



VFARM

Vertical Farming Sostenibile

**D4.3 REPORT DI VALUTAZIONE
D'IMPATTO DEL CICLO DI VITA**



Acronimo:	VFarm
Titolo completo:	Vertical Farming sostenibile
Codice progetto:	2020ELWM82
Finanziamento	PRIN
Coordinatore:	Università di Bologna
Inizio del progetto:	8 Maggio, 2022
Durata del progetto:	36 mesi

	Caratteristiche documento
Titolo del documento	D4.3 Report di valutazione d'impatto del ciclo di vita
Work Package:	WP4
Partner responsabile:	Alma Mater Studiorum – Università di Bologna
Autori principali:	Simone Amadori, Simone Prospero, Andrea Vicinanza, Giulia Stanzani, Arianna Dell'Olio, Matteo Vittuari
Altri autori:	Francesco Orsini; Silvia Locatelli; Paolo Sambo; Carlo Nicoletto; Stefania de Pascale; Christophe El Nakhel; Fabiana Marino; Silvana Nicola
Numero di pagine:	43



Indice dei contenuti

Indice delle tabelle	4
Indice delle figure	4
1. Introduzione	6
1.1 Obiettivi del progetto	6
2. Goal and scope	7
3. Elaborazione dati e valutazione d'impatto	8
4. Risultati della valutazione di sostenibilità	8
4.1 Casi studio	8
4.2 Lattuga in container farm (UNIBO)	10
4.2.1 Valutazione economica	10
4.2.2 Valutazione ambientale	12
4.2.3 Valutazione sociale	14
4.3 Canapa medicinale in mini-VF (UNINA)	15
4.3.1 Valutazione economica	15
4.3.2 Valutazione ambientale	16
4.3.3 Valutazione sociale	19
4.4 Basilico in micro-indoor farm (UNITO)	20
4.4.1 Valutazione economica	21
4.4.2 Valutazione ambientale	22
4.4.3 Valutazione sociale	24
4.5 Lattuga in colonne acquaponiche (UNIPD)	25
4.5.1 Valutazione economica	26
4.5.2 Valutazione ambientale	27
4.5.3 Valutazione sociale	29
5. Comparazione e discussione dei risultati della valutazione di sostenibilità	31



5.1 Risultati chiave	31
5.2 Analisi di sensitività	34
5.2.1 Fonti energia elettrica	35
5.2.2 Prezzo unitario dell'energia elettrica	38
5.2.3 Prezzo di vendita dei prodotti	39
6. Conclusioni	40
7. Bibliografia e sitografia	41



Indice delle tabelle

Tabella 1: Obiettivo dello studio, adattato dal modello di EC, REC. (UE) 2021/2279 Annex I. Product Environmental Footprint Method	7
Tabella 2 Le quattro vertical farm sperimentali analizzate.....	9
Tabella 3 Indicatori economici UNIBO	11
Tabella 4 Indicatori economici UNINA	16
Tabella 5 Indicatori economici UNITO	22
Tabella 6 Indicatori economici UNIPD	27
Tabella 7 Confronto del BCR al variare del tasso di inflazione annuo del prezzo dell'energia per le quattro UR.....	39
Tabella 8 Sensitività dei prezzi utilizzati per le quattro UR	39

Indice delle figure

Figura 1 Collocazione delle quattro vertical farm sperimentali analizzate.....	9
Figura 2 Analisi costi-benefici UNIBO.....	11
Figura 3 Analisi di impatto ambientale UNIBO (con elettricità)	13
Figura 4 Analisi di impatto ambientale UNIBO (senza elettricità)	13
Figura 5 Impatti sociali indiretti UNIBO	14
Figura 6 Analisi costi-benefici UNINA	16
Figura 7 Analisi di impatto ambientale UNINA (con elettricità)	18
Figura 8 Analisi di impatto ambientale UNINA (senza elettricità)	19
Figura 9 Impatti sociali indiretti UNINA	20
Figura 10 Analisi costi-benefici UNITO	22
Figura 11 Analisi di impatto ambientale UNITO (con elettricità)	23
Figura 12 Analisi di impatto ambientale UNITO (senza elettricità).....	24
Figura 13 Impatti sociali indiretti UNITO	25
Figura 14 Analisi costi-benefici UNIPD	27
Figura 15 Analisi di impatto ambientale UNIPD (con elettricità)	28
Figura 16 Analisi di impatto ambientale UNIPD (senza elettricità).....	29
Figura 17 Impatti sociali indiretti UNIPD	30
Figura 18 Struttura dei costi delle quattro UR a confronto.....	33
Figura 19 Impatti ambientali delle 4 UR a confronto	34
Figura 20 Confronto tra impatti delle vertical farm	37





1. Introduzione

Il progetto VFarm – Vertical Farming sostenibile (CUP: J33C20002350001) è un progetto PRIN (Progetti di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale) finanziato nell’ambito della call 2020. Il progetto mira all’identificazione di strategie innovative per il *vertical farming*, implementando un approccio interdisciplinare che integra orticoltura e fisiologia vegetale con applicazioni negli ambiti dell’ingegneria e delle scienze economiche ed ambientali. Il progetto mira a definire le caratteristiche ottimali di sistemi di coltivazione e controllo climatico, adattando le tecnologie alle diverse specie coltivate e consentendo di progettare unità di coltivazione modulari ed adattabili a diversi contesti in città italiane. Inoltre, promuove collaborazioni tra le università partner e aziende operanti nel settore per consentire un rapido trasferimento delle conoscenze generate, permettendo infine l’identificazione e la validazione delle soluzioni tecnologiche ottimali per l’implementazione del *vertical farming* in Italia. VFarm è coordinato dall’Università di Bologna Alma Mater Studiorum, e ha come partner l’Università di Napoli Federico II, l’Università degli Studi di Torino e l’Università degli Studi di Padova.

1.1 Obiettivi del progetto

Gli obiettivi specifici del progetto sono:

- Studiare l’adattabilità di 7 tipologie di prodotti al *vertical farming* (WP2);
- progettare soluzioni tecnologiche ottimali in termini di sistemi di coltivazione, gestione della luce e controllo del clima (WP3);
- valutare la sostenibilità, sociale, ambientale ed economica delle *vertical farm* (VF) tramite analisi del ciclo di vita (LCA, eLCC e S-LCA) e con riferimento all’uso delle risorse (energia, acqua e nutrienti) (WP4);
- definire le tecnologie ottimali, integrandole sia a VF di piccola scala realizzate all’interno di container sia a quelle a grande scala realizzate all’interno di magazzini industriali (WP5).



2. Goal and scope

Come descritto nel precedente deliverable metodologico (D4.1) e riportato nel deliverable comprensivo degli inventari (D4.2), le principali informazioni relative allo scopo e ambito dello studio sono riassunte nella Tabella 1.

Applicazione prevista	Informare la pianificazione strategica aziendale e il processo decisionale pubblico
Motivi per cui si sviluppa lo studio, contesto decisionale e committente	Progetto di ricerca nazionale
Destinatari	Aziende e policymakers
Strategia di verifica	Diffusione di inventari su richiesta
Baseline	Lattuga baby leaf, modello di riferimento per comparare le performance con altri prodotti di agricoltura verticale.
Localizzazione	Produzione in Italia, con sistemi in serre verticali e illuminazione artificiale.
Sistemi analizzati	<ul style="list-style-type: none"> - Lattuga baby leaf in idroponica (UNIBO) - Canapa in idroponica (UNINA) - Basilico in idroponica (UNITO) - Lattuga in colonne acquaponiche (UNIPD)
Unità funzionali (UF)	<ul style="list-style-type: none"> - LCA (ambientale): 1 kg di prodotto fresco - eLCC (economica): 1€ di ricavo dalla vendita - S-LCA (sociale): 1 anno di attività dell'iniziativa
Durata dello studio	1 anno di attività delle VF analizzate.
Confronto con la letteratura	Dati riferiti a produzioni analoghe in serre convenzionali per integrare i risultati.
Applicazioni dei risultati	Supporto alla pianificazione strategica aziendale e al policy-making per promuovere il settore della VF.
Limitazioni dello studio	<ul style="list-style-type: none"> • disponibilità di dati; • scala pilota dei sistemi analizzati; • stime effettuate rispetto a prezzi, costi, materiali utilizzati

Tabella 1: Obiettivo dello studio, adattato dal modello di EC, REC. (UE) 2021/2279 Annex I. Product Environmental Footprint Method



3. Elaborazione dati e valutazione d'impatto

L'elaborazione dei dati e le analisi di sostenibilità ambientale e sociale sono state svolte utilizzando il software di analisi openLCA®v2.1 distribuito da GreenDELTA, ampiamente utilizzato in ambito di ricerca e industriale.

Per l'analisi di impatto ambientale, i dati secondari utilizzati per modellare i processi di background sono stati estratti dal database di impatto ambientale ecoinvent®v.3.10; gli inventari ottenuti sono poi stati caratterizzati con il metodo di impatto ambientale raccomandato dalla Commissione Europea *Product Environmental Footprint (PEF)* v.3.1 (Pant & Zampori, 2019).

Per quanto riguarda invece l'analisi di impatto sociale, i processi sono stati modellati utilizzando il database di impatto sociale PSILCA® professional v3.1.1 (Loubert et al., 2023).

L'analisi economica è stata svolta su Excel®2024, utilizzando dati di mercato e riferimenti Eurostat per la compagine energetica e della Banca d'Italia (Collina et al., 2023) per i tassi di interesse per la stima dell'ammortamento.

Gli inventari ambientali e le elaborazioni economiche sono presentate nei Materiali Supplementari (MS).

4. Risultati della valutazione di sostenibilità

4.1 Casi studio

I dati primari si riferiscono alle 3 diverse tipologie di prodotti coltivati all'interno di 4 diverse Unità di Ricerca (UR) presso le Università di Bologna (UNIBO), di Napoli Federico II (UNINA), di Padova (UNIPD) e di Torino (UNITO).



UNIBO: Lattuga in container vertical farm con illuminazione artificiale e sistema idroponico

UNINA: Canapa in vertical farm con illuminazione artificiale e sistema idroponico

UNITO: Basilico in micro vertical farm con illuminazione artificiale e sistema idroponico

UNIPD: Lattuga in serra con colonne acquaponiche

Figura 1 Collocazione delle quattro vertical farm sperimentali analizzate

Considerate la marcata variabilità dei sistemi in esame evidenziata nella Tabella 2, i dati sono presentati nelle sezioni 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 separatamente per le diverse UR, per ognuno dei 3 pilastri di sostenibilità – economico, ambientale e sociale.

Unità di ricerca	Prodotto coltivato	Sistema di coltivazione	Illuminazione artificiale	Dimensione	Grado di implementazione dei sistemi
UNIBO	Lattuga baby leaf	Idroponico	Sì	Mini	Medio
UNINA	Canapa	Idroponico	Sì	Micro	Avanzato
UNITO	Basilico	Idroponico	Sì	Mini	Medio
UNIPD	Lattuga	Acquaponico	No	Micro	Medio

Tabella 2 Le quattro vertical farm sperimentali analizzate



4.2 Lattuga in container farm (UNIBO)

Il sistema UR UNIBO, situato nella zona peri-urbana di Bologna all'interno del progetto di agricoltura urbana SALUS Space, è ospitato in un container ScalaBox® fornito da Scalabros. Attualmente non è di tipo commerciale, ma viene utilizzato per attività sperimentali su diverse specie (lattuga, kale, microtom, ecc.), con l'obiettivo futuro di produrre per il consumo, anche per il ristorante adiacente. Al momento della valutazione, il sistema era in fase di implementazione media, con alcune installazioni elettriche incomplete, e operava utilizzando metà container. La produzione di lattuga baby leaf avviene tramite un sistema idroponico ebb&flow, con piante coltivate in cilindri di torba e soluzione nutritiva ciclicamente pompata. Il sistema non è climatizzato. La valutazione è stata condotta tra dicembre 2023 e gennaio 2024.

4.2.1 Valutazione economica

L'analisi esplorativa della sostenibilità economica della produzione della lattuga nella vertical farm dell'Università di Bologna ha mostrato risultati negativi di profittabilità alle attuali condizioni di sistema pilota a causa della maggiore entità dei costi rispetto ai potenziali ricavi stimati sulla produzione totale nell'orizzonte temporale di 15 anni. Infatti, con un prezzo medio di 15€/kg, risulterebbe una perdita netta di € 18956.41 (cfr. Tabella 3). Il rapporto costi-benefici (BCR) risulterebbe in questo caso poco inferiore (0.91) al punto di pareggio (BEP). L'elettricità rappresenta la principale voce di costo per i fattori produttivi consumabili, rappresentando in media il 14.7% dei costi annui. Di conseguenza, è stata effettuata una analisi di sensitività per verificare l'andamento della redditività dell'investimento al variare del tasso di incremento del prezzo dell'energia (dall'1% al 10%), a parità di input e con prezzo di vendita costante. Come si può notare dal grafico b nella Figura 2, l'indice BCR può variare da 0.96 con un tasso di incremento annuo del prezzo della fornitura del 1%, a 0.86 con un tasso del 10%.

Rispetto all'analisi annuale dei costi, si può notare una decrescita del peso percentuale dei CAPEX spiegabile con l'aumento maggiore dei costi relativi alle spese operative: la percentuale dei CAPEX sul totale diminuisce con uno scarto del 10%: passa dal 41% del 2024 al 31% del 2038. Tra questi costi, quelli che aumentano maggiormente sono i costi dell'energia elettrica, il cui



peso percentuale sul totale passa dal 13% al 22% (aumentando di più del 50% in 15 anni).

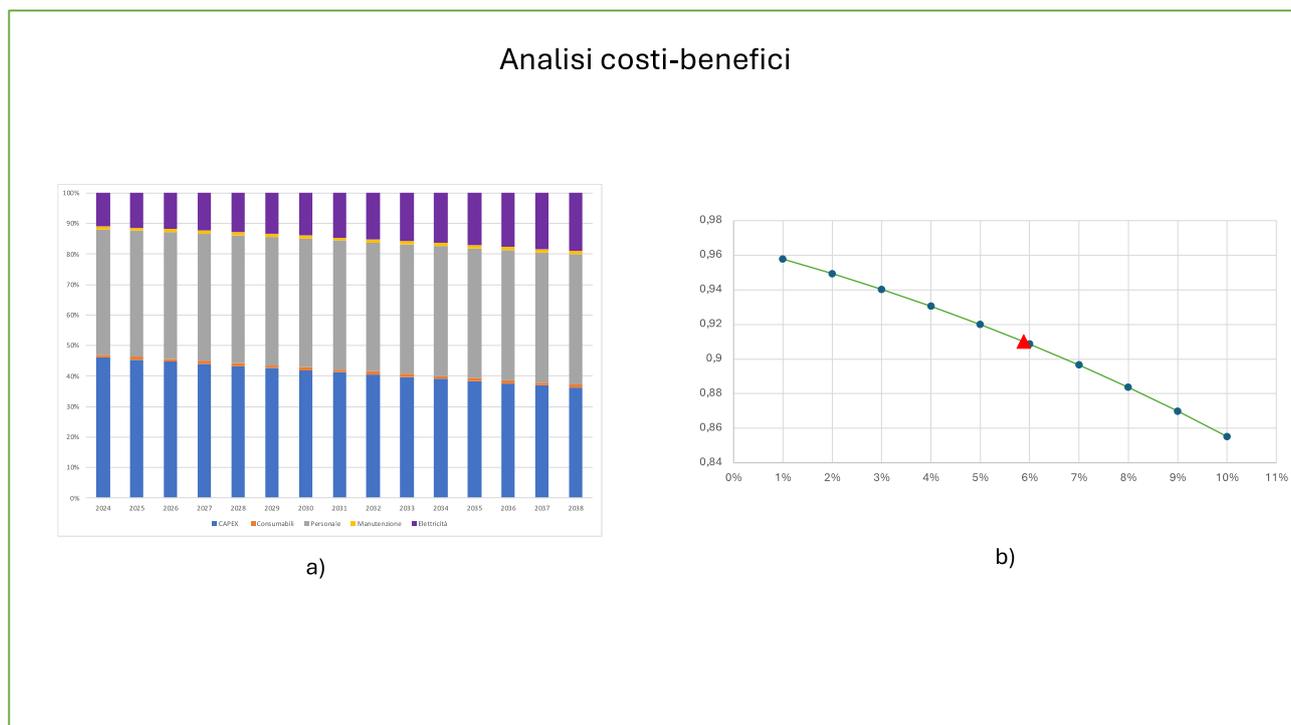


Figura 2 Analisi costi-benefici UNIBO

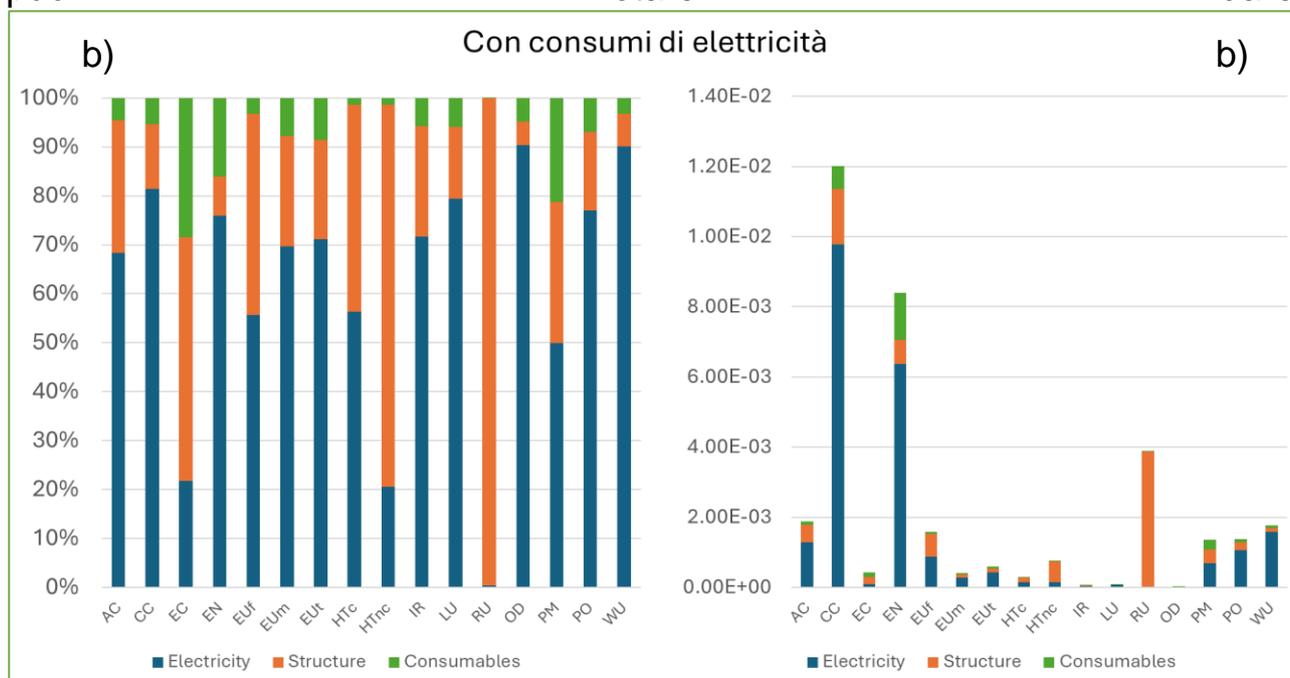
Costi Totali	-€ 210984.72
Ricavi Totali	€ 192028.31
Profitto Netto 15 anni	-€ 18956.41
Profitto Netto medio annuo	-€ 1263.76
BCR	0.910
% riduzione dei costi per raggiungere BEP	9%

Tabella 3 Indicatori economici UNIBO



4.2.2 Valutazione ambientale

La valutazione ha rilevato l'energia elettrica come il principale hotspot ambientale della produzione di lattuga all'interno della vertical farm dell'Università di Bologna in 12 categorie di impatto su 16 analizzate, come si può notare dalla



, che analizza gli impatti scomponendoli tra elettricità, struttura e consumabili (portati al 100%; grafico a) e gli stessi risultati pesati secondo il set di normalizzazione e pesatura del metodo Environmental Footprint 3.1 (Grafico b; Pant & Zampori, 2019) Nello specifico, il maggiore contributo può essere osservato nelle categorie *Climate Change (CC)* e *Energy Resources - non renewable (EN)*. La terza categoria d'impatto in termini di importanza è *Resource Use (RU)*. Per questa categoria, la quasi totalità degli impatti è data dai materiali di costruzione del container e degli scaffali che ospitano il sistema di coltivazione e delle lampade per l'illuminazione artificiale.

Per evidenziare maggiormente i contributi del sistema di coltivazione e dei consumabili utilizzati (fertilizzanti e substrati), è stato costruito un grafico



escludendo gli impatti legati al consumo energetico (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Dall'analisi si osserva una forte incidenza del sistema di coltivazione in 14 categorie di impatto, principalmente in CC, *Eutrophication – freshwater* (EUf), *Human Toxicity – non carcinogenic* (HTnc) e RU. I principali contributi dei consumabili si osservano nelle categorie CC e EN e sono spiegabili con l'uso di fertilizzanti e torba nella coltivazione. Il grafico privo di consumi elettrici evidenzia come la struttura del sistema di coltivazione sia responsabile della quasi totalità degli impatti su RU.

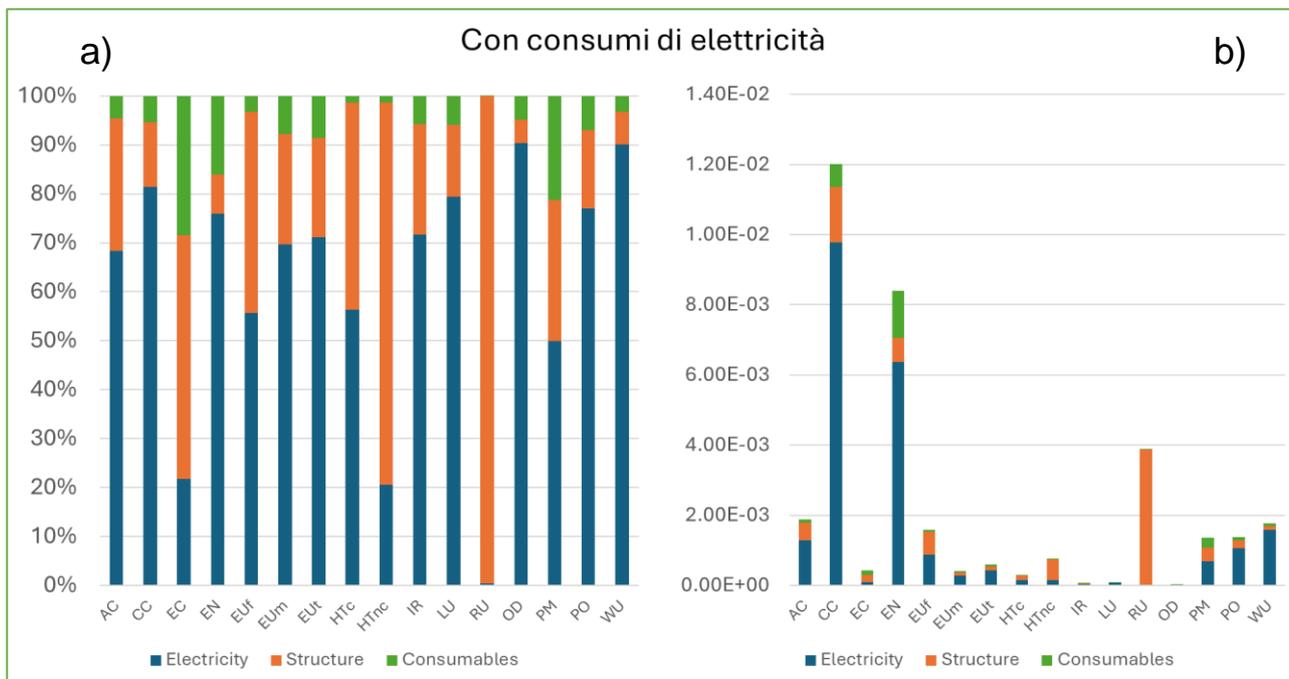


Figura 3 Analisi di impatto ambientale UNIBO (con elettricità)

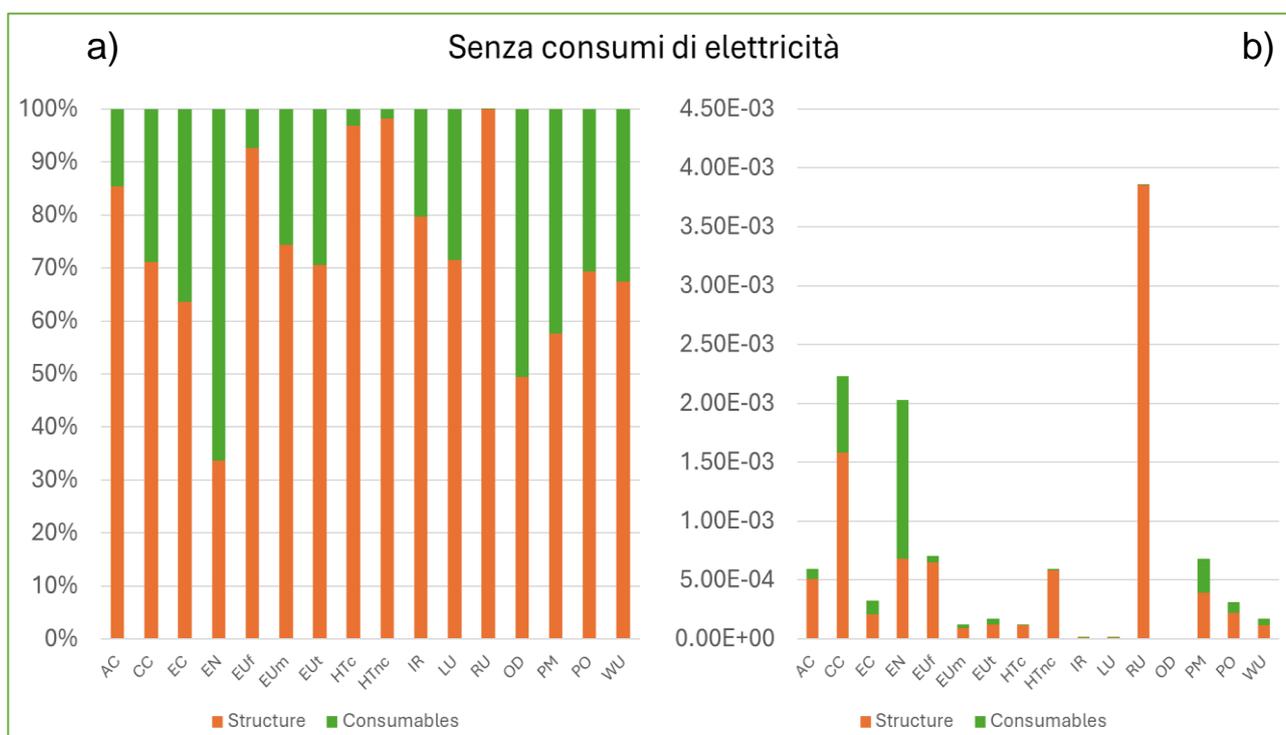


Figura 4 Analisi di impatto ambientale UNIBO (senza elettricità)



4.2.3 Valutazione sociale

Non essendo rilevante in questa fase analizzare gli impatti sociali diretti generati dalla struttura pilota, è stato condotto uno studio dei potenziali impatti sociali indiretti tramite il database di impatti sociali PSILCA (Loubert et al., 2023). L'analisi ha evidenziato un hotspot nei quattro indicatori studiati – Lavoro minorile, Diritti delle comunità indigene, Conflitti e Donne nella forza lavoro – in Russia, Iran, Camerun e Arabia Saudita, oltre ad un impatto sull'Italia. Per una analisi completa, si veda l'analisi comparata delle 4 strutture nella sezione 5.1 Risultati chiave.

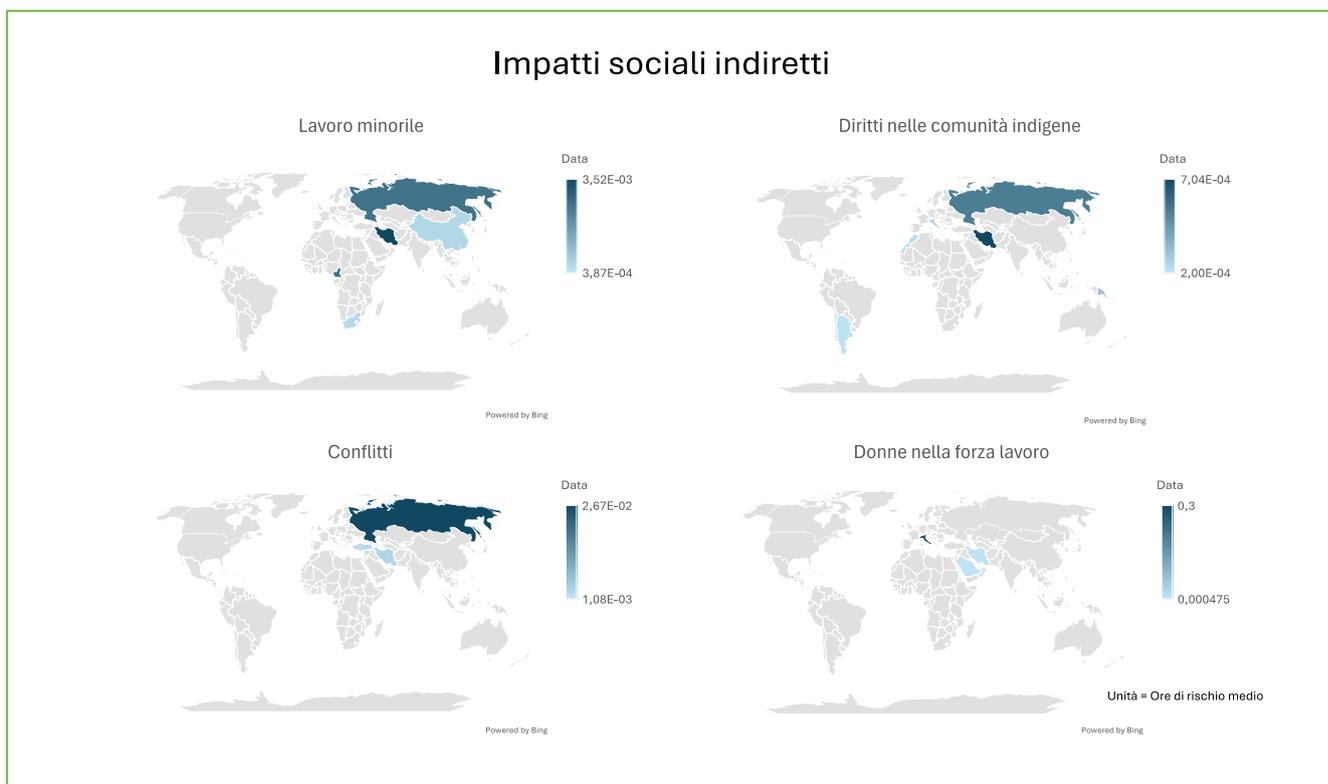


Figura 5 Impatti sociali indiretti UNIBO



4.3 Canapa medicinale in mini-VF (UNINA)

La *vertical farm* dell'UR dell'Università degli Studi di Napoli – Federico II (UNINA) è localizzata nella zona urbana del comune di Portici (NA). Il sistema è dotato di una camera di crescita, è esclusivamente di tipo sperimentale e prevede la coltivazione di canapa medicinale, tramite sistema idroponico a goccia (ciclo chiuso). Nel momento della valutazione dell'attività, che va da febbraio a giugno 2023 (5 mesi), l'implementazione del sistema risulta completa. Per quanto riguarda i dati elaborati, la stima della resa della canapa coltivata è data dal peso secco delle infiorescenze e delle foglie resinose (*sugar leaves*).

4.3.1 Valutazione economica

L'analisi della sostenibilità economica della produzione di canapa nella vertical farm dell'Università degli Studi di Napoli Federico II ha restituito risultati in linea con quella precedente. Nello specifico, ipotizzando la vendita del prodotto, il profitto netto risulterebbe negativo di oltre 38.000 € su un periodo di 15 anni (Tabella 4), con un corrispondente indice BCR pari a 0,397 (<1). Se si considerano scenari di aumento del prezzo dell'energia (Figura 6 b) con incrementi compresi tra l'1% e il 10%, mantenendo costanti gli input e il prezzo di vendita, il BCR varierebbe da più di 0.45 (con un incremento dell'1%) a 0.33 (con un incremento del 10%).

Rispetto all'analisi annuale dei costi (Figura 6 a) si nota una graduale ma costante riduzione del peso percentuale dei CAPEX, che passa dal 12% all'8% in 15 anni. Questo cambiamento può essere spiegato con il marcato aumento prospettico dei costi operativi. Tra questi, i costi energetici sono quelli che crescono maggiormente, passando dal 33% al 46% del totale. Al contrario, le quote dei costi relativi al personale e ai beni consumabili subiscono un calo, passando rispettivamente dal 53% al 44% e dal 2% all'1% tra il 2024 e il 2038. I costi di manutenzione rimangono sostanzialmente invariati e poco significativi rispetto al totale, anche nelle proiezioni sui 15 anni successivi al 2024.

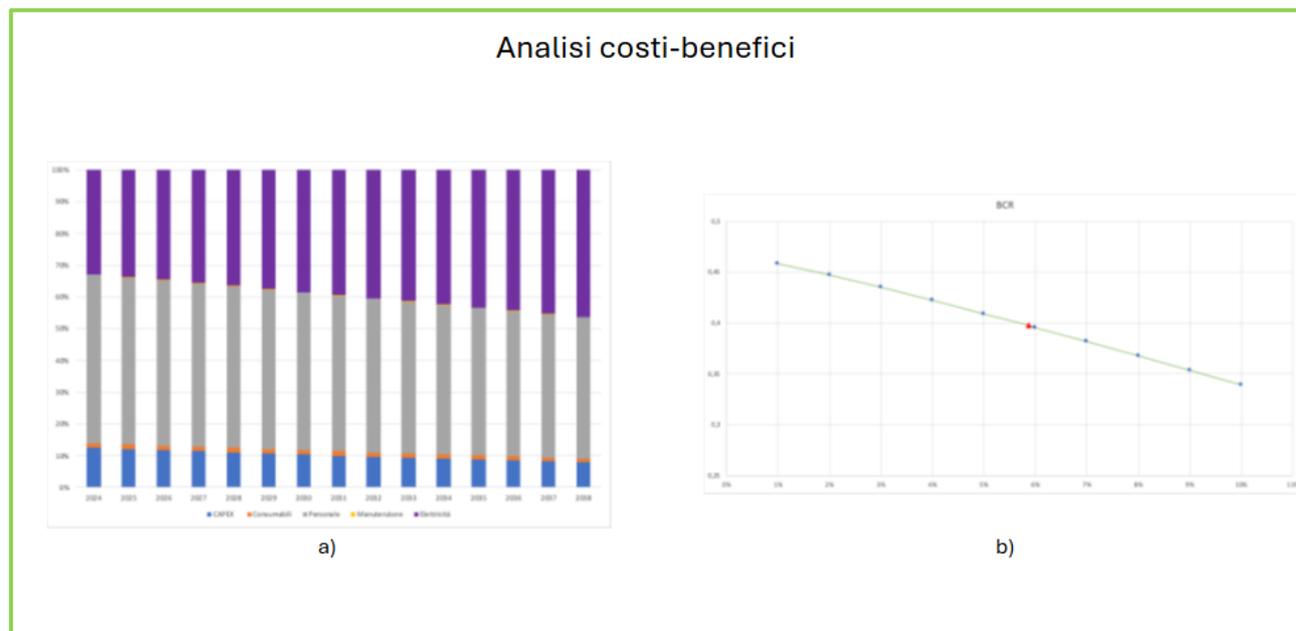


Figura 6 Analisi costi-benefici UNINA

Costi Totali	-€ 958865.83
Ricavi Totali	€ 381008.56
Profitto Netto 15 anni	-€ 577857.27
Profitto Netto medio annuo	-€ 38523.82
BCR	0.397
% riduzione dei costi per raggiungere BEP	60%

Tabella 4 Indicatori economici UNINA

4.3.2 Valutazione ambientale

In linea con gli altri progetti pilota analizzati, la valutazione ambientale ha identificato l'energia elettrica come il principale hotspot nel processo di produzione della canapa all'interno della mini-vertical farm dell'Università di Napoli, con contributi superiori al 90% in ben 14 categorie di impatto sulle 16 prese in esame. Questo è evidenziato nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, che illustra la suddivisione degli impatti tra elettricità, struttura e consumabili (proporzionati al totale, grafico a) e i risultati pesati secondo il set di normalizzazione e pesatura del metodo Environmental Footprint 3.1 (Pant & Zampori, 2019; Nel dettaglio, ad eccezione di *Resource Use* (RU),



l'energia elettrica ha mostrato un impatto significativo nella maggior parte delle categorie analizzate, con apporti particolarmente elevati in *Climate Change* (CC) ed *Energy Resources - non renewable* (EN). La categoria RU rappresenta un'eccezione, con un contributo totale suddiviso quasi equamente tra energia elettrica e struttura. Nello specifico, l'impatto associato alla struttura è imputabile principalmente a materiali ed elementi di sostegno, seguiti dalle componenti elettroniche.

Per evidenziare i contributi specifici del sistema di coltivazione e dei consumabili utilizzati, come fertilizzanti e substrati, è stato sviluppato uno scenario che esclude gli impatti legati al consumo energetico (Figura 8). L'analisi ha mostrato che la struttura rappresenta la principale fonte di impatto rispetto ai consumabili in tutte le categorie, con contributi particolarmente elevati in *Human Toxicity – non carcinogenic* (HTnc), *Land Use* (LU) e *Resource Use* (RU). Inoltre, la struttura mantiene un apporto maggiore anche in termini assoluti.

Si conferma, quindi, il trend che è possibile osservare negli altri casi studio analizzati, in cui i consumabili forniscono un contributo marginale rispetto ad energia e struttura nell'impatto complessivo della vertical farm.

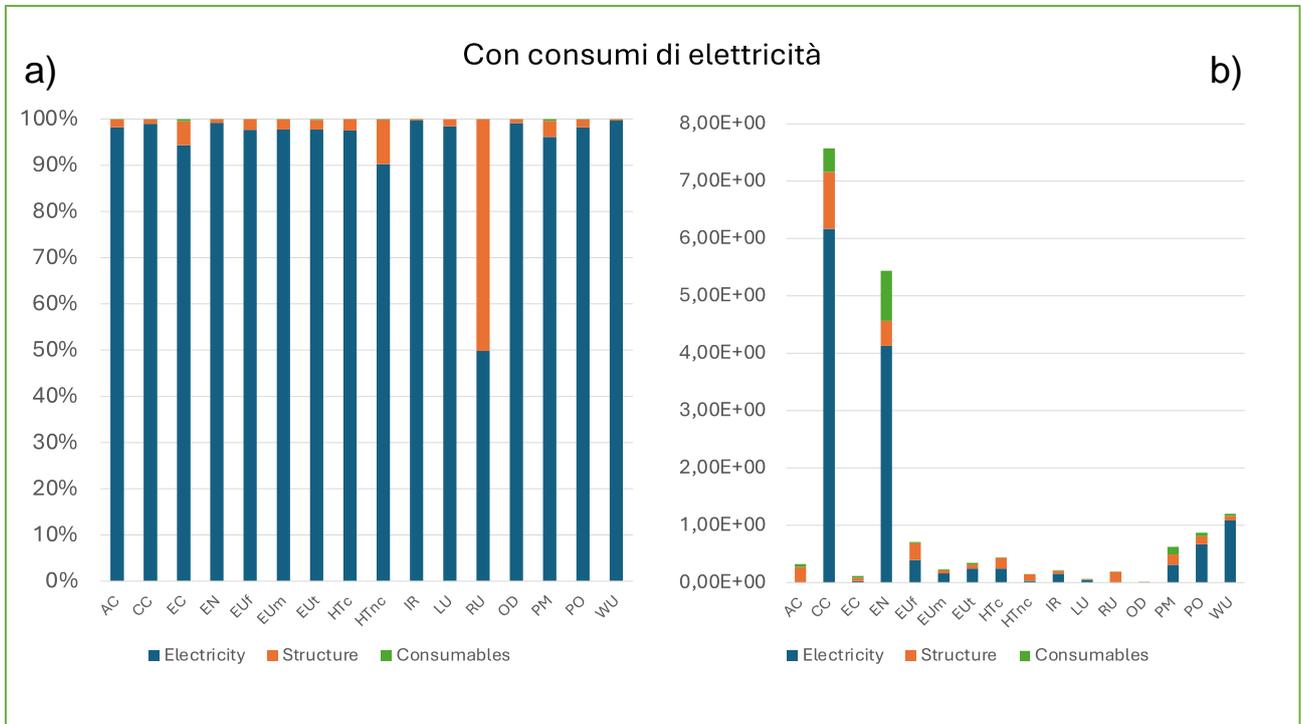


Figura 7 Analisi di impatto ambientale UNINA (con elettricità)

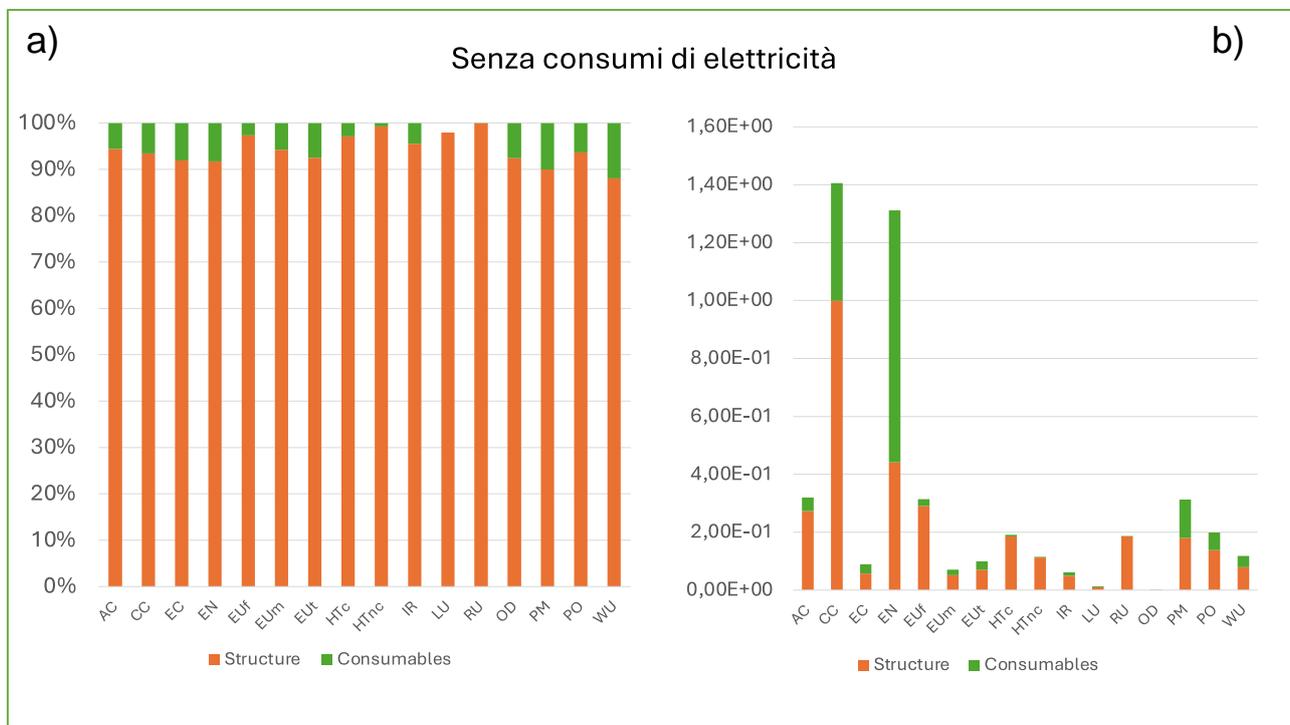


Figura 8 Analisi di impatto ambientale UNINA (senza elettricità)

4.3.3 Valutazione sociale

Non essendo rilevante in questa fase analizzare gli impatti sociali diretti generati dalla struttura pilota, è stato condotto uno studio dei potenziali impatti sociali indiretti tramite il database di impatti sociali PSILCA (Loubert et al., 2023). L'analisi ha evidenziato un hotspot nei quattro indicatori studiati – Lavoro minorile, Diritti delle comunità indigene, Conflitti e Donne nella forza lavoro – in Russia, Iran, Camerun e Arabia Saudita, oltre ad un impatto sull'Italia. Per una analisi completa, si veda l'analisi comparata delle 4 strutture nella sezione 5.1 Risultati chiave.

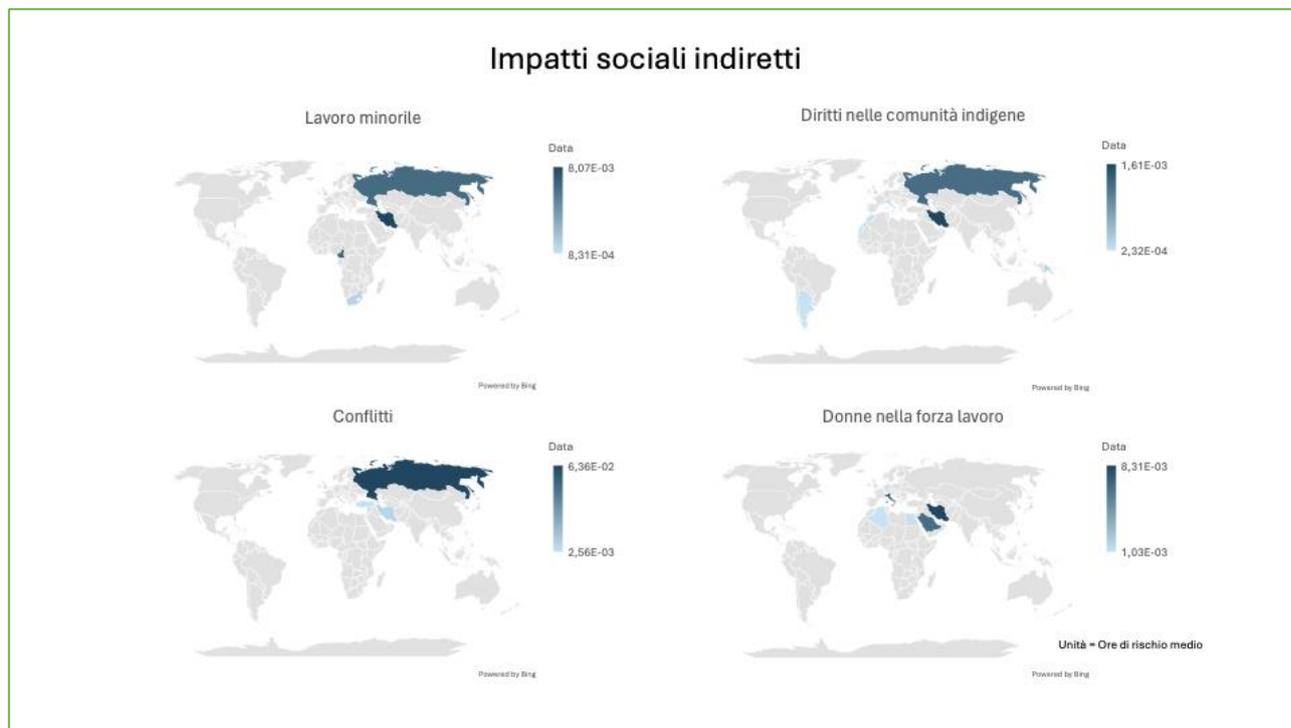


Figura 9 Impatti sociali indiretti UNINA

4.4 Basilico in micro-indoor farm (UNITO)

La *vertical farm* dell'UR dell'Università di Torino (UNITO) è localizzata nella zona peri-urbana del comune di Grugliasco (TO). L'UR è dotata di una struttura di tipo micro-indoor farm (MitTech®). Il sistema non è di tipo commerciale: nella struttura vengono svolte attività sperimentali. Al momento della rilevazione, il sistema non è ancora completo; la finalizzazione dell'impianto richiederà più di un anno. La produzione di basilico avviene tramite sistema di coltivazione idroponico (*floating system*). Il sistema di coltivazione al momento della valutazione non è climatizzato, e la raccolta avviene manualmente, permettendo una perdita di produzione molto ridotta (~0%). La valutazione dell'attività comprende un periodo di due mesi, che va da settembre 2023 a ottobre 2023. Il costo della spesa energetica è stato stimato rapportando il consumo energetico totale alla media del costo dell'elettricità tra ottobre 2023 e gennaio 2024.



4.4.1 Valutazione economica

L'analisi della sostenibilità economica della produzione di basilico nella vertical farm dell'Università di Torino ha restituito risultati coerenti con quelli osservati negli altri sistemi di produzione esaminati nel progetto. Nello specifico, il profitto netto risulta negativo di oltre 6000 € (Tabella 5) su un periodo di 15 anni, con un indice BCR di conseguenza inferiore ad 1, pari a 0.325. Se si considerano scenari di aumento del prezzo dell'energia, con incrementi compresi tra l'1% e il 10% (Figura 10 b) mantenendo costanti gli input e il prezzo di vendita, il BCR varia da 0.36 (con un incremento dell'1%) a 0.29 (con un incremento del 10%).

Rispetto all'analisi annuale dei costi (Figura 10 a), si nota una leggera riduzione del peso percentuale dei CAPEX, che passa dal 5% al 3% in 15 anni. Questo cambiamento può essere giustificato dall'aumento più marcato dei costi operativi. Tra questi, i costi energetici sono quelli che crescono maggiormente, passando dal 23% al 34% del totale, con un incremento assoluto superiore al 50% nell'arco di 15 anni. Al contrario, le quote dei costi relativi al personale e ai beni consumabili subiscono un calo, passando rispettivamente dal 59% al 51% e dal 12% al 10% tra il 2024 e il 2038. Infine, i costi di manutenzione, invece, aumentano in termini assoluti, ma il loro peso percentuale rimane invariato all'1% del totale.

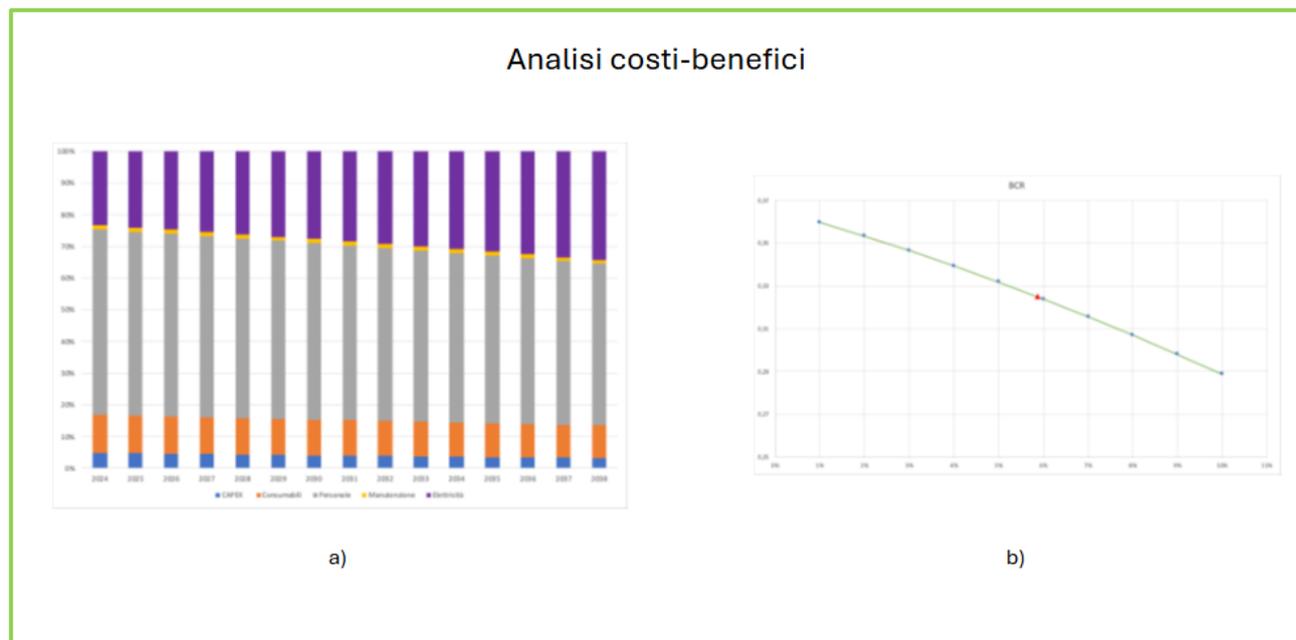


Figura 10 Analisi costi-benefici UNITO

Costi Totali	-€ 137935.63
Ricavi Totali	€ 44811.72
Profitto Netto 15 anni	-€ 93123.91
Profitto Netto medio annuo	-€ 6208.26
BCR	0.325
% riduzione dei costi per raggiungere BEP	68%

Tabella 5 Indicatori economici UNITO

4.4.2 Valutazione ambientale

La valutazione ha rilevato l'energia elettrica come il principale hotspot ambientale della produzione di basilico all'interno della micro-indoor farm dell'Università di Torino, con contributi superiori al 90% in 10 categorie di impatto sulle 16 prese in esame. Ciò si può notare dalla Figura 11, che analizza gli impatti scomponendoli tra elettricità, struttura e consumabili (portati al 100%, grafico a) e gli stessi risultati pesati secondo il set di normalizzazione e pesatura del metodo Environmental Footprint 3.1 (Grafico b; Pant & Zampori, 2019). Nello specifico, i principali impatti del consumo energetico si osservano nelle categorie *Climate Change (CC)* e *Energy Resources - non renewable*



(EN). L'unica categoria in cui si osserva una tendenza differente è *Resource Use (RU)*, in cui le strutture dell'impianto di coltivazione si rivelano essere i principali contribuenti.

Per evidenziare maggiormente i contributi del sistema di coltivazione e dei consumabili utilizzati, quali fertilizzanti e substrati, è stato elaborato un grafico al netto del consumo energetico (Figura 12). Da tale analisi si rileva una forte incidenza del sistema di coltivazione, che risulta essere la causa principale d'impatto in tutte le categorie. Nello specifico, l'impianto di illuminazione artificiale è responsabile del maggior contributo, principalmente riconducibile ai materiali che compongono i circuiti elettronici. Il secondo contributo più rilevante nella struttura è invece rappresentato dal sistema di fertirrigazione e, più in particolare, dalla produzione delle pompe. Nella categoria *Human Toxicity – non carcinogenic (HTnc)*, invece, l'impatto è distribuito quasi equamente tra la lana di roccia usata come substrato e la struttura della farm. Dunque, come osservato negli altri casi studio analizzati, i consumabili risultano essere i fattori produttivi meno impattanti nel complesso.

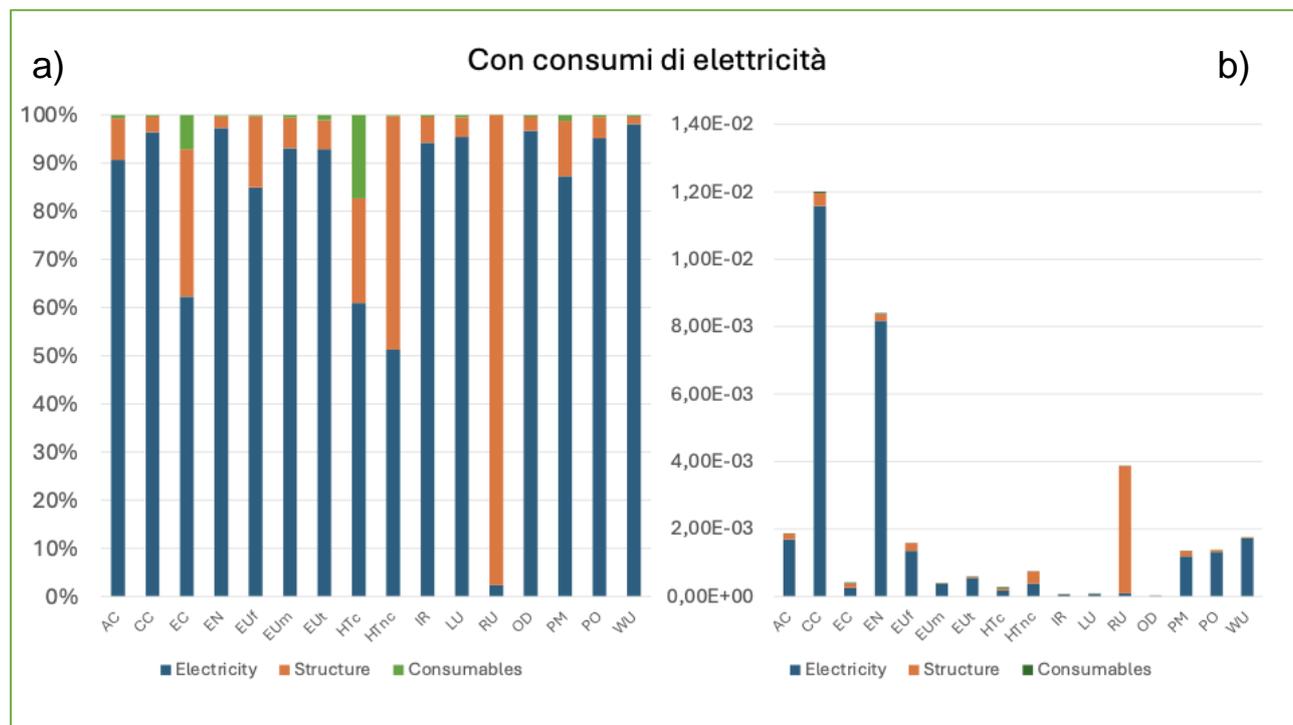


Figura 11 Analisi di impatto ambientale UNITO (con elettricità)

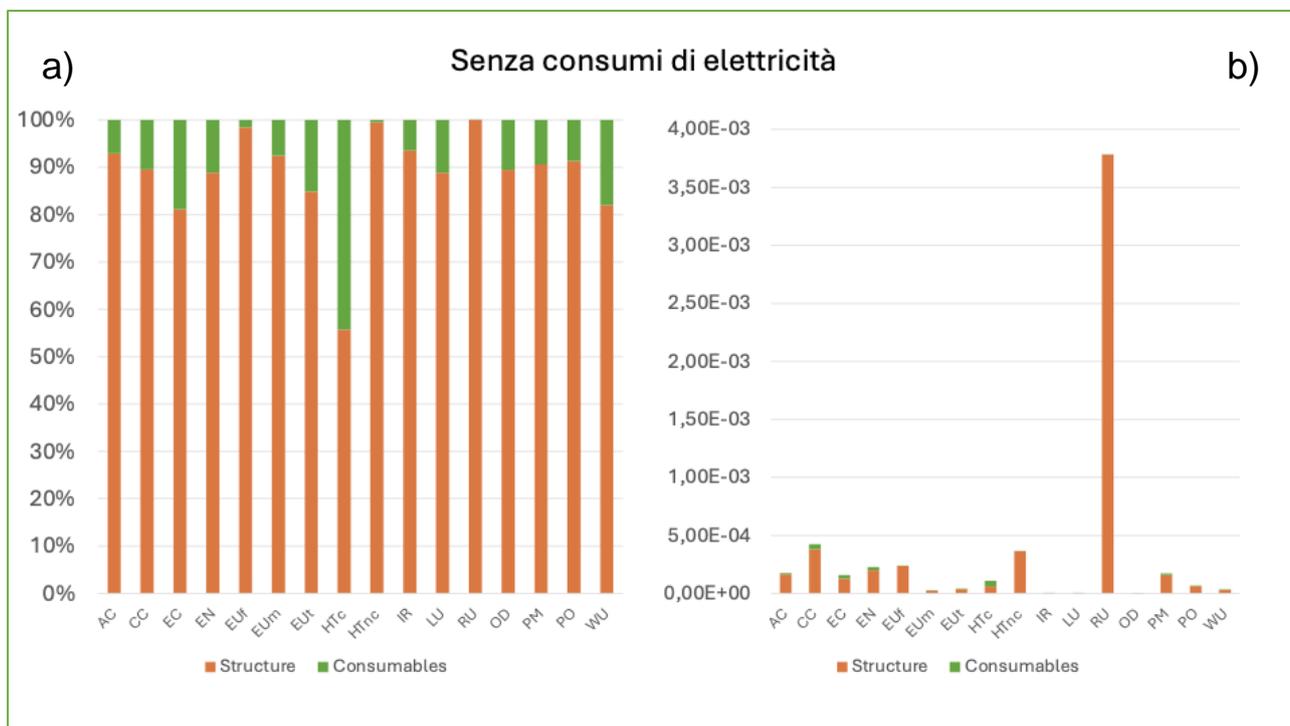


Figura 12 Analisi di impatto ambientale UNITO (senza elettricità)

4.4.3 Valutazione sociale

Non essendo rilevante in questa fase analizzare gli impatti sociali diretti generati dalla struttura pilota, è stato condotto uno studio dei potenziali impatti sociali indiretti tramite il database di impatti sociali PSILCA (Loubert et al., 2023). L'analisi ha evidenziato un hotspot nei quattro indicatori studiati – Lavoro minorile, Diritti delle comunità indigene, Conflitti e Donne nella forza lavoro – in Russia, Iran, Camerun e Arabia Saudita, oltre ad un impatto sull'Italia. Per una analisi completa, si veda l'analisi comparata delle 4 strutture nella sezione 5.1 Risultati chiave.

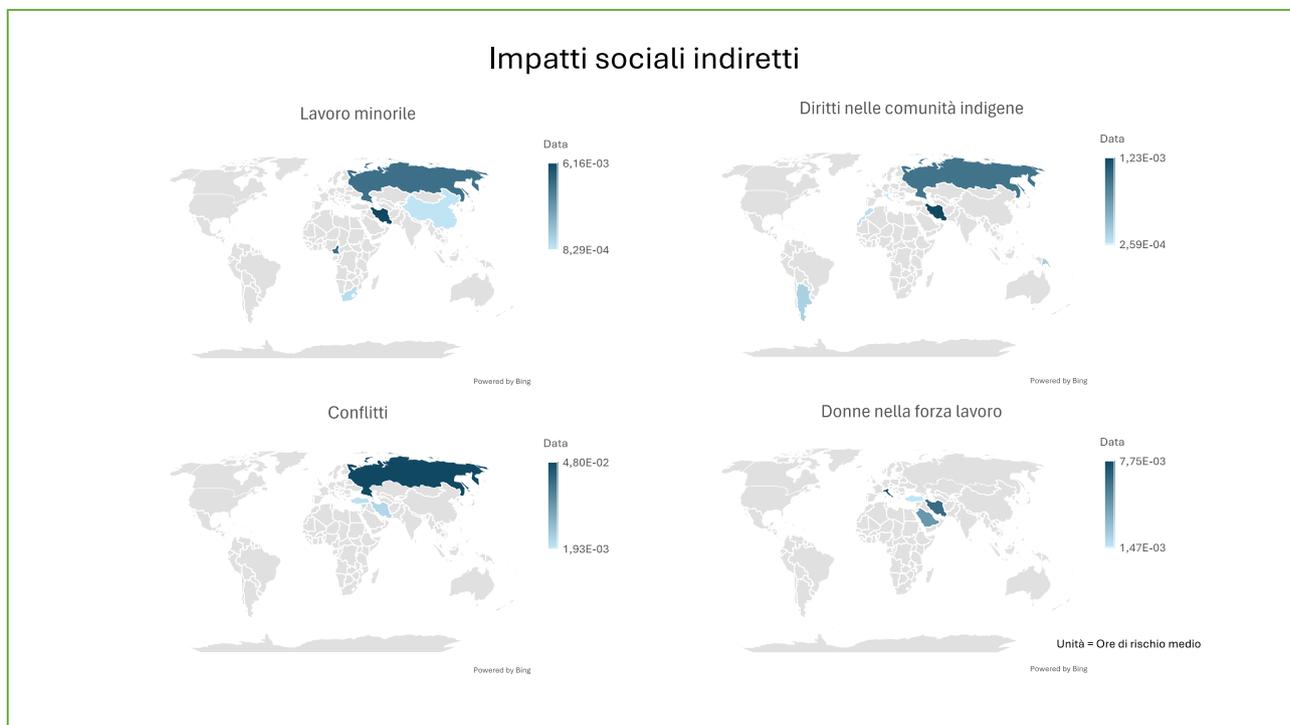


Figura 13 Impatti sociali indiretti UNITO

4.5 Lattuga in colonne acquaponiche (UNIPD)

La *vertical farm* dell'UR dell'Università degli Studi di Padova (UNIPD) è localizzata nella zona peri-urbana di Padova-Legnaro. Il sistema di coltivazione acquaponico è dotato di colonne verticali poste in serra per la coltivazione di lattuga. Nel momento della valutazione dell'attività, che va da luglio 2023 a dicembre 2023 (6 mesi), l'implementazione del sistema risulta quasi completa. Non è presente un sistema di illuminazione artificiale, essendo le torri poste in serra con luce naturale. La perdita di produzione è considerevole nulla (~0%). Il sistema pilota è costituito da una vasca di allevamento del pesce, un sistema di biofiltro e decantazione, 9 colonne di coltivazione, un sistema di raccolta dell'acqua di scarico delle colonne, dei dispositivi di pompaggio, connettori per irrigazione, e un dispositivo di controllo termico dell'acqua.



4.5.1 Valutazione economica

L'analisi della sostenibilità economica della produzione di lattuga nella vertical farm dell'Università di Padova ha mostrato risultati in linea con quelli degli altri sistemi di produzione considerati nel progetto. Infatti, il profitto netto risulta essere negativo di oltre 6.000€ in 15 anni e l'indicatore BCR risulta di conseguenza essere inferiore ad 1, precisamente 0,85. Testando diversi tassi di incremento del prezzo dell'energia (dall'1% al 10%; Figura 14 b), a parità di input e con prezzo di vendita costante, si può notare che il BCR varia da 0.89 (1%) al 0.79 (10%).

Rispetto all'analisi annuale dei costi (Figura 14 a), notiamo una decrescita del peso percentuale dei CAPEX spiegabile con l'aumento maggiore dei costi relativi alle spese operative, la percentuale del costo sul totale diminuisce con uno scarto del 10%: passa dal 41% del 2024 al 31% del 2038. Tra questi costi, quelli che aumentano maggiormente e che portano a una variazione del peso sul totale in percentuale sono i costi dell'energia elettrica, il cui peso percentuale sul totale passa dal 13% al 22% (aumentando di più del 50% in 15 anni). Gli altri costi ad aumentare in termini assoluti, ma che non aumentano in termini percentuali sono i costi di manutenzione, del personale e dei consumabili, i cui pesi relativi rimangono invariati e sono rispettivamente il 5%, il 39% e il 2% del totale.

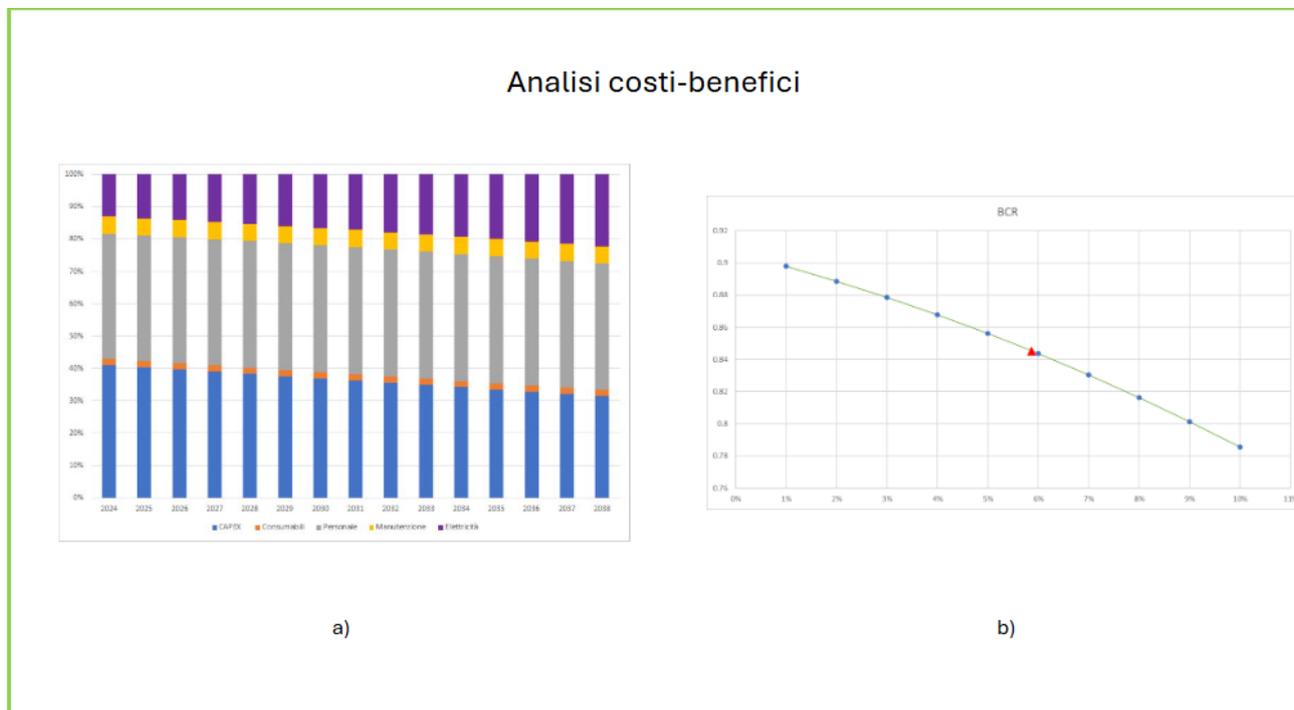


Figura 14 Analisi costi-benefici UNIPD

Costi Totali	-€ 40,566.48
Ricavi Totali	€ 34,290.77
Profitto Netto 15 anni	-€ 6,275.71
Profitto Netto medio annuo	-€ 418.38
BCR	0.85
% riduzione dei costi per raggiungere BEP	15%

Tabella 6 Indicatori economici UNIPD

4.5.2 Valutazione ambientale

La valutazione ha individuato nell'energia elettrica il principale hotspot d'impatto ambientale della produzione di lattuga all'interno della vertical farm dell'Università di Padova. La Figura 15 – con una scomposizione di impatto tra elettricità, struttura e consumabili (portati al 100%, grafico a) e gli stessi risultati



uniformati in base al set di normalizzazione e pesatura del metodo Environmental Footprint 3.1 (Grafico b; Pant & Zampori, 2019) – mostra come il contributo dell'elettricità sia quello maggioritario in ben 13 su 16 categorie di impatto analizzate. Più nello specifico, l'impatto più elevato si registra nelle categorie *Climate Change (CC)* e *Energy Resources - non renewable (EN)*.

Per evidenziare maggiormente i contributi del sistema di coltivazione e dei consumabili utilizzati, quali fertilizzanti e substrati, è stato elaborato un grafico escludendo gli impatti relativi al consumo energetico (Figura 16). Da questa valutazione si rileva una forte incidenza nella generazione complessiva degli impatti da parte del sistema di coltivazione, che risulta essere il contribuente principale in tutte le categorie, soprattutto nel caso di *CC* e *Human Toxicity – carcinogenic (HTc)*. Ciò è imputabile a costruzione ed assemblaggio degli elementi di sostegno, oltre che della componentistica elettronica e della pompa di funzionamento del sistema acquaponico. Si conferma, dunque, la tendenza osservata negli altri casi studio analizzati, in cui le risorse consumabili offrono un contributo minoritario, rispetto a energia e struttura, all'impatto complessivo della vertical farm.

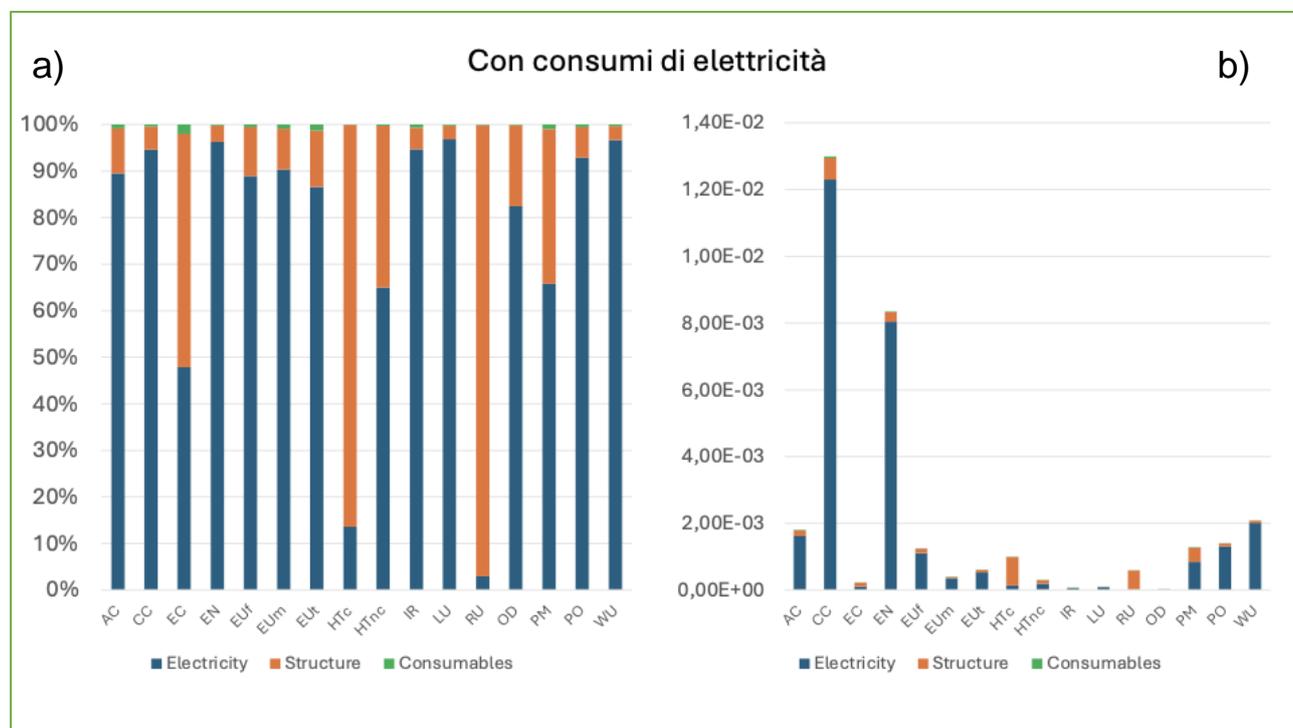


Figura 15 Analisi di impatto ambientale UNIPD (con elettricità)

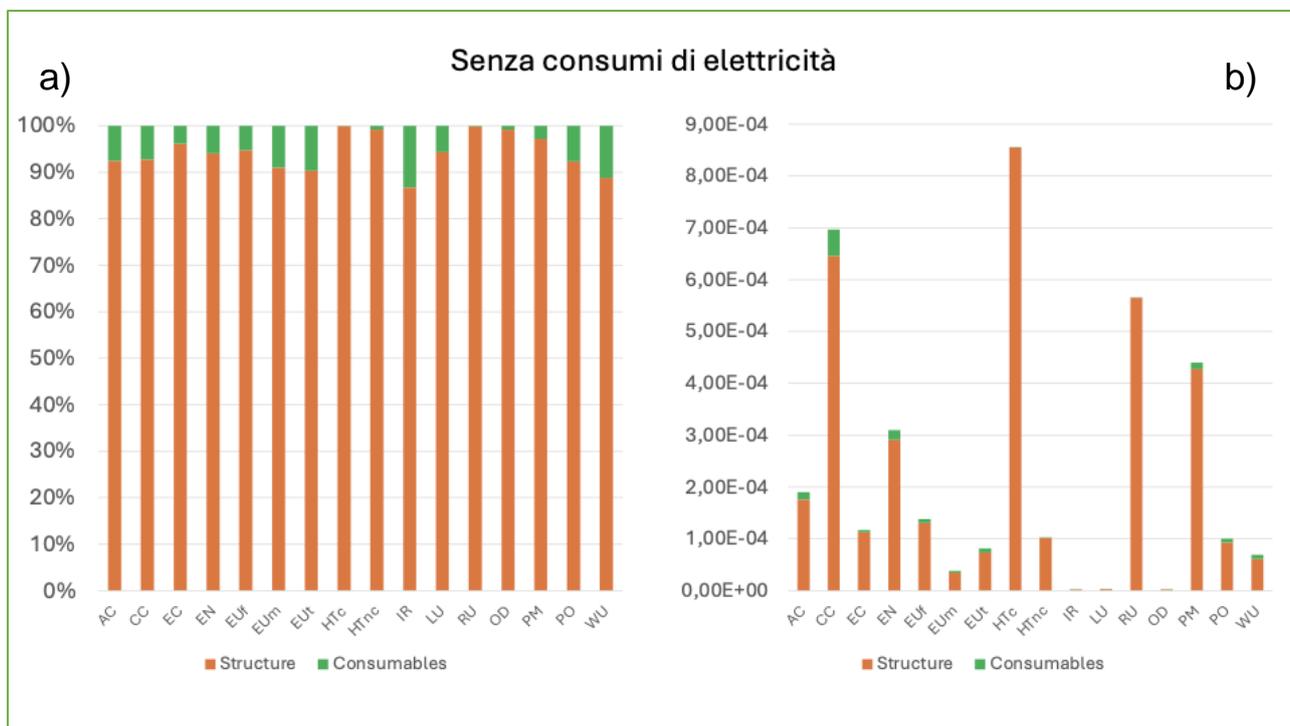


Figura 16 Analisi di impatto ambientale UNIPD (senza elettricità)

4.5.3 Valutazione sociale

Non essendo rilevante in questa fase analizzare gli impatti sociali diretti generati dalla struttura pilota, è stato condotto uno studio dei potenziali impatti sociali indiretti tramite il database di impatti sociali PSILCA (Loubert et al., 2023). L'analisi ha evidenziato un hotspot nei quattro indicatori studiati – Lavoro minorile, Diritti delle comunità indigene, Conflitti e Donne nella forza lavoro – in Russia, Iran, Camerun e Arabia Saudita, oltre ad un impatto sull'Italia. Per una analisi completa, si veda l'analisi comparata delle 4 strutture nella sezione 5.1 Risultati chiave.

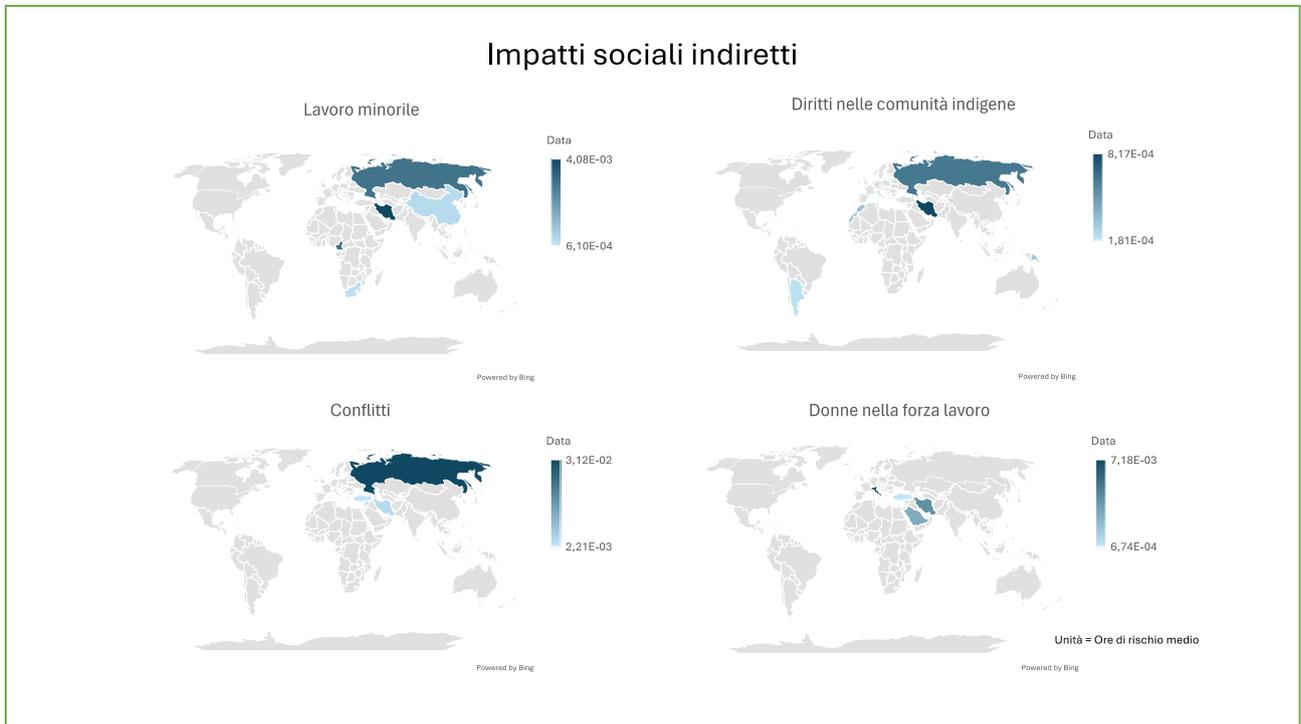


Figura 17 Impatti sociali indiretti UNIPD



5. Comparazione e discussione dei risultati della valutazione di sostenibilità

5.1 Risultati chiave

Lo studio ha evidenziato trend simili per le quattro unità di ricerca. In tutte le strutture, l'hotspot energetico è preponderante sia a livello ambientale (Figura 19) che economico (Figura 18). L'impatto ambientale potrebbe essere parzialmente alleviato sia attraverso un efficientamento energetico che con l'implementazione di approvvigionamenti energetici attraverso energie rinnovabili – vedi 5.2 Analisi di sensitività. Trattandosi di strutture pilota, a livello economico, l'input di manodopera risulta essere molto rilevante: il potenziale di automatizzazione in impianti su larga scala porterebbe a una riduzione sensibile dell'input di personale. Un'altra strategia potrebbe essere quella di includere manodopera non specializzata offrendo allo stesso tempo opportunità di training e accrescimento professionale in un contesto ad alto contenuto di innovazione tecnologica. Interessante anche osservare come strutture più grandi e complesse (UNIBO) abbiano dei costi di investimento – CAPEX – relativamente più alti a livello di struttura dei costi totali rispetto a sistemi più scalabili e modulari (UNITO). Essendo le attività delle vertical farm analizzate basate su un controllo preciso degli input agronomici, i costi (Figura 18) e gli impatti ambientali (Figura 19) relativi ai beni consumabili risultano poco rilevanti sul totale.

L'analisi degli impatti sociali indiretti non ha evidenziato particolari differenze a livello di distribuzione tra le varie UR, in parte a causa delle scelte di modelling effettuate con PSILCA e dall'altra dalla simile struttura di costi usata per l'allocazione degli impatti sociali. La caratterizzazione geografica degli impatti deriva dalle peculiarità delle filiere incluse nella valutazione sociale legate alle attività delle vertical farm e alle risorse minerali e non utilizzate per il loro funzionamento.



La valutazione dei potenziali impatti indiretti delle 4 strutture pilota tramite il database di impatto sociale PSILCA ha evidenziato un hotspot sul rischio di garantire un salario adeguato ai lavoratori lungo tutto la filiera, dall'estrazione delle materie prime per la componentistica utilizzata nell'impianto fino alla produzione dei beni consumabili quali substrati e fertilizzanti. Per quanto riguarda invece le geografie più interessate dagli altri indicatori analizzati – Lavoro minorile, Diritti delle comunità indigene, Conflitti, Donne nella forza lavoro – si possono osservare rischi in diverse aree tra Asia orientale e occidentale (Russia, Turchia, Siria, Iran, Arabia Saudita, Cina), Africa (Sud Africa, Camerun, Marocco) e America Latina (Argentina).

In particolare, il rischio di coinvolgere bambini nella forza lavoro risulta più elevato in Iran, Camerun e Russia. L'Iran si configura anche come l'area maggiormente colpita per quanto riguarda i diritti nelle comunità indigene, suggerendo la presenza di rischi legati alla loro violazione. La Russia, invece, si distingue per un rischio più alto associato ai conflitti. Infine, per quanto concerne la partecipazione delle donne nella forza lavoro, con un'aumentata probabilità di disparità di genere, Iran ed Arabia Saudita emergono come i paesi caratterizzati da impatti più elevati.

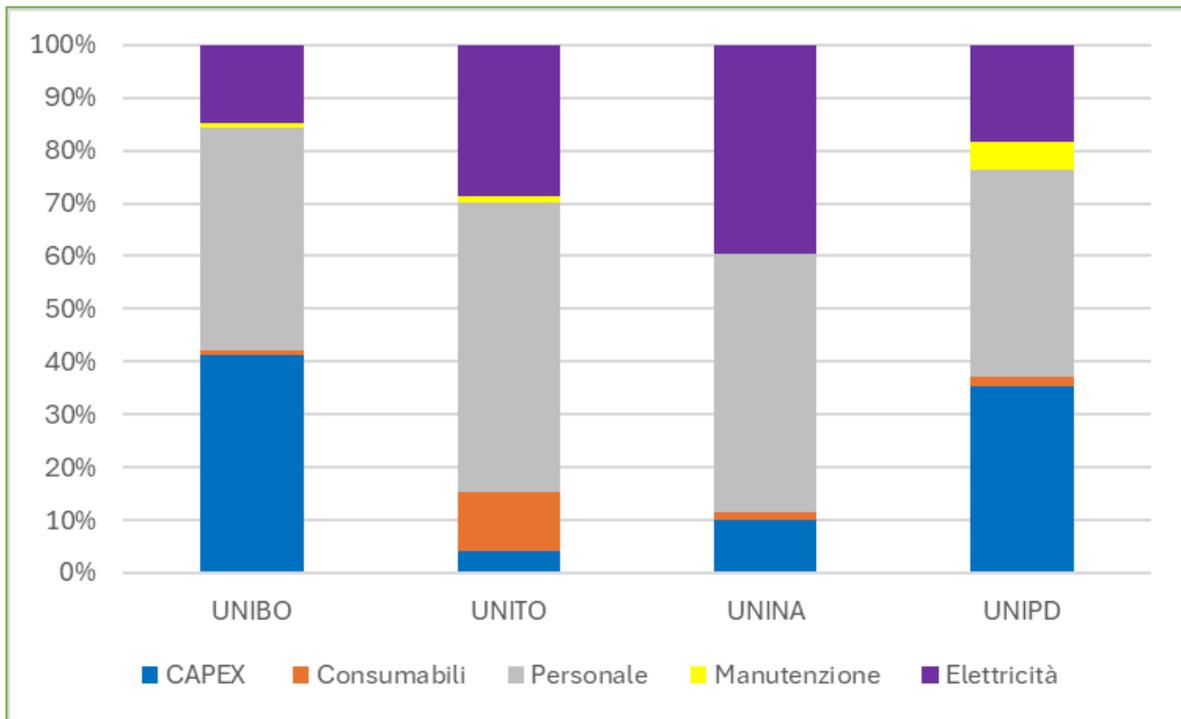


Figura 18 Struttura dei costi delle quattro UR a confronto

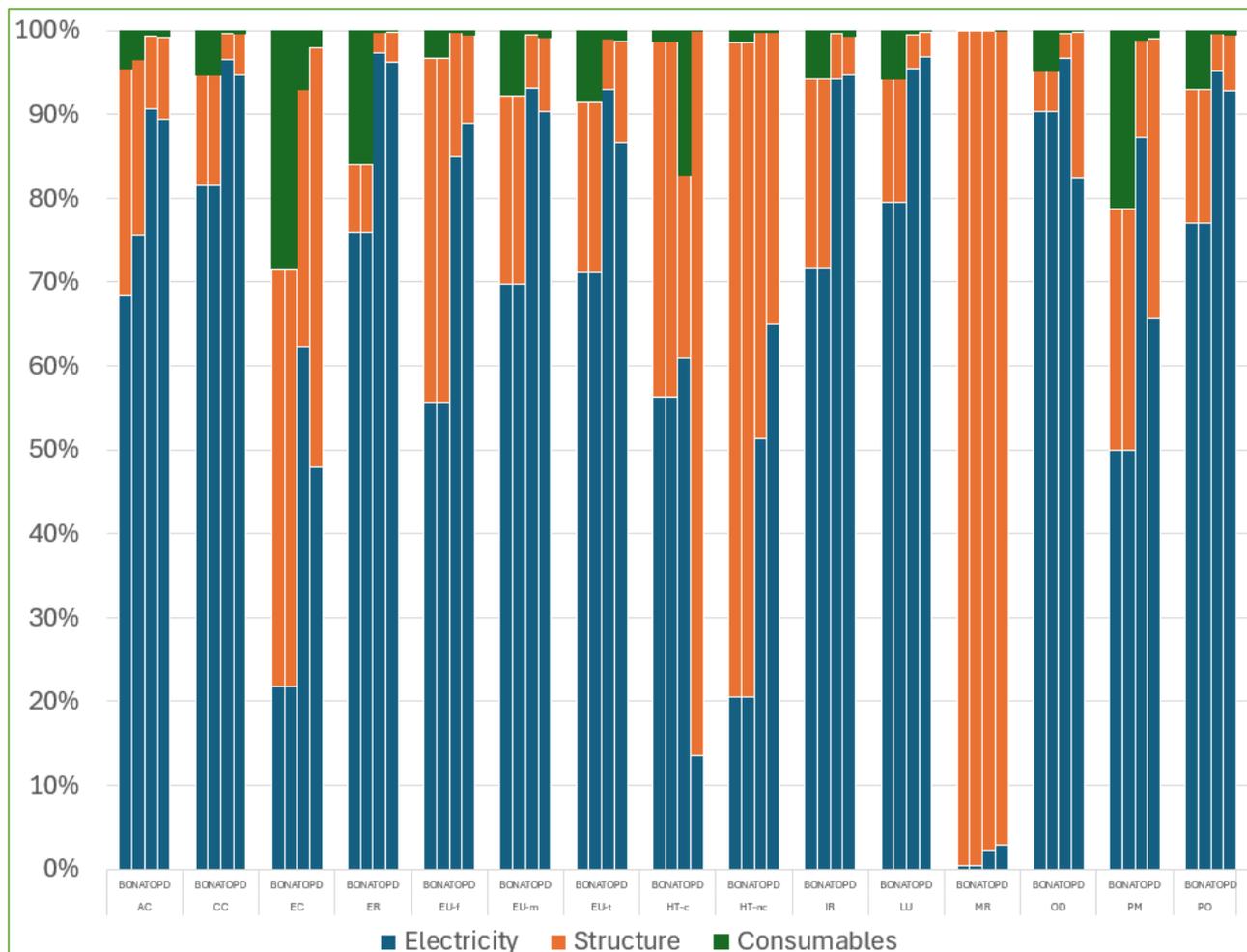


Figura 19 Impatti ambientali delle 4 UR a confronto

5.2 Analisi di sensitività

Sulla base dei risultati dell'analisi di valutazione di sostenibilità delle quattro unità di ricerca, l'energia elettrica è stata individuata come principale hotspot. Sulla base di questo risultato, è stata eseguita una analisi di sensitività a livello ambientale ed economico. Dal punto di vista ambientale, l'analisi di sensitività si è concentrata sull'effetto della variazione della composizione del mix energetico utilizzato dalle vertical farm sugli impatti rilevati. Dal punto di vista



economico, è stata valutata la risposta della struttura totale dei costi al variare del valore unitario della fornitura elettrica (€/kWh).

Un altro punto di incertezza già evidenziato in fase di design della valutazione d'impatto è stato quello dei prezzi di vendita. Importante in questo senso sottolineare e ricordare come le strutture siano a livello pilota e pertanto non ottimizzate per la produzione commerciale; tuttavia, l'inclusione dei prezzi di vendita del prodotto come proxy ha aiutato a dare una prospettiva comparativa sulla potenziale performance economica delle diverse vertical farm. Per testare questa ipotesi, è stato cercato il potenziale prezzo di vendita che avrebbe portato ad un pareggio di bilancio date le attuali condizioni.

5.2.1 Fonti energia elettrica

Conseguentemente al riconoscimento dell'energia elettrica come hotspot principale nei 4 casi analizzati, sono stati modellati 4 scenari alternativi sostituendo il mix energetico da fonti non rinnovabili utilizzato per l'Italia con uno composto solamente da energia da fonti rinnovabili. Per poter ottenere gli impatti ambientali di una fornitura composta solamente elettricità ottenuta da fonti rinnovabili è stato modificato il processo "electricity, high voltage, production mix, ITALY" del databaseecoinvent v3.10 che riporta il contributo delle fonti rinnovabili e non rinnovabili per ogni kWh ottenuto dalla rete elettrica italiana. Eliminando i contributi delle fonti energetiche non rinnovabili e rispettando le proporzioni delle fonti energetiche rinnovabili è stato possibile modellare un processo composto solamente da energia geotermica, eolica e idroelettrica.

Tutti i casi studio dimostrano lo stesso trend di variazione degli impatti al variare della fornitura energetica. Se gli impianti di vertical farm consumassero solo elettricità da fonti rinnovabili, si potrebbe osservare una riduzione degli impatti in 14 categorie su 16 (Figura 20). Le maggiori riduzioni si verificherebbero per le categorie *Climate Change*, *Energy resource – non renewable*, *Ionizing radiation* e *Ozone Depletion* a causa del mancato rilascio in atmosfera dei gas risultanti dalla combustione dei combustibili fossili. Tuttavia, si può osservare un incremento nelle categorie *Land Use* e *Water Use*. Per l'uso del suolo gli incrementi potrebbero registrare valori fino a +341.74%, mentre per l'impronta idrica potrebbe aumentare fino al 297.88%. Tali incrementi sarebbero legati al maggior uso di suolo necessario per la



produzione di energia eolica e solare, e ad un maggior consumo di acqua da parte delle centrali idroelettriche. L'unica categoria in cui si verificherebbero dei cambiamenti molto contenuti o nulli è RU in quanto gli impatti sono imputabili nella quasi totalità alla struttura. L'attivazione di impianti solari direttamente collegati alla farm – e non quindi il semplice acquisto di energia rinnovabile da impianti pre-esistenti – porterebbe invece ad un impatto molto importante su RU, conseguentemente all'utilizzo di terre rare per la produzione dei sistemi fotovoltaici (Ziemińska-stolarska et al., 2021). Questi risultati sono coerenti con i risultati ottenuti da Kobayashi et al. (2022), che hanno dimostrato come spesso gli impatti della conversione ad impianti fotovoltaici per le vertical farms non sia auspicabile in termini ambientali.

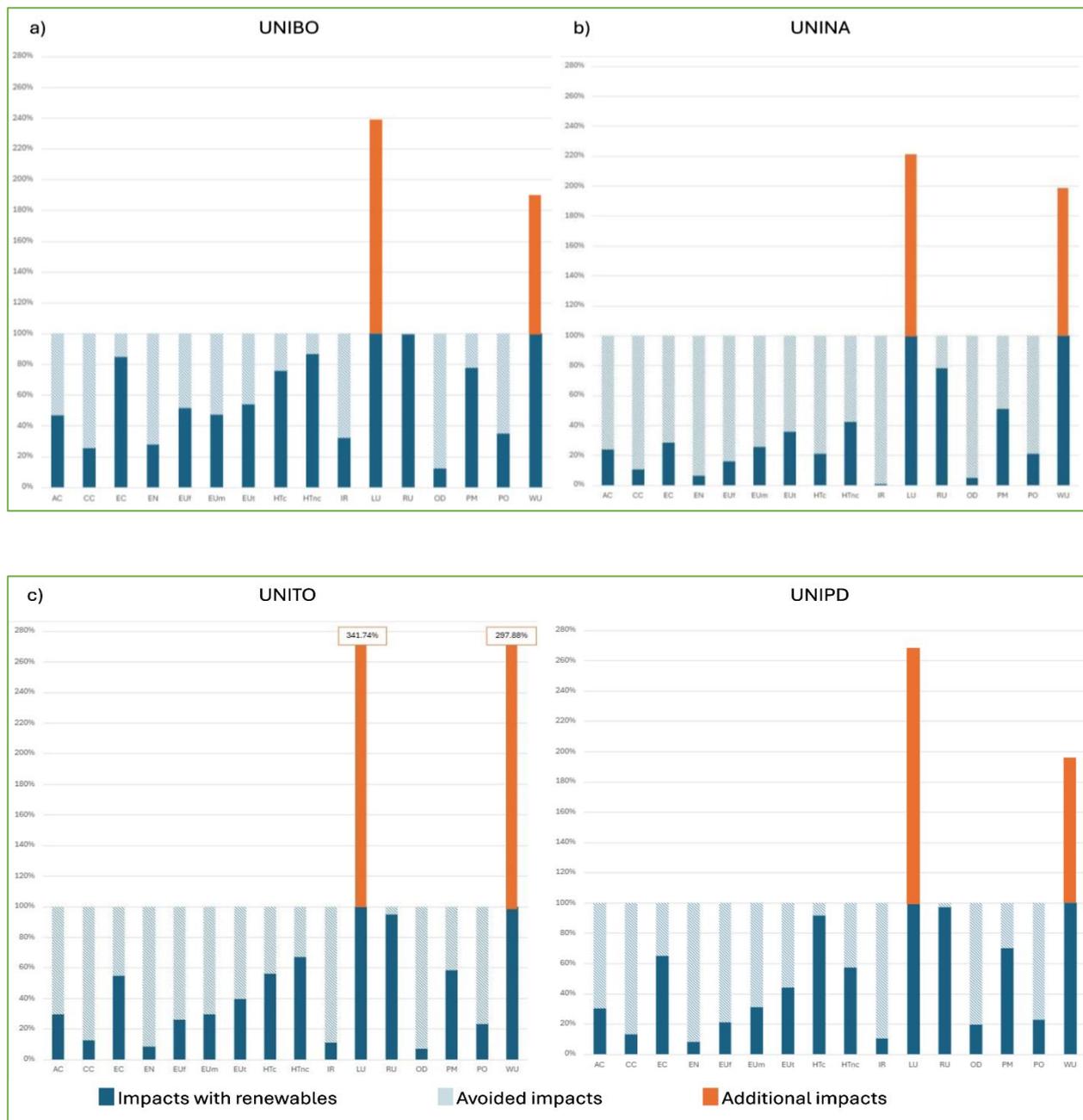


Figura 20 Confronto tra impatti delle vertical farm



5.2.2 Prezzo unitario dell'energia elettrica

L'analisi di sensitività del prezzo medio della fornitura elettrica ha permesso di osservare l'andamento della redditività degli impianti di vertical farming al variare del tasso di inflazione del prezzo del kWh. Per l'analisi LCC è stato scelto un tasso di inflazione annua pari al 5,87%, basato sull'andamento medio rilevato negli ultimi 5 anni da dati EUROSTAT sui prezzi medi dei consumi non domestici. Nell'analisi di sensitività sono stati simulati diversi scenari variando il tasso di inflazione annuo nel range 1-10% (vedi Tabella 7).

In generale, nelle vertical farm analizzate la variazione del tasso di inflazione porta a oscillazioni del BCR comprese tra il 10.7% e il 26.1% in funzione dell'incidenza del costo variabile dell'elettricità sui costi variabili dei diversi impianti produttivi. Infatti, per gli impianti UNIBO e UNIPD in cui l'incidenza del costo dell'elettricità risulta essere inferiore alle altre vertical farm la variazione del BCR è rispettivamente del 10.7% e del 12.5%, mentre per UNITO e UNINA che registrano maggiori consumi energetici la variazione è del 19.7% e 26.1%

L'analisi di sensitività ha evidenziato che, anche a fronte di una riduzione del tasso di inflazione all'1%, nessun impianto sarebbe in grado di generare dei profitti. Il miglior valore del BCR è osservabile per la vertical farm di UNIBO in una situazione di inflazione annua pari all'1%, ma, nonostante ciò, il tasso risulta essere comunque inferiore di 0.04 punti rispetto al punto di pareggio (*Break-Even Point*, BEP) (0.96).

Di conseguenza, è possibile constatare che anche una riduzione della crescita del prezzo della fornitura elettrica nell'orizzonte temporale analizzato non porterebbe ad una situazione di convenienza economica. Affinchè le vertical farm analizzate possano essere in grado di generare profitto è necessario efficientare i consumi energetici al fine di ridurre l'incidenza sui costi variabili.



UR	BCR con tasso di inflazione annua al 10%	BCR con tasso di inflazione annua al 1%	Variazione percentuale BCR
UNIBO (lattuga)	0.86	0.96	10.7%
UNINA (canapa medicinale)	0.34	0.46	26%
UNITO (basilico)	0.29	0.35	19.7%
UNIPD (lattuga)	0.79	0.90	12.5%

Tabella 7 Confronto del BCR al variare del tasso di inflazione annuo del prezzo dell'energia per le quattro UR

5.2.3 Prezzo di vendita dei prodotti

L'analisi di sensitività sul prezzo scelto per i prodotti è stata effettuata con l'obiettivo di ricercare il prezzo che potesse garantire il raggiungimento del BEP con l'attuale struttura dei costi. L'analisi ha evidenziato come le diverse farm, considerando gli attuali costi di produzione, dovrebbero vendere a prezzi superiori che variano dal 110% (da 17.64 €/kg a 19.38 €/kg, UNIBO) a 252% (da 1500 €/kg a 4439.19 €/kg, UNINA). La Tabella 8 illustra i dati ottenuti per le quattro unità di ricerca. Nonostante la destinazione delle strutture pilota non sia commerciale, avere una misura dei potenziali prezzi di vendita dei prodotti può supportare nella valutazione dell'efficienza delle tecnologie e evidenziare un target da raggiungere nell'upscaling a scala pre-industriale delle tecnologie studiate nel progetto VFARM.

UR	Prezzo di mercato utilizzato (media 15 anni, con inflazione)	Prezzo per raggiungere il BEP (€)	Aumento del prezzo corrente per raggiungere il BEP (%)
UNIBO (lattuga)	17.64	15	110
UNINA (canapa medicinale)	1763.93	1500	252
UNITO (basilico)	17.64	269	308
UNIPD (lattuga)	87.61	20.87	118

Tabella 8 Sensitività dei prezzi utilizzati per le quattro UR



6. Conclusioni

Lo studio mette in evidenza alcune osservazioni significative riguardo alla sostenibilità delle strutture di vertical farming delle quattro UR analizzate. In primo luogo, emerge con chiarezza che l'energia elettrica rappresenta l'hotspot principale sia in termini di impatto ambientale che economico. Questo è particolarmente evidente dalla disamina dei costi e nell'analisi degli impatti ambientali generati, suggerendo che interventi come l'efficientamento energetico e l'adozione di fonti rinnovabili potrebbero mitigare tali impatti. Tuttavia, l'analisi di sensitività ha rivelato che l'impiego esclusivo di energia rinnovabile, sebbene riduca le emissioni in molte categorie ambientali, comporterebbe incrementi significativi nell'uso del suolo e dell'acqua, a causa delle caratteristiche intrinseche di tali tecnologie, e nell'estrazione di risorse critiche qualora l'energia rinnovabile non fosse acquistata da rete ma prodotta attraverso l'installazione di pannelli fotovoltaici.

Dal punto di vista economico, il costo dell'energia elettrica influenza profondamente la redditività delle strutture. Anche con scenari di inflazione energetica moderata, nessuna delle vertical farm studiate qualora dovessero vendere i prodotti ottenuti riuscirebbe a raggiungere un punto di pareggio economico. Pertanto, in una progettazione di upscale pre-industriale delle strutture risulterebbe essenziale migliorare l'efficienza dei consumi energetici per ridurre l'incidenza di questa voce di spesa sui costi totali. Inoltre, è emerso che i prezzi di vendita attuali rilevati dal mercato non sarebbero sufficienti a coprire i costi di produzione: le farm dovrebbero vendere a prezzi significativamente superiori rispetto agli attuali per raggiungere il break-even point. Questi dati sottolineano la necessità di ulteriori sviluppi tecnologici e ottimizzazioni in fase di upscaling per garantire una maggiore competitività economica.

Un altro aspetto importante riguarda il ruolo della manodopera. Essendo le strutture ancora in fase pilota, l'incidenza del lavoro manuale risulta particolarmente elevata. Tuttavia, l'automatizzazione su larga scala potrebbe ridurre significativamente tale incidenza. Parallelamente, includere manodopera non specializzata e offrire opportunità di formazione potrebbe



rappresentare una strategia utile per integrare l'innovazione tecnologica con un impatto sociale positivo.

In termini di impatti sociali indiretti, l'analisi ha evidenziato rischi significativi legati alla remunerazione adeguata lungo le filiere di produzione, in particolare nelle aree geografiche coinvolte nell'estrazione delle materie prime. Alcuni indicatori, come il lavoro minorile e i diritti delle comunità indigene, mostrano rischi specifici in paesi come Iran, Camerun e Russia, mentre disparità di genere e conflitti emergono in regioni come Arabia Saudita e Russia. Questi risultati riflettono le complesse dinamiche socio-economiche legate alle attività delle vertical farm e sottolineano la necessità di affrontare tali questioni con approcci mirati.

Infine, le differenze nella struttura dei costi tra le unità di ricerca suggeriscono che sistemi più scalabili e modulari, come quelli di UNITO, presentano un vantaggio in termini di investimenti iniziali rispetto a strutture più complesse come quelle di UNIBO. Questo aspetto potrebbe avere implicazioni rilevanti per il futuro sviluppo commerciale delle vertical farm, indicando la necessità di strategie progettuali diversificate in base alle specifiche esigenze produttive e alle condizioni di mercato.

L'upscaling delle tecnologie studiate, se accompagnato da strategie integrate volte ad una maggiore efficienza e sostenibilità, potrebbe portare le vertical farm a giocare un ruolo chiave nell'agricoltura del futuro, contribuendo a rispondere alle sfide globali legate alla sicurezza alimentare e al cambiamento climatico in contesti di agricoltura urbana.

7. Bibliografia e sitografia

- Collina, E., Liberati, D., & Maddaloni, P. (2023). *Statistiche Metodi e fonti: approfondimenti I tassi di interesse bancari. Guida ai dati pubblicati dalla Banca d'Italia*. www.bancaditalia.it/statistiche/index.html
- Kobayashi, Y., Kotilainen, T., Carmona-García, G., Leip, A., & Tuomisto, H. L. (2022). Vertical farming: A trade-off between land area need for crops and for renewable energy production. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134507. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.134507>



- Loubert, M., Maister, K., Noi, C. Di, Radwan, L., Ciroth, A., & Srocka, M. (2023). *The Product Social Impact Life Cycle Assessment database*.
- Pant, R. ., & Zampori, L. . (2019). *Suggestions for updating the organisation environmental footprint (OEF) method*. Publications Office of the European Union.
- Ziemińska-stolarska, A., Pietrzak, M., & Zbiciński, I. (2021). Application of LCA to determine environmental impact of concentrated photovoltaic solar panels—state-of-the-art. In *Energies* (Vol. 14, Issue 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en14113143>