



**Centro Studi Qualità Ambiente**  
Dipartimento di Processi Chimici dell'Ingegneria  
Università degli Studi di Padova

# Il ruolo dell'analisi d'incertezza a supporto del processo decisionale negli studi di LCA

**Seminario LCA**

*Rete Italiana LCA*

***“Valutazioni di sostenibilità di tecnologie: quale ruolo per l’LCA?”***

***Ecomondo 2010, Rimini 4 Novembre 2010***

**Ing. Monia Niero**

- ✓ I riferimenti: ISO e ILCD
- ✓ Tipologie di incertezza
- ✓ L'importanza dell'analisi di incertezza
- ✓ Analisi di incertezza negli studi di LCA: qualche numero
- ✓ Approcci alla stima dell'incertezza
- ✓ La proposta di un approccio misto
- ✓ Caso studio: LCA agricoltura biologica
- ✓ Analisi qualitativa
- ✓ Analisi quantitativa
- ✓ Discussione dei risultati
- ✓ Conclusioni



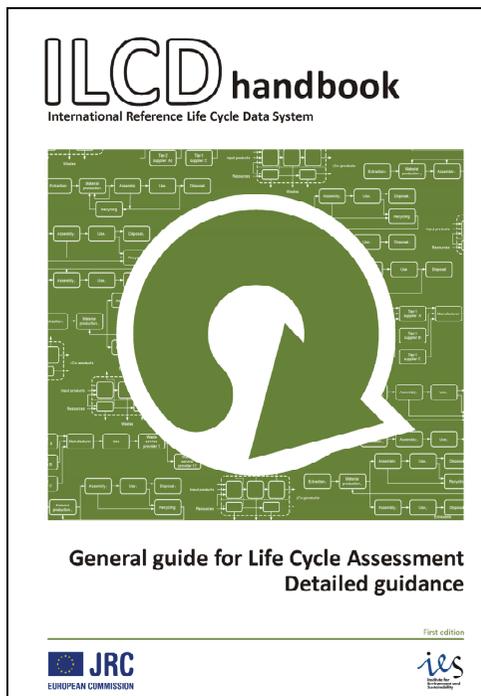
## *Analisi di incertezza*

**“Procedura sistematica per quantificare l’incertezza, introdotta nei risultati di un’analisi d’inventario del ciclo di vita, dagli effetti cumulativi dell’imprecisione del modello, dell’incertezza degli elementi in ingresso e della variabilità dei dati”**

UNI EN ISO 14040:2006



International  
Organization for  
Standardization



*“ [.].. Life cycle assessments are often comparative, i.e. performed in order to analyze differences between products, processes or other systems. The construction and analysis of the systems involves **potential sources of uncertainties**, not only in the case of future studies, but also in studies describing the present situation. In order to determine whether the **apparent differences between the compared alternatives are real (statistically significant)**, it is necessary to perform an **assessment of the uncertainties accompanying the results.**”*

*ILCD handbook – General guide for LCA – Detailed guidance  
- Annex E “Addressing uncertainties in LCA”*

## ***Parameter uncertainty***

Riguarda l'incertezza dei dati di input dei processi, emissioni ambientali e caratteristiche tecnologiche; riflette la nostra incompleta conoscenza del valore reale di un parametro

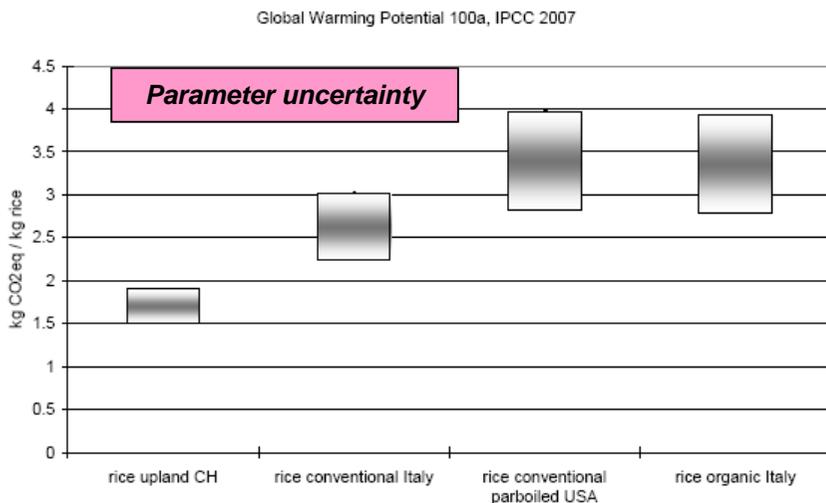
## ***Scenario uncertainty***

Riguarda scelte imposte dalla norma di riferimento relative all'unità funzionale, fattori di pesatura, orizzonte temporale, confini geografici, contesti naturali, procedure di allocazione, scenari di trattamento dei rifiuti, aspetti tecnologici

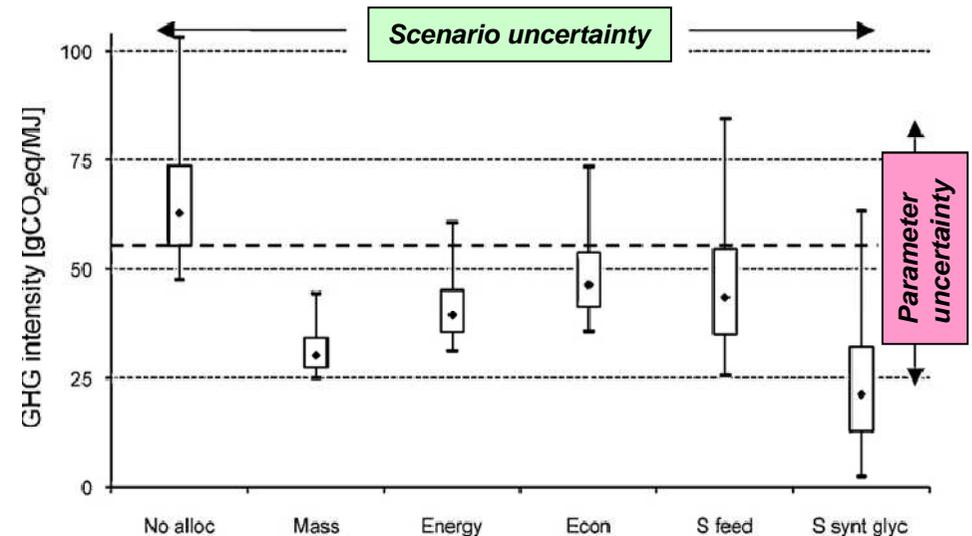
## ***Model uncertainty***

Riguarda scelte relative ai modelli matematici per derivare le emissioni e i fattori di caratterizzazione

# L'importanza dell'analisi di incertezza (1)

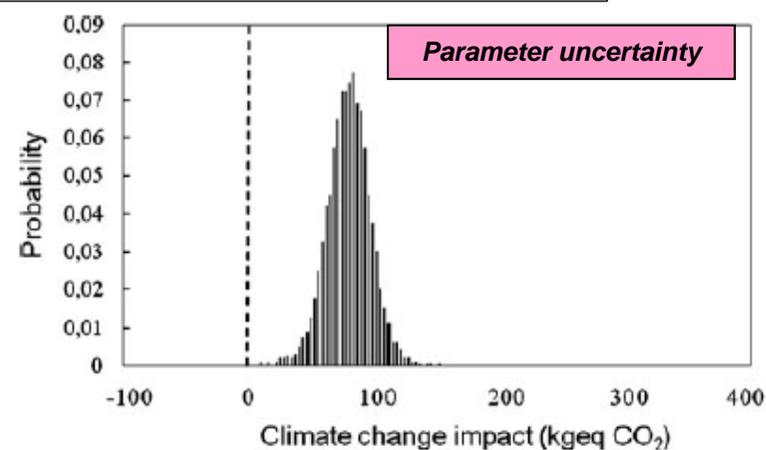
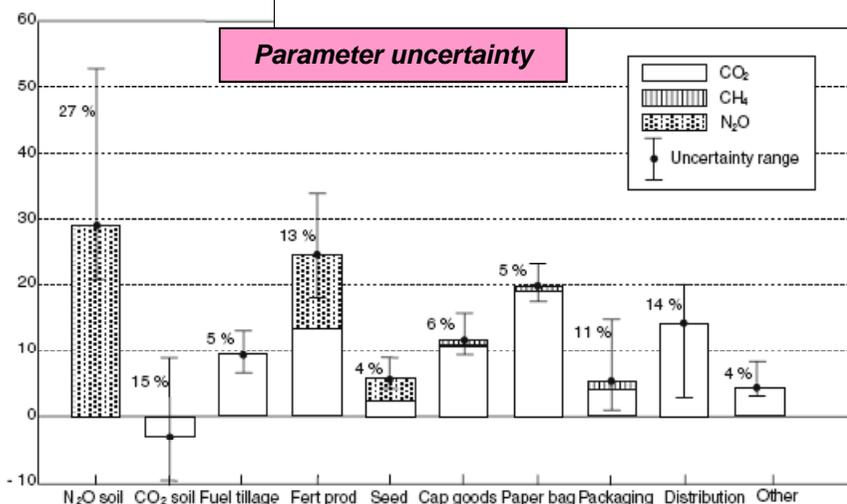
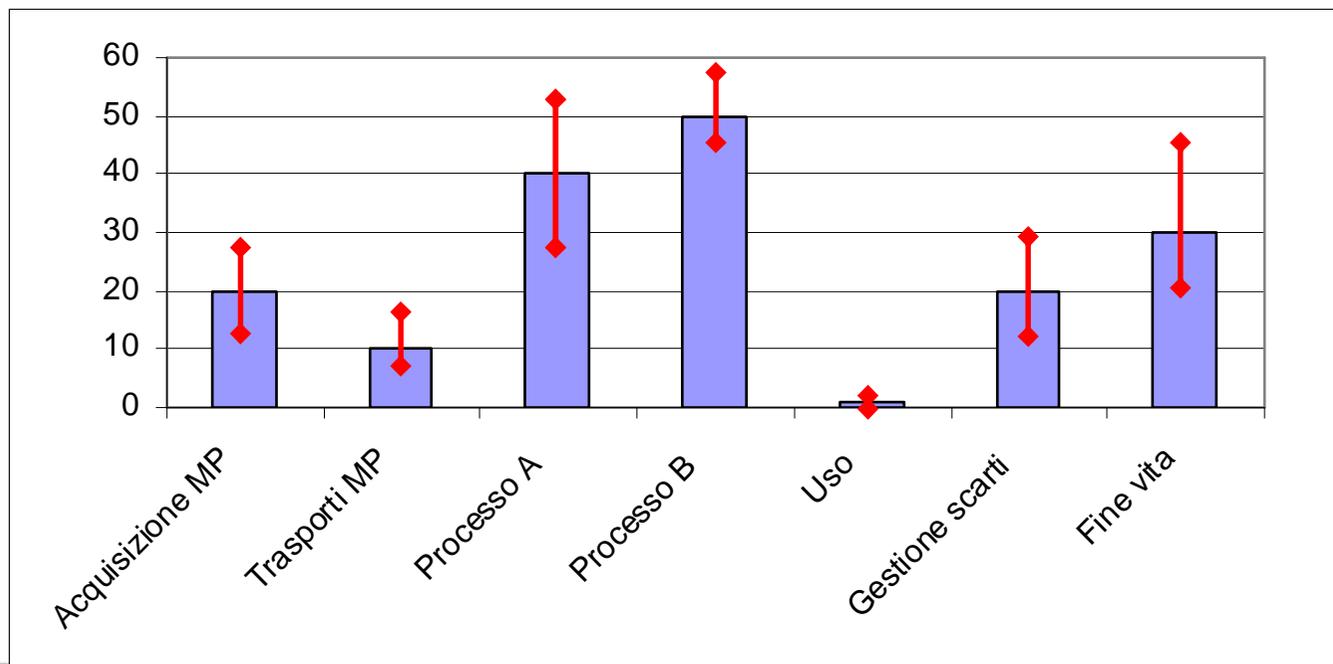


Fonte: Kaegi et al., SETAC Europe, Seville 23-27 May 2010



Fonte: Malca et al., 2010 Ren Sust Energy Rev (in press)

# L'importanza dell'analisi di incertezza (2)

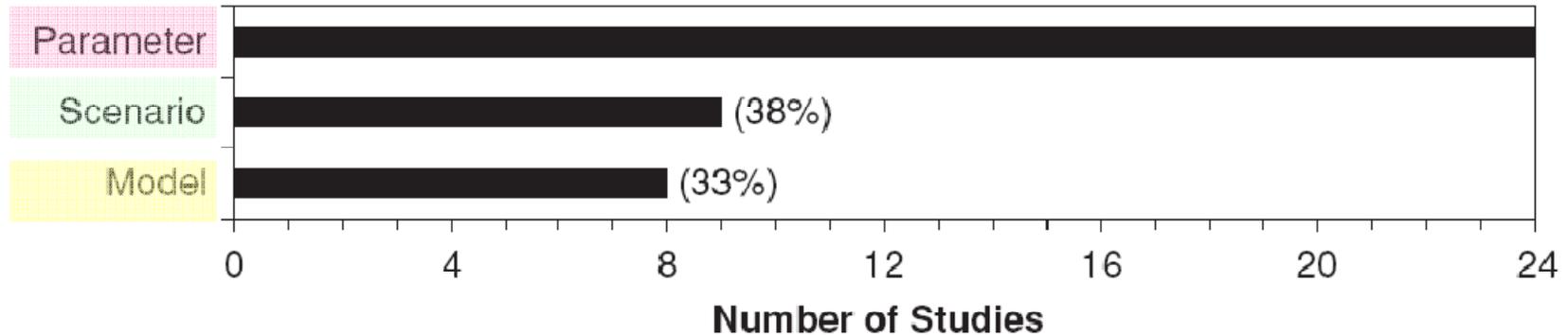


Fonte: Roos et al. (2010) *Int J LCA* 15, 478-488

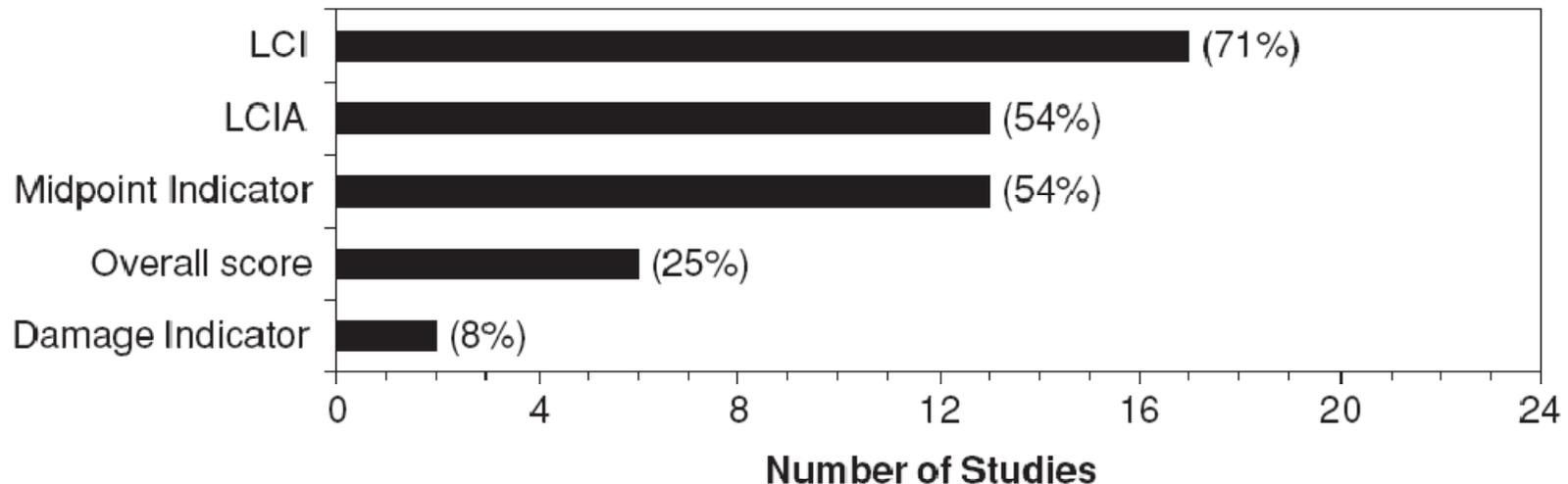
Fonte: Hong et al. (2010) *Int J LCA* 15, 499-410

# Analisi di incertezza negli studi di LCA ...qualche numero

## **Tipologia di incertezza considerata** *(da analisi di 24 pubblicazioni scientifiche nel periodo 1996-2004)*



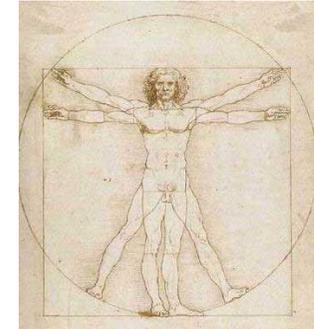
## **Tipologia di risultati per cui è riportata l'analisi di incertezza**



Fonte: Lloyd S.M., Ries R. (2007) "Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment. A Survey of Quantitative Approaches" *Journal of Industrial Ecology* 11(1), 161-179

## *Per la gestione dell'incertezza*

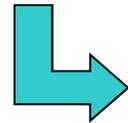
➔ **Approccio scientifico:** ricerca di metodologie per raccogliere dati più affidabili ed elaborare modelli più accurati ed appropriati



➔ **Approccio sociale:** discussione del tema dell'incertezza con gli stakeholders allo scopo di trovare consenso su dati e scelte



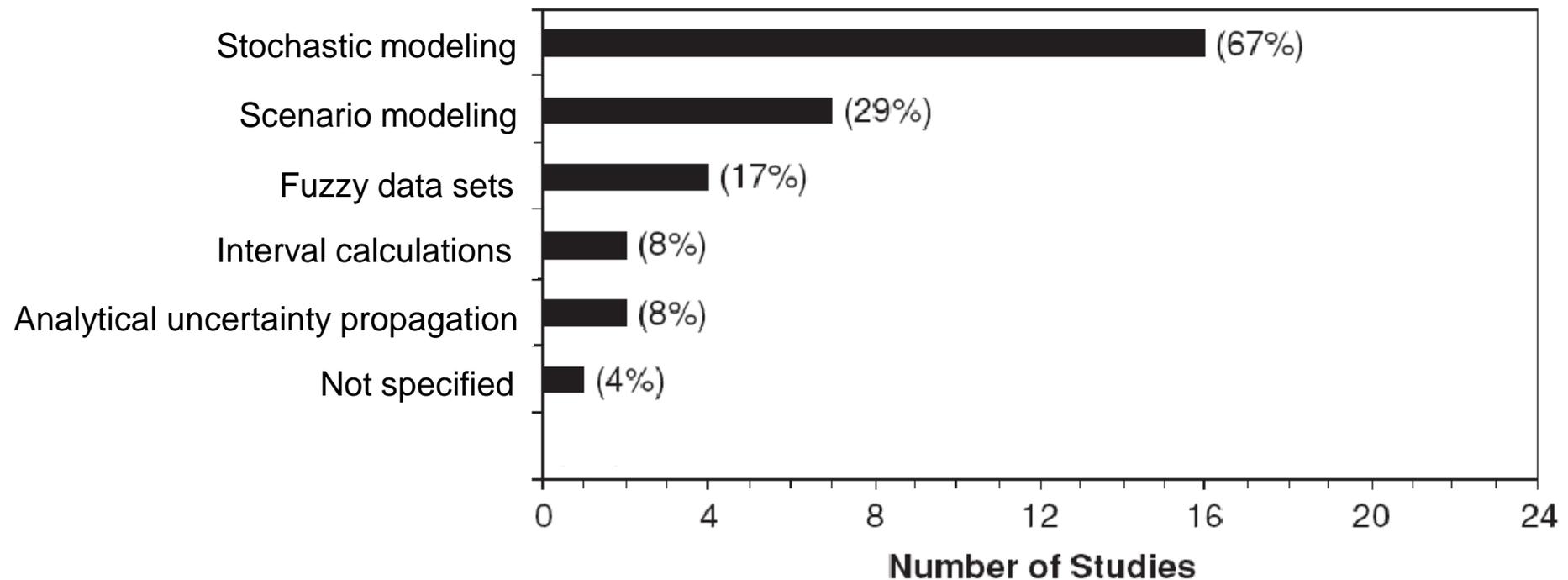
*Per la stima e quantificazione dell'incertezza*



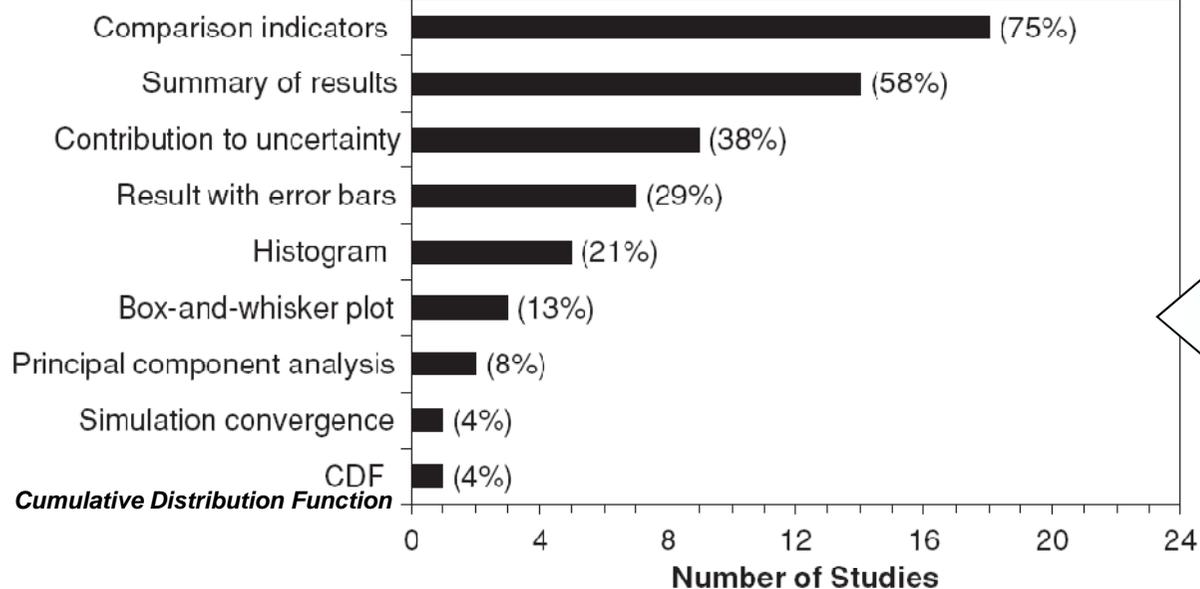
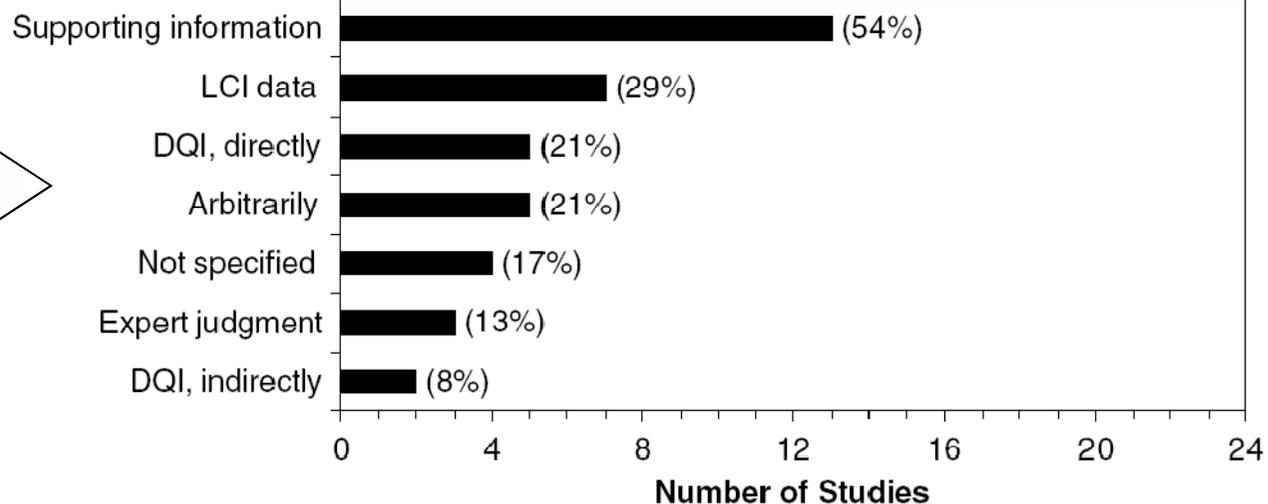
**APPROCCIO STATISTICO**



*Metodi per stimare la propagazione dell'incertezza*



Informazioni  
per  
caratterizzare  
l'incertezza



Modalità per  
comunicare  
l'analisi di  
incertezza

# La proposta di un approccio misto

Applicazione di un **approccio misto** che combina **metodi qualitativi e quantitativi di tipo stocastico** per la valutazione dell'incertezza insita nella **fase di inventario**

## Obiettivi:

- ➔ Individuare in che modo le **incertezze** nei **dati** e nelle **ipotesi** progrediscono nei calcoli
- ➔ Individuare come tali incertezze incidono sull'**affidabilità** dei risultati della valutazione degli impatti
- ➔ Determinare le **fasi di processo** su cui occorre migliorare la qualità e tipologia di dati



**Caso studio: LCA relativo alla coltivazione di cereali  
mediante tecnica di coltivazione biologica**

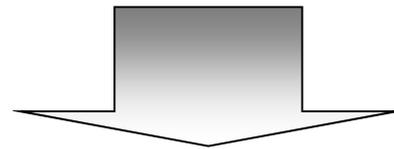
# Caso studio: LCA agricoltura biologica

## ✓ **OBIETTIVO:**

Definire gli impatti ambientali della coltivazione di un ciclo colturale triennale di rotazione di soia e orzo secondo la tecnica di coltivazione biologica (Rif. Reg. CE n.834/2007)

## ✓ **FUNZIONE:**

Produzione di sementi ottenute dalla coltivazione in un **ciclo triennale di rotazione di piante leguminose e graminacee**, nello specifico in un ciclo costituito da coltura di soia nel primo e terzo anno e orzo nel secondo anno



**UNITA' FUNZIONALE:** 1 kg di semente ottenuto nel corso di un ciclo produttivo di 3 anni, con una composizione costituita da 2/3 di soia e 1/3 di orzo



## INPUT

SEMENTI NON TRATTATE



CONSUMO ACQUA DI DOSAGGIO



CONCIME ORGANICO



CONSUMO CARBURANTE MEZZI AGRICOLI



OCCUPAZIONE SUOLO



AZIENDA AGRICOLA

## OUTPUT

EMISSIONI IN ARIA ( $N_2O$ ,  $NO_x$  e  $NH_3$ )

EMISSIONI IN ACQUA (nitrati, fosfati, metalli pesanti)

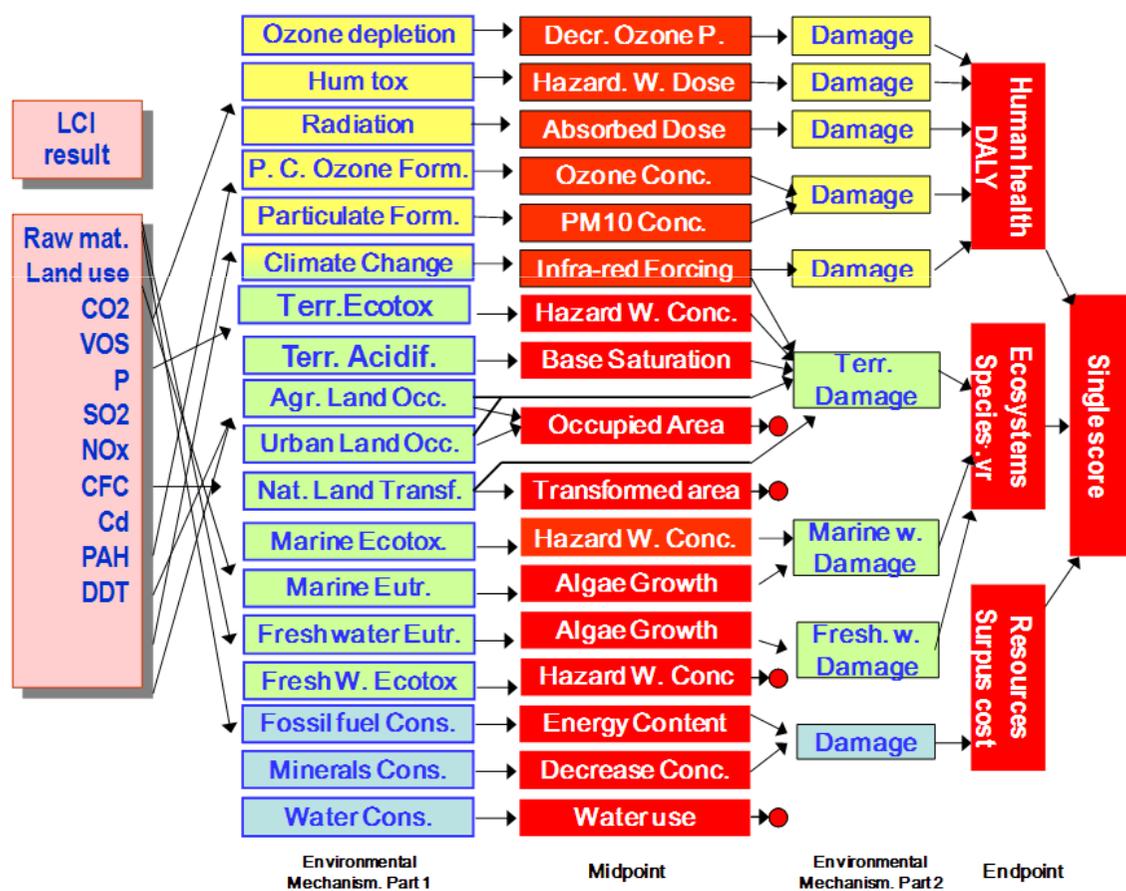
EMISSIONI NEL TERRENO (metalli pesanti)

RESIDUI ORGANICI

SEMENTI ORGANICHE

## Software di calcolo:

SimaPro 7.2 (Pre, Product Ecology Consultants)



## Metodo di valutazione degli impatti

ReCiPe approccio Endpoint

Prospettiva gerarchica (H)

Set di pesatura: H/A

# 1. Analisi qualitativa (a)

## Procedura:

1. Selezione dei dati di inventario più significativi per ciascuna categoria di danno attraverso **l'analisi dei contributi** alla valutazione dei danni

(fattore di esclusione: 1%)

<i>Human Health</i>	<i>DALY</i>	<i>%</i>
Emissioni da uso terreno - soia (N <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub> )	1,111E-06	<b>63,2</b>
Emissioni da uso terreno - orzo (N <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub> )	3,784E-07	<b>21,5</b>
Combustione gasolio	1,546E-07	8,8
<i>Sementi di soia</i>	5,093E-08	2,9
<i>Concime organico</i>	2,927E-08	1,7
Processi rimanenti	3,552E-08	2,0
TOTALE	1,759E-06	100
<i>Ecosystems</i>	<i>species.yr</i>	<i>%</i>
Occupazione suolo - soia	3,997E-08	<b>71,6</b>
Occupazione suolo - orzo	1,277E-08	<b>22,9</b>
<i>Sementi di soia</i>	1,964E-09	3,5
Processi rimanenti	1,098E-09	2,0
TOTALE	5,581E-08	100
<i>Resources</i>	<i>\$</i>	<i>%</i>
Gasolio trattori	4,048E-01	<b>89,1</b>
<i>Sementi di soia</i>	2,900E-02	6,4
<i>Sementi di orzo</i>	1,015E-02	2,2
<i>Concime organico</i>	7,831E-03	1,7
Processi rimanenti	2,373E-03	0,5
TOTALE	4,542E-01	100

# 1. Analisi qualitativa (b)

## 2. Assegnazione di una distribuzione probabilità:

Per voci da banca dati Ecoinvent → distribuzione di probabilità lognormale (Unit process)

Per voci da altre banche dati e emissioni → calcolo della standard deviation

$$SD_{g95} = \sigma_g^2 = \exp\left(\left[\ln(U_1)\right]^2 + \left[\ln(U_2)\right]^2 + \left[\ln(U_3)\right]^2 + \left[\ln(U_4)\right]^2 + \left[\ln(U_5)\right]^2 + \left[\ln(U_6)\right]^2 + \left[\ln(U_b)\right]^2\right)$$

con

$U_i$  da Matrice Pedigree (Ecoinvent), fattori di incertezza di:

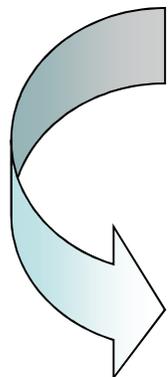
- $U_1$ : affidabilità (R, reliability)
  - $U_2$ : completezza (C, completeness)
  - $U_3$ : correlazione temporale (TC, temporal correlation)
  - $U_4$ : correlazione geografica (G, geographic correlation)
  - $U_5$ : altre correlazioni tecnologiche (T, other technological correlation)
  - $U_6$ : dimensioni del campione (S, sample size)
  - $U_b$ : fattore di incertezza di base (basic uncertainty factor)
- $U_b = U_b$  (processo, dato)

Input / output group	e	p	a
<b>Demand of:</b>			
Thermal energy, electricity, semi-finished products, working material, waste treatment services	1.05	1.05	1.05
Transport services (tkm)	2.00	2.00	2.00
Infrastructure	3.00	3.00	3.00
<b>Resources:</b>			
Primary energy carriers, metals, salts	1.05	1.05	1.05
Land use, occupation	1.50	1.50	1.50
Land use, transformation	2.00	2.00	2.00
<b>Pollutants emitted to air:</b>			
CO <sub>2</sub>	1.05	1.05	
SO <sub>2</sub>	1.05		
NMVOC total	1.50		
NO <sub>x</sub> , N <sub>2</sub> O	1.50		1.40
CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub>	1.50		1.20
Individual hydrocarbons	1.50	2.00	
Pm <sub>10</sub>	1.50	1.50	
Pm <sub>2.5</sub>	2.00	2.00	
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)	3.00		
CO, heavy metals	5.00		
Inorganic emissions, others		1.50	
Radionuclides (e.g. Radon-222)		3.00	
<b>Pollutants emitted to water:</b>			
BOD, COD, DOC, TOC, inorganic compounds (NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Cl, Na, etc.)		1.50	
Individual hydrocarbons, PAH		3.00	
Heavy metals		5.00	1.30
Pesticides			1.50
NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>			1.50
<b>Pollutants emitted to soil:</b>			
Oil, hydrocarbon total		1.50	
Heavy metals		1.50	1.30
Pesticides			1.20

## 2. Analisi quantitativa

### Pedigree Matrix

Indicator score	1	2	3	4	5	Remarks
Reliability	Verified data based on measurements	Verified data partly based on assumptions OR non-verified data based on measurements	Non-verified data partly based on qualified estimates	Qualified estimate (e.g. by industrial expert); data derived from theoretical information (stoichiometry, enthalpy, etc.)	Non-qualified estimate	verified means: published in public environmental reports of companies, official statistics, etc unverified means: personal information by letter, fax or e-mail
Completeness	Representative data from all sites relevant for the market considered over an adequate period to even out normal fluctuations	Representative data from >50% of the sites relevant for the market considered over an adequate period to even out normal fluctuations	Representative data from only some sites (<<50%) relevant for the market considered OR >50% of sites but from shorter periods	Representative data from only one site relevant for the market considered OR some sites but from shorter periods	Representativeness unknown or data from a small number of sites AND from shorter periods	Length of adequate period depends on process/technology
Temporal correlation	Less than 3 years of difference to our reference year (2000)	Less than 6 years of difference to our reference year (2000)	Less than 10 years of difference to our reference year (2000)	Less than 15 years of difference to our reference year (2000)	Age of data unknown or more than 15 years of difference to our reference year (2000)	less than 3 years means: data measured in 1997 or later; score for processes with investment cycles of <10 years; for other cases, scoring adjustments can be made accordingly
Geographical correlation	Data from area under study	Average data from larger area in which the area under study is included	Data from smaller area than area under study, or from similar area		Data from unknown OR distinctly different area (north america instead of middle east, OECD-Europe instead of Russia)	Similarity expressed in terms of environmental legislation. Suggestion for grouping: North America, Australia; European Union, Japan, South Africa; South America, North and Central Africa and Middle East; Russia, China, Far East Asia
Further technological correlation	Data from enterprises, processes and materials under study (i.e. identical technology)		Data on related processes or materials but same technology, OR Data from processes and materials under study but from different technology	Data on related processes or materials but different technology, OR data on laboratory scale processes and same technology	Data on related processes or materials but on laboratory scale of different technology	Examples for different technology: - steam turbine instead of motor propulsion in ships - emission factor B(a)P for diesel train based on lorry motor data Examples for related processes or materials: - data for tyles instead of bricks production - data of refinery infrastructure for chemical plants infrastructure
Sample size	>100, continuous measurement, balance of purchased products	>20	> 10, aggregated figure in env. report	>=3	unknown	sample size behind a figure reported in the information source

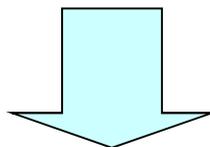


A seconda del punteggio di ciascun indicatore si ottiene il valore da inserire nella formula della  $SD_{95}$

Indicator score	1	2	3	4	5
Reliability	1.00	1.05	1.10	1.20	1.50
Completeness	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20
Temporal correlation	1.00	1.03	1.10	1.20	1.50
Geographical correlation	1.00	1.01	1.02		1.10
Further technological correlation	1.00		1.20	1.50	2.00
Sample size	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20

# Risultati analisi qualitativa

Assegnazione del punteggio ai dati raccolti in relazione agli aspetti:  
 affidabilità, completezza, correlazione temporale, correlazione geografica, altre correlazioni tecnologiche, dimensioni del campione

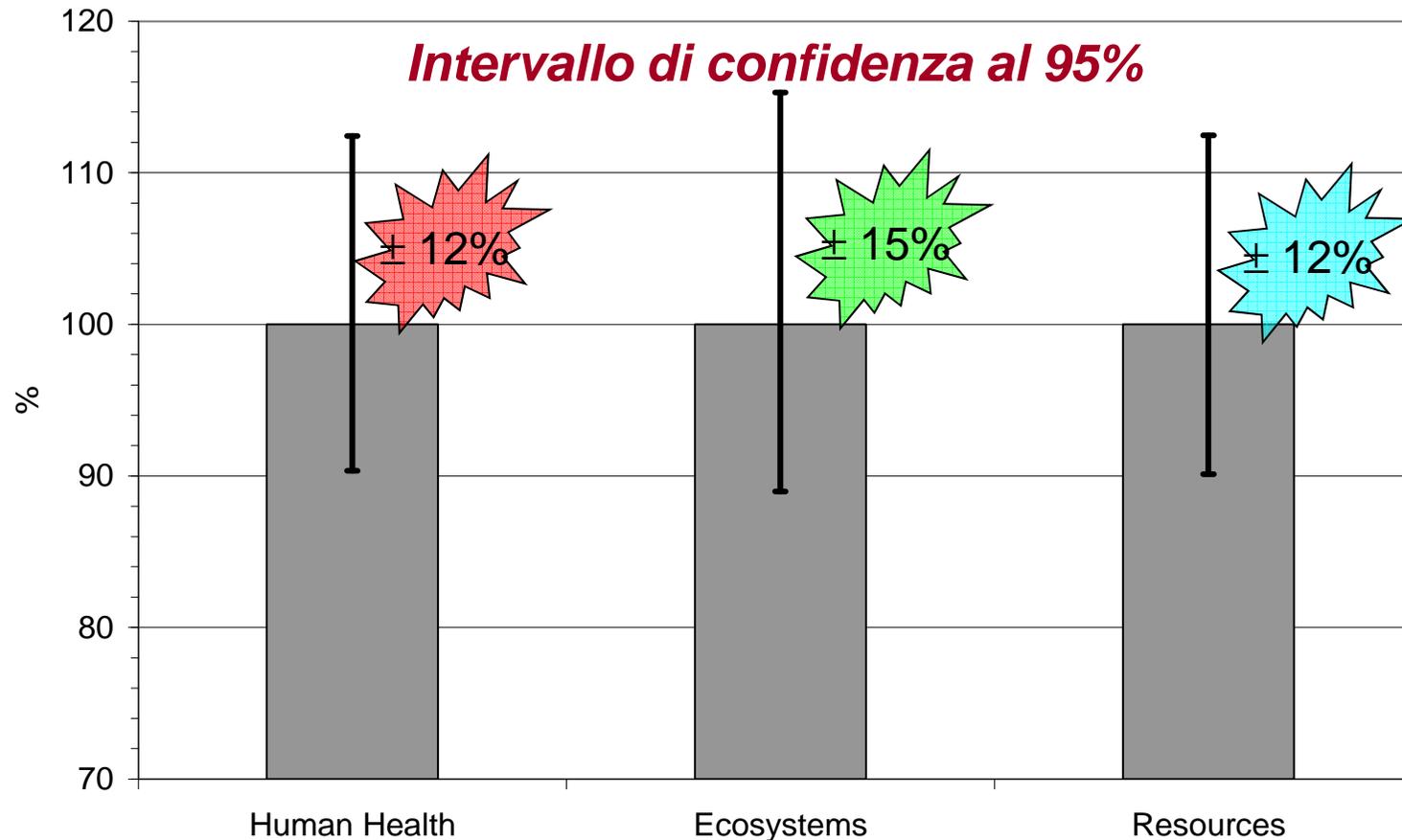


## Calcolo standard deviation

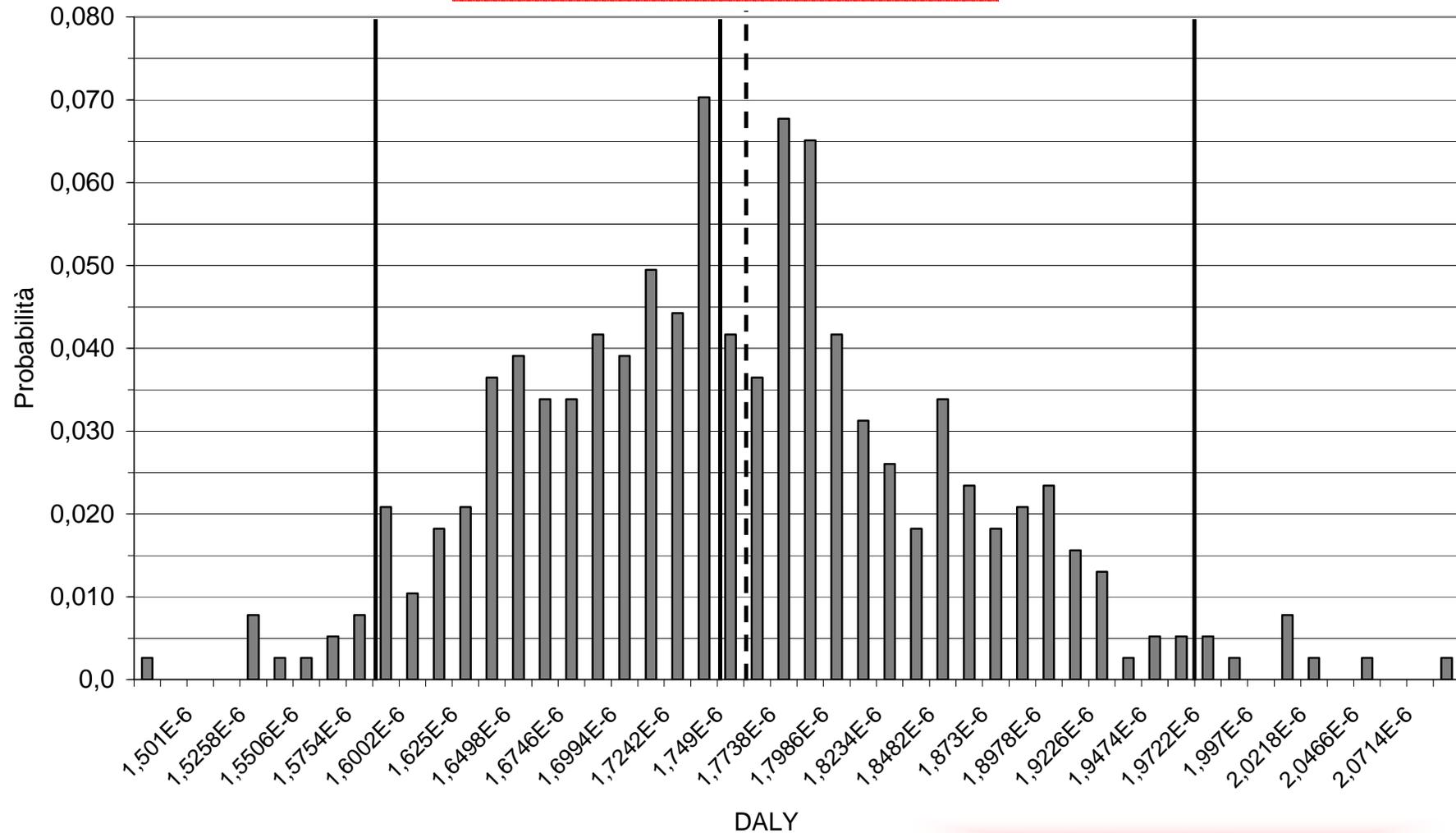
Voce di inventario	R	U <sub>1</sub>	C	U <sub>2</sub>	T	U <sub>3</sub>	G	U <sub>4</sub>	T C	U <sub>5</sub>	S	U <sub>6</sub>	U <sub>b</sub>	SDg95
Gasolio trattori	2	1,05	3	1,05	3	1,1	5	1,1	4	1,5	5	1,2	1,05	1,228
N <sub>2</sub> O in aria	2	1,05	3	1,05	1	1	1	1	1	1	5	1,2	1,4	1,184
CO <sub>2</sub> in aria	2	1,05	3	1,05	1	1	1	1	1	1	5	1,2	1,2	1,123
NO <sub>x</sub> in aria	2	1,05	3	1,05	1	1	1	1	1	1	5	1,2	1,4	1,184
Occupazione suolo	1	1	3	1,05	1	1	1	1	1	1	5	1,2	1,5	1,214

# Risultati analisi quantitativa (1)

3. Simulazione di **Monte Carlo** (criterio di fermata = 500 esecuzioni)
4. Il software campiona in maniera casuale una serie di valori sulla base della distribuzione e ricalcola la LCA per ogni parametro, immagazzina ogni risultato e raffigura la distribuzione dei risultati



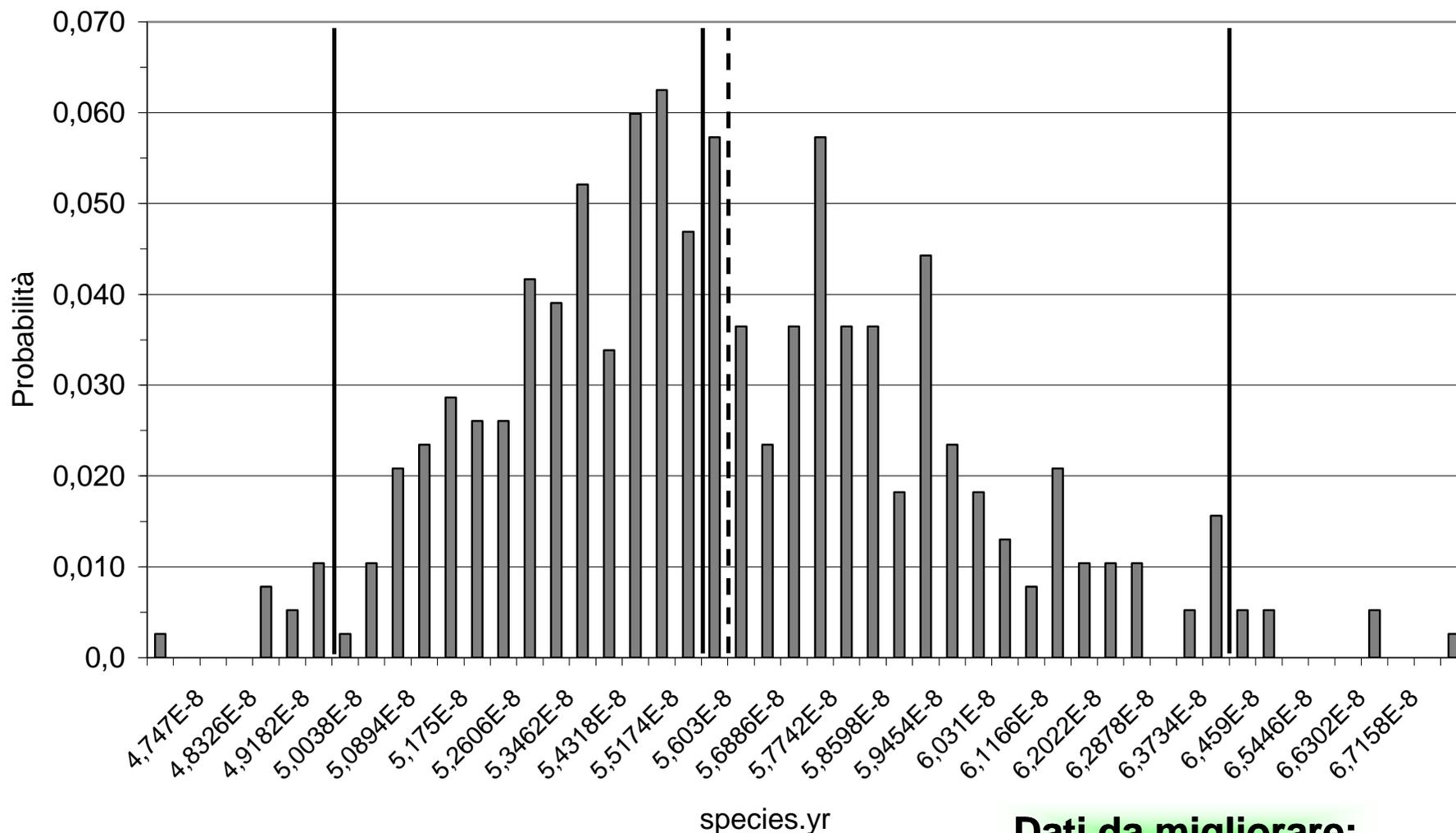
## Valutazione dei danni Human Health



- Valore mediana = 1,75 E-06 DALY
- Valore puntuale da studio LCA = 1,76E-06 DALY

**Dati da migliorare:**  
**Emissioni da uso del suolo**

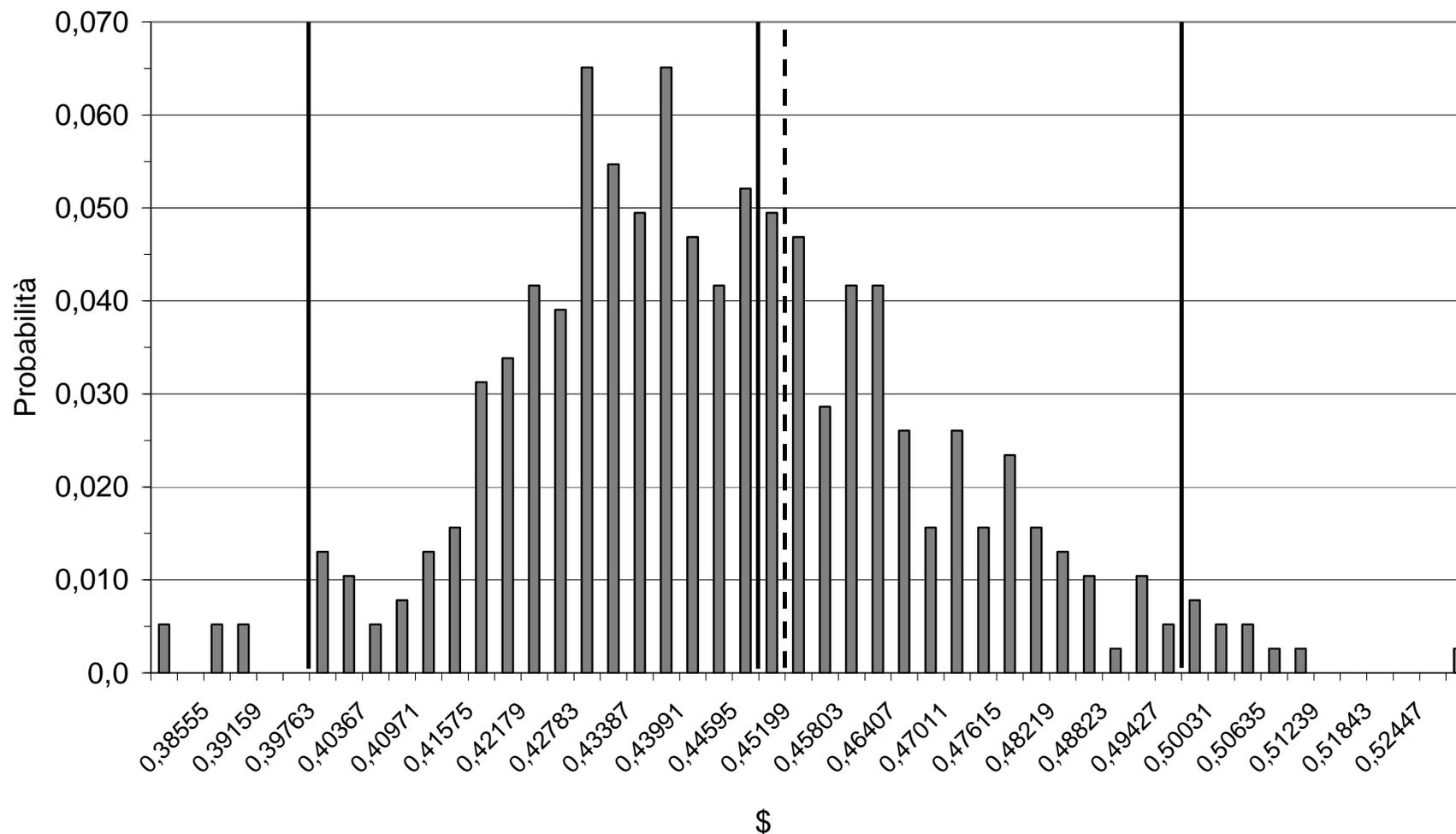
## Valutazione dei danni Ecosystems



- Valore mediana = 5,54 E-08 species.yr
- Valore puntuale da studio LCA = 5,58 E-08 species.yr

**Dati da migliorare:  
Occupazione suolo**

## Valutazione dei danni Resources

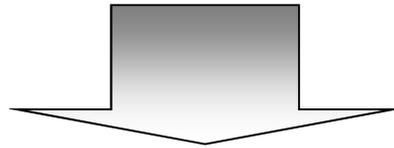


Valore mediana = 0,441 \$

Valore puntuale da studio LCA = 0,454 \$

**Dati da migliorare:**  
**Gasolio mezzi agricoli**

L'applicazione di un'analisi di incertezza combinata di tipo qualitativo e quantitativo è stata una **scelta strategica** in fase di interpretazione dei risultati

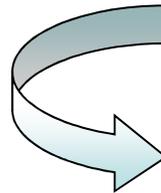


- L'analisi qualitativa (*Pedigree matrix*) ha fornito un **giudizio qualitativo** sui **dati di inventario**;
- L'analisi quantitativa dell'incertezza (standard deviation e analisi di Monte Carlo) ha **quantificato** come la **qualità dei dati** si è tradotta in grado di incertezza sui risultati della valutazione degli impatti e ha indicato quali sono le **categorie di danno** maggiormente affette da incertezza e i **dati di cui migliorare la qualità**

### Limitazioni dell'approccio proposto e prospettive future:

❖ Considerare *l'influenza delle correlazioni sull'incertezza* (ad es. input di combustibili e emissioni di CO<sub>2</sub> trattate come indipendenti sebbene presentino una relazione lineare)

❖ I *fattori dell'incertezza di base Ub* della banca dati Ecoinvent derivano da giudizi di esperti (dal confronto con valori di letteratura essi tendono a sottostimare la "reale" incertezza, ad es. inquinanti misurati raramente)



Quantificazione dell'incertezza necessaria quando i risultati di LCA singolo o LCA comparativo vengono utilizzati per prendere delle decisioni, allo scopo di **individuare** e **comunicare l'intervallo di validità dei risultati** ottenuti e aumentare **l'affidabilità di tali studi**



Grazie per l'attenzione!

**Centro Studi Qualità Ambiente**  
**DIPARTIMENTO DI PROCESSI CHIMICI DELL'INGEGNERIA**  
**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

Via Marzolo 9, 35131 Padova; Tel. + 39 49 8275539/6 - Fax + 39 49 8275785

Email: [cesqa@unipd.it](mailto:cesqa@unipd.it) – Web: [www.cesqa.it](http://www.cesqa.it)

Ing. Monia Niero

*monia.niero@cesqa.it*