



VFARM

Vertical Farming Sostenibile

**D4.1 QUADRO METODOLOGICO PER LCA,
LCC E S-LCA**



| | |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| 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 | D4.1 Quadro metodologico per LCA, LCC e S-LCA |
| Work Package: | WP4 |
| Partner responsabile: | Alma Mater Studiorum – Università di Bologna |
| Autori principali: | Simone Amadori, Anna Niero, Andrea Vicinanza, Matteo Vittuari |
| Altri autori: | Francesco Orsini |
| Numero di pagine: | 20 |



Indice dei contenuti

| | |
|--|----|
| 1. Introduzione | 3 |
| 1.1 Obiettivi del progetto | 3 |
| 1.2 Analisi del ciclo di vita applicato al <i>vertical farming</i> | 4 |
| 2. Goal and scope | 7 |
| 3. Protocollo di raccolta dati..... | 9 |
| 3.1 Informazioni Generali | 10 |
| 3.2 Sistema di coltivazione..... | 10 |
| 3.3 Consumabili, energia, personale..... | 10 |
| 4. Valutazione d'impatto | 12 |
| 4.1 Valutazione di impatti ambientali..... | 12 |
| 4.2 Valutazione di impatti economici | 13 |
| 4.3 Valutazione di impatti sociali | 17 |
| 5. Bibliografia..... | 19 |



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).



1.2 Analisi del ciclo di vita applicato al *vertical farming*

L'approccio del ciclo di vita (Life Cycle Thinking, LCT) rappresenta una valida ed efficace metodologia per investigare gli impatti ambientali, economici e sociali dei diversi sistemi di VF implementati nel contesto del progetto VFarm. Tale metodologia si basa sull'osservazione di tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto, servizio, processo, o organizzazione e i relativi effetti sulla sostenibilità ambientale, economica e sociale. Queste caratteristiche permettono di individuare *hotspot* specifici di impatto nelle varie sezioni della filiera analizzata e *trade-off* tra le tre sfere della sostenibilità considerate. Per raggiungere questi obiettivi, l'approccio del ciclo di vita si struttura in quattro fasi: goal and scope, inventario, analisi d'impatto e interpretazione. Il processo parte infatti definendo l'obiettivo dello studio, per poi delineare confini del sistema in esame e l'unità funzionale (UF) rispetto alla quale si riferiscono i dati raccolti nell'inventario. Successivamente, attraverso delle strategie di caratterizzazione e di allocazione si procede a valutare l'impatto e fornirne un'interpretazione. L'efficace potere esplicativo di queste metodologie è alla base del loro utilizzo da parte di diversi studi per analizzare la performance delle tecnologie di *vertical farming* (Orsini et al., 2020).

Come evidenziato da Peña, Rovira-Val, and Mendoza (2022), la produzione scientifica applicata all'agricoltura urbana si concentra principalmente sull'analisi di impatto ambientale attraverso Life Cycle Assessment (LCA). Gli autori ricordano che le analisi degli impatti economico-monetari tramite Life Cycle Costing (LCC) sono molto scarse, non utilizzano un approccio di *environmental LCC* (eLCC), e spesso sono utilizzate come integrazioni a studi LCA. L'unico esempio in questo senso, che integra anche un'analisi Social Life Cycle Assessment (S-LCA), è il report del progetto H2020 FoodE che analizza tra gli altri anche un'iniziativa di VF (Petruzzelli et al., 2023).



Dalla revisione della letteratura sono emersi vari studi che hanno effettuato analisi ambientali del ciclo di vita applicate a diverse tipologie di VF. I sistemi analizzati sono caratterizzati sia da illuminazione naturale (Benis et al., 2017; Kikuchi et al., 2018) che artificiale (Benis et al., 2017; Kikuchi et al., 2018; Martin & Molin, 2019; Sandison et al., 2023), e da varie tecnologie di coltivazione idroponiche (Casey et al., 2022; Martin & Molin, 2019; Sandison et al., 2023) e aeroponiche (Schmidt Rivera et al., 2022).

Le VF sono state comparate con sistemi di produzione basati su serre su tetti (*rooftop greenhouse*), serre convenzionali e coltivazione in campo aperto. Nonostante diverse scelte rispetto ai modelli di *baseline*, i più frequenti, comparabili sia per strutturazione di costi ed impatti che per produttività al metro quadro, sono comunque i sistemi controllati in serra.

Nella maggior parte dei casi, le UF scelte per l'analisi sono *mass-based*, ovvero relative alla massa (e.g. kg) di cibo prodotto, considerando specie vegetali quali il pomodoro (Benis et al., 2017; Kikuchi et al., 2018; Sanjuan-Delmás et al., 2018) e la lattuga (Blom et al., 2022; Kikuchi et al., 2018; Martin & Molin, 2019; Romeo et al., 2018; Sandison et al., 2023). Moosavi-Nezhad et al. (2022) e Schmidt Rivera et al. (2022) hanno esplorato invece prodotti alternativi a pomodoro e lattuga, rispettivamente germogli di pisello e piantine di anguria. Nel caso delle analisi ambientali – diversamente rispetto a quanto comunemente impiegato nelle ricerche relative a fisiologia e produttività delle colture, nelle quali la biomassa secca è generalmente considerata nelle analisi di crescita – si considera la biomassa fresca, che, sebbene maggiormente influenzabile dallo stato di idratazione del prodotto al momento della raccolta o campionamento, risulta maggiormente indicativa rispetto a quanto commercializzato e consumato.

Un'altra opzione rispetto all'UF *mass-based* è quella adottata da Martin e Molin (2019a), da Moosavi-Nezhad et al. (2022) e da Schmidt Rivera et al. (2022), i quali hanno scelto di concentrare la loro analisi su un prodotto piuttosto che su un'unità di massa, considerando quindi una UF *product-based*. Questa scelta



è generalmente associata alla strategia di commercializzazione del prodotto, che ad esempio nel caso di colture aromatiche prevede la produzione di singole piantine in vaso, e per le quali l'impatto associato all'unità di massa risulterebbe altrimenti influenzato da elementi integrativi al prodotto (es. substrato, vaso).

Per quanto riguarda invece i confini del sistema preso in esame, la maggior parte degli studi analizzati adottava un approccio *cradle-to-gate*, considerando gli impatti dall'estrazione delle materie prime fino alla distribuzione.

Tra i metodi di valutazione di impatto più utilizzati figurano il metodo ReCiPe 2016 (Huijbregts et al., 2017) e CML-IA (PRé Sustainability, 2020), entrambi utilizzati per effettuare valutazioni *midpoint* in particolare per quanto riguarda l'impatto ambientale.



2. Goal and scope

Lo studio si pone l'obiettivo di valutare e confrontare le performance ambientali, sociali ed economiche di cinque prodotti ottenuti da VF, prendendo in considerazione il loro ciclo di vita dall'estrazione delle materie prime fino al consumo finale (*cradle-to-consumer*). I prodotti presi in esame sono: la lattuga *baby leaf*, i funghi ostrica (*Pleurotus ostreatus*) e pioppini (*Agrocyte aegerita*), il pesce da acquaponica, lo zafferano e i *microgreen*. In particolare, la lattuga è stata scelta come *baseline* da comparare a tutti gli altri prodotti. Infatti, dall'analisi della letteratura e dal confronto con i partner di progetto è emerso come la produzione verticale di lattuga *baby leaf* sia un modello di riferimento (*benchmark*) particolarmente adatto per confrontare le performance ambientali, sociali ed economiche con quelle degli altri prodotti di agricoltura verticale.

Per questo motivo, in una prima fase verrà costruito un modello basato sulla lattuga *baby leaf* prodotta in VF con illuminazione artificiale, che possa poi fungere da termine di confronto per le altre opzioni produttive. La produzione si svolge in Italia, attraverso sistemi in serre verticali con luce artificiale e diversi sistemi di coltivazione, che includono idroponica, aeroponica e acquaponica.

Più nello specifico, i cinque sistemi analizzati sono:

1. Produzione di lattuga *baby leaf* in sistema acquaponico
2. Produzione di funghi in serra verticale
3. Produzione di pesci e orticole da foglia da sistemi acquaponici
4. Produzione di spezie (zafferano)
5. Produzione di *microgreen*

Per catturare le diverse caratteristiche e analizzare i *trade-off* tra la performance ambientale, sociale ed economica dei modelli in esame sono state selezionate diverse UF per rispecchiare lo scopo della valutazione:



- Per l'analisi LCA, è stata selezionata un'UF *mass-based*: 1kg di prodotto fresco
- Per l'analisi eLCC, è stata selezionata un'UF *money-based*: 1€ di ricavo dalla vendita del prodotto
- Per l'analisi S-LCA, è stata selezionata un'UF *organization-based*: 1 anno di attività dell'iniziativa

Questa struttura permette di evidenziare gli *hotspot* ambientali, sociali ed economici di ciascuna opzione produttiva e di aiutare nella definizione dei modelli di business più adatti a sfruttare commercialmente queste tecnologie, offrendo una prospettiva sulle tre dimensioni della sostenibilità. Tuttavia, questo approccio presenta delle limitazioni legate alla scelta di UF differenti, che rendono complessa l'integrazione quantitativa delle tre dimensioni.

Lo studio si riferisce ad un anno di attività delle varie VF analizzate. I risultati saranno commentati anche rispetto a dati derivanti dalla letteratura riferiti a produzioni analoghe effettuate in serre convenzionali e saranno utilizzati per informare la pianificazione strategica aziendale e il *policy-making* verso la promozione del settore. La Tabella 1 riassume le principali informazioni relative all'obiettivo dello studio.

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

| | |
|---|---|
| Applicazione prevista | Informare pianificazione strategica aziendale e processo decisionale pubblico |
| Motivi per cui si sviluppa lo studio, contesto decisionale e committente | Progetto di ricerca nazionale |
| Destinatari | Aziende e <i>policymakers</i> |
| Strategia di verifica | Diffusione di inventari su richiesta |

Infine, in merito alle limitazioni dello studio, queste riguardano:

- La disponibilità di dati;
- La scala pilota di alcuni dei sistemi analizzati;
- Le stime effettuate rispetto ai costi.



3. Protocollo di raccolta dati

Il protocollo di raccolta dati si sviluppa coerentemente con gli aspetti metodologici presentati in precedenza, seguendo l'approccio di analisi del ciclo di vita e focalizzandosi sulle 3 unità funzionali identificate come più appropriate per i 3 tipi di analisi. A tal proposito, i dati riconducibili ad impatti ambientali ed economici sono stati rapportati alla produzione generata, nel primo caso in termini di kg di cibo prodotto, e nel secondo in termini di euro ricavati. Considerando invece la sfera sociale, gli impatti non vengono interpretati in base alla produzione derivante dal sistema, ma come derivanti dal complesso di attività implementate dall'organizzazione in un dato arco temporale. Per facilitare il processo di raccolta dati è stato impostato un foglio di calcolo in Microsoft Excel che può essere compilato direttamente dai proprietari/e delle VF oggetto di studio. Il modello di raccolta dati rappresenta una guida per registrare e archiviare dati utili di input e output dei sistemi produttivi di *vertical farming*. Il modello si compone di tre fogli principali per raccogliere i dati, i.e. 1) informazioni generali, 2) sistemi di coltivazione, 3) consumabili, energia e personale. Tramite il modello sono state raccolte le informazioni necessarie come base per le analisi quantitative di LCA, eLCC e S-LCA.

Sul modello di raccolta dati, è stata effettuata una consultazione di esperti per verificarne l'appropriatezza e validarne così l'efficacia per il caso specifico.

Il modello di raccolta dati è stato condiviso con i responsabili dei casi studio insieme ad un documento esplicativo della struttura e del funzionamento del modello stesso. In una prima fase viene richiesto ai responsabili di compilare il modello con tutti i dati di cui gli attori dispongono, fatta eccezione per aspetti critici o di incomprensione. In una seconda fase, gli autori si confrontano con i responsabili dei casi studio per verificare la qualità dei dati, chiarire eventuali dubbi o fraintendimenti e supportare la registrazione dei dati. Infine, i dati vengono analizzati tramite il software Simapro e foglio di calcolo Excel.



Nelle prossime sezioni verranno presentati i 3 fogli del modello Excel utilizzato per la raccolta dati.

3.1 Informazioni Generali

Questa sezione raccoglie dati generali sulle caratteristiche della struttura, il prodotto, il tipo di VF e la struttura che ospita la VF. Nello specifico, in questa sezione vengono raccolte informazioni su:

- Ubicazione della struttura
- Data di inizio delle attività e della valutazione
- Orientamento attività
- Ricavi (ove disponibili)
- Stadio dell'implementazione della VF e della maturità commerciale
- Caratteristiche del prodotto
- Caratteristiche della struttura

In questa sezione vengono raccolti dati di tipo economico (es. €, € anno⁻¹), ambientale (es. kg di materiali, resa in kg m⁻² anno⁻¹) e sociale.

3.2 Sistema di coltivazione

Questa sezione raccoglie dati generali sull'unità di produzione piantine e germinazione, il sistema di coltivazione, il sistema di controllo climatico e l'unità di raccolta e confezionamento. In questa sezione vengono raccolti dati di tipo economico (es. € per unità) e ambientale (es. kg di materiali, n di elementi).

3.3 Consumabili, energia, personale

Questa sezione raccoglie dati generali sui consumabili, i consumi energetici, il personale, la manutenzione.



In questa sezione vengono raccolti dati di tipo economico (es. € all'anno per unità), ambientale (es. kg di materiali, n di elementi) e sociale (es. n di eventi, n di lavoratori, n di tirocinanti).

Particolare attenzione è stata prestata alla definizione del mix energetico e dei sistemi energetici in fase di modellizzazione: come evidenziato in letteratura, il consumo energetico rappresenta un punto particolarmente critico per il settore del *vertical farming*. Il template di raccolta dati è presentato integralmente nell'Allegato 1.



4. Valutazione d'impatto

4.1 Valutazione di impatti ambientali

Il LCA è una metodologia di valutazione dell'impatto ambientale standardizzata dalle norme ISO 14040:2021 (che ne definisce principi e quadro metodologico) ISO 14044:2021 (che delinea alcune raccomandazioni per l'operatore). La principale discrezionalità risiede nella scelta della metodologia di valutazione d'impatto (vedi sezione successiva). In questo caso, sono stati selezionati fattori di caratterizzazione e relative categorie d'impatto (*midpoint impact categories*) afferenti alla metodologia della impronta ambientale dei prodotti e delle organizzazioni (*environmental footprint*, EF) elaborata e raccomandata agli Stati Membri dalla Commissione Europea con la REC 2021/2279 (Commissione Europea, 2021). Le categorie prese in esame sono riportate nella Tabella 2.

Tabella 2: Categorie d'impatto del metodo EF, da EC, REC. (UE) 2021/2279 Annex I. Product Environmental Footprint Method.

| Categoria d'impatto EF | Indicatore della categoria d'impatto | Unità |
|---|---|--------------------------|
| Cambiamenti climatici, totale | Potenziale di riscaldamento globale (GWP100) | kg CO ₂ eq |
| Riduzione dello strato di ozono | Potenziale di riduzione dell'ozono (ODP) | kg CFC ⁻¹¹ eq |
| Tossicità per gli esseri umani - effetti cancerogeni | Unità tossica comparativa per gli esseri umani (CTUh) | CTUh |
| Tossicità per gli esseri umani - effetti non cancerogeni | Unità tossica comparativa per gli esseri umani (CTUh) | CTUh |
| Particolato | Impatto sulla salute umana | Incidenza delle malattie |
| Radiazione ionizzante, salute umana | Efficienza dell'esposizione umana all'U235 | kBq U235 eq |
| Formazione di ozono fotochimico, salute umana | Aumento della concentrazione di ozono troposferico | kg NMVOC eq |



| Categoria d'impatto EF | Indicatore della categoria d'impatto | Unità |
|--|--|--|
| Acidificazione | Superamento accumulato | moli di H ⁺ eq |
| Eutrofizzazione, terrestre | Superamento accumulato | moli di N eq |
| Eutrofizzazione, acque dolci | Frazione di nutrienti che raggiunge il comparto finale acque dolci (P) | kg P eq |
| Eutrofizzazione, marina | Frazione di nutrienti che raggiunge il comparto finale acque marine (N) | kg N eq |
| Ecotossicità, acque dolci | Unità tossica comparativa per gli ecosistemi (CTUe) | CTUe |
| Uso del suolo | Indice di qualità del suolo | Valore adimensionale (pt) |
| Uso d'acqua | Potenziale mancanza d'acqua per l'utilizzatore (consumo di acqua ponderato in funzione della mancanza) | m ³ acqua equivalente di mancanza d'acqua |
| Uso delle risorse, minerali e metalli | Impoverimento delle risorse abiotiche (ADP riserve finali) | kg Sb eq |
| Uso delle risorse, fossili | Impoverimento di risorse abiotiche – combustibili fossili (ADP – fossili) | MJ |

4.2 Valutazione di impatti economici

Le categorie di costo da considerare nel LCC possono variare a seconda della materia studiata, ma nella maggior parte dei casi consistono in costi di investimento, costi operativi, costi di manutenzione e costi di smaltimento di fine vita. Per l'analisi sono state dunque utilizzate queste 4 categorie:

- C_{ac} = Costi di acquisizione
- C_{op} = Costi operativi
- C_{ma} = Costi di manutenzione
- C_{sm} = Costi di smaltimento di fine vita

I C_{ac} includono il costo della struttura, delle piantine, della germinazione e del controllo climatico, i C_{op} includono i costi del personale, dei servizi, dei consumabili, dei fertilizzanti, dei semi, dei substrati, della produzione e della



raccolta delle piantine ed infine i C_{ma} includono i costi per le sostituzioni dei LED e delle tubazioni e i costi per la sanificazione e la pulizia. Inoltre, poiché è stato deciso di effettuare una analisi di eLCC, sono state internalizzate anche le esternalità: gli impatti ambientali sono stati espressi in valore monetario. Per le categorie di impatto “Cambiamenti climatici, totale”, “Riduzione dello strato di ozono”, “Tossicità per gli esseri umani”, “Particolato”, “Radiazione ionizzante, salute umana”, “Formazione di ozono fotochimico, salute umana”, “Acidificazione”, “Uso d'acqua” e “Uso delle risorse - minerali e metalli” sono stati utilizzati come fattori di monetizzazione i valori di riferimento suggeriti da Amadei, De Laurentiis, e Sala (2021), i quali hanno calcolato massimi, minimi e medie considerando solo i fattori di monetizzazione utilizzati negli studi più recenti. Per le rimanenti categorie “Eutrofizzazione, terrestre”, “Eutrofizzazione acque dolci”, “Eutrofizzazione, marina”, “Ecotossicità, acque dolci”, “Uso del suolo” e “Uso delle risorse – fossili” invece, sono stati calcolati massimi, minimi e medie considerando anche i fattori di monetizzazione utilizzati negli studi meno recenti. Per i fattori di monetizzazione è opportuno adattare i valori all’anno corrente utilizzando l’indice del prezzo al consumo (indice dei prezzi al consumo, CPI); in questo senso, è stato utilizzato l’approccio descritto da Amadei, De Laurentiis, e Sala (2021). Tutti i dati di cui sopra sono riportati nella Tabella 3.



Tabella 3: Fattori di monetizzazione massimi, minimi e medi per categoria d'impatto EF da Amadei et al. (2021).

| Categoria d'impatto EF | Unità | Max | Min | Media | Riferimento |
|--|---|----------|----------|----------|--|
| Cambiamenti climatici, totale | € kg CO ₂ eq. ⁻¹ | 6.85E-01 | 2.11E-02 | 2.72E-01 | Min: Bruyn et al. (2010); Max: Schneider-Marín and Lang (2020) |
| Riduzione dello strato di ozono | € kg CFC ⁻¹¹ eq. ⁻¹ | 1.15E+02 | 3.16E+01 | 5.55E+01 | Min: Bruyn et al. (2010); Max: Alberici et al. (2014) |
| Tossicità per gli esseri umani | € kg 1–4 DB eq. ⁻¹ | 3.21E-01 | 2.43E-02 | 1.23E-01 | Min: Bruyn et al. (2010); Max: Finnveden et al. (2013) |
| Particolato | € kg PM10 eq. ⁻¹ | 6.07E+01 | 1.62E+01 | 3.73E+01 | Min: Alberici et al. (2014); Max: Bruyn et al. (2010) |
| Radiazione ionizzante, salute umana | € kBq U235 eq. ⁻¹ | 1.01E+00 | 1.03E-03 | 2.13E-01 | Min: De Nocker and Debacker (2018); Max: Bruyn et al. (2010) |
| Formazione di ozono fotochimico, salute umana | € kg NMVOC eq. ⁻¹ | 1.39E+01 | 2.30E-03 | 3.51E+00 | Min: Alberici et al. (2014); Max: Bruyn et al. (2010) |
| Acidificazione | € kg SO ₂ eq. ⁻¹ | 1.59E+01 | 2.15E-03 | 4.07E+00 | Min: Alberici et al. (2014); Max: Schneider-Marín and Lang (2020) |
| Eutrofizzazione, terrestre | € m ² UES | 1.74E-02 | 1.74E-02 | 1.74E-02 | Min: Alberici et al. (2014); Max: Alberici et al. (2014) |
| Eutrofizzazione, acque dolci | € kg P eq. ⁻¹ | 7.66E+01 | 2.15E-01 | 1.42E+01 | Min: Alberici et al. (2014); Max: Finnveden et al. (2013) |



| Categoria d'impatto EF | Unità | Max | Min | Media | Riferimento |
|--|-------------------------------|----------|----------|----------|---|
| Eutrofizzazione, marina | € kg N eq. ⁻¹ | 1.28E+01 | 1.94E+00 | 6.64E+00 | Min: Alberici et al. (2014); Max: Bruyn et al. (2010) |
| Ecotossicità, acque dolci | € m ⁻² | 7.21E-01 | 8.91E-02 | 3.24E-01 | Min: Bruyn et al. (2018); Max: Bruyn et al. (2010) |
| Uso del suolo | € kg 1–4 DB eq. ⁻¹ | 5.70E+01 | 1.34E-03 | 1.74E+01 | Max: Giunta et al. (2018); Min: Kaenchan and Gheewala (2017) |
| Uso d'acqua | € m ⁻³ | 2.15E-01 | 5.08E-03 | 1.10E-01 | Max: Alberici et al. (2014); Min: Trinomics (2020) |
| Uso delle risorse, minerali e metalli | € MJ ⁻¹ | 1.76E-02 | 1.32E-03 | 1.10E-02 | Min: Alberici et al. (2014); Max: Schneider-Marín and Lang (2020) |
| Uso delle risorse, fossili | € kg Fe ⁻¹ | 7.54E-02 | 3.63E-02 | 5.72E-02 | Max: Giunta et al. (2018); Min: Alberici et al. (2014) |



4.3 Valutazione di impatti sociali

Seguendo la metodologia di S-LCA, sono state selezionate tre categorie di attori principali, considerate rilevanti per i casi studio di VFarm, ovvero lavoratori, studenti e comunità locale. Per ciascuna delle categorie di stakeholders, sono stati derivati dalla letteratura rilevante gli indicatori per effettuare la valutazione di impatto sociale. Tali indicatori sono successivamente stati interpretati come funzioni che il sistema può garantire per gli attori considerati. Per ognuno degli indicatori, si valuta tramite sistema binario se la funzione è stata svolta o meno dal sistema (no=0, sì=1), e tale numero viene poi moltiplicato per il numero di persone per cui la funzione è garantita. Le funzioni non direttamente riconducibili ad un numero di persone sono da definirsi secondo standard o raccomandazioni nazionali o internazionali da derivare dalla letteratura, e.g. quantità di vegetali prodotti da rapportare all'assunzione nutrizionale raccomandata. Il risultato finale rappresenta l'impatto sociale generato dal sistema in termini di persona-equivalente. In Tabella 4 sono indicate le categorie di attori, gli indicatori e le relative funzioni svolte dal sistema da valutare in termini di persona-equivalente.

Tabella 4: Categorie di attori, indicatori e funzioni per la valutazione di impatti sociali – S-LCA.

| Categorie di attori | Indicatori | Descrizione | Unità di misura | Funzione |
|---------------------|----------------------------------|--|-----------------|-------------------------------|
| Lavoratori | Creazione posti di lavoro | N posti di lavoro creati all'anno | N | Posti di lavoro creati |
| | Retribuzione | Stipendio mensile lordo per lavoratore | € | Salario dignitoso |
| | Stabilità del lavoro | N di contratti a tempo indeterminato | N | Contratti di lavoro stabili |
| | Equilibrio vita-lavoro | N ore di lavoro a settimana | N | Orario lavorativo equilibrato |
| | Rischio per la salute sul lavoro | N ore di esposizione a rischi | N | - |



| Categorie di attori | Indicatori | Descrizione | Unità di misura | Funzione |
|------------------------|---|---|-----------------|--|
| | Sicurezza sul lavoro | N di infortuni all'anno | N | - |
| | Sviluppo di competenze e formazione | N di lavoratori che hanno seguito corsi di formazione nel contesto lavorativo | N | Formazione tramite corsi in contesto lavorativo |
| | Retribuzione equa | <i>Gender wage gap</i> | % | - |
| | Pari opportunità | Proporzione di lavoratori di genere femminile o non binario | % | - |
| Giovani | Educazione e didattica (tesi) | N di tesisti | N | Supporto della carriera universitaria |
| | Sviluppo di competenze e formazione (tirocini) | N di studenti tirocinanti | N | Formazione tecnica di studenti |
| | Scambio di conoscenze (visiting) | N di dottorandi in visiting | N | Coinvolgimento in scambi istituzionali per l'attività scientifica |
| Comunità locale | Impiego gruppi vulnerabili | N lavoratori da gruppi vulnerabili | N | Impiego per persone vulnerabili |
| | Eventi educativi | N eventi educativi all'anno | N | - |
| | Capacità divulgazione | N partecipanti per evento * N di eventi | N | Capacità di divulgazione e sensibilizzazione della comunità locale |
| | Collaborazioni locali | N di collaborazioni con attori locali | N | - |
| | Sicurezza alimentare | Kg di verdura prodotta a km0 | kg | Assunzione nutrizionale raccomandata |



5. Bibliografia

- Amadei, A. M., De Laurentiis, V., & Sala, S. (2021). A review of monetary valuation in life cycle assessment: State of the art and future needs. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129668. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129668>
- Benis, K., Reinhart, C., & Ferrão, P. (2017). Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts. *Journal of Cleaner Production*, 147, 589–602. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.130>
- Blom, T., Jenkins, A., Pulselli, R. M., & van den Dobbelsteen, A. A. J. F. (2022). The embodied carbon emissions of lettuce production in vertical farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production*, 377. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134443>
- Casey, L., Freeman, B., Francis, K., Brychkova, G., McKeown, P., Spillane, C., Bezrukov, A., Zaworotko, M., & Styles, D. (2022). Comparative environmental footprints of lettuce supplied by hydroponic controlled-environment agriculture and field-based supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133214>
- Commissione Europea. (2021). *Raccomandazione della Commissione (EU) 2021/2279*. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-12791-2019-INIT/it/pdf>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., Hollander, A., Zijp, M., & van Zelm, R. (2017). *ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level*. www.rivm.nl/en
- Kikuchi, Y., Kanematsu, Y., Yoshikawa, N., Okubo, T., & Takagaki, M. (2018). Environmental and resource use analysis of plant factories with energy technology options: A case study in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 186, 703–717. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.110>



- Martin, M., & Molin, E. (2019). Environmental assessment of an urban vertical hydroponic farming system in Sweden. *Sustainability (Switzerland)*, 11(15). <https://doi.org/10.3390/su11154124>
- Moosavi-Nezhad, M., Salehi, R., Aliniaiefard, S., Winans, K. S., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2022). An analysis of energy use and economic and environmental impacts in conventional tunnel and LED-equipped vertical systems in healing and acclimatization of grafted watermelon seedlings. *Journal of Cleaner Production*, 361. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132069>
- Orsini, F., Pennisi, G., Zulfiqar, F., & Gianquinto, G. (2020). Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs). *European Journal of Horticultural Science*, 85(5), 297–309. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.1>
- Peña, A., Rovira-Val, M. R., & Mendoza, J. M. F. (2022). Life cycle cost analysis of tomato production in innovative urban agriculture systems. *Journal of Cleaner Production*, 367, 133037. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133037>
- Petruzzelli, M., Niero, A., Cirone, F., Rufí-Salís, M., De Menna, F., Gabarrell, X., Vittuari, M., Righini, I., Orsini, F., Carotti, L., Durante, E., Zauli, I., Bertocchi, I., Lombardo, F., Curtis, A., Coudard, A., Reynaud-Desmet, L., Conan, Y., Lelièvre, A., ... Pennisi, G. (2023). *FoodE D2.6 Extensive life cycle assessment, life cycle costing and social LCA of pilots and self-assessment tool Work package WP2 Methodological framework development and case studies sustainability assessment*.
- PRé Sustainability. (2020). *SimaPro database manual - Methods library*.
- Romeo, D., Veà, E. B., & Thomsen, M. (2018). Environmental Impacts of Urban Hydroponics in Europe: A Case Study in Lyon. *Procedia CIRP*, 69, 540–545. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2017.11.048>
- Sandison, F., Yeluripati, J., & Stewart, D. (2023). Does green vertical farming offer a sustainable alternative to conventional methods of production?: A case study from Scotland. *Food and Energy Security*, 12(2). <https://doi.org/10.1002/fes3.438>



Sanjuan-Delmás, D., Llorach-Massana, P., Nadal, A., Ercilla-Montserrat, M., Muñoz, P., Montero, J. I., Josa, A., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2018). Environmental assessment of an integrated rooftop greenhouse for food production in cities. *Journal of Cleaner Production*, 177, 326–337. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.147>

Schmidt Rivera, X., Rodgers, B., Odanye, T., Jalil-Vega, F., & Farmer, J. (2022). The role of aeroponic container farms in sustainable food systems – The environmental credentials. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160420>