitoraggio digitale del consumo energetico tramite sensori IoT integrati nelle piattaforme BMS**, all'acquisto di **energia elettrica rinnovabile al 100% tramite contratti PPA (Power Purchase Agreement)** e alla generazione fotovoltaica in loco. Inoltre, le pratiche agroecologiche riducono l'uso di sostanze chimiche e promuovono la biodiversità nel vigneto. Queste misure hanno consentito una **riduzione del 18% del consumo energetico totale**, in gran parte grazie all'uso di algoritmi di intelligenza artificiale per l'**ottimizzazione termica degli impianti**, oltre **alla completa compensazione delle emissioni residue attraverso progetti forestali certificati**.

Nella regione della Linguadoca, la cantina Château Maris è diventata un esempio di architettura ecologica ed efficienza energetica. La sua cantina, costruita con materiali naturali quali **canapa e calce**, funziona interamente grazie all'**energia solare, alla biomassa e all'elettricità proveniente da fonti rinnovabili certificate**. Inoltre, ha ottenuto la certificazione B **Lab (B-Corp)** per le sue prestazioni ambientali, sociali ed economiche, ed è riuscita a posizionarsi nei **mercati premium dove ottiene fino al 15% in più di valore per i suoi** vini a bassa impronta di carbonio (Wine Spectator, 2022).

Anche la Francia ha compiuto passi decisivi nel settore dell'agrivoltaico. In Occitania, il vigneto Domaine de Nidolères partecipa al programma Sun'Agri, nell'ambito del quale **4,5 ettari di vigneti vengono coltivati sotto pannelli fotovoltaici dinamici che si orientano automaticamente in base alla radiazione solare e all'umidità ambientale**. I risultati sono impressionanti: una **riduzione del 70% del fabbisogno irriguo**, aumenti di resa compresi tra il **20 e il 60%** e miglioramenti nella qualità dell'uva grazie a una maturazione più lenta ed equilibrata (INRAE, 2022). Ciò rende la Francia un punto di riferimento europeo nella viticoltura resiliente al clima.

## 3. Italia: cooperative energetiche comunitarie e agrivoltaiche

In Toscana, la storica Cantina Gabbiano ha completamente modernizzato il proprio sistema energetico, installando **1,8 MW di pannelli solari** che coprono circa il **70% del suo consumo annuo di energia elettrica**. Questa produzione è abbinata a

**pompe di calore geotermiche per la climatizzazione**, che hanno ridotto **i costi energetici legati alla temperatura degli impianti del 45%.** Grazie a queste misure, l'azienda vinicola è riuscita a evitare l'emissione di circa **450 tonnellate di $CO_2$ all'anno** e ha recuperato il proprio investimento in soli cinque anni, grazie anche ai contributi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR).

Più a nord, il Consorzio Vini del Trentino riunisce **oltre 3.000 viticoltori del Trentino-Alto Adige** ed è diventato un esempio di come la cooperazione possa accelerare la transizione energetica nelle zone rurali. Il consorzio ha promosso l'installazione **di caldaie a biomassa collettive che riutilizzano le vinacce e i tralci di vite**, riducendo così **i costi energetici del 30%** e **chiudendo il ciclo dei rifiuti agricoli**, trasformando i rifiuti in energia pulita (Commissione europea, 2021).

Anche l'Italia sta sviluppando progetti agrivoltaici a livello comunitario. Uno dei più emblematici è il progetto **Vigna Agrivoltaica di Comunità – La Svolta**, in Puglia, dove **sono stati installati 7.770 pannelli a film sottile con una potenza di 970 kW sui vigneti**. Questo sistema ha permesso di **ritardare la vendemmia di 3-4 settimane**, favorendo una **maturazione più lenta ed equilibrata**, oltre a ridurre lo **stress idrico delle piante del 20%.** Le uve ottenute presentano **una maggiore acidità e una minore concentrazione di zuccheri**, il che consente di ottenere **vini più freschi adatti alla produzione di spumanti**, aprendo nuove opportunità di mercato in un contesto di riscaldamento globale.

### 4. Cile: gemelli digitali ed efficienza energetica su larga scala

La multinazionale Concha y Toro, leader nel settore vinicolo in America Latina, ha elaborato un **piano globale di sostenibilità energetica** che combina produzione da fonti rinnovabili, digitalizzazione ed efficienza. L'azienda ha installato **parchi solari a Maule e Colchagua in grado di produrre 3 GWh/anno** e ha sostituito le vecchie caldaie con **sistemi a biomassa che sfruttano i sottoprodotti agricoli**. Inoltre, ha implementato un **digital twin che modella in tempo reale il comportamento energetico e idrico dei suoi impianti di produzione**, consentendo di ottimizzare i consumi e pianificare con precisione le operazioni. Di conseguenza, è riuscita **a ridurre il consumo di elettricità per litro di vino prodotto del 10% e le emissioni indirette di Scope 2 del 30%,** ottenendo il riconoscimento del **Sigillo di Efficienza Energetica del Governo del Cile** (2021). Questo approccio pionieristico viene replicato da altre cantine del Paese.**5. Stati Uniti: Jackson Family Wines e Smart Solar Energy**

### 5. Stati Uniti: energia solare intelligente e stoccaggio distribuito

In California, Jackson Family Wines ha portato l'efficienza energetica a un livello superiore integrando tecnologie di previsione, produzione da fonti rinnovabili e stoccaggio intelligente. L'azienda ha installato 12 MW di pannelli fotovoltaici, che coprono il 60% del suo fabbisogno energetico durante i periodi di picco (vendemmia), riducendo drasticamente la dipendenza dalla rete elettrica. Questa capacità è integrata da un sistema di batterie Tesla Powerpack che immagazzina energia nelle ore di minor consumo e la rilascia durante i picchi di domanda, mentre algoritmi di intelligenza artificiale regolano dinamicamente i carichi delle apparecchiature industriali. Queste

innovazioni hanno consentito una riduzione di 12.000 tonnellate di $CO_2$ all'anno e un risparmio economico di 2,5 milioni di dollari all'anno, raggiungendo in anticipo l'obiettivo aziendale della neutralità carbonica entro il 2030 (IWCA, 2022).

## 3.2. Analisi comparativa dei modelli sostenibili nella viticoltura

L'analisi comparativa dei diversi modelli di sostenibilità adottati nella viticoltura ci permette di capire quali siano le strategie più efficaci in termini di **costi, impatto ambientale, ritorno sull'investimento (ROI)** e **accettazione sociale**. Questa sezione presenta i principali **approcci adottati da aziende vinicole di fama internazionale**, confrontandone le caratteristiche chiave: **tecnologia applicata, investimento iniziale, risparmi, riduzione delle emissioni e benefici collaterali**.

### 1. Energia fotovoltaica contro biomasse: impatto e fattibilità

**L'energia solare fotovoltaica** è la tecnologia più diffusa nelle aziende vinicole, grazie all'elevata irradiazione nelle regioni viticole. Esempio:

- **Jackson Family Wines (USA)**: 12 MW installati, investimento stimato di 14 milioni di dollari, con un risparmio annuo di 2,5 milioni di dollari e una riduzione di **12.000 t di $CO_2$/anno** (IWCA, 2022).
- **Cantina Gabbiano (Italia):** 1,8 MW installati, ritorno sull'investimento in 5 anni, copertura del 70% del fabbisogno energetico (Commissione Europea, 2021).

Al contrario, la **biomassa viticola** sfrutta sottoprodotti quali tralci, semi e vinacce, riducendo i costi di smaltimento e chiudendo il ciclo circolare. Esempi:

- **Torres (Spagna):** Caldaie a biomassa che provvedono al riscaldamento delle cantine, con una riduzione di **200 t di $CO_2$ all'anno**.
- **Consorzio Vini del Trentino**: un modello cooperativo che riduce le bollette energetiche del **30%.**

**Conclusione comparativa:**

- **Il fotovoltaico** presenta un costo iniziale elevato ma un ritorno sull'investimento più rapido (5-7 anni), mentre la biomassa è più accessibile e offre ulteriori vantaggi nell'ambito dell'economia circolare.
- Nelle regioni in cui i rifiuti sono abbondanti e l'irraggiamento solare è minore, la biomassa risulta più efficiente; nelle zone soleggiate, prevale il fotovoltaico.

### 2. Sistemi ibridi: combinazione di energia solare + energia geotermica + accumulo

I **sistemi** ibridi integrano più fonti per garantire la stabilità dell'approvvigionamento. Esempio:

- **Château Maris (Francia)** combina energia solare, biomasse e accumulo termico, raggiungendo **un'autonomia energetica del 95%.**

- L'installazione delle batterie **Tesla Powerpack in California**, che consente di bilanciare i picchi di consumo, riducendo la dipendenza dalla rete elettrica.

**Ricavi:**

- Copertura costante anche nei periodi di scarsa radiazione solare.
- Costo iniziale elevato (investimento superiore a 500.000 € nelle cantine di medie dimensioni), ma riduzione totale dei costi energetici.

### 3. Intelligenza artificiale (IA) per l'efficienza energetica

La digitalizzazione applicata alla gestione energetica rappresenta un salto di qualità in termini di sostenibilità. Esempi:

- **Concha y Toro (Cile)** utilizza i **gemelli digitali** per simulare diversi scenari energetici, ottenendo una **riduzione del 10% del consumo di energia elettrica per litro prodotto**.
- **Torres (Spagna)** utilizza **l'intelligenza artificiale predittiva** per gestire il raffreddamento delle cisterne, ottimizzando l'uso delle energie rinnovabili.

**Vantaggi rispetto ai modelli tradizionali:**

- Un ulteriore risparmio energetico del **10-15%** senza grandi investimenti in hardware.
- Migliore tracciabilità e processo decisionale per evitare il superamento dei costi.

### 4. Certificazioni e valore commerciale: l'impatto sul prezzo del vino

L'impatto economico della sostenibilità non si misura solo in termini di risparmio energetico, ma anche in termini di **valore aggiunto per il consumatore**:

- Le aziende vinicole certificate come **Carbon Neutral** (ad esempio Château Larose-Trintaudon) sono riuscite a posizionare i propri vini con un **prezzo superiore del 10-15%** nei mercati di fascia alta (Wine Spectator, 2022).
- Programmi come **B-Corp** o **IWCA Gold Member** facilitano l'ingresso nelle catene internazionali e rafforzano la reputazione del marchio.

**5. Confronto tra ROI (ritorno sull'investimento) e benefici ambientali**

*Tabella 1. Elaborazione degli autori sulla base di IWCA (2022), Torres (2021) e Commissione europea (2021).*

| Tecnologia | Investimento iniziale (€) | ROI | Riduzione delle emissioni di $CO_2$ all'anno | Altri vantaggi |
|---|---|---|---|---|
| Fotovoltaico (1 MW) | 700.000 – 1.000.000 | 5-7 anni | 1.000 – 1.500 tonnellate | Autonomia parziale, immagine ecologica |
| Biomassa (caldaia da 500 kW) | 250.000 – 400.000 | 3-4 anni | 200–300 tonnellate | Recupero dei rifiuti |
| Geotermica (cantina di medie dimensioni) | 150.000 – 300.000 | 4-6 anni | 150 – 250 tonnellate | Stabilità termica |
| L'intelligenza artificiale al servizio dell'efficienza | 50.000 – 100.000 | 2 anni | 50 – 100 tonnellate | Ottimizzazione digitale |

**Conclusione dell'analisi comparativa**

Il modello più conveniente per le aziende vinicole di piccole e medie dimensioni è **il fotovoltaico abbinato alla biomassa**, integrato dall'**intelligenza artificiale per la gestione energetica**. Le grandi aziende vinicole possono integrare **sistemi di accumulo e energia geotermica**, raggiungendo la neutralità carbonica. La chiave sta nella **flessibilità del sistema e nell'accesso agli aiuti pubblici**, che possono ridurre l'investimento del **40-60%.**

## 3.3. Impatto economico e ambientale della transizione energetica sulle aziende vinicole

La transizione energetica nella viticoltura e nella vinificazione non comporta solo un cambiamento tecnologico, ma anche una **profonda trasformazione della struttura dei costi, del posizionamento commerciale e dell'impronta ambientale del** settore. Questa sezione affronta i principali impatti da una duplice prospettiva: **economica (costi, risparmi, ritorno sull'investimento)** e **ambientale (riduzione delle emissioni, efficienza delle risorse),** sulla base di studi recenti e casi di studio.

**1. Impatto economico: costi e ritorno sull'investimento (ROI)**

L'adozione di tecnologie rinnovabili e di misure di efficienza energetica rappresenta una **sfida finanziaria iniziale**, soprattutto per le piccole aziende vinicole, dove gli investimenti possono variare da **50.000 € a oltre 1.000.000 €**, a seconda delle dimensioni e delle tecnologie integrate (Commissione europea, 2021).

**Distribuzione stimata degli investimenti per tecnologia**

- **Pannelli solari fotovoltaici (1 MW):** 700.000 – 1.000.000 €
- **Caldaie a biomassa (500 kW):** 250.000 – 400.000 €
- **Energia geotermica per il condizionamento:** 150.000 – 300.000 €
- **Accumulo elettrico (batterie):** 200.000 – 350.000 €
- **Intelligenza artificiale e sistemi di gestione energetica:** 50.000 – 100.000 €

Il **ROI (ritorno sull'investimento)** dipende dal mix tecnologico, dal consumo energetico e dagli incentivi disponibili. Secondo **International Wineries for Climate Action (IWCA, 2022)** e **Torres (2021):**

- **Fotovoltaico:** Ammortamento in **5-7 anni** grazie all'autoconsumo e alla vendita delle eccedenze.
- **Biomassa:** Ritorno sull'investimento in **3-4 anni**, oltre alla riduzione dei costi di gestione dei rifiuti.
- **Intelligenza artificiale e ottimizzazione energetica:** Rapido ritorno sull'investimento, in **1-2 anni**, grazie alla riduzione del consumo di energia elettrica (10-15%).

Nelle aziende vinicole che adottano tecnologie innovative, si registrano **risparmi del 25-35% sulle bollette elettriche** e una **riduzione del 30% dei costi energetici complessivi**, liberando così risorse finanziarie da destinare all'innovazione e al marketing (García et al., 2022).

## 2. Impatto ambientale: riduzione dell'impronta di carbonio

Si stima che la vinificazione tradizionale abbia un'impronta di carbonio compresa tra **1,5 e 2,0 kg di $CO_2$ per bottiglia di vino** (Delmotte et al., 2020). L'utilizzo di energie rinnovabili può ridurre significativamente queste emissioni:

- **Fotovoltaico:** -40% dell'impronta energetica elettrica.
- **Biomassa:** -15-20% in più rispetto ai combustibili fossili.
- **Sistemi ibridi (solare + biomassa + accumulo):** -70-80% di emissioni energetiche.
- **Intelligenza artificiale e digitalizzazione:** riduzione indiretta del 10% grazie all'ottimizzazione dei processi.

**Esempio quantitativo**

- Una cantina con **una produzione di 500.000 bottiglie all'anno** e un consumo di energia elettrica di **1,2 GWh all'anno**:
    - Prima: emissioni pari a 550 t di $CO_2$ all'anno derivanti dal settore energetico.
    - Dopo l'integrazione dell'impianto fotovoltaico (copertura del 70%): riduzione di 385 t di $CO_2$ all'anno.
    - Integrazione della biomassa per il riscaldamento: ulteriore riduzione di 90 t di $CO_2$ all'anno.
    - Totale: riduzione di oltre l'**85%** dell'impronta energetica.

Questo livello di mitigazione consente alle aziende vinicole di optare per **certificazioni ambientali (Carbon Neutral, ISO 14001),** aumentando così la competitività e l'accesso ai mercati di fascia alta (Wine Spectator, 2022).

**3. Impatto sulla competitività e sul valore commerciale**

La sostenibilità energetica non solo riduce i costi e le emissioni, ma **genera anche un valore economico diretto**:

- **Prezzi più elevati:** I vini certificati come sostenibili vengono venduti a prezzi superiori del **10-20%**, soprattutto nei mercati degli Stati Uniti e del Nord Europa (Wine Intelligence, 2021).
- **Attrarre investimenti e finanziamenti verdi:** Fondi come **NextGeneration EU** coprono fino al **40-60% dell'investimento iniziale**, accelerando la transizione (Commissione europea, 2021).
- **Fedeltà dei consumatori:** Il 66% degli acquirenti di vino nell'UE considera la sostenibilità un criterio di acquisto fondamentale (OIV, 2022).

**4. Ostacoli economici e soluzioni**

- **Elevati costi iniziali:** Soluzione: **modelli Energy SaaS** (Energy as a Service) e **PPA (Power Purchase Agreements)**.
- **Disparità nell'accesso ai finanziamenti:** Le cooperative e i cluster vitivinicoli possono negoziare acquisti collettivi per ridurre i costi del **20-30%.**
- **Mancanza di dati reali sui rendimenti: Sistemi di monitoraggio continuo (IoT + IA)** che generano report finanziari e ambientali a sostegno degli investimenti.

Tabella riassuntiva dell'impatto economico e ambientale

| Misura | Riduzione delle emissioni di $CO_2$ | Risparmio annuo (%) | Ritorno sull'investimento stimato |
|---|---|---|---|
| Fotovoltaico | 40 % | 20-25 % | 5-7 anni |
| Biomassa | 15-20 % | 15 % | 3-4 anni |
| Intelligenza artificiale e digitalizzazione | 10% (indiretto) | 8-12 % | 1-2 anni |
| Sistemi ibridi | 70-80 % | 30-40 % | 7-10 anni |

## Bibliografia


- Abad, J., Marqués, M. J., & Álvaro-Fuentes, J. (2021). Soil conservation in vineyards: A global review. Agronomy for Sustainable Development, 41(45), 1–22.

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO. https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm

- Almeida, W. S., Paredes, P., Basto, J., Pôças, I., Pacheco, C. A., & Paço, T. A. (2024). Estimating evapotranspiration of rainfed winegrapes combining remote sensing and the SIMDualKc soil water balance model. Water, 16(18), 2567. https://doi.org/10.3390/w16182567

- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). Technological approaches to sustainable agriculture at a crossroads: An agroecological perspective. Sustainability, 9(3), 349. https://doi.org/10.3390/su9030349

- Bàrberi, P., Burgio, G., Dinelli, G., Moonen, A. C., Otto, S., Vazzana, C., & Zanin, G. (2010). Functional biodiversity in the agricultural landscape: Relationships between weeds and arthropod fauna. Weed Research, 50, 388–401. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00798.x

- Bavaresco, L., Gatti, M., Fregoni, M., & Pezzutto, S. (2016). Grapevine rootstocks: Effects on viticulture and environment. Acta Horticulturae, 1136, 41–50. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1136.6

- Biddoccu, M., Ferraris, S., Pitacco, A., Cavallo, E., & Comolli, R. (2016). Hillslope vineyard rainfall–runoff measurements: Evaluation of flood and soil erosion control measures. Australian Journal of Grape and Wine Research, 22(1), 54–67. https://doi.org/10.1111/ajgw.12173

- Bindi, M., & Olesen, J. E. (2011). The responses of agriculture in Europe to climate change. Regional Environmental Change, 11(1), S151–S158. https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x

- Bordelon, B. P., Bates, T. R., & Morris, J. R. (2020). Soil management and its impact on vine growth and fruit quality. American Journal of Enology and Viticulture, 71(2), 123–134. https://doi.org/10.5344/ajev.2020.19054

- Brunori, G., Cerruti, A., & Corsi, S. (2020). Carbon balance and mitigation potential of the wine sector. Journal of Cleaner Production, 271, 122645. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122645

- Celette, F., Gaudin, R., & Gary, C. (2008). Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. European Journal of Agronomy, 29, 153–162. https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.04.007

- Celette, F., Gaudin, R., & Gary, C. (2009). Competition for nitrogen in an unfertilized intercropping system. European Journal of Agronomy, 30, 41–51. https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.07.003

- Delmotte, F., Corio-Costet, M. F., & Delière, L. (2020). Integrated disease management and reduction of pesticide use in viticulture. Science of the Total Environment, 731, 139269. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139269

- Er-Raki, S. (2024). Using AquaCrop for irrigation and water productivity assessment of table grapes. E3S Web of Conferences, 489, 04011. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448904011

- European Commission. (2021a). EU soil strategy for 2030. https://environment.ec.europa.eu/publications/eu-soil-strategy-2030_en

- European Commission. (2021b). Green transition in EU wineries: Renewable energy and sustainability. Publications Office of the European Union.

- European Commission. (2022). Digital technologies for energy efficiency in the wine sector. EU Science Hub.

- FAO. (2017). The future of food and agriculture – Trends and challenges. https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf

- Gambetta, G. A., Herrera, J. C., Dayer, S., Feng, Q., Hochberg, U., & Castellarin, S. D. (2020). The physiology of drought stress in grapevine. Journal of Experimental Botany, 71(16), 4658–4676. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa245

- García, L., Miñarro, M., Martínez-Sastre, R., & García, D. (2018). Ground covers and biodiversity in Mediterranean vineyards. Agriculture, Ecosystems & Environment, 267, 100–111. https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.017

- García, M., Hernández, L., & Santesteban, L. G. (2022). Digital twins in viticulture. Agronomy, 12(4), 856. https://doi.org/10.3390/agronomy12040856

- Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J. F., & Ruiz-Sinoga, J. D. (2016). Effects of topsoil treatments in a dry Mediterranean climate. Solid Earth, 7(5), 1479–1489. https://doi.org/10.5194/se-7-1479-2016

- International Wineries for Climate Action (IWCA). (2022). Best practices for decarbonization in wine production [Technical report].

- Intrigliolo, D. S., & Castel, J. R. (2011). Interactive effects of deficit irrigation and shoot and cluster thinning. Irrigation Science, 29(6), 443–452. https://doi.org/10.1007/s00271-010-0258-y

- Ismail, S. M. (2025). Biofertilizers and soil carbon enhancement in Mediterranean vineyards. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 25(3), 1023–1037. https://doi.org/10.1007/s42729-025-01234-9

- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2010). Climate change and global wine quality. Climatic Change, 73(3), 319–343. https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2

- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls. Journal of Experimental Botany, 55(407), 2427–2436. https://doi.org/10.1093/jxb/erh213

- Kumar, P. (2022). Application of sap flow sensors for irrigation scheduling. Frontiers in Plant Science, 13, 1021387. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1021387

- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change. Science, 304, 1623–1627.

- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. Agronomy Journal, 112(5), 3755–3768. https://doi.org/10.1002/agj2.20282

- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management (2nd ed.). Routledge.

- López-Vicente, M., Álvarez, S., & Marqués, M. J. (2020). Soil and water conservation in sloping vineyards. Agricultural Water Management, 240, 106267. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106267

- Lucchetta, M., Rossi, F., & Rombolà, A. D. (2025). Evaluating pruning and winery residues compost. Frontiers in Sustainable Food Systems, 9, 1504761. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1504761

- Malvoni, M., Congedo, P., & Laforgia, D. (2017). Analysis of energy consumption: An Italian winery case study. Energy Procedia, 126, 227–233. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.144

- Martínez-Casasnovas, J. A., Escolà, A., & Ramos, M. C. (2012). Site-specific management zones in precision viticulture. Precision Agriculture, 13, 622–638.

- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Escalona, J. M., Pou, A., Fuentes, S., & Bota, J. (2015). Improving water use efficiency of vineyards. Agronomy for Sustainable Development, 35, 499–517. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0280-z

- Mirás-Avalos, J. M., Trigo-Córdoba, E., & Buesa, I. (2021). Optimization of vineyard water management. Water, 13(6), 746. https://doi.org/10.3390/w13060746

- Morlat, R., & Symoneaux, R. (2008). Long-term effect of soil management systems. Vitis, 47(4), 201–208.

- Pardo, G., Moral, R., Aguilera, E., & del Prado, A. (2019). GHG emissions and mitigation potential in Spanish agriculture. Environmental Science & Policy, 94, 119–129. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.020

- Pattara, C., Raggi, A., & Cichelli, A. (2012). Life cycle assessment and carbon footprint in the wine supply chain. Environmental Management, 49(6), 1247–1258. https://doi.org/10.1007/s00267-012-9844-3

- Ripoche, A., Metay, A., Celette, F., & Gary, C. (2011). Changing soil surface management in vineyards. Plant and Soil, 339, 259–271. https://doi.org/10.1007/s11104-010-0573-1

- Ruiz-Colmenero, M., Bienes, R., & Marqués, M. J. (2013). Soil and water conservation dilemmas in steep vineyards. Soil and Tillage Research, 126, 111–118. https://doi.org/10.1016/j.still.2012.09.006

- SARE. (2022). Managing cover crops profitably (3rd ed.). USDA. https://www.sare.org/resources/managing-cover-crops-profitably/

- Van Leeuwen, C., & Darriet, P. (2016). The impact of climate change on viticulture and wine quality. Journal of Wine Economics, 11(1), 150–167. https://doi.org/10.1017/jwe.2016.7

- Van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., de Rességuier, L., & Schultz, H. (2019). Impact of climate change in viticulture. Bulletin de l'OIV, 92, 1–27.
- Wine Intelligence. (2021). Premium wine and sustainability trends: Global consumer insights. Wine Intelligence Research Series.

- Wine Spectator. (2022). Sustainable wine: Market impact and consumer preferences. Wine Spectator Insights Report.

- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming: A review. Agricultural Systems, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

# Allegato I – Questioni oggetto di revisione

### Blocco 1: Pratiche sostenibili nella viticoltura

1. Spiega il ruolo della materia organica nella fertilità del suolo e nella capacità di ritenzione idrica nei vigneti.
2. Quali effetti ha la lavorazione intensiva del terreno sulla struttura del suolo e sulla biodiversità microbica?
3. Confronta i vantaggi e gli svantaggi dell'uso di coperture vegetali rispetto ai terreni nudi nei climi mediterranei.
4. In che modo la biodiversità funzionale contribuisce alla lotta biologica contro i parassiti nei vigneti?
5. Cita tre pratiche che aumentano la biodiversità funzionale in un vigneto e descrive in che modo queste ne favoriscono la resilienza.

### Blocco 2: Efficienza idrica

1. Definisci il concetto di deficit idrico controllato (RDI) e i suoi effetti sulla qualità del vino.
2. Spiega i vantaggi dei sensori di umidità del suolo rispetto alla programmazione fissa dell'irrigazione.
3. Descrivi brevemente il modello AquaCrop e la sua utilità nella viticoltura.
4. In che modo le reti di sensori basate sull'Internet delle cose (IoT) contribuiscono alla gestione delle risorse idriche?
5. Metti in relazione il risparmio idrico con il risparmio energetico nella viticoltura.

### Blocco 3: La biodiversità nel vigneto

1. Definisci il concetto di biodiversità funzionale e la sua importanza nella viticoltura sostenibile.
2. In che modo la monocoltura intensiva influisce sulla comparsa di parassiti e malattie?
3. Spiega il ruolo delle siepi e dei corridoi ecologici nella conservazione della fauna ausiliaria.
4. Menziona tre benefici ecologici diretti derivanti dall'introduzione di coperture vegetali nei vigneti.
5. Quali ostacoli socioeconomici possono impedire l'adozione di pratiche volte a promuovere la biodiversità?

### Blocco 4: Uso sostenibile dell'energia

1. Qual è la percentuale approssimativa dei costi energetici nella viticoltura convenzionale secondo l'Organizzazione Internazionale della Vigna e del Vino (OIV)?
2. Spiega due tecnologie che migliorano l'efficienza energetica nell'irrigazione dei vigneti.
3. Descrivi il funzionamento di base di un impianto fotovoltaico e i suoi principali vantaggi nel settore vitivinicolo.
4. In che modo un audit energetico contribuisce alla transizione di un vigneto verso le energie rinnovabili?
5. Definisci un sistema energetico ibrido e fornisci un esempio di applicazione nelle cantine.

### Blocco 5: La transizione energetica nel settore vitivinicolo

1. Indica le fasi del ciclo del vino in cui si concentrano maggiormente il consumo energetico e le emissioni di gas serra.
2. Spiega il concetto di impronta di carbonio e la differenza tra gli ambiti 1, 2 e 3 secondo il GHG Protocol.
3. Indica tre strategie per ridurre l'impronta di carbonio di un'azienda vinicola e il suo impatto ambientale.
4. Quali sono i vantaggi della certificazione International Wineries for Climate Action (IWCA)?
5. Definisci cos'è l'agrivoltaico e descrivi come può essere applicato nei vigneti.

# Allegato II – Attività didattica: «Progettare un vigneto sostenibile»

**Farai parte del team tecnico di un'azienda vinicola che intende trasformare il proprio vigneto convenzionale in un sistema produttivo sostenibile, efficiente e resiliente ai cambiamenti climatici. A tal fine, dovrai elaborare un piano di transizione agroecologica ed energetica, mettendo in pratica le conoscenze acquisite nel modulo dedicato al suolo, all'acqua, alla biodiversità, all'energia e alla mitigazione dei cambiamenti climatici.**

**Informazioni preliminari sul vigneto fittizio**

- **Ubicazione:** zona dell'entroterra con clima mediterraneo semi-arido
- **Superficie:** 25 ettari di vigneti a spalliera
- **Terreno:** consistenza sabbioso-limoso, scarsa materia organica, segni di erosione
- **Gestione attuale:** lavorazione intensiva del terreno, assenza di copertura vegetale, scarsa presenza di fauna ausiliaria
- **Acqua:** irrigazione a pioggia, senza sensori, ad alto consumo e inefficiente
- **Fertilità:** uso di fertilizzanti chimici sintetici e fitosanitari
- **Energia:** dipendenza totale dalla rete elettrica e dal gasolio per i macchinari
- **Emissioni:** elevate emissioni di gas a effetto serra (GHG)
- **Costi:** aumento delle bollette energetiche e scarsa efficienza delle risorse

**Il tuo compito è quello di elaborare un piano di transizione sostenibile per il vigneto, che deve comprendere le seguenti sezioni:**

**1. Gestione del suolo e fertilità**

- **Proporre strategie volte a migliorare la salute e la fertilità del suolo (ad esempio, copertura vegetale, riduzione della lavorazione del terreno, compost o biofertilizzanti).**
- **Spiega in che modo ciascuna misura migliora le proprietà del terreno e il suo rapporto con la qualità dell'uva.**

**2. Gestione efficiente delle risorse idriche**

- **Progettare un nuovo sistema di irrigazione più efficiente (ad esempio: irrigazione a goccia, irrigazione a deficit controllato, sensori di umidità, modello AquaCrop).**
- **Indica in che modo le tue decisioni possono ridurre il consumo idrico e il relativo dispendio energetico.**

**3. Biodiversità funzionale**

- Proporre iniziative volte a promuovere la biodiversità (ad esempio: siepi, corridoi verdi, cassette nido, piante ausiliarie).
- Spiega in che modo queste azioni contribuiscono al controllo naturale dei parassiti e alla resilienza dei vigneti.

4. Transizione energetica

- Proporre misure volte a ridurre il consumo energetico e a sostituire le fonti fossili con quelle rinnovabili (ad esempio: fotovoltaico, biomasse, geotermia, sistemi ibridi).
- Spiega in che modo queste misure possono migliorare l'autosufficienza e ridurre le emissioni di gas serra.

5. Strategia climatica e valore di mercato

- Indicare in che modo la vostra proposta contribuirà a ridurre l'impronta di carbonio dell'azienda vinicola (tenendo conto degli ambiti 1, 2 e 3 del GHG Protocol).
- Scegli una o due certificazioni ambientali o di sostenibilità (ad esempio, International Wineries for Climate Action o B Lab) che l'azienda vinicola potrebbe ottenere e spiega in che modo migliorerebbero la sua immagine di marca e l'accesso ai mercati di fascia alta.