

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Chimica e dei Processi Sostenibili**

Tesi di Laurea Magistrale

**Sostenibilità e impatti ambientali
dell'industria conciaria:
studio di un caso reale**



Relatrice

Prof.ssa Fulvia Chiampo

Candidato

Giancarlo D'Angelo

Marzo 2024

Indice

INTRODUZIONE	6
1. CHIMICA DEL CUOIO E DELLA PELLE	8
1.1 Istologia della pelle	8
1.1.1 Epidermide	9
1.1.2 Derma (o corio)	9
1.1.3 Tessuto sottocutaneo	9
1.2 Chimica della pelle	9
1.2.1 Punto isoelettrico (IEP)	11
1.2.2 Gelatinizzazione	11
1.2.3 Gonfiamento	12
2. IL PROCESSO DI CONCIA	13
2.1 Lavori di riviera o trattamenti preliminari	14
2.1.1 Rinverdimento o ammollo	14
2.1.2 Depilazione e calcinazione	15
2.1.3 Scarnatura e spaccatura	15
2.1.4 Decalcinazione e macerazione	15
2.1.5 Piclaggio	16
2.1.6 Sgrassaggio	16
2.2 Concia	16
2.2.1 Concia al cromo	17
2.3 Trattamenti post concia	21
2.3.1 Riconcia	22
2.3.2 Tintura	22
2.3.3 Ingrassio	23
2.3.4 Essiccamento	24
2.4 Rifinitura	25
3. IMPATTI DELL'INDUSTRIA CONCIARIA	27
4. DATI DELL' AZIENDA STUDIATA	31
5. LCA: LIFE CYCLE ASSESSMENT	35
5.1 Struttura	36
5.1.1 Definizione dell'obiettivo e campo di applicazione	37
5.1.2 Analisi dell'inventario	37
5.1.3 Valutazione degli impatti	37
5.1.4 Interpretazione dei risultati	38

5.2 Alcune considerazioni sulla LCA	38
5.3 Metodologie di valutazione dell'impatto	38
5.3.1 Environmental Footprint: la metodologia sviluppata dall'Unione Europea	40
6. OPEN LCA	45
6.1 Introduzione all'utilizzo del programma.....	45
6.2 Modellazione di un processo in OpenLCA	47
6.3 Sistema prodotto e calcolo LCA	49
6.4 Risultati	50
6.5 Progetti	52
7. APPLICAZIONE DI "OpenLCA" AL CASO DI STUDIO.....	54
7.1 Processo e flussi	54
7.2 Creazione del "sistema prodotto".....	57
7.3 Calcolo degli impatti	60
7.4 Confronto degli impatti calcolati.....	62
7.4.1 Confronto col processo integrato nel database.....	62
7.4.2 Confronto con utilizzo di metano invece che energia solare	63
8. RISULTATI.....	66
8.1 Risultati del processo analizzato	66
8.2 Confronto con il processo integrato nel database.....	77
8.3 Ipotesi di sostituzione dell'energia solare con metano.....	84
9. OSSERVAZIONI E CONSIDERAZIONI FINALI.....	86
9.1 Inserimento in un contesto europeo	86
9.1.1 Consumo di acqua	86
9.1.2 Consumo di energia.....	87
9.1.3 Emissione di particolato	87
9.2 Possibili miglioramenti	87
9.2.1 Solfato basico di cromo.....	87
9.2.2 Produzione di energia e combustibili fossili	88
10. CONCLUSIONI	90
BIBLIOGRAFIA.....	92
<i>Ringraziamenti</i>	95

INTRODUZIONE

L'industria conciaria è una delle più antiche al mondo. Sono stati trovati infatti dei documenti risalenti al 1975 a.C. che stabilivano regole e salari per i conciatori [1]. La pelle d'altronde è sfruttata sin dalla preistoria, quando gli uomini primitivi che cacciavano gli animali per cibo, ne utilizzavano le pelli per fare vestiti e tende di protezione dagli agenti atmosferici.

Ovviamente con il passare degli anni ha subito sviluppi notevoli, soprattutto durante l'industrializzazione quando fu introdotta quella che è l'attuale concia al cromo, che sfrutta le capacità di questo metallo di legarsi in modo stabile alla pelle rendendola un materiale imputrescibile e di valore. Ancora oggi questo metodo è il più utilizzato poiché produce cuoi di altissima qualità, più che ogni altro tipo di concia. Tuttavia, questa metodologia comporta gravi impatti ambientali. In particolare, si ha un elevato consumo di acqua, la quale diventerà un reflujo inquinato, e di sostanze chimiche che entreranno in parte in quelle che sono le acque di scarico [2].

Sin dai tempi antichi quindi, l'uomo ha sfruttato un "rifiuto" non commestibile trasformandolo in un oggetto molto utile. Ancora oggi la materia prima della concia è un sottoprodotto dell'industria del bestiame o dell'allevamento. I conciatori, infatti, recuperano le pelli dai macelli e trasformano quello che è uno scarto privo di valore in un materiale con notevoli caratteristiche fisiche e meccaniche e dall'alto valore economico, utile per la fabbricazione di un'ampia gamma di prodotti di qualità.

Un'eccezione a quanto detto sopra riguarda le pelli da pelliccia e altri settori di nicchia (pelli di rettili) dove l'uso della pelle dell'animale è lo scopo principale dell'allevamento.

Il mercato della pelle è in continua espansione, soprattutto per quanto riguarda i prodotti di lusso e di alta moda. Nel 2017 la dimensione del mercato globale della pelletteria era di 414 miliardi di dollari e si stima che questo valore possa raggiungere i 630 miliardi entro il 2025. La seguente tabella rappresenta i primi cinque paesi produttori di pelle al mondo [3].

Posizione	Paese	Produzione annua (milioni di m ²)	% Produzione mondiale
1	Cina	573,2	25%
2	Brasile	219,3	9,5%
3	Russia	153,5	7%
4	India	144,9	6,4%
5	Italia	141,3	6,3%

Maggiori paesi produttori di pelli al mondo

L'Italia rappresenta quindi il principale paese conciario dell'Unione Europea, coprendo il 65% del fatturato comunitario e il 19% di quello mondiale. È il più grande esportatore mondiale per valore economico, le pelli in Italia sono infatti destinate soprattutto all'alta moda e al settore del lusso [3,4]. Qui in genere le concerie sono di piccole dimensioni e sono raggruppate in distretti conciari di comuni collegati tra loro. I principali distretti conciari si trovano in Veneto

nella valle del Chiampo (Vicenza), in Toscana a Santa Croce sull'Arno (Pisa) e in Campania nella zona di Solofra (Avellino) [5].

Negli ultimi anni si è però verificato uno spostamento della produzione del cuoio verso i paesi in via di sviluppo, a causa del minor costo della manodopera e soprattutto di una legislazione ambientale più permissiva, il che si traduce in minori costi di produzione.

In particolare, il mercato indiano è in rapida crescita sia in termini di produzione che di consumo. Qui sono presenti più di 3000 concerie che lavorano 700000 tonnellate di pelli l'anno. La maggior parte di queste concerie sono di piccole dimensioni e si trovano sulle rive dei sistemi fluviali Gange e Palar. La principale materia prima in questo paese è la pelle bovina data l'elevatissima popolazione di questi animali, l'India detiene infatti la maggior quantità di bestiame al mondo. La maggior parte delle concerie indiane utilizza però tecnologie vecchie e inefficienti consumando notevoli quantità di prodotti chimici, acqua ed energia. Ciò comporta ovviamente gravi impatti ambientali [6].

La rapida crescita di questo business nei paesi in via di sviluppo ha creato quindi diversi problemi di inquinamento ambientale.

Lo scopo di questo lavoro è analizzare un particolare caso studio ovvero un'azienda indiana (che per motivi di riservatezza non verrà citata) che effettua le operazioni di post concia di pelli bovine, partendo dai pellami *wet blue* per ottenere un cuoio finito. Per far ciò si è effettuata l'analisi del ciclo vita (o *Life Cycle Assessment, LCA*), utilizzando i dati primari forniti dall'azienda. Si è utilizzato il software opensource OpenLCA e si sono valutate diverse categorie di impatto ambientale.

La valutazione del ciclo vita è infatti un utile strumento per la misura dell'impatto ambientale di un prodotto o un processo lungo tutto il suo ciclo vita. Esso è regolato a livello internazionale dalla norma UNI EN ISO 14040 del 2006.

I primi capitoli illustrano le caratteristiche della pelle, del processo di concia e gli impatti generici dell'industria conciaria. In seguito, viene presentato il caso studio e i dati forniti dall'azienda per poi illustrare le caratteristiche principali della LCA. Viene poi spiegato l'utilizzo del programma e le operazioni svolte con esso per presentare i risultati ottenuti. Infine, sono presentate alcune riflessioni su questi risultati e proposti spunti di miglioramento per le operazioni svolte dall'azienda.

1. CHIMICA DEL CUOIO E DELLA PELLE

Con il termine cuoio (*leather* in inglese) si indica la pelle animale (*hide* se riferita ad animali di grossa taglia come i bovini o *skin* per animali di piccola taglia come gli ovini e i caprini) che, dopo essere stata trattata tramite particolari processi chimici, fisici e meccanici diventa un materiale stabile e durevole. Questo insieme di procedimenti che trasformano la pelle fresca o grezza (nome che prende la pelle animale appena scuoiata) da un materiale di scarto putrescibile ad un materiale di alto valore, imputrescibile, con notevoli caratteristiche meccaniche ed impermeabile prende il nome di concia.

Il materiale di partenza per il cuoio è, quindi, la pelle animale, che rappresenta un prodotto di scarto dell'industria alimentare, e per specifici casi, l'obiettivo dell'allevamento dell'animale (pelli di nicchia e pellicce).

1.1 Istologia della pelle

La pelle è l'organo più grande del corpo dei mammiferi e possiede una struttura complessa che fornisce protezione dall'ambiente, trattiene le viscere e gli organi all'interno del corpo stesso e consente il controllo della temperatura dell'individuo.

La pelle è un insieme eterogeneo di più strati sovrapposti e come una moneta presenta due facce distinte: la faccia interna, ovvero quella che in origine era attaccata alla carne dell'animale chiamata "lato carne" e la faccia esterna dove sono attaccati i peli chiamata "lato fiore". Tagliandola e osservandola in sezione si possono distinguere tre strati (figura 1.1): epidermide, derma e tessuto sottocutaneo [7].

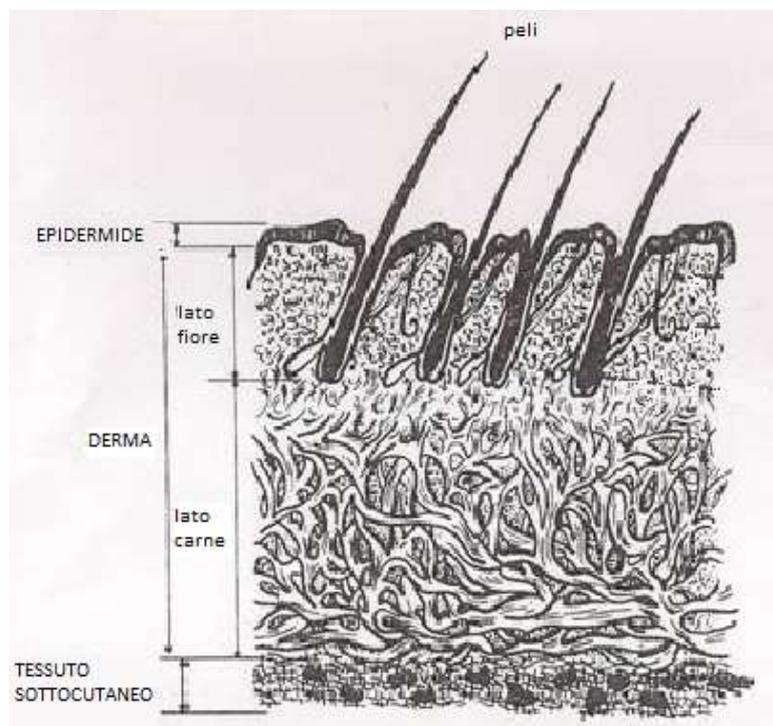


Figura 1.1 Struttura di una pelle bovina

1.1.1 Epidermide

È lo strato più esterno della pelle e viene rimosso durante le fasi preliminari della concia. È la barriera tra l'animale e l'ambiente e rappresenta circa l'1% dell'intero spessore.

L'epidermide non è omogenea ma è formata da diversi strati di cellule. Lo strato più esterno, infatti, chiamato strato corneo è formato da cellule morte mentre quelli più interni, chiamati strati di Malpighi, sono formati da cellule vive. Tra quest'ultimo strato e il derma è presente una sottile membrana, chiamata membrana ialina o vitrea.

1.1.2 Derma (o corio)

È lo strato principale della pelle e anche il più spesso; è costituito principalmente da fibre bianche di collagene che si reticolano tra loro e che gli conferiscono forza e resistenza. La struttura delle fibre varia lungo la sezione trasversale della pelle: partendo dalla membrana ialina si ha un aumento delle dimensioni sino al centro del derma, mentre dal centro fino allo strato successivo si ha invece una diminuzione delle dimensioni [1].

Come si può vedere dalla figura 1.1, nel derma si distinguono chiaramente le zone “lato fiore” e “lato carne”: la prima, dove si trova la base dei peli l'intreccio di fibre, è molto sottile e fitto e conferisce duttilità al cuoio; la zona inferiore invece è costituita da un intreccio di fibre più spesse ed è la parte che conferisce resistenza al cuoio.

1.1.3 Tessuto sottocutaneo

È lo strato di pelle più vicino alla carne dell'animale, non è nettamente separato dal derma, nel senso che si passa gradualmente da una trama molto intrecciata ad una più distesa e rada. In questa sezione sono presenti anche cellule di grasso e per questo motivo questo strato viene anche chiamato tessuto adiposo.

L'unico strato di interesse nel processo di concia è quindi il derma: solamente questo strato viene trasformato in cuoio, mentre epidermide e tessuto sottocutaneo rappresentano scarti che vengono eliminati durante le operazioni preliminari, così come i peli.

1.2 Chimica della pelle

La pelle bovina appena scuoiata è composta per il 64% di acqua, il 33% di proteine, il 2% di grassi e l'1% di minerali e altre sostanze. Tolta quindi l'acqua, i costituenti principali sono le proteine.

Una proteina è una macromolecola costituita da una sequenza di amminoacidi uniti da legami peptidici. Ogni amminoacido presenta alle estremità un gruppo amminico e un gruppo carbossilico, che formano i legami peptidici, e da un gruppo metile centrale a cui è legata la catena laterale “R”, come mostrato in figura.

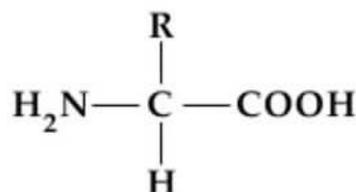


Figura 1.2: Struttura generica di un amminoacido

Le catene polipeptidiche si formano tramite il legame del gruppo amminico con il gruppo carbossilico, creando in questo modo quella che è la “spina dorsale” del polimero, dalla quale si estendono le catene laterali e sono proprio queste che determinano le caratteristiche e le proprietà della proteina: gli amminoacidi, infatti, si differenziano tra loro a seconda del gruppo R.

Il tipo di proteina dipende dalla sequenza e dal numero di amminoacidi legati tra loro, in genere una proteina è formata da 15-20 amminoacidi; ogni gruppo R inoltre può reagire con le catene laterali di un altro amminoacido, rendendo quindi la proteina una molecola molto complessa.

I peli e l’epidermide sono costituiti principalmente dalla cheratina, mentre il derma è costituito dal collagene, la principale e più importante proteina presente nella pelle. È infatti quella che reagisce con le sostanze concianti e sono le sue proprietà che rendono la pelle un prodotto interessante dal punto di vista industriale.

Il collagene è una proteina fibrosa caratterizzata dalla presenza dell’amminoacido idrossiprolina che è presente quasi univocamente nel collagene (può essere quindi usato per misurarne il contenuto). L’amminoacido più presente nel collagene è la glicina (Gly), infatti i collageni sono caratterizzati dalla tripletta $-(Gly-X-Y)-$ dove X è spesso la prolina (Pro) e Y è spesso l’idrossiprolina (Hypro). Nella tabella 1.1 vengono riportate le possibili combinazioni con le rispettive percentuali. Questa catena si avvolge su sé stessa per formare un’ α -elica antioraria. La struttura fibrosa del collagene è data dalla combinazione di tre di queste catene, che si attorcigliano una sull’altra a formare una tripla elica destrorsa (oraria) con al centro sempre la glicina. Questa tripla elica assume la forma di un bastoncino con una lunghezza pari a circa 300 nm ed uno spessore di 1,5 nm ed è la base per la struttura fibrosa della proteina.

Tripletta	%
-(Gly-Pro-Hypro)-	12%
-(Gly-Pro-Y)- o -(Gly-X-Hypro)-	44%
-(Gly-X-Y)-	44%

Tabella 1.1: Triplette tipiche del collagene [1]

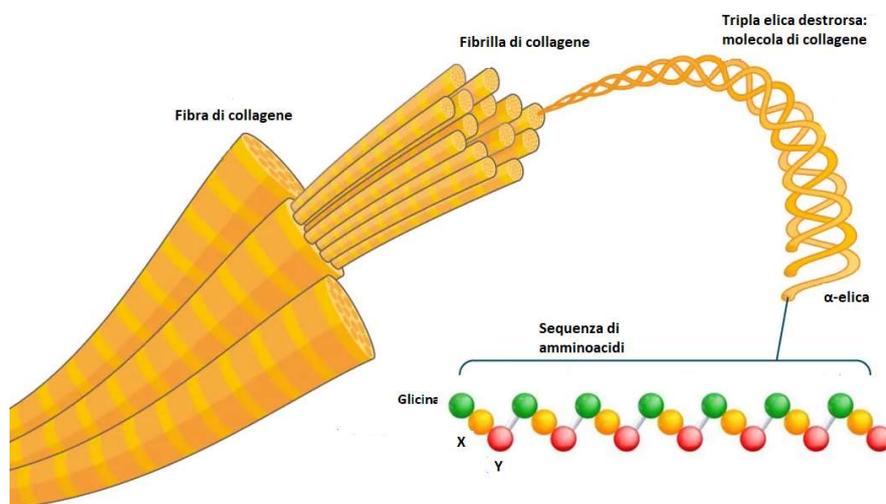


Figura 1.3: Struttura del collagene

1.2.1 Punto isoelettrico (IEP)

Data la loro particolare struttura, gli amminoacidi e, di conseguenza, le proteine hanno carattere anfotero. Infatti, quando una proteina è immersa in una soluzione acida assume carica positiva, mentre a contatto con una soluzione basica assume carica negativa. Questa caratteristica si riversa sulla pelle che possiede anch'essa carattere anfotero.

Poiché la carica della pelle può essere regolata a seconda del pH della soluzione nella quale è immersa, si avrà un punto sulla scala del pH nel quale la carica netta è pari a zero, e questo valore prende il nome di punto isoelettrico (IEP). È quindi una caratteristica molto importante perché nell'intorno di questo valore di pH la molecola è neutra, e si avranno minima reattività e minimo gonfiamento.

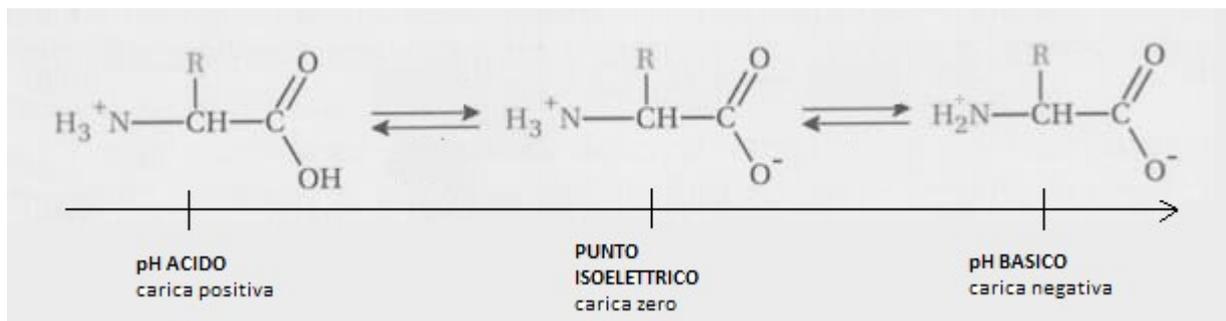


Figura 1.4: Variazione della carica di una proteina al variare del pH della soluzione

Quando il pH della pelle è superiore all'IEP questa viene caricata negativamente, mentre al contrario se il pH è inferiore si avrà una pelle cationica: in entrambi i casi, maggiore sarà la differenza tra IEP e pH e maggiore sarà la carica.

Per una data proteina, il punto isoelettrico è fisso e non varia al variare del pH o della carica del sistema. Il suo valore può essere modificato solamente tramite un'alterazione chimica che vada a modificare la struttura e la disponibilità dei siti attivi della proteina ed è proprio ciò che avviene durante il processo di concia.

Per quanto riguarda la pelle grezza il punto isoelettrico è ad un pH di circa 7,4 [1].

1.2.2 Gelatinizzazione

Se si sottopone la pelle grezza a calore umido, essa inizia a degradarsi restringendosi e contraendosi. Questo fenomeno prende il nome di gelatinizzazione e la temperatura a cui avviene è la temperatura di gelatinizzazione o di contrazione (TG). Per la pelle fresca, la TG è di circa 50°C. Aumentando ulteriormente la temperatura il derma si scioglie formando una soluzione gelatinosa o collosa che dà il nome alla proteina, collagene appunto.

La gelatinizzazione avviene perché il calore umido causa una degradazione strutturale della proteina andando ad aprire la tripla elica che assume una forma casuale. È un processo che avviene in più fasi: inizialmente si ha un restringimento della struttura fibrosa che in seguito rimpicciolisce, mentre aumentando ulteriormente la temperatura si ha gelatinizzazione e infine la solubilizzazione del collagene. Solamente la fase di restringimento è reversibile, mentre nelle fasi successive si ha un danno irreversibile al collagene.

Tramite il processo di concia si aumenta il valore di questa temperatura che, per una pelle conciata al cromo arriva anche a valori superiori a 100°C.

Le fibre della cheratina invece, non sembrano essere influenzate da questo fenomeno.

1.2.3 Gonfiamento

Se si tratta il derma con una soluzione alcalina, si ha un incremento di volume e spessore delle fibre di collagene. Questo fenomeno, che prende il nome di gonfiamento, può essere annullato semplicemente ripristinando la neutralità. Al contrario, la cheratina a contatto con una soluzione alcalina si degrada in modo irreversibile, e questo fenomeno è sfruttato nella depilazione, un'operazione preliminare che verrà esaminata nel capitolo successivo.

2. IL PROCESSO DI CONCIA

Attenzione, il seguente capitolo farà uso di terminologia tecnica, propria del settore conciario.

Il processo di concia è uno dei più antichi procedimenti sviluppati dall'essere umano, risalente addirittura al periodo preistorico quando l'uomo si accorse che la pelle degli animali che cacciava poteva essere utilizzata come protezione dagli agenti atmosferici. Dai tempi preistorici ad oggi, ovviamente, il processo ha subito cambiamenti, miglioramenti ed innovazioni, soprattutto durante la rivoluzione industriale.

Generalmente il processo di concia prevede diverse fasi principali, le quali sono formate in genere da diversi sottoprocessi fisici, meccanici o chimici. Le fasi principali del processo sono:

- Lavori di riviera
- Concia
- Trattamenti post concia
- Rifinizione.



Figura 2.1 Sequenza del processo di concia

Tutte le operazioni chimiche, a partire dai lavori di riviera fino ai trattamenti post concia, vengono effettuate generalmente in bottale, ovvero una grossa botte ruotante attorno al proprio asse orizzontale, nel quale vengono introdotti la pelle con l'acqua e i reagenti necessari. Questa speciale "botte" è integrata di tutti i sistemi di controllo necessari per il corretto funzionamento (controllori di livello, temperatura, valvole regolatrici di portata, ...).

In genere, le lavorazioni della pelle non avvengono in tempo reale con la scuoiatura dell'animale. Le pelli, infatti, vengono conservate fino al momento del processo conciario. Questa operazione deve essere effettuata immediatamente dopo la scuoiatura per impedire lo sviluppo di batteri e microorganismi. I principali metodi di conservazione sono essiccamento e salatura. Il primo consiste nell'eliminazione dell'acqua il più velocemente possibile, in modo da determinare condizioni inadatte allo sviluppo di microorganismi. Il secondo metodo consiste nel trattare la pelle con sale comune o con una soluzione satura di sale (salamoia). Quest'ultimo metodo è il più utilizzato per le pelli bovine. Ovviamente il sale utilizzato diventerà poi un rifiuto da smaltire. La pelle che lavora il conciatore è quindi un grezzo conservato.



Figura 2.2 Bottali

2.1 Lavori di riviera o trattamenti preliminari

La pelle grezza non può essere direttamente sottoposta a concia, occorre effettuare una serie di trattamenti al fine di portarla nelle condizioni ottimali per la concia. Queste operazioni preliminari prendono il nome di “lavori di riviera” e hanno lo scopo di eliminare componenti come epidermide, lana, peli e tessuto sottocutaneo, dato che l’unico componente della pelle che interessa è il derma. Alla fine di questa fase si otterrà una pelle che è ancora molto putrescibile denominata “pelle in trippa”.

Come visto nel capitolo precedente, quando si opera con la pelle fresca (conservata), non ancora conciata, bisogna fare attenzione alla temperatura di gelatinizzazione: per questo motivo durante queste operazioni preliminari bisogna tenere sotto controllo la temperatura ed evitare che essa superi i 40°C.

I trattamenti preliminari comprendono:

- 1- Rinverdimento o ammollo
- 2- Depilazione e calcinazione
- 3- Scarnatura e spaccatura
- 4- Decalcinazione e macerazione
- 5- Piclaggio
- 6- Sgrassaggio.

Tutte queste operazioni vengono effettuate in genere in bottale.

2.1.1 Rinverdimento o ammollo

È la prima operazione dei lavori di riviera, durante la quale la pelle viene trattata in bottale con molta acqua con lo scopo di riportarla allo stato di idratazione che aveva quando l’animale era in vita; ha anche lo scopo di pulire la pelle in superficie eliminandone il sudiciume e rimuovendo il sale utilizzato per la conservazione. Inoltre, si ha un inizio di solubilizzazione delle proteine interfibrillari in modo da rendere più semplici le successive operazioni.

Questa operazione è importante perché permette la successiva penetrazione delle sostanze concianti all'interno della pelle; infatti, il trasporto delle sostanze chimiche può avvenire solamente quando la pelle è satura di acqua.

2.1.2 Depilazione e calcinazione

Storicamente le fasi di depilazione e messa in calce (idrolisi alcalina) venivano effettuate contemporaneamente, oggi invece si cerca sempre più spesso di separare queste due operazioni in modo tale da poter recuperare il pelo e la lana.

La depilazione consta nella rimozione del pelo e dell'epidermide e può essere effettuata tramite metodi chimici o enzimatici.

La calcinazione avviene trattando la pelle con idrossido di calcio: tramite questa operazione si ottiene un allentamento e un gonfiamento delle fibre della pelle in modo tale da permettere l'assorbimento dei prodotti chimici utilizzati durante il processo conciario.

Alla fine di questa operazione si ottiene una pelle privata del pelo e dell'epidermide, con una struttura fibrosa gonfia, più rilassata e senza i grassi che vengono rimossi grazie ad una reazione di saponificazione. Si ha, inoltre, la rimozione delle proteine solubili.

2.1.3 Scarnatura e spaccatura

La prima è un'operazione meccanica per rimuovere il tessuto sottocutaneo.

La seconda invece è una conseguenza del gonfiamento che avviene durante la messa in calce. Dato il considerevole aumento di spessore, infatti, la pelle può essere spaccata in strati (in genere due) paralleli alla superficie. Ciò avviene mediante un'operazione meccanica, nella quale una lama a nastro taglia la pelle in due parallelamente alla superficie. Si ottengono in questo modo due strati, uno superficiale denominato strato fiore e uno interno denominato crosta. L'operazione di spaccatura è necessaria per le pelli di grandi dimensioni come quelle bovine, mentre non viene normalmente effettuata sulle pelli più piccole come quelle di ovini e caprini.

2.1.4 Decalcinazione e macerazione

Dopo la calcinazione, la pelle si presenta gonfia e con un pH elevato, pertanto, decalcinazione e macerazione hanno lo scopo di neutralizzare e rilassare la pelle.

La decalcinazione serve come preparazione per la macerazione; come facilmente intuibile dal nome, in questa fase si ha l'allontanamento della calce usata nell'idrolisi alcalina, con conseguente sgonfiamento della pelle e diminuzione del suo pH, che passa da 12,5 a circa 8,5, valore ottimale per l'attività degli enzimi nella fase di macerazione. Per effettuare questa neutralizzazione si utilizzano acidi deboli come l'acido lattico e sali che danno dissociazione acida come i sali di ammonio.

La macerazione è un'operazione enzimatica e consta nel rilassamento della struttura fibrosa tramite l'azione di enzimi proteolitici che vanno a degradare le proteine non strutturali. In questo modo si favorisce la rimozione della melanina, dei resti di pelo, dell'epidermide e dei grassi non totalmente rimossi dalle operazioni precedenti.

2.1.5 Piclaggio

L'operazione serve per preparare la pelle per il processo di concia al cromo. Al momento della concia, il pH della pelle in trippa deve essere al di sotto del punto isoelettrico in modo che i gruppi carbossilici del collagene non risultino carichi e non interagiscano con il conciante, per permettere l'iniziale penetrazione dei sali di cromo nella pelle. In questa operazione, quindi, viene diminuito il pH ad un valore di circa 2: in questo modo si interrompe anche l'azione enzimatica del processo di macerazione. A tal fine si tratta la pelle con acido solforico in quantità pari a circa l'1% del peso della pelle, per evitare il rigonfiamento acido si aggiunge al bagno del cloruro di sodio (10% del peso della pelle). Questo trattamento favorisce, nella successiva fase di concia, la distribuzione e ripartizione dei sali di cromo nei vari strati della pelle, perché una distribuzione non adeguata porterebbe a eccessi di cromo sulla superficie del cuoio.

2.1.6 Sgrassaggio

È l'operazione che serve per eliminare il grasso residuo, soprattutto nelle pelli suine ed ovine dove l'eccesso di grasso potrebbe causare un cattivo assorbimento dei prodotti chimici concianti. Il metodo maggiormente utilizzato consta nell'utilizzo di tensioattivi che possono essere anionici, cationici, non ionici o anfoteri, tra questi i migliori sono quelli non ionici o i cationici. Alla fine di questo processo, le pelli in trippa vengono lavate abbondantemente e sono pronte per essere conciate.

2.2 Concia

La concia viene definita come:

“La stabilizzazione delle proteine della pelle in seguito a trattamento con un prodotto chimico conciante che, superate tutte le difficoltà di penetrazione e di accesso ai siti reattivi della pelle, per reazione chimica irreversibile con il collagene genera legami trasversali tra catene peptidiche vicine con conseguente aumento della TG del collagene, maggiore resistenza della pelle alla digestione proteolitica e possibilità di essiccamento senza che il prodotto finale diventi corneo.”

La pelle in trippa, infatti, si presenta ancora come un materiale facilmente biodegradabile e con scarsa resistenza all'acqua e al calore. Dopo il processo di concia, il collagene reticola e la pelle diventa imputrescibile, con una minor capacità di gonfiamento, una maggior resistenza meccanica e con una elevata stabilità idrotermica (per stabilità idrotermica si intende la resistenza di un materiale al calore umido). Si ha infatti un aumento della temperatura di gelatinizzazione che, dopo la concia al cromo, si attesta intorno ai 100°C.

Durante questo processo, le pelli vengono trattate con prodotti chimici che si legano in modo irreversibile con il collagene, trasformando i gruppi liofili in gruppi liofobi e creando reticolazioni nelle catene polipeptidiche. Affinché questo avvenga, questi prodotti chimici, chiamati concianti, devono essere in grado di legarsi ai siti reattivi del collagene, con un meccanismo di reazione che varia in base al tipo di conciante utilizzato. I concianti organici, per esempio, si legano al collagene mediante legami, ionici; ad idrogeno o dipolo-dipolo. I concianti inorganici come i sali di cromo si legano invece tramite legame coordinato nel quale il doppietto elettronico è fornito da uno dei due atomi che partecipano al legame. Infine, il legame covalente tra i gruppi funzionali del conciante e del collagene è caratteristico della concia per condensazione che utilizza come agenti concianti formaldeide, oli e solfocloruri. È

importante sottolineare che il meccanismo specifico del processo non è ad oggi del tutto conosciuto, soprattutto perché lo studio della chimica conciaria è estremamente costoso.

Sono quindi possibili diversi tipi di concia con diversi tipi di legame sul collagene. Ogni processo di concia influenza in modo diverso la temperatura di gelatinizzazione, essendo questa legata al numero e al tipo di legami trasversali che si vengono a creare tra le catene di collagene.

Tipo di concia	Legame formato	Temperatura di gelatinizzazione
Concia all'olio	Covalente	60-70 °C
Concia all'allume	Coordinato	65-75 °C
Concia vegetale	A ponte idrogeno	70-85 °C
Concia alla formaldeide	Covalente	80-90 °C
Concia al cromo	Coordinato	100 °C o superiori

Tabella 2.1 Alcuni tipi di concia con i legami creati e le relative temperature di gelatinizzazione in ordine crescente [7]

La concia vegetale è la più antica e in origine era l'unico tipo di concia praticata. Oggi è meno utilizzata e viene impiegata per lo più per cuoi da suola. Essa utilizza tannini vegetali.

La concia al cromo è attualmente la più utilizzata ed è quella che porta alla temperatura di gelatinizzazione maggiore; a differenza della concia vegetale, quella al cromo dà cuoi leggeri e altera solo in minima parte la struttura del collagene. Inoltre, a differenza della concia vegetale, quella al cromo rende il cuoio più idrofobo. Può essere usata per produrre qualsiasi tipo di cuoio, ad eccezione dei cuoi per soles di calzature. Si stima che circa il 90% della produzione mondiale di cuoio sia attraverso questo tipo di concia.

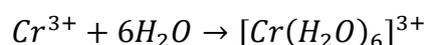
In questo lavoro di tesi, viene presa in considerazione e descritta solo la concia al cromo perché l'azienda che ha fornito i dati tratta esclusivamente pelli conciate al cromo.

2.2.1 Concia al cromo

Il cromo (Cr) è un metallo di transizione molto duro e fragile, di colore grigio, con massa atomica 52,01 u, numero atomico 24 e stati di ossidazione +2, +3 e +6. Può reagire con acidi non ossidanti (acido cloridrico, solforico e fluoridrico) sviluppando idrogeno e formando sali di colore blu-violetto. I sali di cromo più diffusi e di interesse per il processo di concia sono quelli corrispondenti agli stadi di ossidazione +3 (Cr(III)) e +6 (Cr(VI)).

L'ossido del cromo esavalente, CrO₃ si forma a partire dall'acido cromico, ha quindi un comportamento acido. L'ossido del cromo trivalente, Cr₂O₃ è il più stabile, per tale ragione gli altri ossidi tendono a trasformarsi in questo se lasciati a contatto con l'aria o riscaldati. Può funzionare sia da base e formare sali con gli acidi sia da ossido acido formando i cromiti.

La forma che interessa al conciatore è quella trivalente, data la sua capacità di formare complessi con i gruppi carbossilici del collagene. Lo ione Cr³⁺ a contatto con acqua forma lo ione esacquocromo:



Questo particolare ione può andare incontro a una deprotonazione quando l'acqua legata al cromo viene sostituita con ioni ossidrilici formando un sale basico:

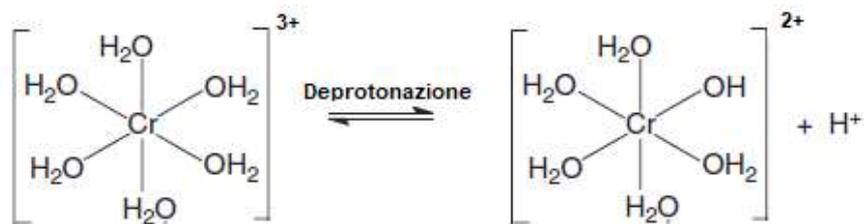


Figura 2.3 Reazione deprotonazione dello ione esacquocromo

Essendo una reazione di equilibrio, può essere modificata e spostata: aggiungendo alcali, aumentando quindi la basicità, si sposta l'equilibrio verso destra (basificazione).

Se la soluzione di ioni e sali basici viene lasciata invecchiare o viene riscaldata, si formano ponti OH tra gli atomi di cromo che prendono il nome di ponti olo, ovvero ponti OH tra gli atomi di cromo:

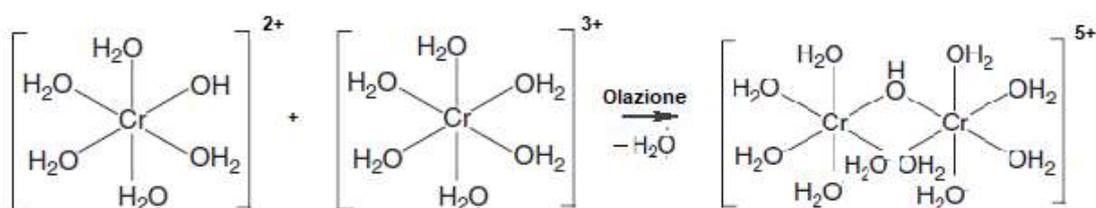


Figura 2.4 Reazione di olazione

Questo processo, che prende il nome di olazione, può anche portare alla formazione di più ponti oli tra due atomi di cromo, formando quindi complessi polinucleari. Tuttavia, per limiti sterici non è possibile avere più di tre ponti olo tra due atomi di cromo.

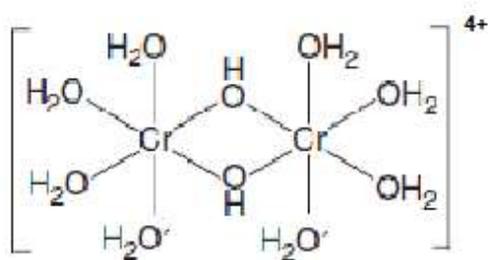


Figura 2.5 Due complessi cromo legati da due ponti olo

Con il passare del tempo i ponti olo si trasformano nei più stabili ponti oxo ovvero ponti ossigeno, con eliminazione di H^+ e aumento di acidità.

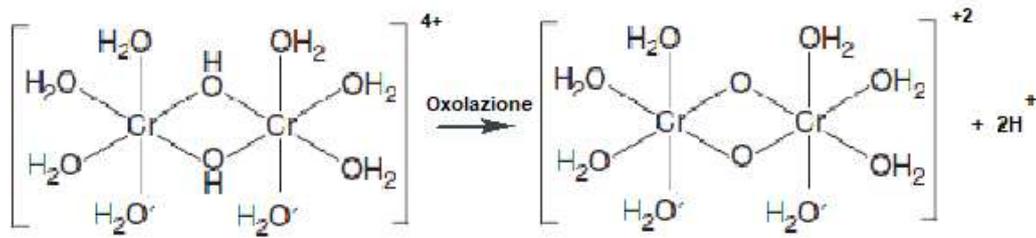


Figura 2.6 Reazione di oxolazione

Oltre ai gruppi ossidrilici, possono entrare nel complesso anche altri gruppi ionici, rendendo la carica a seconda dei casi cationica o anionica.

Queste sono le reazioni tipiche del cromo trivalente, che nel processo di concia viene utilizzato sotto forma di solfato basico di cromo (III) nella seguente forma:

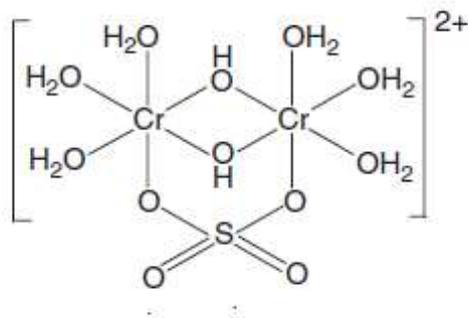


Figura 2.7 Solfato basico di cromo (III) utilizzato nella concia al cromo

Nel processo di concia il legame tra collagene e cromo avviene con l'ingresso nel complesso al cromo dei gruppi carbossilici liberi del collagene, ovvero quelli che si trovano alla fine delle catene laterali dell'acido glutammico e dell'acido aspartico attraverso la reazione di olazione.

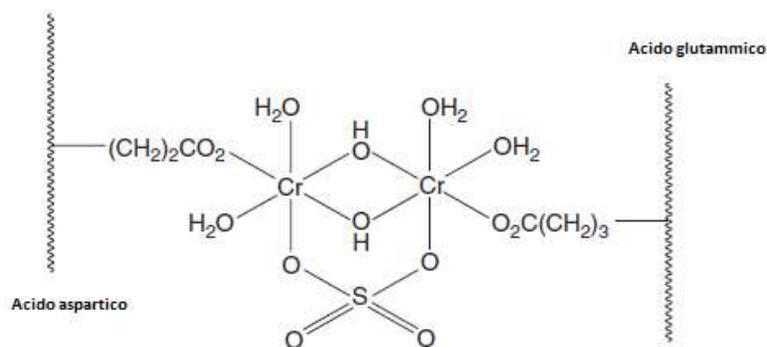


Figura 2.8 Reazione di concia nel collagene

I gruppi carbossili possono legarsi allo ione esacquocromo solo se ionizzati, i carbossili non ionizzati non reagiscono, il valore del pH è quindi molto importante: ecco perché si utilizzano soluzioni basiche per la concia.

Si crea in questo modo una reticolazione tra due o più catene polipeptidiche dato che generalmente i due amminoacidi appartengono a catene diverse. Il meccanismo può quindi essere riassunto come: *“la creazione di complessi legami covalenti tra gruppi carbossilici del collagene, in particolare i gruppi carbossilato ionizzati e i complessi molecolari del cromo (III).”*

Tutti questi eventi vanno a modificare il punto isoelettrico della pelle, che per quella conciata al cromo risulta essere tra 6 e 7.

La metodologia più utilizzata ad oggi è la concia ad un bagno, nella quale le pelli in trippa vengono trattate in un bottale con sali basici di cromo trivalente in un'unica operazione. Normalmente si usa il 2,2% - 4,4% di Cr_2O_3 e l'80 %-100% di acqua sul peso della pelle in trippa. Inizialmente le soluzioni di cromo con le quali viene trattata la pelle hanno bassa basicità e, di conseguenza, maggior potere di penetrazione; in seguito, con il procedere delle reazioni di olazione aumenta la basicità del bagno, grazie anche alla graduale aggiunta di alcali una volta raggiunto il grado di penetrazione voluto, viene quindi incrementata la reattività (astringenza).

Il processo ha una durata circa di 8-10 ore. Dopodiché le pelli vengono poste a cavalletto per 12-18 ore per completare la fissazione del cromo e scolare l'eccesso del bagno. Durante questo periodo i ponti olo si trasformano in ponti oxo, aumentando l'acidità del cuoio. Si rende quindi necessaria una neutralizzazione, prestando però attenzione che il pH del cuoio non sia superiore a 5. Per fare ciò si tratta il cuoio alla fine del processo con sali debolmente basici.

L'efficacia del processo di concia è influenzata da molteplici fattori, tutti si riconducono però ad un unico parametro ovvero la velocità di penetrazione vs velocità di reazione. Ci sono tre casi possibili:

- 1) Velocità di penetrazione superiore alla velocità di reazione: situazione tipica all'inizio del processo, essendo la velocità di penetrazione maggiore di quella di reazione si ha la permeazione del sale in tutta la pelle, con conseguente colorazione di questa; tuttavia, il sale non risulta essere fisso.
- 2) Velocità di penetrazione uguale alla velocità di reazione: situazione ideale porta ad una fissazione e colorazione uniforme del sale attraverso la pelle.
- 3) Velocità di penetrazione inferiore alla velocità di reazione: situazione tipica alla fine del processo, in questo caso il sistema è troppo reattivo (astringente), ciò porta ad una fissazione superficiale eccessiva.

A seconda delle condizioni operative e dei pretrattamenti si va a modificare la penetrazione e l'astringenza dei sali di cromo ottenendo quello che sarà il prodotto finale, nello specifico:

- Pretrattamenti: la calcinazione e il gonfiamento alcalino incrementano la possibilità del collagene di formare legami col cromo incrementando quindi l'astringenza. Il piclaggio, al contrario, causa deionizzazione dei gruppi COO^- dovuta all'aggiunta di acido, diminuisce la reattività favorendo quindi la penetrazione del cromo nella pelle. Questo trattamento è quindi importante per assicurare un'adeguata distribuzione del sale in tutta la pelle.
- pH: i sali di cromo sono basici, e la basicità deve essere regolata in base al piclaggio. Una basicità troppo bassa limita la capacità di reazione, si ottiene quindi un fiore morbido ma vuoto. Al contrario una basicità troppo elevata (maggior pH) va ad

aumentare le dimensioni dei complessi di cromo diminuendo la penetrazione e aumentando l'astringenza (ionizzazione dei gruppi carbossilici liberi), in questo caso si ottiene una pelle con gli strati interni poco conciati.

- Sali neutri e mascheranti: la presenza di sali neutri limita il gonfiamento della pelle permettendo una maggior penetrazione del sale conciante. Un eccesso di sale però andrebbe a ridurre la reattività, allungando i tempi necessari per la concia e rischiando di produrre un cuoio vuoto, o comunque più leggero. Questo fenomeno prende il nome di mascheramento: questi sali possono agire da mascheranti poiché avendo la capacità di entrare nel complesso cromo entrano in competizione con i gruppi reattivi del collagene per i legami con lo stesso.
- Temperatura: in media le temperature del processo oscillano tra i 18 e i 25°C, durante la concia però si sviluppa calore che può far alzare la temperatura di qualche grado. Aumentando la temperatura, si incrementa la velocità della reazione di olazione aumentando l'astringenza.
- Concentrazione: aumentando la concentrazione dei sali di cromo, aumenta la capacità di penetrazione, in caso di bagno troppo diluito si rischia di avere una distribuzione non uniforme con il cuoio conciato solamente in superficie (astringenza troppo elevata). Anche in questo caso inizialmente si avrà cromo in eccesso per una maggior penetrazione, e successivamente con la diminuzione della sua concentrazione nel bagno si avrà maggior reattività.
- Tempo: l'assorbimento del cromo avviene in maniera molto rapida all'inizio del processo, che in genere dura dalle 5 alle 10 ore. Tuttavia, dopo questo periodo di tempo la pelle va lasciata riposare per una notte a cavalletto per permettere al cromo di reagire e fissarsi anche negli strati più interni della pelle.

Una volta terminato il processo di concia occorre smaltire i sali di cromo presenti nelle acque di scarico, essendo questi dannosi per l'ambiente. Avendo questi sali un valore economico non indifferente si cerca di recuperarli, aggiungendo al bagno, previa filtrazione, una base forte in modo da far precipitare il cromo sotto forma di idrossido. Il precipitato viene poi recuperato grazie ad una filtropressa e ridisciolto con acido solforico, ottenendo quindi solfato di cromo pronto per essere riutilizzato.

2.3 Trattamenti post concia

Il cuoio che si ottiene dopo il processo di concia si presenta umido e di colore azzurro chiaro e prende il nome di "*wet blue*". La pelle a questo punto non ha ancora le caratteristiche per essere utilizzata come prodotto finito: deve ulteriormente subire una serie di processi che la trasformeranno in un prodotto di valore, conferendogli specifiche proprietà prestazionali. Questi processi possono essere effettuati dalla stessa azienda che ha effettuato la concia, oppure il cuoio *wet blue* può essere venduto ad una seconda azienda che si occupa esclusivamente dei processi post concia. La sequenza di questi trattamenti prevede: riconcia, tintura, ingrasso e rifinitura, anche se questa può essere considerata come un trattamento a sé stante.

In queste operazioni vengono utilizzati diversi reagenti, e come nel processo di concia bisogna quindi considerare diversi aspetti quali: la competizione tra reazione e penetrazione, il grado e l'uniformità di penetrazione, la velocità di reazione e l'affinità del reagente al substrato.

2.3.1 Riconcia

È un processo che prevede un ulteriore trattamento con agenti concianti per conferire proprietà e caratteristiche desiderate alla pelle. Si può utilizzare lo stesso agente conciante del processo principale oppure uno diverso a seconda delle caratteristiche volute. La riconcia più comune della pelle *wet blue* prevede nuovamente l'utilizzo di sali di cromo. La concentrazione di sali di cromo nella riconcia è circa l'1% rispetto al peso della pelle, è quindi meno della metà della concia principale e anche la durata è minore, circa un'ora. Questo fa in modo che gli effetti della riconcia siano molto meno marcati rispetto a quelli del procedimento originale e che l'effetto sia per lo più superficiale. La temperatura di contrazione subisce un aumento minimo e praticamente non è influenzata da questo processo. La fissazione del cromo sarà minore rispetto alla concia vera e propria. Una maggior fissazione del cromo comporta una maggior morbidezza e un maggior riempimento della pelle senza l'utilizzo di reagenti esterni, tuttavia anche questo effetto sarà minimo.

La riconcia è efficace nell'uniformare il colore e nella modifica della reattività della pelle. L'uniformazione del colore ha valore prettamente estetico e viene effettuata soprattutto quando la pelle *wet blue* viene acquistata da aziende diverse. Per quanto riguarda la reattività della pelle, l'assorbimento di altro cromo porta alla formazione di ulteriori siti cationici sfruttabili per la fissazione dei reagenti anionici, utilizzati nei processi successivi. Inoltre, in questo modo si avrà uno spostamento del punto isoelettrico a valori di pH maggiori, in modo tale che la pelle risulti per ogni valore di pH maggiormente positiva (cationica) o comunque meno negativa (anionica) rispetto al *wet blue* originale, comportando un'ulteriore affinità verso i reagenti anionici: proprio questo spostamento dell'IEP è l'effetto principale della riconcia.

2.3.2 Tintura

È il processo che conferisce colore alla pelle, in tutto lo spessore o solamente in superficie. È una fase della lavorazione estremamente importante perché in genere il colore è la prima proprietà che viene notata dal consumatore. Il risultato di questo dipenderà dalla chimica dei coloranti e del substrato e soprattutto dal tipo di concia e dagli eventuali trattamenti subiti in precedenza dalla pelle.

Il colore di un corpo è la risultante delle radiazioni non assorbite del corpo stesso; nei coloranti il colore è generato da sistemi con elettroni delocalizzati, chiamati gruppi cromofori.

La delocalizzazione elettronica avviene in molecole che contengono doppi legami alternati, in questo caso si ha la sovrapposizione di diverse strutture elettroniche limite chiamate strutture di risonanza, che "non esistono realmente", quella che esiste è una struttura ibrida che prende il nome di ibrido di risonanza con caratteristiche intermedie, nella quale gli orbitali p dei legami doppi creano un orbitale molecolare su tutta la struttura, gli elettroni sono quindi delocalizzati su tutta la molecola. È importante sottolineare che l'ibrido di risonanza corrisponde al minimo energetico e quindi alla maggior stabilità.

La delocalizzazione elettronica può essere modificata inserendo sostituenti su gruppi cromofori aromatici che prendono il nome di gruppi auxocromi, in questo modo si modifica l'energia dell'orbitale molecolare e quindi l'energia per eccitarlo e quella che viene rilasciata quando l'elettrone ritorna nel suo stato fondamentale: in questo modo si modifica il colore. Per quanto riguarda il cuoio, gli auxocromi reagiscono con il substrato collagenico conferendogli il colore.

Il principio sopra descritto è lo stesso per tutti i tipi di coloranti (acidi, basici, a mordente, azoici, reattivi, ...); quelli maggiormente utilizzati nella concia al cromo sono i coloranti acidi, chiamati in questo modo poiché vengono fissati in condizione acide. Sono molecole piccole e

idrofile, hanno carica anionica e quindi elevata affinità per la pelle cationica, reagiscono generalmente per reazione elettrostatica tramite i gruppi solfonato e i gruppi amminici della lisina. Vengono utilizzati per tintura con elevato grado di penetrazione e danno luogo a sfumature uniformi con ampia gamma di colori e tonalità luminose e profonde.

Di grande importanza sono anche i coloranti basici la cui struttura è simile a quella dei coloranti acidi ad eccezione che presentano una carica positiva, sono caratterizzati quindi dalla presenza di un gruppo cationi e avranno affinità con pelli anioniche. Sono coloranti idrofobi che reagiscono tramite reazione elettrostatica sui gruppi carbossilici ionizzati del collagene. Producono colori forti e brillanti con una tendenza al metallico. Vengono utilizzati su cuoi vegetali o per effettuare la rimonta basica su cuoio al cromo e precedentemente tinto con coloranti acidi.

La tintura può avvenire secondo diverse modalità:

- In bottale: è il metodo tradizionale, avviene in un semplice bottale munito di sporgenze o poli, dove avviene un'azione meccanica di sbattimento. Si ha uno scarso controllo della temperatura e del pH.
- Tintura a spazzola: utilizzata per cuoi tinti al vegetale e asciutti, il colorante viene passato sul cuoio inumidito con acqua con due passate leggere.
- Tintura a spray: simile a quella a spazzola, da uniformità di tinta ma bassa penetrazione.

2.3.3 Ingrassio

Lo scopo dell'ingrasso è rivestire con uno strato di grasso ad azione lubrificante le fibre, separandole le une dalle altre in modo tale da permettere il loro scorrimento relativo. Se così non fosse, dopo l'essiccamento le fibre si compatterebbero diventando rigide e fragili. Tramite questa operazione diminuisce l'attrito tra le fibre che potendo scorrere risultano più morbide, flessibili e resistenti. Inoltre, poiché questi prodotti lubrificanti vanno a riempire gran parte degli spazi interfibrillari migliora l'impermeabilità del cuoio. È quindi fondamentale che questa operazione venga effettuata dopo la tintura, altrimenti a causa della scarsa bagnabilità conferita da questo trattamento non si avrebbe la penetrazione del colorante.

Al tal fine vengono impiegati trigliceridi (grassi di origine animale o vegetale) parzialmente solfonati o solfatati. La parte "oleosa" è l'agente effettivamente lubrificante mentre la parte solforosa funziona da emulsionante, mantiene l'olio in sospensione e lo trasporta in questo modo nella pelle.

Il meccanismo può essere riassunto in quattro semplici passaggi:

- 1- Trasporto dell'olio nella pelle sotto forma di emulsione.
- 2- Interazione emulsione-pelle (si ha l'annullamento del potere emulsionante).
- 3- Deposizione dell'olio sulla struttura delle fibre.
- 4- Essiccazione e rimozione dell'acqua.

Analogamente a quanto avviene nelle fasi precedenti si hanno anche in questa operazione due parametri influenti:

- Penetrazione e distribuzione delle emulsioni nella pelle.
- Rottura delle emulsioni nei bagni di ingrasso

Per ottenere risultati degni di nota, la velocità di rottura delle emulsioni deve essere minore o uguale alla velocità di penetrazione. Anche in questo caso, queste due velocità variano in base alle diverse possibili condizioni operative.

Per avere una distribuzione omogenea e una profonda penetrazione occorre per esempio lavorare a valori del pH intorno al punto isoelettrico della pelle (si ricorda che l'IEP dipende dalle operazioni subite dalla pelle dopo la concia, in particolare dalla riconcia), in condizioni acide le emulsioni sono meno stabili che vicino al punto isoelettrico o in ambiente alcalino. Aumentando invece la temperatura si ha diminuzione del potere penetrante, questo perché all'aumentare della temperatura aumenta la velocità di reazione tra grasso e fibra, di solito questa operazione viene svolta tra i 40 e i 70°C.

Anche le dimensioni delle gocce di emulsione influenzano la capacità di penetrazione. Le dimensioni dipendono dal grado di conversione dell'olio nel suo solfo derivato, maggiore sarà la frazione solfonata o solfatata e più le particelle di emulsione saranno fini. Normalmente si opera con un 50% di olio neutro, 25% di frazione solforosa e 25% di acqua, in questo modo si ottengono emulsioni con gocce di dimensioni di circa 30 nm. Variando queste dimensioni, si può variare il grado di penetrazione dell'ingrasso: emulsioni fini hanno maggior potere di penetrazione, mentre emulsioni più grossolane producono un ingrasso per lo più superficiale. Bisogna però fare attenzione a non esagerare con il grado di solfonazione/solfatazione per non creare cuoi troppo allentati e spugnosi.

Questa operazione avviene normalmente in bottale o in aspo, ma quest'ultimo richiede condizioni di lavoro più difficili e tempi più lunghi. Terminata l'operazione di ingrasso, il cuoio viene lasciato riposare una notte a cavalletto in modo da garantire un fissaggio ottimale.

2.3.4 Essiccamento

L'essiccamento è il processo tramite il quale piccole quantità di acqua vengono allontanate dalla pelle. Può essere effettuato semplicemente lasciando le pelli esposte all'aria in ambiente ventilato, e introducendo aria calda che viene fatta circolare per convezione forzata.

Durante questo processo il cuoio subisce diversi cambiamenti ossia:

- Riduzione di umidità: da un 70% di acqua sul peso totale a un 16% sul peso totale, basandosi invece sul peso secco si passa da un 233% a un 19%. Un residuo di umidità finale è necessario per evitare la perdita delle molecole d'acqua strutturali che causerebbe un'eccessiva rigidità.
- Contrazione della superficie: quando si essicca il cuoio all'aria lasciandolo appeso liberamente, questo si contrae e si incurva. Questo fenomeno è dovuto alla tensione superficiale dell'acqua capillare che tende ad unire le fibre tra di loro; poiché questa forza diminuisce all'aumentare della temperatura anche la contrazione diminuisce all'aumentare della temperatura di essiccamento. Per evitare l'incurvamento del cuoio e fare in modo che rimanga piano e con un fiore liscio, lo si lascia essiccare non appeso all'aria ma disteso su una piastra piana e liscia.
- Migrazione delle sostanze solubili: l'acqua contenuta all'interno del cuoio per evaporare deve prima raggiungere la superficie esterna, portando con sé i solidi solubili che contiene, i quali però, non evaporando si accumulano in superficie. Con un essiccamento lento questi solidi hanno il tempo di penetrare all'interno del cuoio per diffusione; con un'evaporazione veloce invece, si accumulano in superficie. Dato che con la concia al cromo si hanno pochi prodotti solubili, per i cuoi conciati in questo modo non ci sono problemi di accumulo superficiale.
- Variazione del punto isoelettrico: eliminando l'acqua durante l'essiccamento, aumenta la concentrazione degli ioni solfato i quali si legheranno con gli atomi di cromo

formando dei composti con carica nulla: il punto isoelettrico sarà quindi inferiore rispetto a quello del cuoio wet blue, più precisamente il punto isoelettrico passa da valori intorno a 7 a circa 6.

- Formazione di legami tra fibre della pelle e prodotti: con l'allontanamento dell'acqua, le fibre si avvicinano tra di loro a tal punto che i gruppi ionici di carica contraria delle varie fibre possano formare legami elettrovalenti molto stabili. Inoltre, anche i gruppi reattivi ionici delle molecole di grasso risoncianti e coloranti possono formare dei legami elettrostatici con i gruppi ionici della pelle.

2.4 Rifinitzione

Lo stadio finale della lavorazione della pelle è un insieme di procedure molto complesse che vengono effettuate sulla pelle asciutta al fine di migliorare sia il lato estetico che funzionale. Più precisamente, lo scopo della rifinitzione è quella di fornire una miglior qualità merceologica mascherando i difetti e assicurando uniformità di colore e brillantezza e di migliorare le caratteristiche fisico-meccaniche della superficie come l'impermeabilità e la resistenza all'abrasione e alla luce. In particolare, viene incrementata la protezione all'umidità e all'imbrattamento del cuoio, viene egualizzata la superficie e vengono eliminati i difetti superficiali.

La rifinitzione consta nell'applicazione di prodotti chimici sulla superficie del cuoio. La natura dei prodotti usati dipende dalle caratteristiche intrinseche del cuoio stesso, dal modo in cui è stato conciato, dal tipo di eventuali difetti superficiali presenti e anche dall'uso finale a cui il cuoio è destinato. Questi prodotti prendono il nome di appretto e sono sostanzialmente soluzioni di sostanze vernicianti in acqua o in solvente. Generalmente sono costituiti da: una resina legante, con lo scopo di formare un film protettivo; un colorante; un veicolante che può essere acqua o un solvente che evaporerà con l'essiccamento e sostanze ausiliari quali plastificanti o agenti di spalmatura.

Nonostante si possano utilizzare diversi prodotti chimici, la metodologia è sempre la stessa e consta nell'applicazione di tre differenti strati di appretto:

- Strato di profondo o di impregnazione: spesso 10-15 micron, serve per preparare il cuoio a ricevere lo strato pigmentario vero e proprio, migliora la pienezza del cuoio al fine di attenuare possibili difetti superficiali.
- Strato di appretto pigmentato: viene applicato una o più volte intervallate da essiccamenti. Serve per egualizzare la superficie e conferirle un aspetto colorato ed uniforme, inoltre conferisce proprietà meccaniche quali resistenza agli sforzi di flessione e di trazione.
- Strato fissativo finale: strato molto sottile e duro, dà alla rifinitzione il suo aspetto finale e conferisce al cuoio la resistenza allo sfregamento, alla sporcizia e all'acqua.

Dopo l'applicazione di ogni strato è necessario essiccare il cuoio al fine di mantenere un livello di umidità del 15%, generalmente questo avviene in un tunnel con aria calda a circa 70-80°C.

Oltre al trattamento chimico dell'applicazione dei vari strati di appretto, esistono anche dei trattamenti meccanici, i più utilizzati sono:

- **Lissatura**: effettuata tramite una macchina chiamata lissa e composta da un cilindro di vetro che con un movimento di andirivieni strofina il cuoio provocando riscaldamento e compressione.

- **Satinatura:** trattamento che consiste nel sottoporre il cuoio ad una pressa idraulica a piastre, con lo scopo di incrementare la coesione dei tre strati di appretto, la parte superiore della pressa può essere incisa se si vuole conferire al cuoio una grana artificiale.

A questo punto il processo di concia è finito. Prima di immettere il cuoio sul mercato, devono essere effettuati test e controlli visivi al fine di verificare alcune proprietà quali: aderenza, tenuta allo strofinio, flessibilità, elasticità, impermeabilità, solidità alla luce e al calore e uniformità.

3. IMPATTI DELL'INDUSTRIA CONCIARIA

L'industria conciaria è un'importante fonte di inquinamento del suolo e dell'acqua. Utilizza più di 250 sostanze chimiche diverse, molte delle quali vengono poi rilasciate nell'ambiente.

Come spiegato nel secondo capitolo, il processo di concia maggiormente utilizzato è quello che usa sali di cromo (utilizzato da circa il 90 % delle industrie conciariae mondiali) e che produce cuoi di alta qualità; tuttavia, questo processo comporta enormi impatti ambientali.

Osservando la figura 3.1 si intuisce subito come i consumi di materie prime siano notevoli: per ottenere circa 250 kg di cuoio servono 1000 kg di pelli grezze e circa la metà di prodotti chimici, con un notevole consumo di energia. Poiché la maggior parte delle operazioni del processo conciario avviene in acqua, si ha un gran consumo di questa, che arriva anche a 50 m³ per ogni tonnellata di pelle grezza lavorata e che diventerà in seguito un refluo da smaltire (*wastewater WW*).

Solamente il 20-25% circa della pelle grezza viene quindi convertito in cuoio, la rimanente parte diventa rifiuti solidi e liquidi.

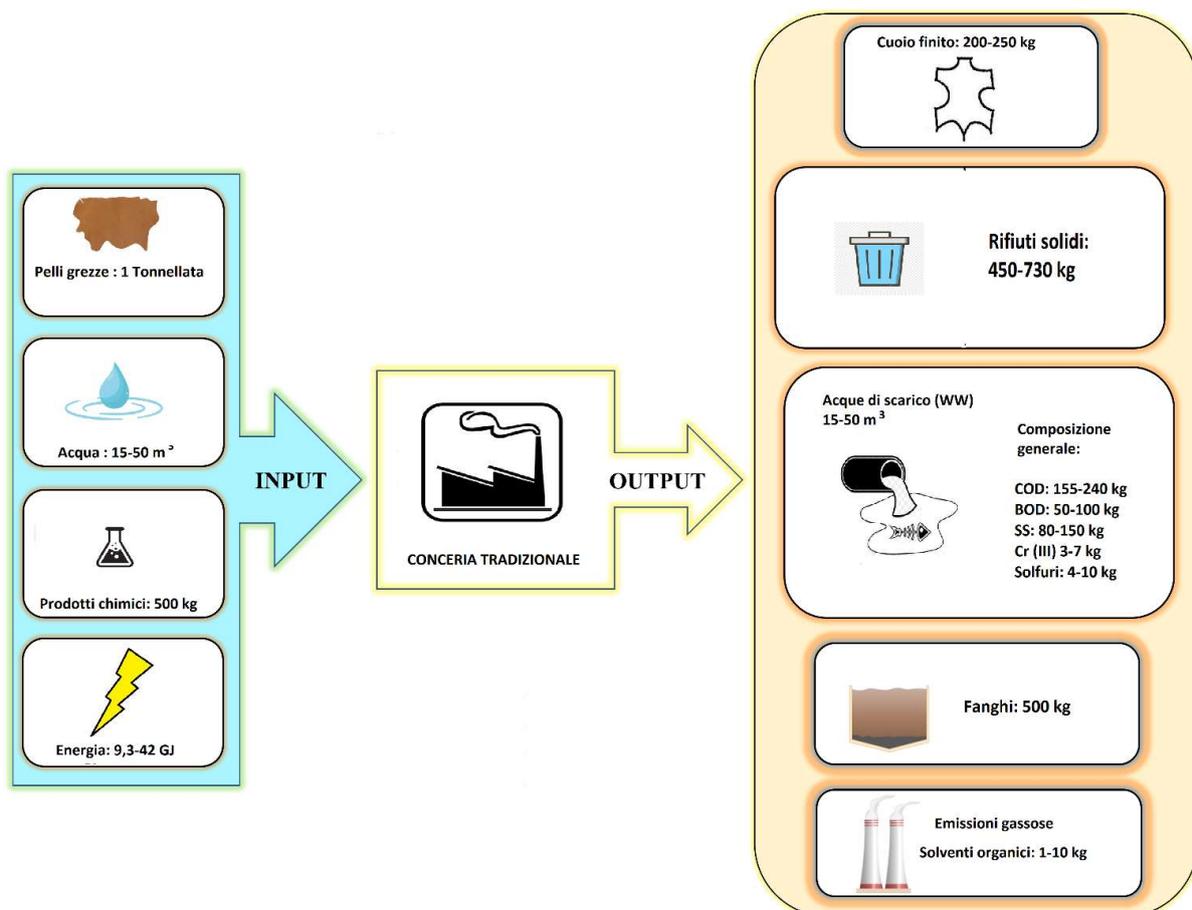


Figura 3.1 input e output dell'industria conciaria

L'enorme consumo di acqua e la relativa emissione della stessa come refluo è sicuramente uno degli aspetti di maggior rilevanza e impatto, ma non è l'unico. Come si vede dalla figura 3.1, infatti, per ogni tonnellata di pelle grezza lavorata si produce un'altrettanta tonnellata di rifiuti solidi e fanghi, quest'ultimi derivati dal trattamento delle acque di scarico. Questi rifiuti devono essere adeguatamente trattati e smaltiti, con un costo che dipende dalla loro pericolosità.

Si nota, inoltre, come il processo comprenda anche emissioni gassose, le quali, come si evince dalla tabella sottostante, derivano per lo più dalla fase di rifinitura (emissione di composti organici volatili) e dalle fasi di calcinazione e decalcinazione (emissione di ammoniaca e idrogeno solforato). In base alla composizione delle correnti gassose devono essere effettuati trattamenti in loco per il loro abbattimento, il metodo più comunemente utilizzato è l'adsorbimento su carbone attivo.

La seguente tabella illustra su quale categoria di emissione vanno ad impattare le varie fasi del processo di concia viste nel capitolo precedente (preconcia, concia, post concia e rifinitura):

Processo	Acque reflue	Emissioni gassose	Rifiuti solidi
Preconcia	X	X	X
Concia	X		X
Post Concia	X		X
Rifinitura	X	X	

Tabella 3.1: Impatti delle fasi di concia

Tra i vari sottoprocessi, quello più impattante è sicuramente quello di concia: l'80% degli inquinanti totali viene generato durante questa fase.

Come detto in precedenza le acque utilizzate nel processo di concia vengono trasformate in acque di scarico.

Le acque di scarico a causa della loro tossicità hanno un notevole impatto ambientale, in particolare causano acidificazione e riduzione della fertilità del suolo con il serio rischio di penetrazione del cromo negli strati inferiori con alterazione dell'attività microbica presente. Nelle acque superficiali sono responsabili di altrettanti danni, in quanto formano schiume, che schermano i raggi solari e provocano un difetto di ossigeno; sono responsabili dell'eutrofizzazione e causano tossicità per gli organismi che popolano le acque. Infine, ma non meno importante tutte queste sostanze sono responsabili di tossicità e cancerogenicità nell'uomo e negli animali.

Le caratteristiche delle acque di scarico di conceria variano a seconda della conceria e della sua dimensione, dei prodotti chimici utilizzati, della quantità di acqua utilizzata e del tipo di prodotto finale. La tabella 3.2 [2] illustra una media delle quantità di inquinanti prodotte per tonnellata di pelle trattata e loro le concentrazioni. Considerando un'emissione di acque reflue di 15-50 m³ per tonnellata di pelle grezza trattata, il range di concentrazione è stato ottenuto dividendo il valore minimo dell'inquinante per la portata massima (valore minimo) e il valore massimo dell'inquinante per la portata minima (valore massimo).

Inquinante	Quantità (kg/tonnellata di pelle grezza)	Concentrazione (g/L)
Solidi sospesi (SS)	80-150	1,6-10
COD	155-240	3.1-16
BOD ₅	50-100	1-6.6
Cromo (III)	3-7	0.06-0.47
Solfuri	4-10	0.08-0.67
N-NH ₄ ⁺	4-6	0.08-0.4
Azoto totale	11-18	0.22-1.2
Cloruri	115-120	2.3-8
Solfati	45-125	0.9-8.33

Tabella 3.2 Principali inquinanti presenti nelle acque reflue conciarie

La maggior parte dell'inquinamento salino deriva dalla conservazione delle pelli fresche, che dopo la scuoiatura dell'animale, devono essere conservate con enormi quantità di sale (300-400 kg di sale per tonnellata di pelle grezza). COD e BOD₅ sono influenzati da peli, epidermide e proteine non strutturali che provengono dalle fasi di rinverdimento e calcinaio. Le ammine derivano dai processi di decalcinazione, macerazione e riconcia, mentre i solfuri presenti nelle acque di scarico sono quelli che non sono stati assorbiti durante il calcinaio. Infine, il cromo deriva, ovviamente dalla concia e dalla riconcia. Oltre a questi composti sono presenti numerose sostanze in minor quantità quali: coloranti azoici; cobalto, rame; antimonio, bario, selenio; piombo; zinco; mercurio; arsenico, PCB; composti di cadmio; resine a base di formaldeide e tensioattivi come gli alchilfenoli [4,8].

I valori limite in Italia per questi inquinanti secondo il D.Lgs. 152/2006 [9] risultano essere:

Inquinante	Limiti per scarico in acque superficiali (g/L)	Limiti per scarico in fognatura (g/L)
Solidi sospesi (SS)	0,08	0,2
COD	0,04	0,25
BOD ₅	0,16	0,5
Cromo (III)	0,002	0,004
Solfuri	0,001	0,002
N-NH ₄ ⁺	0,015	0,03
Azoto totale	0,02	0,03
Cloruri	1,2	1,2
Solfati	1	1

Tabella 3.3: Limiti legislativi per lo scarico di inquinanti nelle acque superficiali e in fognatura

Come si nota dal confronto delle due precedenti tabelle, le concentrazioni di inquinanti sono sempre superiori ai limiti di legge sia per lo scarico in acque superficiali che in fogna; pertanto, le aziende conciarie devono trattare le acque di scarico. Possono effettuare questi trattamenti in loco o nella maggior parte dei casi, soprattutto per aziende non molto grandi possono mandare gli effluenti in un impianto consortile che raccoglie le acque di scarico delle varie industrie del distretto.

Se non adeguatamente trattati, questi effluenti diventano anche una fonte di contaminazione per il suolo, diventando un grave problema sia per le conseguenze sulla crescita dei vegetali ma anche per il possibile ingresso nella catena alimentare di metalli pesanti o micronutrienti. I vegetali che crescono in zone contaminate, infatti potrebbero assorbire tali contaminanti e trasferirli agli animali che si cibano di essi per arrivare in fine all'uomo. Non solo, i metalli pesanti possono anche penetrare nel suolo e raggiungere le falde acquifere. Come spiegato all'inizio del capitolo, uno di questi componenti altamente pericolosi è il cromo, che, se presente in elevate concentrazioni risulta nocivo, mutageno e cancerogeno.

L'esposizione al cromo ed altri composti tossici come piombo, zinco, cadmio e formaldeide è anche un problema per i lavoratori, soprattutto in paesi dove le norme di sicurezza sul lavoro sono meno rigide. Può portare effetti temporanei come vertigini, irritazioni e reazioni allergiche ma anche effetti a lungo termine come asma professionale, ulcere, bronchiti e difetti genetici [8].

Questi ultimi due aspetti, trattamenti di effluenti non efficienti e scarsa sicurezza sul lavoro, riguardano i paesi in via di sviluppo verso i quali parte dell'industria conciaria è stata trasferita dato il costo minore della manodopera e una legislazione ambientale e in ambito di sicurezza sul lavoro meno stringente. In questi paesi molte aziende utilizzano ancora metodi di lavorazione antiquati e quindi molto impattanti a livello ambientale. L'industria conciaria rappresenta infatti la principale causa dell'inquinamento da cromo in India, Pakistan, Burkina Faso, Sud Africa, America Latina, Etiopia e Sudan [8,10].

Per concludere il capitolo, si pone all'attenzione del lettore che i valori e dati presentati nelle figure e nelle tabelle che sono già di per sé molto elevati, sono riferiti alla lavorazione di una tonnellata di pelle. Si stima che annualmente a livello globale le concerie lavorino circa 17 milioni di tonnellate pelli l'anno, generando più di 600 milioni di m³ di acque reflue e scaricando nell'ambiente più di 350 milioni di m³ di acque trattate contribuendo al 40% dell'inquinamento globale da cromo [11].

4. DATI DELL'AZIENDA STUDIATA

L'azienda oggetto di studio si trova in India e si occupa del processo di post-concia: partendo da pelli conciate al cromo (*wet blue*), produce cuoi pronti all'uso e generalmente destinati all'industria delle calzature e di manufatti in cuoio.

Si ricorda che le fasi del processo di riconcia delle pelli conciate al cromo sono le seguenti:



Figura 4.1 Operazioni di post-concia

Per poter effettuare le analisi di sostenibilità di questo processo, l'azienda ha fornito dati riguardanti consumi ed emissioni e riportati nella tabella successiva.

Parametro	Quantità
Pelli trattate	949554 m ² /anno
Ore lavorate	2344 ore/anno
Consumo di acqua totale	46240 m ³ /anno
Energia termica	2.1*10 ⁵ kcal/anno (energia solare)
Energia elettrica	1187685 kWh/anno
Acque di scarico generate	5 m ³ /ora
Fanghi prodotti	10 t/anno

Tabella 4.1 Principali dati dell'azienda

L'azienda lavora tutto l'anno per un totale di 2344 ore annue e tratta in questo arco di tempo 949554 m² di pelli *wet blue* che vengono convertite in cuoi da tomaia (essendo pelli già conciate non si ha perdita di materiale), consumando circa 46240 m³ di acqua. Il consumo elettrico si attesta intorno ai 1187685 kWh/anno, mentre per quanto riguarda l'energia termica per i diversi processi e per il riscaldamento interno, l'azienda utilizza solamente energia solare (2,1 *10⁵ kcal) senza necessità di impiegare metano.

Secondo quanto dichiarato dall'azienda, si ha la produzione di 10 tonnellate l'anno di fanghi e di 5 m³ l'ora di acque di scarico, che moltiplicate per le ore annue di lavoro corrispondono a 11720 m³ l'anno. Questa quantità viene mandata all'impianto consortile per la depurazione.

Nonostante non sia il caso studiato, l'operazione di mandare le acque reflue di un certo settore industriale in consorzi comuni per il loro trattamento (CETP) è tipica delle aziende di piccole dimensioni. Le concerie sono di solito un insieme di piccole industrie situate nello stesso distretto e singolarmente non dispongono di adeguate risorse finanziarie per il trattamento degli effluenti.

L'azienda utilizza anche diversi composti chimici, i principali sono:

Composto	Consumo annuo (kg)
<i>Fatliquor</i> generico 1	1980
Acido formico	1800
Formiato di sodio	850
<i>Fatliquor</i> generico 2	3000
Resina acrilica	2000
Solfato basico di cromo	2300
Resina melaminica senza formaldeide	2500

Tabella 4.2 Principali composti chimici utilizzati

I *fatliquors* e le due resine sono stati forniti con i nomi propri dei prodotti, che non vengono riportati. Tramite ricerca da cataloghi si è risaliti ai diversi composti:

- Il polimero acrilico utilizzato dall'azienda risulta essere una resina acrilica utilizzata nella riconcia delle pelli conciate al cromo.
- La seconda resina utilizzata è melaminica ed è priva di formaldeide. Viene impiegata nel processo di riconcia. Questo prodotto, rispetto alle classiche resine a base di formaldeide, oltre a garantire pelli prive di questa sostanza porta ad avere cuoi con caratteristiche migliori e con una maggior tenuta. L'utilizzo di questo prodotto è sicuramente una nota di merito per l'azienda, visto che molte industrie conciarie utilizzano ancora prodotti a base di formaldeide.
- Vengono utilizzati due *fatliquors* nella fase di ingrasso. In particolare, il primo è un estere solfitato a base di materie prime naturali, utilizzato per pelli molto morbide destinate all'abbigliamento e alle calzature.

Infine, l'impianto è dotato di due camini, le cui caratteristiche e le relative emissioni sono riassunte nella seguente tabella.

	Camino 1	Camino 2
Diametro	0.46 m	0.10 m
Temperatura ambiente	32 °C	32 °C
Temperatura camino	128 °C	147 °C
Velocità del gas	11.79 m/s	17.15 m/s
Emissioni gassose	5231 Nm ³ /hr	472 Nm ³ /hr
Particolato (≥10 µm)	26.2 mg/Nm ³	0.061 g/kWh
NO _x	25.8 mg/Nm ³	0.24 g/kWh
SO ₂	12.5 mg/Nm ³	BDL (D.L =3,0 mg/Nm ³) *
CO	BDL (D.L.=0.2%) *	BDL (D.L = 0,2%) *
CO ₂	5,4% in volume	3,7 % in volume
O ₂	15,6 % in volume	16,4 % in volume
Idrocarburi	BDL (D.L=1%) *	BDL (D.L.=1%) *
<i>*La sigla BDL (Below Detection Limit) indica un valore inferiore al limite di rilevabilità</i>		

Tabella 4.3 Dati relativi ai camini dell'azienda

I dati riguardanti i camini così proposti necessitano di alcuni calcoli per poter essere utilizzati.

CAMINO 1

Il primo camino è quello di dimensioni maggiori e presenta un diametro di 0,46 m. Il flusso di emissioni gassose corrisponde a 5231 Nm³/hr, e considerando il totale delle ore annue di lavoro pari a 2344 si avrà un flusso annuo di 12261464 Nm³. Questo dato è molto importante per il calcolo delle quantità di inquinanti.

Moltiplicando la portata annua per le concentrazioni di particolato, NO_x e SO₂ si ottengono infatti le quantità di questi composti emessi annualmente, pari a circa 321,25 kg di particolato, 316,3 kg di NO_x e 153,3 kg di SO₂.

La percentuale di CO₂ nella corrente uscente corrisponde ad un flusso di 282,9 Nm³/hr ovvero 663098,8 Nm³/anno, mentre il 15,6 % di ossigeno corrisponde ad un flusso di 1912788,4 Nm³/anno.

È conveniente ora uniformare questi valori in termini massici. Per trovare questo valore bisogna dividere in Nm³ per 22,414 Nm³/kmol ottenendo così le kmol annue e successivamente moltiplicare per le rispettive masse molari. Si ottengono quindi circa 1304 tonnellate di CO₂ emessi annualmente dal primo camino.

CAMINO 2

Il secondo camino ha dimensioni inferiori rispetto al primo, presenta infatti un diametro di 0,10 m. Il flusso di gas uscente è pari a 472 Nm³/hr che corrispondono a 1106368 Nm³/anno.

Questo camino è collegato ad un generatore diesel la cui potenza è pari a 200 kW.

Con riferimento alla tabella 4.3, è possibile calcolare le quantità annue di inquinanti emessi. Si ottiene quindi che ogni anno il camino emette in atmosfera 28,6 kg di particolato e 112,5 kg di NO_x.

Per quanto riguarda le percentuali di ossigeno ed anidride carbonica, si è voluto anche in questo caso esprimere i valori in termini massici piuttosto che in Nm³, ottenendo circa 80,5 t/anno di CO₂.

Vengono quindi di seguito riassunti i quantitativi annui emessi.

	Emissioni camino 1	Emissioni camino 2
PM	321,3 kg/anno	28,6 kg/anno
NO _x	316,3 kg/anno	112,5 kg/anno
SO ₂	153,3 kg/anno	BDL
CO	BDL	BDL
CO ₂	1304 t/anno	80,5 t/anno
O ₂	2730,8 t/anno	259 t/anno
Idrocarburi	BDL	BDL

Tabella 4.4 Emissioni annuali massiche

Questi dati verranno utilizzati in seguito per il calcolo dell'impatto ambientale dell'impianto.

5. LCA: LIFE CYCLE ASSESSMENT

La valutazione del ciclo vita (*Life Cycle Assessment*, LCA) è una metodologia standardizzata e normalizzata a livello internazionale (UNI EN ISO 14040) per la quantificazione degli impatti ambientali e sulla salute umana associati all'intero ciclo vita di un prodotto, un processo o un'attività.



Figura 5.1 LCA

La Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) definisce la Life Cycle Assessment come *“un procedimento obiettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente (...). La valutazione include l'intero ciclo vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale”*.

Prima di parlare di LCA, occorre però definire che cos'è un impatto ambientale. Secondo il D.lgs. 152/2006 [9], l'impatto ambientale è definito come: *“l'effetto significativo, diretto e indiretto, di un piano, di un programma o di un progetto sui seguenti fattori: popolazione e salute umana; biodiversità; territorio, suolo, acqua, aria e clima; beni materiali, patrimonio culturale, paesaggio; interazione tra i fattori sopraelencati.”*

La LCA ha lo scopo quindi per valutare in modo obiettivo, quantitativo ed olistico, attraverso degli indicatori, gli effetti sull'ambiente e sulla salute umana di un determinato processo, è molto importante per confrontare due o più processi (o prodotti) che svolgono la stessa funzione

per identificare quale dei due sia più sostenibile a livello ambientale. Spesso viene anche utilizzata in fase di progettazione per verificare l'impatto del prodotto che si vuole costruire o per scegliere "la strada" migliore per costruirlo (ad esempio utilizzando un reagente piuttosto che un altro). Sulla stessa linea, attraverso la LCA è possibile valutare come varierebbe l'impatto ambientale cambiando alcune specifiche di progetto per un processo già esistente (per esempio sostituendo un reagente con un altro). Inoltre, analizzando i risultati dell'analisi si possono individuare i "punti critici" di un determinato processo ovvero quelli che sono più impattanti a livello ambientale.

Per definizione l'analisi dovrebbe essere effettuata "*from cradle to grave*" ("*dalla culla alla tomba*"), ovvero a partire dall'estrazione delle materie prime necessarie fino al fine vita del prodotto o servizio, passando per l'utilizzo e la manutenzione dello stesso e comprendendo quindi anche lo smaltimento o il riutilizzo/riciclaggio, e per ogni operazione, il trasporto. Essendo però molto complicato definire la "tomba" di un prodotto, due varianti spesso utilizzate sono le analisi "*from cradle to gate*" e "*from gate to gate*". La prima pone i confini del sistema a partire dall'estrazione delle materie prime fino all'uscita dallo stabilimento del prodotto (appunto, *gate*); la seconda invece considera l'impatto dovuto solamente alla produzione del prodotto ponendo i confini direttamente sullo stabilimento, senza considerare quindi l'estrazione delle materie prime, l'utilizzo e il fine vita del prodotto.

5.1 Struttura

Secondo la norma UNI EN ISO 14040 [12], l'analisi LCA consta di quattro fasi:

- 1) Definizione dell'obiettivo e campo di applicazione
- 2) Analisi dell'inventario
- 3) Valutazione degli impatti
- 4) Interpretazione dei risultati.

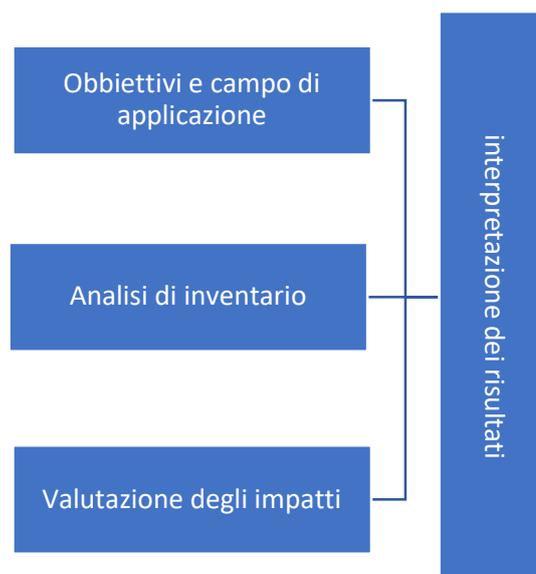


Figura 5.2: Fasi della LCA, adattata da UNI EN ISO 14044 [12]

Vengono ora descritte sinteticamente le quattro fasi.

5.1.1 Definizione dell'obiettivo e campo di applicazione

È la fase iniziale dell'analisi, comprende l'identificazione degli obiettivi dell'analisi e i confini del sistema, vengono descritti il prodotto desiderati e la sua unità funzionale. È importante stabilire bene queste tre caratteristiche prima della raccolta dati. Tuttavia, è una fase soggettiva e può essere modificata e rivista anche durante il processo iterativo di analisi [13]. È una fase molto delicata soprattutto quando l'analisi viene utilizzata per il confronto di due o più processi/prodotti poiché in questo caso sia i confini che l'unità funzionale devono essere i medesimi.

5.1.2 Analisi dell'inventario

L'analisi dell'inventario ha lo scopo di quantificare i flussi di materia ed energia che entrano ed escono dal sistema compreso il rilascio di rifiuti ed emissioni, si ha quindi la modellizzazione del sistema.

Si distinguono tre tipi di flusso:

- Flussi elementari: materiali o energia che entrano/escono dal sistema direttamente da/verso l'ambiente senza subire trasformazioni. Ad esempio, l'acqua raccolta da un bacino o le emissioni rilasciate in atmosfera.
- Flussi di prodotto: beni o servizi, rappresentano materiali ed energia scambiati tra i processi all'interno del sistema, sono quindi risultati di altri processi e hanno subito delle trasformazioni.
- Flussi di rifiuti: sottoprodotti senza valore di mercato, che vanno smaltiti.

I diversi flussi sono disponibili in banche dati e database dedicati. La raccolta di dati viene effettuata in base a quelli che sono i confini del sistema, e deve essere effettuata attentamente e con precisione. È importante, inoltre, che le fonti di questi dati e le assunzioni effettuate siano precisate in maniera chiara e trasparente.

5.1.3 Valutazione degli impatti

Questa fase ha lo scopo di quantificare i potenziali impatti ambientali, associando ai dati di inventario specifiche categorie di impatto ambientale come ad esempio: cambiamenti climatici, consumo o esaurimento di risorse, impatti sull'ecosistema (acidificazione del suolo e delle acque, riduzione dello strato di ozono, eutrofizzazione, ...) e sulla salute umana. Ogni categoria di impatto è a sua volta composta da sottocategorie, ognuna con specifiche unità di misura. Diverse metodologie di calcolo valutano queste categorie attraverso i cosiddetti fattori di caratterizzazione, i quali indicano l'impatto ambientale per unità di stress. È compito di chi effettua l'analisi, in base anche ai dati in suo possesso, scegliere quale metodologia utilizzare e quindi quali categorie analizzare. Anche in questo caso per confrontare diversi processi bisogna utilizzare le stesse metodologie, poiché ogni metodologia fornisce risultati diversi (perché espressi diversamente). Questa sezione verrà approfondita nel paragrafo 5.2.

5.1.4 Interpretazione dei risultati

Nell'ultima fase vengono valutate le informazioni ricavate dalla fase precedente, ne vengono tratte le conclusioni e vengono effettuate eventuali raccomandazioni. In questa fase si effettua anche una revisione dei risultati e nel caso questi non rispettino gli obiettivi iniziali o possano sembrare in qualche modo errati, va migliorato qualcosa nelle fasi precedenti, per esempio nell'analisi dell'inventario possono dover essere rivisti i flussi utilizzati o i confini del sistema stabiliti, si può valutare la necessità di raccogliere ulteriori dati o si può cambiare metodologia di calcolo [13].

5.2 Alcune considerazioni sulla LCA

La LCA è quindi una procedura non lineare ma iterativa; ad ogni step vanno fatte delle assunzioni e successivamente vanno verificati i risultati. Ciò è stato fatto anche in questo lavoro di tesi, come verrà spiegato nei prossimi capitoli. Infatti, molte assunzioni e flussi sono stati rivisti più volte e dopo diversi calcoli, prima di arrivare a risultati accettabili. Questo è uno dei principali problemi dell'analisi del ciclo vita.

La LCA presenta quindi anche limiti, in primis la raccolta dei dati risulta molto dispendiosa sia in termini di tempo che di risorse, in secondo luogo le metodologie di calcolo sono molteplici e i risultati dell'analisi dipendono fortemente da esse e dalle ipotesi effettuate, una metodologia errata o non adatta ai dati in possesso porterebbe a risultati errati (scoglio con cui ci si è confrontati anche per questo lavoro di tesi). Infine, database e metodologie necessitano sempre di aggiornamenti in quanto i nuovi prodotti e le nuove tecnologie sono all'ordine del giorno e in mancanza di dati aggiornati la loro valutazione risulta difficile.

Inoltre, la LCA calcola l'impatto ambientale di un processo, non effettua nessuna simulazione e nessun calcolo di processo. Non può sostituire quindi le prove sperimentali o gli appositi software di simulazione di processo.

Per eseguire la LCA è necessario dotarsi di appositi software come ad esempio SimaPro, OpenLCA, GaBi o Umberto.

Come detto in precedenza, i dati relativi ai flussi di input e output sono reperibili in banche date apposite a cui i software possono attingere: alcune sono specifiche per determinati software, altre sono invece compatibili con più di un software.

I dati dei diversi database possono essere analizzati con diverse metodologie di calcolo. Si ha un'elevata disponibilità di banche dati e metodologie, ma per quanto questo possa sembrare un vantaggio, bisogna porre molta attenzione che la metodologia scelta per effettuare l'analisi sia compatibile con il database utilizzato.

Questi discorsi su database e metodologie potranno risultare poco chiari ora al lettore, ma la comprensione di questi concetti risulterà più facile procedendo con la lettura del capitolo e dei prossimi capitoli.

5.3 Metodologie di valutazione dell'impatto

Le metodologie di valutazione dell'impatto quantificano i potenziali impatti ambientali associati ai prodotti, processi o servizi, analizzano i dati dell'inventario e collegandoli negli indicatori corrispondenti, e i risultati vengono classificati in un'ampia gamma di categorie di impatto, ognuna con un suo indicatore. Metodologie diverse possono comprendere categorie differenti o indicatori differenti per la stessa categoria.

La scelta delle categorie analizzate (e quindi della metodologia) deve essere effettuata in base agli obiettivi e all'oggetto dell'analisi.

I metodi di calcolo si dividono in due categorie [14]:

- 1) Metodi “*midpoint*”: comprendono categorie più specifiche, che si pongono all'inizio della catena causa-effetto.
- 2) Metodi “*endpoint*”: si pongono alla fine della catena causa-effetto e valutano i dati finali. Danno quindi un'idea finale e più facilmente intuibile di quello che può essere l'impatto. Tuttavia, questi metodi sono meno specifici e più soggetti a incertezza essendo formati dall'insieme di due o più categorie *midpoint*.

In altre parole, le categorie midpoint sono più specifiche e raggruppandole si hanno gli effetti finali ovvero le categorie endpoint. La seguente immagine serve a chiarire quanto detto.

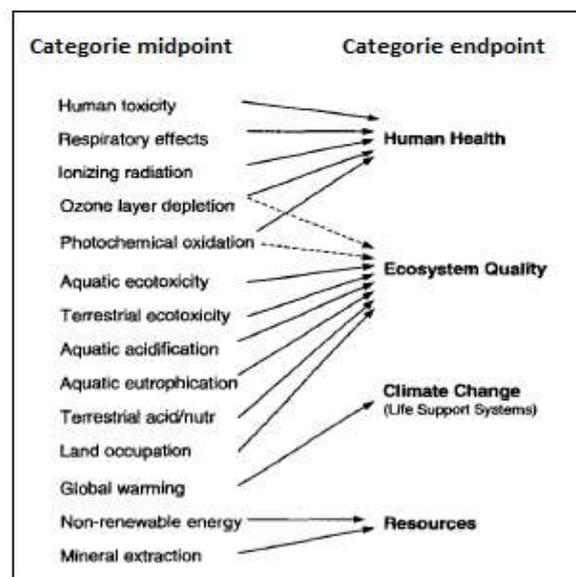


Figura 5.3 Categorie midpoint ed endpoint

Una descrizione delle più importanti categorie verrà effettuata in seguito.

Alcune delle metodologie più rilevanti sono le seguenti:

- **CUMULATIVE ENERGY DEMAND (CED)**
Il suo scopo è quantificare il consumo di energia primaria durante il ciclo vita di un prodotto, un servizio o un'attività. Comprende gli utilizzi di energia diretti e indiretti (per esempio, i consumi di energia per produrre un reagente che viene utilizzato nel processo analizzato) ma non i rifiuti utilizzati a fini energetici. Si concentra esclusivamente sull'uso dell'energia, suddiviso per tipo (fossile, rinnovabile, nucleare, ...) ma non considera altri impatti ambientali [15].
- **ECOLOGICAL FOOT PRINT**
Misura lo spazio (terrestre e acquatico) biologicamente produttivo necessario per sostenere il consumo di risorse e l'assorbimento dei rifiuti di un processo [16].
- **ENVIRONMENTAL FOOTPRINT (EF)**
È il metodo sviluppato e gestito dalla Commissione Europea [17].

- IPCC
Sviluppato dal Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici delle Nazioni Unite, si concentra solamente sul cambiamento climatico quantificando principalmente le emissioni di gas serra. Non considera altre categorie di impatto.
- RECIPE
Comprende numerose categorie di impatto e può essere utilizzato su due diversi livelli: midpoint ed endpoint. L'ultimo aggiornamento fornisce fattori di caratterizzazione per i diversi impatti su scala globale anziché su scala europea [18].

5.3.1 Environmental Footprint: la metodologia sviluppata dall'Unione Europea

Per superare i problemi evidenziati in precedenza riguardanti le numerose metodologie di calcolo presenti l'Unione Europea ha sviluppato una metodologia comune e conforme alla norma ISO 14040.

È un metodo *midpoint* che valuta sedici categorie di impatto, ognuna con una propria unità per permettere il confronto tra diversi processi o prodotti, riportate nella tabella sottostante.

Categoria di impatto	Indicatore	Unità
Climate change	Global Warming Potential (GWP-100)	kg CO ₂ eq
Ozone depletion	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11 eq
Human toxicity, cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh
Human toxicity, non cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh
Particulate matter	Effetti sulla salute umana	Incidenza di malattia
Ionising radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U ²³⁵	kBq U ²³⁵
Photochemical ozone formation	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC eq
Acidification	Accumulated Exceedance (AE)	mol H ⁺ eq
Eutrophication, terrestrial	Accumulated Exceedance (AE)	mol N eq
Eutrophication, aquatic freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end component (P)	kg P eq
Eutrophication, aquatic marine	Fraction of nutrients reaching marine end component (N)	kg N eq
Ecotoxicity freshwater	Comparative Toxic Unit for ecosystem (CTUe)	CTUe
Land use	Soil quality index	Pt
Water use	User deprivation potential	m ³ deprived
Resource use, minerals and metals	Abiotic resource depletion (ADP)	kg Sb eq
Resource use, energy carriers	Abiotic resource depletion – fossil fuel (ADP-fossil)	MJ

Tabella 5.1 Categorie di impatto per la metodologia EF [17]

CLIMATE CHANGE

Questa categoria misura le emissioni di gas serra e il loro contributo al riscaldamento globale. Il cambiamento climatico può essere definito come la variazione della temperatura terrestre causata dall'effetto serra generato dal rilascio dei cosiddetti "gas serra" generati dalle attività antropologiche. [15]

Il fattore di caratterizzazione per questa categoria è il riscaldamento globale potenziale (Global Warming Potential, GWP) con orizzonte di 100 anni (GWP-100) e viene misurato in kg di CO₂ eq. Per definizione, il GWP è definito come "Fattore di caratterizzazione che descrive l'impatto in termini di forzante radiativo di un'unità basata sulla massa di un dato gas a effetto serra in relazione a quello dell'anidride carbonica durante un certo periodo di tempo" [19].

In parole povere, quantifica il forzante radiativo (l'effetto) di un gas ad effetto serra rispetto a quello della CO₂, sostanza di riferimento valutata in termini di 1 kg di emissione. In questo caso il periodo di tempo è di 100 anni, ma sono possibili anche analisi su 20 anni o 100 anni.

La seguente tabella mostra alcuni principali gas serra con i rispettivi paesi in termini di GWP.

Composto	GWP-20	GWP-100	GWP-500
Anidride carbonica	1	1	1
Metano fossile	82,5 ± 25,8	29,8 ± 11	10 ± 3,8
Metano non fossile	79,7 ± 25,8	27 ± 11	7,2 ± 3,8
N ₂ O	273 ± 118	273 ± 130	130 ± 64
CFC-11	8321 ± 2419	6226 ± 2297	2093 ± 865
HFC-32	2693 ± 842	771 ± 292	220 ± 87
HFC-134a	4144 ± 1160	1526 ± 577	436 ± 173

Tabella 5.2 GWP di alcuni gas serra [20]

OZONE DEPLETION

È noto come gas quali CFC e HCFC siano i principali responsabili della riduzione dello strato di ozono, che comporta una riduzione della capacità di filtrare i raggi ultravioletti. La riduzione dello strato di ozono viene caratterizzata dall'*Ozone Depletion Potential* (ODP). Come nel caso precedente, anche questa categoria di impatto viene misurata attraverso una sostanza di riferimento con valore unitario: kg di CFC-11 eq, e rappresenta quindi la quantità di ozono che una sostanza può ridurre rispetto all'azione svolta da 1 kg di CFC-11[15].

Si fa notare che, quando si considerano i risultati finali dell'analisi di un processo non si misura la singola sostanza ma l'insieme di tutte le sostanze/processi/fonti di energia utilizzate nel ciclo vita del processo/prodotto/attività.

HUMAN TOXICITY

Può riferirsi alla tossicità cancerogena e a quella non cancerogena. Riflette il possibile rischio tossicologico di una data sostanza rilasciata nell'ambiente, valutando sia la tossicità intrinseca che la sua dose potenziale. Le sostanze che vengono prese in considerazione da questa categoria

sono sostanze potenzialmente pericolose per l'uomo attraverso l'ingestione, l'inalazione e il contatto [15].

L'indicatore di questa categoria è il Comparative Toxic Units, che può essere riferito sia alla salute umana o agli ecosistemi (vedere ecotossicità). In questo caso, quantifica l'impatto tossicologico di una sostanza sulla salute umana. L'unità di riferimento si basa sul concetto di tossicità relativa rispetto ad un riferimento standard che varia a seconda del tipo di tossicità (cancerogena o meno) e tiene in considerazione diversi fattori come la dose letale, la frequenza di esposizione e la via di esposizione.

PARTICULATE MATTER (PM)

Per particolato (PM) si intende un insieme di particelle molto piccole, solide o liquide, costituite da una serie di componenti organici ed inorganici tra cui: COV, metalli, particelle carboniose, pollini, polvere e inquinanti liquidi. Il particolato viene suddiviso in base alle dimensioni medie delle particelle: PM 10 con particelle di dimensioni inferiori a 10 μm e PM 2,5, particolato di dimensioni inferiori a 2,5 μm . L'inalazione di queste particelle può comportare numerosi problemi di salute. L'indicatore di questa categoria, infatti, è l'incidenza di malattie dovuta all'esposizione di sostanza particolata, espressa in morti/kg di PM 2,5 essendo queste le maggiori responsabili degli impatti sulla salute umana. Per avere l'impatto delle PM10, invece, si moltiplica il valore delle PM 2,5 per il 23%, essendo questa la frazione delle PM 2.5 sul totale del PM 10. La valutazione di questa categoria richiede quindi l'uso di modelli epidemiologici e statistici.

IONISING RADIATION, HUMAN HEALTH

Questa categoria è correlata ai danni alla salute umana causati dall'emissione di radionuclidi, dovute per esempio all'utilizzo in qualche fase del processo (incluso energia utilizzata per produrre un determinato reagente o prodotto utilizzato nel processo analizzato), di energia nucleare come fonte energetica. L'esposizione alle radiazioni ionizzanti causate da radionuclidi può causare danni alle molecole del DNA. La sostanza di riferimento è l'uranio 235 (U235).

PHOTOCHEMICAL OZONE FORMATION

L'ozono fotochimico è quello che si forma nella troposfera, e quindi rappresenta una fonte di tossicità per l'uomo e l'ambiente, a causa della reazione tra composti organici volatili non metanici (COVNM) e azoto in presenza della luce solare. Sono proprio i COVNM, infatti, la base di riferimento per misurare il potenziale di creazione di ozono fotochimico di una sostanza.

ACIDIFICATION

L'acidificazione è formata principalmente da emissioni di NO_x e SO_x . La deposizione atmosferica di questi gas acidi provoca una variazione di acidità nel suolo con gravi danni alle specie vegetali presenti. Inoltre, tramite reazione con l'acqua presente in atmosfera si ha la formazione delle cosiddette piogge acide. Una volta raggiunto il suolo, queste sostanze penetrano nel terreno, modificando la concentrazione degli ioni H^+ nel suolo. Il potenziale di acidificazione viene espresso infatti in mol H^+ equivalenti.

EUTROPHICATION

Può essere terrestre, acquatica di acqua dolce o acquatica marina. Per definizione l'eutrofizzazione è un surplus di nutrienti, principalmente fosforo ed azoto in un ecosistema che comporta una crescita anormale di flora, per esempio, le alghe negli ecosistemi acquatici che provocano danni alla qualità dell'acqua e alla vita animale.

I principali responsabili dell'eutrofizzazione sono le emissioni di ammoniaca, nitrati, ossidi di azoto e fosforo, sia nell'aria che nelle acque. Questa categoria viene misurata infatti in termini di azoto equivalente per quanto riguarda l'eutrofizzazione terrestre (mol N eq) e marina (kg N eq) e di fosforo equivalente (kg) per quanto riguarda l'eutrofizzazione delle acque dolci.

ECOTOXICITY FRESHWATER

Come la tossicità sulla salute umana, riflette l'impatto tossicologico di una sostanza sull'ambiente e più precisamente sulle specie acquatiche di acqua dolce. Viene sempre misurato in Comparative Toxic Units, in questo caso riferite all'ambiente. Il riferimento è una sostanza la cui tossicità è nota, come il mercurio o il piombo. Per avere il valore di tossicità relativa, si tiene in considerazione la concentrazione letale, la persistenza nell'ambiente e la sua capacità di bioaccumulo.

LAND USE

Questa categoria indica i danni causati dall'occupazione del suolo, si misura tramite una variabile adimensionale denominata punto (Pt) che considera diversi fattori, come la perdita di biodiversità, la riduzione della produttività del suolo e l'alterazione degli ecosistemi. Per calcolare il Punto bisogna anche tenere conto del tempo di utilizzo di questo. Rappresenta quindi l'impatto ambientale causato dall'utilizzo di un'area di suolo per un anno, tenendo conto della sua capacità di sostentamento delle specie native, della sua fertilità e della sua funzione ecologica.

WATER USE

Il consumo di acqua è inteso come il suo utilizzo come evaporata, incorporata nei prodotti, trasferita in altri bacini idrografici o smaltita in mare. L'acqua che viene consumata non è quindi, ovviamente, più disponibile nel bacino idrografico di origine né per l'uomo né per gli ecosistemi. Questa categoria definisce la riduzione della disponibilità di acqua dolce. Una riduzione di acqua dolce per gli umani porta alla competizione tra i diversi usi dell'acqua: un'irrigazione non adeguata per esempio, porterà a una riduzione della produzione agricola e quindi un aumento della malnutrizione tra la popolazione locale e questo avrà un peso maggiore nei paesi in via di sviluppo o sovrappopolati piuttosto che nei paesi industrializzati e dotati di sufficienti mezzi di sostentamento (ed economici) per prevenire la malnutrizione. Per quanto riguarda l'impatto sugli ecosistemi, il ragionamento è analogo: una riduzione dell'acqua cosiddetta blu (laghi, fiumi, falde) ridurrà anche l'acqua verde (umidità del suolo) e causerà danni alle specie vegetali. Anche per quanto riguarda la fauna di acqua dolce si fanno le stesse considerazioni.

In conclusione, questa categoria viene misurata in m³ di acqua sottratti all'ambiente. Questa relazione non è però lineare (1 m³ estratta o utilizzata ≠ 1 m³ consumata o sottratta) ma va contestualizzata attraverso specifici modelli, tenendo conto di diversi fattori come la locazione geografica, la scarsità d'acqua, l'eventuale sovrappopolazione, la disponibilità economica di un

certo paese, la gestione delle pratiche agricole, etc. (prelevare 1 m³ di acqua in Svizzera, ha un peso minore sull'ambiente che prelevarlo in paesi caldi e a rischio siccità).

Oltre ai fattori sopraelencati, il calcolo tiene in considerazione anche l'efficienza dell'utilizzo di acqua: un'azienda meno efficiente avrà bisogno di estrarre e consumare più acqua per soddisfare lo stesso fabbisogno di un'azienda più efficiente, ovviamente la metodologia non può considerare ogni singola azienda e quindi anche in questo caso viene fatta una media rispetto alla localizzazione.

RESOURCE USE

Quest'ultima categoria si riferisce al consumo di risorse non biologiche e si divide in due categorie: minerali e metalli, e carrier energetici. Per entrambe le categorie l'indicatore è un potenziale di riduzione della risorsa, ma viene misurato in maniera diversa.

L'esaurimento di metalli e minerali viene misurato in kg di antimonio equivalente, mentre l'esaurimento di carrier energetici tramite i MJ di energia derivata da combustibili fossili equivalenti.

6. OPEN LCA

Sono disponibili in commercio molti software per effettuare la *Life Cycle Assessment* ((SimaPro, OpenLCA, GaBi, ...), di cui alcuni gratuiti. Per questo lavoro di tesi è stato scelto il software OpenLCA dato che è opensource e basato sullo standard UNI EN ISO 14040 [12].

L'utilizzo del software è stato effettuato sfruttando manuali messi a disposizione dagli sviluppatori e video tutorial. I risultati ottenuti sono quindi frutto di prova e riprova di diversi calcoli con diverse metodologie, che, come si vedrà nel prossimo capitolo, sono stati successivamente scartati perché troppo inverosimili, fino a trovare la metodologia adatta e compatibile con i dati in possesso.

Il programma è sviluppato da GreenDelta ed è scaricabile gratuitamente dalla pagina web del programma all'indirizzo: <https://www.openlca.org/download-form/>

La versione utilizzata per questo lavoro è l'ultima ovvero la 2.0, rilasciata a maggio 2023.

Per utilizzare il programma in windows sono necessari i seguenti requisiti minimi:

- CPU 2 GHz o superiore
- 6-20 GB di RAM a seconda dei database utilizzati e delle dimensioni del modello
- 500 MB di spazio libero su hard disk + ulteriore spazio per il download dei database.

6.1 Introduzione all'utilizzo del programma

Prima di procedere all'uso del programma, è necessario scaricare le banche dati che si intendono utilizzare, ovvero l'archivio di tutti gli elementi interconnessi necessari per l'utilizzo del programma siano questi semplici flussi o interi processi e progetti. OpenLCA ha una delle più vaste raccolte di set di dati tra i software per LCA. Questi database sono messi a disposizione da collaborazioni dei creatori con i centri di ricerca e sono scaricabili dalla piattaforma OpenLCA Nexus all'indirizzo: <https://nexus.openlca.org/databases>. Alcuni sono molto generici e comprendono diversi tipi di flussi, altri invece sono altamente specifici per determinati settori. Molti di questi database sono disponibili soltanto a pagamento, solo alcuni sono fruibili gratuitamente.

Tra i principali database disponibili i più rilevanti sono [21]:

- Ecoinvent: è il più famoso e utilizzato database per LCA al mondo. È compatibile con diversi programmi, non solo OpenLCA, ed è il più completo ed aggiornato. Tuttavia, è disponibile soltanto a pagamento.
- Environmental Footprints: è il database fornito e gestito dalla Commissione Europea. È fruibile gratuitamente.
- Agribalyse: database francese per l'agricoltura e la provvigione di cibo, fruibile gratuitamente.
- Agri-footprint: database mondiale per l'agricoltura e la provvigione di cibo, è il più completo per questo settore, molto più di *Agribalyse*. Disponibile solamente a pagamento.
- Worldsteel: come intuibile dal nome è il database destinato al mondo dell'acciaio. Disponibile a pagamento.

- Exiobase: utilizzato per stimare le emissioni e l'utilizzo delle risorse da parte delle industrie a livello globale, è fruibile gratuitamente.
- PSILCA: è un database particolare, per l'analisi dell'impatto sociale. Sviluppato da GreenDelta è disponibile a pagamento.

Questi sono solo alcuni dei database disponibili. Queste banche dati possono essere usate singolarmente o unite per formare un unico database più ampio. Bisogna però porre attenzione che l'uso contestuale di dati provenienti da database diversi potrebbe non essere compatibile con la metodologia di calcolo scelta.

Il database più usato e completo è sicuramente "Ecoinvent", tuttavia essendo disponibile solamente a pagamento, per questo lavoro di tesi è stato utilizzato il database *Environmental Footprint (EF)* distribuito e gestito dall'Unione Europea.

Una volta scaricati e importati i database (la procedura passo per passo non viene riportata, non essendo l'obiettivo della tesi fornire un manuale), l'aspetto che si presenta è simile a quello riportato in figura:

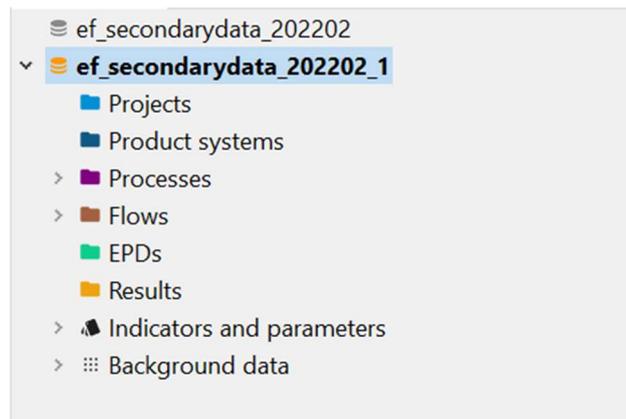


Figura 6.1 Finestra iniziale del database EF

Come si vede sono presente diverse voci, comuni a tutti i database, le più rilevanti:

- **Flussi (flows)**: è un elenco di tutti gli materiali/sostanze presenti. I flussi possono essere sostanze, prodotti, materiali, vettori energetici, emissioni o altri tipi di input e output. Ogni flusso deve essere associato ad una o più proprietà di riferimento (massa, volume, ...). Oltre ai flussi già presenti nel database ne possono essere creati di nuovi. Come spiegato nel precedente capitolo, si distinguono tre tipologie di flusso: elementari, di prodotto e rifiuti, indicati nel programma con la seguente simbologia:

	Flusso elementare
	Flusso di prodotto
	Flusso di rifiuto

Figura 6.2 Tipi di flussi

I flussi prodotto sono i risultati finali di un processo, tutti i processi che producono un flusso prodotto presente nel database, sono anch'essi presenti nel database. È possibile anche creare flussi nuovi “da zero”.

- **Processi (processes):** in questa sezione sono presenti tutti i processi integrati nel database che possono rappresentare la produzione di prodotto, un determinato processo o un'attività. Un processo è un insieme di attività che trasformano gli input in output. È in questa fase che avviene l'analisi dell'inventario: ogni processo è infatti formato da degli input e degli output, che sono i “flussi” presenti nell'apposita sezione. È possibile anche creare “creare da zero” un processo inserendo manualmente input e output.
- **Sistemi prodotto (product systems):** qui si crea il modello grafico, il cosiddetto *process networks*, la rete di tutti i sottoprocessi che compongono il processo in questione. Infatti, nel caso in cui negli input di un processo ci sia un flusso prodotto, vorrà dire che questo è generato da un processo formato a sua volta da input e output, che possono essere a loro volta dei flussi processo. Si crea quindi una rete di processi e sottoprocessi legati tra loro, e ognuno di essi verrà analizzato dal programma per effettuare l'analisi. Da questa sezione si può procedere con il calcolo.
- **Progetti (projects):** in questa sezione si ha il report finale e la possibilità di effettuare comparazioni tra diversi product system.
- **Risultati:** Vengono riportati e salvati i risultati delle analisi effettuate.
- **EPDs:** sezione che fornisce informazioni verificate sulle prestazioni ambientali di prodotti specifici.
- **Indicatori e parametri:** in questa sezione sono presenti tutti i componenti necessari al calcolo LCA, quali l'elenco delle metodologie di valutazione dell'impatto importate (come i database, queste non sono presenti inizialmente ma devono essere importate), i vari indicatori e le categorie di impatto per ogni metodologia e altri parametri di supporto.
- **Informazioni di background:** qui è possibile reperire informazioni riguardo i diversi flussi come gli autori o le fonti delle proprietà di un determinato flusso.

La sezione flussi contiene solamente l'elenco di tutti i prodotti e materiali che sono presenti nel programma, con relative informazioni come proprietà di riferimento (massa, volume, area, ...), in quali processi è coinvolto e se è un input o un output, in quali metodologie di calcolo è implementato e in quali categorie di impatto è coinvolto.

Il calcolo effettivo inizia con la modellazione di un processo, sia questo ex novo o già implementato.

6.2 Modellazione di un processo in OpenLCA

Come descritto in precedenza la sezione processi è il cuore della LCA: attingendo dalla sezione “flussi”, vengono inseriti tutti gli input e output del processo in questione.

Un processo può essere unitario o di sistema: la differenza è che il processo unitario è una singola unità operativa, un singolo processo, mentre un processo di sistema è dato da più processi unitari uniti tra loro.

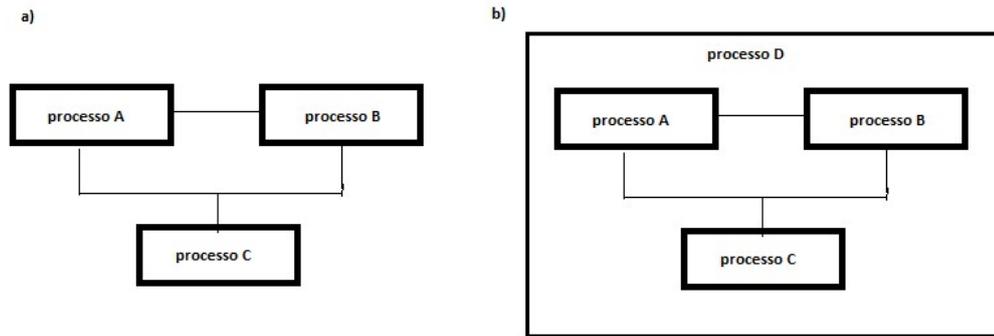


Figura 6.3 Processo unitario (a) vs processo di sistema (b)

La figura 6.3.a rappresenta tre processi unitari uniti tra loro. Considerando un processo totale che racchiuda questi tre processi unitari (figura 6.3.b) si ha il processo di sistema “D”.

Inputs/Outputs: Production boxed oat milk

Inputs										
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided wa...	Provider	Data quality...	Location	Desc
Breakfast cereals, very r...	Biscuits and breakfast cer...	1.00000	g		none					
Corrugated board box ...	Others/Ecoinvent cut-off ...	0.06500	kg		none					
Electricity, medium volt...	Others/Ecoinvent cut-off ...	0.20900	kWh		none					
Oat grain (RoW)] oat pr...	Others/Ecoinvent cut-off ...	0.20000	kg		none					
Water, municipal/FR U	Food/Transformation	1.30000	kg		none					

Outputs										
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided pr...	Provider	Data quality...	Location	Desc
Oat milk box		1.00000	kg		none					
Waste water	Emission to water/unspe...	0.15000	kg		none					
Water	Emission to air/unspecified	0.05000	kg		none					

Figura 6.4 Esempio di processo

Il processo in figura è un processo già esistente. Nel database ne sono implementati moltissimi, è sempre però possibile aggiungere o togliere flussi di un processo già implementato, così come è possibile creare un processo da zero selezionando manualmente i flussi desiderati dall’elenco dei flows, ed è proprio ciò che è stato fatto per questo lavoro di tesi, come si vedrà nel prossimo capitolo. Come si può notare, in questo caso sono presenti sia flussi elementari che di processo.

Nel caso in cui il flusso di input sia un process flow, l’analisi verrà effettuata anche su quel processo che produce quel determinato input e così via anche per i flussi di processo di quel “sottoprocesso” (con una sorta di “effetto matrioska” [n.d.r.]). Si nota quindi come anche un

semplice processo con pochi input e output possa richiedere moltissimi calcoli poiché questi input possono essere a loro volta risultato di processi con altri input e output e così via. Per questo motivo, nel caso in cui un determinato flusso di input sia prodotto da più di un processo, deve essere selezionato quello che produce la sostanza in questione, per far capire al programma quale “sottoprocesso analizzare”, e per fare ciò lo si dovrà selezionare nella voce *provider*.

Negli output sono presenti oltre al prodotto desiderato, anche i sottoprodotti e, soprattutto, le emissioni ed eventuali rifiuti. Il valore o quantità del flusso di output del prodotto desiderato funge da unità funzionale, su cui basare successive assunzioni e confronti.

6.3 Sistema prodotto e calcolo LCA

Dopo aver creato flussi e processi (o partendo da quelli già presenti nei database), si può procedere alla creazione del sistema prodotto, dal quale si può effettuare il calcolo. Secondo la norma ISO 14040 [12], un sistema prodotto è un “insieme di processi unitari con flussi elementari e di prodotto, che eseguono una o più funzioni definite e che modella il ciclo vita di un prodotto”.

In OpenLCA il sistema prodotto è la modellazione del ciclo vita del processo o del prodotto definita da un insieme di processi interconnessi tra di loro. Anche in questo caso le diverse procedure operative sono lasciate al lettore e reperibili sul manuale [22].

Le figure 6.5 e 6.6 sono tratte dal manuale del software e mostrano, rispettivamente, il modello grafico e la pagina principale del sistema prodotto, da cui è possibile far partire il calcolo di un determinato processo.

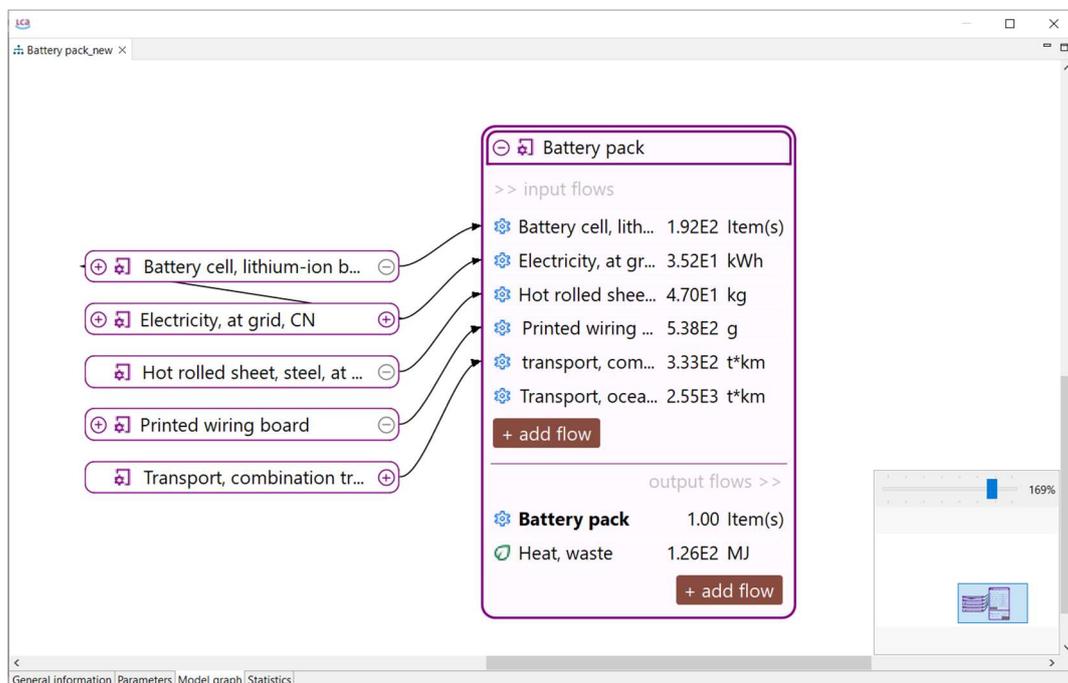


Figura 6.5 Modello grafico di un sistema prodotto

Il modello grafico collega tutti i sottoprocessi al processo principale: espandendolo si potranno anche visualizzare i sottoprocessi dei sottoprocessi e via discorrendo. Salta quindi all’occhio “l’effetto matrioska” discusso sopra, visto che ogni *process flow* di input è collegato al processo

che lo produce. Non rientrano nel modello grafico i flussi elementari dato che questi non sono collegati ad un sottoprocesso ma arrivano direttamente dall'ambiente senza subire trasformazioni.

Battery Pack ×

General information: Battery Pack

General information

Name: Battery Pack

Category: - none -

Description: First created: 2022-10-06T12:52:23
Linking approach during creation: Prefer default providers; Preferred process type: Unit process

Version: 00.00.001 Last change: 2022-10-06 13:45:25 UUID: ab6d3d30-159e-4b1c-af9c-d31716af8cf5

Tags: Add a tag

Calculate

Reference

Process: Battery pack

Product: Battery pack

Flow property: Number of items

Unit: Item(s)

Target amount: 1.0

General information | Parameters | Model graph | Statistics

Figura 6.6 Sezione principale del "sistema prodotto"

Nella sezione principale (*general information*), sono presenti le principali informazioni del sistema prodotto, ovvero il prodotto finale del processo e l'unità funzionale con la relativa unità di misura e il tipo di flusso. Da questa sezione è possibile far partire il calcolo LCA attraverso il comando *Calculate*.

Una volta "creato" il sistema prodotto e verificato la presenza di tutti i collegamenti si può effettuare il calcolo degli impatti. Prima bisogna però scegliere la metodologia di valutazione dell'impatto che quantifica i potenziali impatti ambientali associati a prodotti, processi o servizi analizzando i dati della fase di inventario e traducendoli in indicatori.

Come spiegato nel capitolo 5, la valutazione dell'impatto può essere effettuata mediante diverse metodologie di valutazione dell'impatto. In genere questi metodi non sono inclusi nei database di OpenLCA ma vanno scaricati e importati dalla piattaforma di OpenLCA-Nexus all'indirizzo <https://nexus.openlca.org/database/openLCA%20LCIA%20methods>, che mette a disposizione pacchetti di più metodologie che possono essere compatibili o meno in base al database utilizzato.

6.4 Risultati

Una volta calcolati gli impatti vengono generati i risultati sia sotto forma di grafici che sottoforma di tabella, le figure 6.7 e 6.8 tratte dal manuale ufficiale esplicitano il tutto.

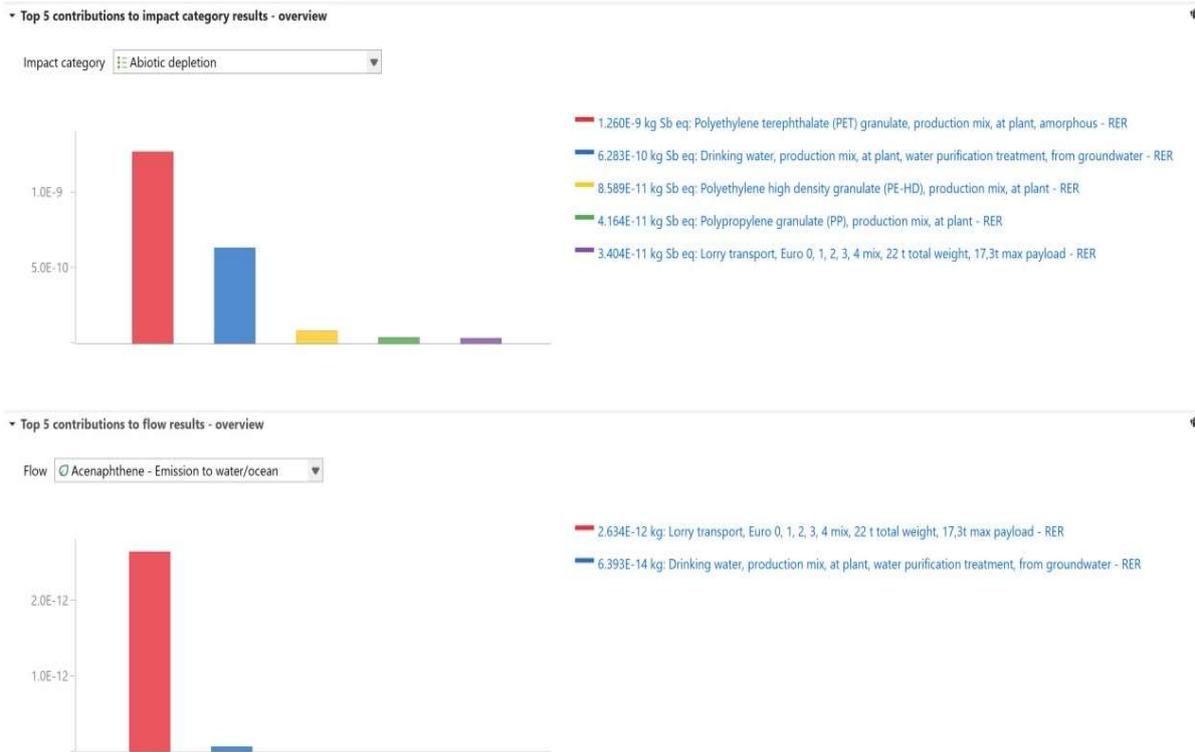


Figura 6.7 Risultati sotto forma di grafici

Come si vede dalla figura 6.7 nella sezione principale si trovano due grafici: il primo mostra per una data categoria di impatto quali sono i processi con maggior contributo, il secondo invece mostra i processi che più contribuiscono a un determinato flusso. Con questi grafici è possibile notare subito quale parte del sistema prodotto analizzato è la più impattante per una data categoria. È importante quindi quando si vuole migliorare un processo, per poter individuare quelli che sono i suoi punti critici.

HDPE from database

▼ Impact analysis: openLCA - EF 3.1 Method (adapted)

Sub-group by: Flows Processes | Don't show < %

Name	Category	Inventory result	Characterization factor	Impact assessment result
> <input type="checkbox"/> Acidification	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			0.00601 mol H+-Eq
▼ <input type="checkbox"/> Climate change (GWP100)	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			1.90245 kg CO2-Eq
> <input checked="" type="checkbox"/> Carbon dioxide, fossil	Elementary flows/Emission to air/high populat...	1.27657 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	1.27657 kg CO2-Eq
> <input checked="" type="checkbox"/> Methane, fossil	Elementary flows/Emission to air/high populat...	0.01076 kg	29.80000 kg CO2-Eq/kg	0.32055 kg CO2-Eq
> <input checked="" type="checkbox"/> Carbon dioxide, fossil	Elementary flows/Emission to air/low populati...	0.20116 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	0.20116 kg CO2-Eq
> <input checked="" type="checkbox"/> Carbon dioxide, fossil	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.06049 kg	1.00000 kg CO2-Eq/kg	0.06049 kg CO2-Eq
> <input checked="" type="checkbox"/> Methane, fossil	Elementary flows/Emission to air/low populati...	0.00111 kg	29.80000 kg CO2-Eq/kg	0.03295 kg CO2-Eq
> <input type="checkbox"/> Climate change - Biogenic (GWP	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			0.00265 kg CO2-Eq
> <input type="checkbox"/> Climate change - Fossil (GWP100	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			1.89922 kg CO2-Eq
> <input type="checkbox"/> Climate change - Land use and la	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			0.00058 kg CO2-Eq
> <input type="checkbox"/> Ecotoxicity, freshwater	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			2.32923 CTUe
> <input type="checkbox"/> Ecotoxicity, freshwater - inorgani	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			2.11528 CTUe
> <input type="checkbox"/> Ecotoxicity, freshwater - organics	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			0.21395 CTUe
> <input type="checkbox"/> Eutrophication, freshwater	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			0.00026 kg P-Eq
> <input type="checkbox"/> Eutrophication, marine	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			0.00115 kg N-Eq
> <input type="checkbox"/> Eutrophication, terrestrial	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			0.01202 mol N-Eq
> <input type="checkbox"/> Human toxicity, carcinogenic	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			4.56380E-10 CTUh
> <input type="checkbox"/> Human toxicity, carcinogenic - in	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			3.20414E-10 CTUh
> <input type="checkbox"/> Human toxicity, carcinogenic - oi	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			1.35966E-10 CTUh
> <input type="checkbox"/> Human toxicity, non-carcinogeni	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			1.02097E-8 CTUh
> <input type="checkbox"/> Human toxicity, non-carcinogeni	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			9.02912E-9 CTUh
> <input type="checkbox"/> Human toxicity, non-carcinogeni	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			1.18062E-9 CTUh
> <input type="checkbox"/> Ionising radiation (human health	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			0.12847 kBq U235-Eq
> <input type="checkbox"/> Land use	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			1.73497 dimensionless
> <input type="checkbox"/> Ozone depletion	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			1.27658E-8 kg CFC-11-Eq
> <input type="checkbox"/> Particulate matter	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			6.94768E-8 disease inciden...
> <input type="checkbox"/> Photochemical ozone formation	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			0.00649 kg NMVOC-Eq
> <input type="checkbox"/> Resource use, fossils	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			71.66140 MJ, net calorific v...
> <input type="checkbox"/> Resource use, minerals and meta	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			8.66307E-6 kg Sb-Eq
> <input type="checkbox"/> Water use (user deprivation pote	openLCA - EF 3.1 Method (adapted)			0.85051 m3 world eq. depr...

[General information](#) |
 [Inventory results](#) |
 [Impact analysis](#) |
 [Process results](#) |
 [Contribution tree](#) |
 [Grouping](#) |
 [Locations](#) |
 [Sankey diagram](#) |
 [LCIA Checks](#)

Figura 6.8 Tabella con risultati finali

La figura 6.8 rappresenta l'impatto totale del sistema prodotto: mostra infatti la tabella con tutte le categorie di impatto e il valore attribuito dall'intero processo studiato finora. Rappresenta il punto finale dell'analisi.

6.5 Progetti

Attraverso la sezione progetti, si possono infine, confrontare più sistemi prodotto. Ovviamente per un confronto ottimale i due sistemi prodotto devono essere confrontabili e avere la stessa unità funzionale. Non avrebbe infatti senso confrontare l'impatto di due processi diversi che producono lo stesso prodotto ma con quantità finali diverse. Questo è un fattore importante da tenere in considerazione e in fase di confronti bisogna ricordarsi assolutamente di inserire nelle apposite sezioni la stessa unità funzionale per i processi che si vogliono confrontare.

Anche in questo caso la figura tratta dal manuale ufficiale rappresenta i risultati finali di uno specifico confronto.

Results of: bottle filling comparison

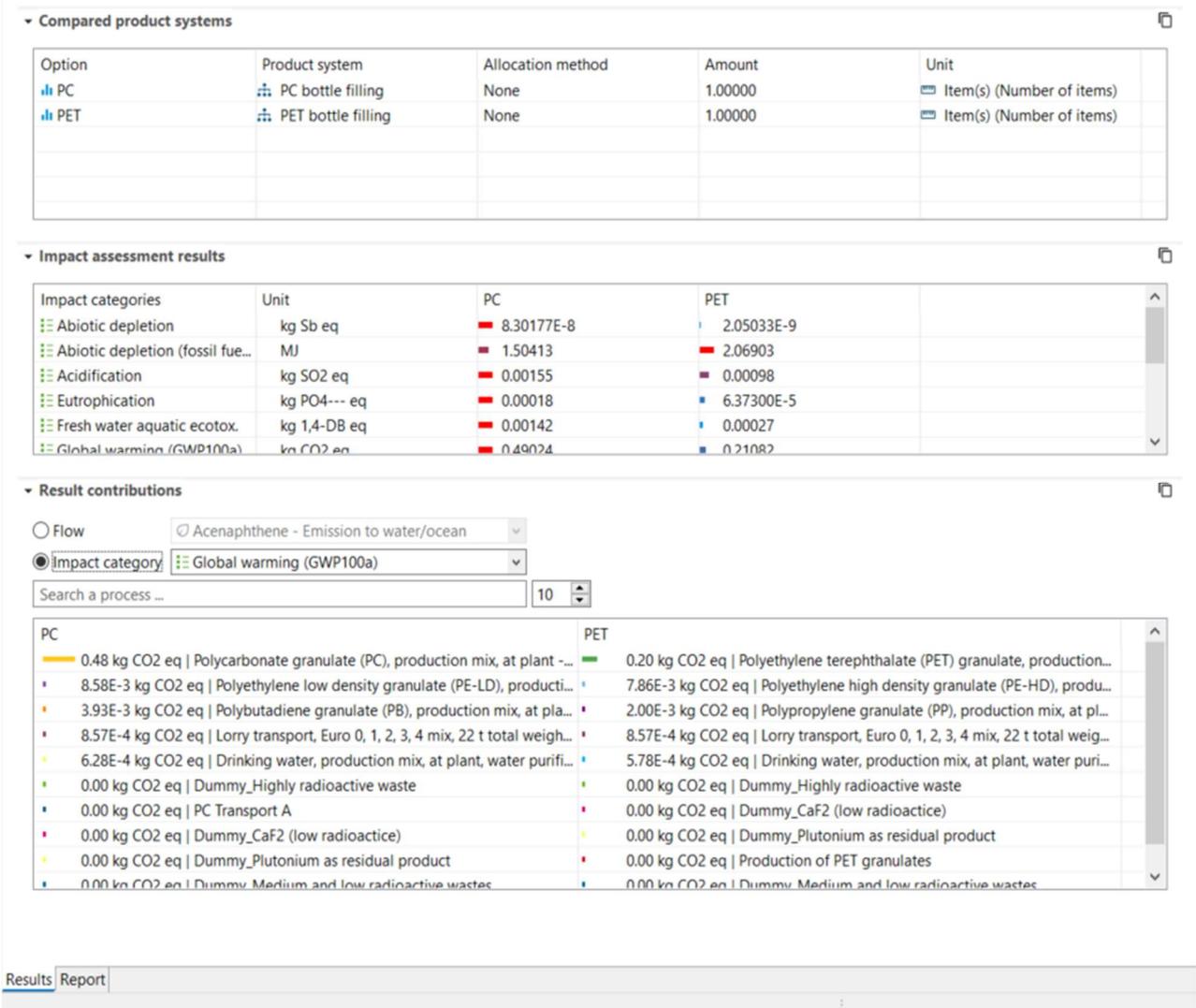


Figura 6.9 Progetto: il confronto tra due processi

Nel capitolo successivo verrà illustrato il lavoro svolto per analizzare il processo oggetto di studio e i risultati ottenuti.

7. APPLICAZIONE DI “OpenLCA” AL CASO DI STUDIO

Per procedere allo studio della sostenibilità dell’azienda in questione sono stati usati i dati primari illustrati nel capitolo 4. I confini di sistema sono stati fissati “*gate to gate*”. Non vengono quindi considerati gli impatti dei lavori di riviera e della concia, che a partire dalla pelle grezza portano alla pelle *wet blue*.

Verranno qui di seguito illustrati i procedimenti operativi seguiti.

7.1 Processo e flussi

Prima di tutto è stato creato da zero il flusso per la pelle *wet blue*, poiché non era presente nel database. Non viene fatta un’analisi di sostenibilità su questo materiale dato i confini del sistema “*gate to gate*”. Il flusso appena creato è stato utilizzato come riferimento per creare un nuovo progetto, ovvero è stato indicato come il prodotto desiderato. Il processo è stato creato da zero, inserendo manualmente gli input e output secondo i dati del capitolo 4.

I flussi entranti e uscenti del processo vengono mostrati nelle seguenti tabelle. Si ricorda che questi dati fanno riferimento ad una produzione annua di 949554 m² di cuoio e 2344 ore di lavoro all’anno.

INPUT		
Flusso	Quantità annue	
Polimero acrilico	2000	kg
Solfato basico di cromo	2300	kg
Elettricità (da fonti fossili)	1,188*10 ⁶	kWh
Acido formico	1800	kg
Acqua	4,62*10 ⁴	m ³
Resina melaminica senza formaldeide	2500	kg
Pelle <i>wet blue</i>	949554	m ²
Energia solare utilizzata	4,92*10 ⁸	kcal
Formiato di sodio	850	kg
<i>Fatliquor</i> generico 1	1980	kg
<i>Fatliquor</i> generico 2	3000	kg
Carbone	4,55 *10 ⁵	kg
Diesel	2,59*10 ⁴	kg

Tabella 7.1 Input del processo

OUTPUT			
Flusso	Quantità annue		Note
Cuoio finito	949554	m²	
Acqua di scarico	1,17*10 ⁴	m ³	
Fanghi	10*10 ³	kg	
CO ₂ (fossile)	1,30*10 ⁶	kg	Camino 1
CO ₂ (fossile)	8,05*10 ⁴	kg	Camino 2
NO _x	316,346	kg	Camino 1
NO _x	112,512	kg	Camino 2
O ₂	2,73*10 ⁶	kg	Camino 1
O ₂	2,59*10 ⁵	kg	Camino 2
Particolato (>PM10)	321,25	kg	Camino 1
Particolato (>PM10)	28,597	kg	Camino 2
SO ₂	153,268	kg	Camino 1

Tabella 7.2 Output del processo

Si vuole far notare come i nomi dei flussi nelle tabelle 7.1 e 7.2 siano generici. I nomi specifici dei flussi sono visionabili nella figura 7.1. che mostra la schermata del programma rappresentante il processo costruito. In ogni caso, come illustrato nel capitolo 4, non vengono riportati i nomi propri dei composti utilizzati, ma solamente il “tipo”. Nomi propri che, ovviamente, non sono presenti nel programma. Per inserire i flussi di chemicals è stato quindi necessario cercare il prodotto in rete (vedere capitolo 4) per risalire al tipo e alla composizione e inserire nel programma il flusso più simile disponibile.

Come si nota nella tabella 7.2 e nella figura 7.1, le emissioni di CO₂ sono segnate come fossili, questo perché il programma comprende diverse categorie (o tipi) per un determinato elemento, e va quindi selezionato quello giusto per il processo in questione. Per quanto riguarda la CO₂, per esempio, è possibile selezionare sia quella fossile che quella biogenica. In questo caso, derivando dalla combustione di metano e olio diesel è sicuramente fossile e pertanto va specificato.

Le emissioni di SO₂ del secondo camino non sono presenti perché come si ricorda dal capitolo 4 la loro concentrazione è al di sotto del limite rilevabile.

Ingressi										
Flusso	Categoria	Quantità	Unità	Costi/Ricavi	Incertezza	Avvicinato w...	Fornitore dei dati...	Data quality entry	Posizione	
Acrylic resin; technology mix; production mix, at plant; without butylacetate	Materials production/Organic chemicals	2000.02000	kg		none		Acrylic resin...			
basic chrome sulfate	Organic chemicals/nan	2300.02000	kg		none		basic chrome...			
Coke (C carrier)	Materials production/Organic chemicals	4.55141E5	kg		none		Coke, proced...			
Diesel	Energy carriers and technologies/Cruce oi...	2.59750E4	kg		none		Diese mix atr...			
Electricity from fossil unspecified	Energy carriers and technologies/Electricity	1.18759E6	kWh		none		Electricity fro...		IN	
formic acid	Organic chemicals/nan	1800.02000	kg		none		formic acid pr...			
freshwater -IN	Resources from water/Renewable materi...	4.62400E4	m3		none					
Melamine methylated; technology mix; production mx, at plant	Materials production/Organic chemicals	2500.02000	kg		none		Melamine me...		IN	
Pelle wet blue	Resources from air/Renewable energy/res...	9.48554E5	m2		none				IN	
primary energy from solar energy	Resources from air/Renewable energy/res...	4.82240E8	kcal		none					
sodium formate	Organic chemicals/nan	850.02000	kg		none		sodium forma...			
synthetic fatiquos	Organic chemicals/nan	1980.02000	kg		none		synthetic fatli...			
synthetic fatiquos	Organic chemicals/nan	3000.02000	kg		none		synthetic fatli...			
Outputs										
Flusso	Categoria	Quantità	Unità	Costi/Ricavi	Incertezza	Prodotto e...	Fornitore dei...	Data qual...	Posizione	Descrizione
carbon dioxide (fossil)	Emissions to air/Emissions to non-urb...	8.03416E4	kg		none					camiro 2
carbon dioxide (fossil)	Emissions to air/Emissions to non-urb...	1.30466E6	kg		none					camiro 1
Finished leather or footwear & leather goods_UJ+28		9.49554E5	m2		none					
Nitrogen oxides	Emissions to air/Emissions to non-urb...	1.1152E5	g		none					camiro 2
Nitrogen oxides	Emissions to air/Emissions to non-urb...	3.16346E8	mg		none					camiro 1
oxygen	Emissions to air/Emissions to non-urb...	2.59044E5	kg		none					camiro 2
oxygen	Emissions to air/Emissions to non-urb...	2.73085E6	kg		none					camiro 1
particles (> PM10)	Emissions to air/Emissions to air, unsp...	2.83988E4	g		none					camiro 2
particles (> PM10)	Emissions to air/Emissions to air, unsp...	3.2230E8	mg		none					camiro 1
Sludge	End-of-life treatment	10.00000	t		none					camiro 1
sulfur dioxide	Emissions to air/Emissions to non-urb...	1.52288E8	mg		none					camiro 1
Water (waste water, treated)	End-of-life treatment	1.17200E4	m3		none					

Figura 7.1 Schermata del programma, input e output

Nella figura 7.1 si distinguono chiaramente tutti e tre i tipi di flussi di OpenLCA: flussi elementari, prodotti, e di rifiuto. Il flusso di riferimento è il prodotto desiderato ovvero “*Finished leather or footwear & leather goods_EU+28*”, riferito all’Unione Europea pre-Brexit (28 Paesi), scritto in grassetto e con la relativa unità funzionale: l’ammontare delle pelli prodotte in un anno. Ove possibile nei flussi di input è stata anche aggiunta la locazione del processo.

Alcune note riguardanti i dati:

- I. Il flusso “*pelle wet blue*” non era presente nei database utilizzati, è stato quindi creato appositamente. Non è stata fatta alcun’analisi di sostenibilità su questo flusso dato i confini “gate to gate”.
- II. È stato supposto che la quantità di “*pelle wet blue*” entrante fosse corrispondente a quella di cuoio uscente. Questo perché la “perdita di materiale” si ha principalmente nei lavori di riviera, mentre in questa fase del processo può essere considerata nulla.
- III. Per quanto riguarda la quantità di acqua è stato utilizzato il consumo totale fornito dall’azienda.
- IV. Non conoscendo l’origine dell’energia elettrica utilizzata, nel programma è stata inserita cautelativamente come da fonte fossile non specificata.
- V. L’azienda utilizza due *fatliquors* diversi che sono inseriti come *fatliquors* sintetici generici poiché non sono stati reperiti flussi più specifici.
- VI. Il prodotto finito denominato nel programma come “*Finished leather or footwear & leather goods_EU+28*” è un flusso già esistente, ciò non influenza i risultati. Essendo questo un prodotto, risulta possibile produrlo attraverso il processo già presente nel database (con il quale verrà effettuato il confronto) oppure mediante questo processo. Quando si effettua il calcolo del sistema prodotto, si sceglie quale dei due processi analizzare. In poche parole, è solamente un nome fittizio. È vero che sarebbe stato possibile creare un nuovo flusso per identificare questo prodotto finito, ma si è preferito procedere in questo modo per avere poi un confronto più diretto: stesso prodotto finale ma due processi diversi.
- VII. Come flusso di acqua uscente è stato considerato quello mandato al trattamento: 5 m³/hr.
- VIII. Per quanto riguarda i camini valgono le considerazioni effettuate nel capitolo 4.

Una volta inseriti i vari flussi entranti e uscenti, con le rispettive quantità e unità di misura, sono stati selezionati per i flussi prodotto in input, i *provider* ovvero i fornitori dei dati. Come descritto nel precedente capitolo, rappresentano i processi da analizzare per produrre quel determinato prodotto. Questa operazione è fondamentale per creare il sistema prodotto, dato che questo lega tutti i sottoprocessi a quello principale. È quindi fondamentale specificare quale sottoprocesso legare. Ovviamente questa operazione non viene effettuata per i flussi elementari, dato che essi non subiscono nessuna trasformazione ma derivano direttamente dall’ambiente.

Lo step successivo all’inserimento di tutti i flussi è la creazione del sistema prodotto

7.2 Creazione del “sistema prodotto”

Una volta completato l’elenco dei flussi di input e output si può procedere alla creazione del sistema prodotto che è lo step che anticipa il calcolo dei risultati.

Per far ciò dalla sezione principale del processo si seleziona l’apposito comando presente sulla finestra principale del progetto.

Informazioni generali: pelle2_EF - IN

▼ Informazioni generali

Nome

Categoria ■ TESI

Descrizione

Versione 00.00.034 ↶ ↷ Ultima modifica 2024-02-06 14:57:05 UUID ee60e55a-i

Tags

Processo di infrastruttura

► Data

▼ Geografia

Posizione ×

Figura 7.2 Creazione di un sistema prodotto

Come spiegato nel capitolo precedente, il sistema prodotto lega tutti i sottoprocessi che servono per produrre gli input con quello principale collegando tutto assieme con una sorta di *effetto matrioska*. Anche quindi un semplice processo con pochi input e output risulterà in realtà molto più complesso ed esteso. La figura 7.3 mostra il cosiddetto modello grafico del processo analizzato. Il modello grafico mette in risalto proprio questi collegamenti con i sottoprocessi e mostra, come anticipato in precedenza, l'importanza di selezionare il giusto fornitore di dati per i flussi prodotto: selezionare un *provider* invece che un altro cambierà tutto il processo e i collegamenti!

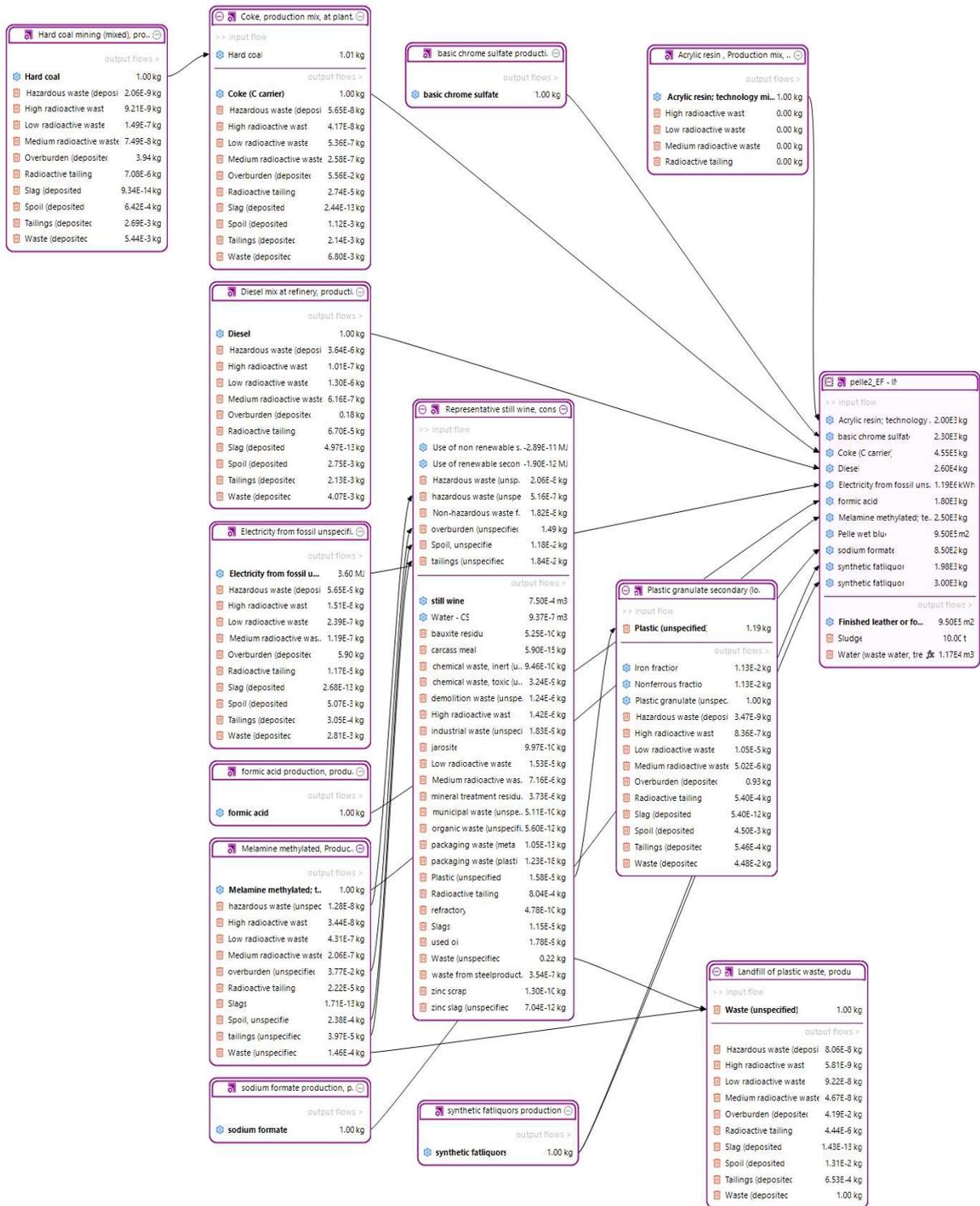


Figura 7.3 Modello grafico del sistema prodotto del processo analizzato

Si nota l'assenza di flussi elementari. Come spiegato, questi non entrano di default nel modello grafico dato che non sono collegati a nessun sottoprocesso; è possibile inserirli tramite le opzioni ma il loro numero elevato renderebbe impossibile leggere il modello grafico sia su schermo che su carta.

Una volta creato il sistema prodotto è possibile iniziare il calcolo degli impatti, avendo la premura però di modificare, se necessario, l'unità funzionale, indicata nella figura 7.4 come "quantità obiettivo".

Nella LCA l'unità funzionale è la quantità di prodotto desiderato che viene usata come riferimento per i calcoli. È la base per l'analisi e il confronto, tutti i valori di input e output sono in relazione all'unità funzionale. In questo caso, come detto in precedenza, l'unità funzionale corrisponde alle pelli prodotte in un anno ovvero 949554 m².

▼ Informazioni generali

Nome

Categoria

Descrizione

Versione 00.00.000 Ultima modifica 2024-02-06 15:54:44 UUID 243a0706-22e8-4d23-9862-642fae6cdd4b

Tags

▼ Riferimento

Processo

Prodotto

Proprietà del flusso

Unità

Quantità obiettivo

Figura 7.4 Calcolo dei risultati

7.3 Calcolo degli impatti

L'ultimo step dell'analisi del ciclo vita consiste nel calcolo degli impatti, è in questa fase che si sono riscontrate le maggiori criticità.

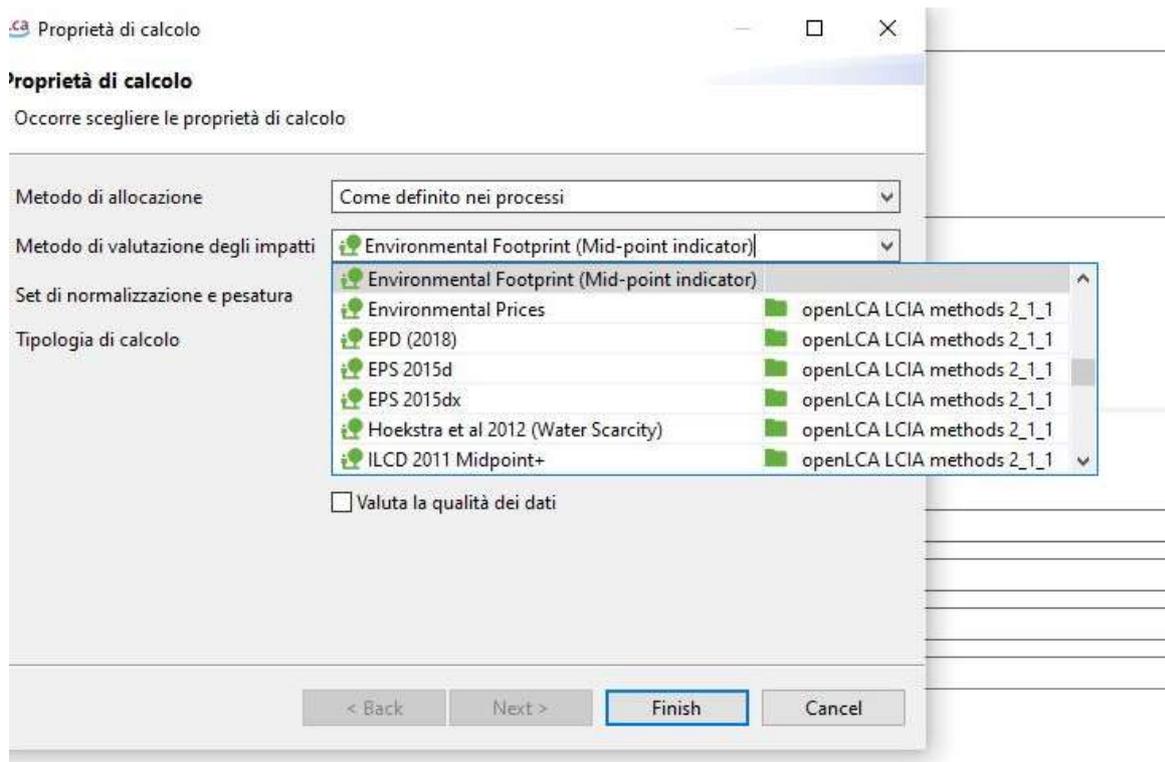


Figura 7.5 Diverse metodologie di calcolo

Per effettuare il calcolo degli impatti occorre prima scegliere una metodologia di calcolo come si vede nella figura 7.5.

Inizialmente, è stata scelta come metodologia di impatto il metodo: “*ReCiPe Midpoint (H)*”. Per le seguenti motivazioni:

- È un metodo *midpoint*, e quindi copre più categorie a un livello più specifico
- È globalizzato, cioè, considera dati a livello mondiale.

Purtroppo, i risultati ottenuti con questo metodo erano di valore più che dubbio, dato che molte delle categorie analizzate risultavano a impatto zero. Andando ad analizzare i singoli flussi e le metodologie all’interno del programma, facendo numerose prove, valutando diverse proprietà, si è riscontrato che molti flussi non erano integrati con tutte le metodologie di calcolo. Andando ad analizzare alcuni dei singoli flussi utilizzati nel processo, e provando diversi calcoli si è riscontrato come questi siano compatibili con un’unica metodologia di calcolo: *Environmental Footprint (Mid-point indicator)*.

Categoria di impatto	Categoria	Posizione	Fattore di impatto	Unità
Water use	Environmental Footprint (Mid-point indicator)		29.40000	m3 depriv. / m3
Water use	Environmental Footprint (Mid-point indicator)		29.40000	m3 depriv. / m3

Fattori di impatto: carbon dioxide (fossil)

Categoria di impatto	Categoria	Posizione	Fattore di impatto	Unità
Climate change	Environmental Footprint (Mid-point indicator)		1.00000	kg CO2 eq / kg
Climate change-Fossil	Environmental Footprint (Mid-point indicator)		1.00000	kg CO2 eq / kg

Figura 7.6 Esempi di fattori di impatto implementati in una sola metodologia

La figura 7.6 mostra un esempio di due flussi, uno negli input e uno negli output: questi due flussi sono implementati solamente nella metodologia sopraindicata; il calcolo con una metodologia diversa darebbe come risultato un impatto nullo.

Si sottolinea quindi l'importanza di verificare l'integrazione di ogni nuovo flusso di dati con la metodologia di calcolo prescelta, *Environmental Footprint (Mid-point indicator)*, ampiamente descritta nel quinto capitolo. Utilizzando questa metodologia però, altri flussi utilizzati nel caso precedente non erano più considerati. È stato quindi necessario effettuare delle scelte riguardo alcuni flussi in input e output, selezionando solamente quelli compatibili con la metodologia utilizzata. Infatti, per ogni flusso già presente negli input e output e per quelli aggiunti o sostituiti è stato necessario valutarne la compatibilità con la metodologia, in caso contrario è stato necessario identificare flussi di dati alternativi. Per ogni nuovo flusso è stato quindi reiterato il calcolo dell'analisi con la metodologia scelta per verificare che esso fosse compatibile e quindi "tenuto in considerazione" dalla metodologia in questione, in caso contrario sarebbe risultato avere impatto 0, cosa molto improbabile. È spesso capitato infatti di avere risultati nulli e dover quindi cambiare i flussi in questione scegliendone altri con lo stesso nome ma con allocazioni diverse o con nomi diversi (che rappresentano però la stessa sostanza o emissione).

Ovviamente questo processo è stato molto dispendioso in termini di tempo poiché si è dovuto analizzare tutti i flussi del processo e all'occorrenza sostituirli con delle valide alternative.

Sempre nella figura 7.6 è possibile notare il "fattore di impatto", di cui si è discusso nel capitolo 5 quando sono state illustrate le diverse categorie. Ovviamente, per quanto riguarda la CO₂ il fattore è unitario in quanto il *climate change* viene misurato attraverso i kg di CO₂ equivalenti. Il discorso è diverso invece per quanto riguarda l'uso dell'acqua, per tutti i motivi ampiamente descritti nel quinto capitolo questo valore spesso non è unitario: per l'India, infatti, l'utilizzo di 1 m³ di acqua corrisponde ad una deprivazione della stessa pari a 29,4 m³.

7.4 Confronto degli impatti calcolati

Vengono ora effettuati due confronti: il primo con il processo di concia completo implementato nel database, il secondo confronto sostituendo l'energia solare che l'azienda utilizza per il riscaldamento e per i processi di tintura con la combustione del metano.

7.4.1 Confronto col processo integrato nel database

Per poter inserire in un contesto industriale questi valori, si è voluto confrontare il processo dell'azienda con quello integrato nel database, denominato "*Finished leather or footwear & leather goods, consumption mix, at tanning plant, preserved and tanned,*" che porta al flusso "*Finished leather or footwear & leather goods_EU+28*". Questo flusso rappresenta però l'intero processo di concia ed è una media di diversi tipi di concia (al cromo, vegetale e minerale senza cromo) su pelli di diversi animali (bovini, ovini e caprini). Come si vede dal nome, inoltre, il programma fa una media europea su 28 stati, considerando quindi ancora il Regno Unito (l'ultima modifica del processo risale al 2018). Questi aspetti sono da considerare quando si effettuano i confronti degli impatti dei casi. Le immagini riguardanti questo processo vengono riportate in appendice.

Il calcolo del processo integrato nel database è stato fatto parallelamente al processo principale e si sono riscontrati gli stessi problemi di cui sopra riguardo alla metodologia. Anche in questo caso analizzando i flussi (in questo caso essendo un processo già integrato, non è stato possibile fare modifiche) si è riscontrato nuovamente come *Environmental Footprint (Mid-point*

indicator) fosse l'unica metodologia utilizzabile. Pertanto, controllata e verificata l'integrazione dei flussi di questo processo con la metodologia scelta si è proceduto in maniera analoga a prima creando il sistema prodotto e infine effettuando il calcolo.

7.4.2 Confronto con utilizzo di metano invece che energia solare

Come evidenziato in precedenza, l'azienda in questione utilizza per il riscaldamento dell'acqua impiegata nel processo di tintura solamente energia solare ($2,1 \cdot 10^5$ kcal/hr) evitando del tutto l'utilizzo di metano.

Sorge quindi una domanda spontanea: dato che questo può essere fatto grazie alla locazione tropicale dell'azienda, cosa accadrebbe se si dovesse utilizzare gas metano per coprire tale fabbisogno? Come cambierebbero i risultati in un'ottica LCA, considerando quindi non solo l'impatto dovuto alla combustione del metano impiegato ma anche l'impatto derivato dalla produzione ed estrazione dello stesso?

Per rispondere a questa domanda bisogna innanzitutto conoscere la quantità di metano necessaria per gli scopi dell'azienda.

Sappiamo che l'azienda necessita per il riscaldamento dell'acqua $2,1 \cdot 10^5$ kcal/hr e quindi considerando il totale di 2344 ore annue lavorate si ha un fabbisogno energetico di $4,92 \cdot 10^8$ kcal annue.

Considerando il potere calorifero del metano pari a 8500 kcal/Nm³ sono necessari circa 57911 Nm³ annui di metano che corrispondono a circa 41443 kg.

Bruciando questa quantità di metano, si ha una produzione aggiuntiva di CO₂ secondo la seguente reazione: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$. Visto il rapporto 1:1 tra le moli di metano consumate e quelle di CO₂ prodotte si ottengono circa 113709 kg annui di CO₂ aggiuntivi.

Facendo riferimento quindi al processo aziendale, gli input e output del processo dovranno essere modificati come indicato nelle tabelle seguenti:

Input		
Flusso	Quantità	
Polimero acrilico	2000	kg
Solfato basico di cromo	2300	kg
Elettricità (da fonti fossili)	1,188*10 ⁶	kWh
Acido formico	1800	kg
Acqua	4,62*10 ⁴	m ³
Resina melaminica senza formaldeide	2500	kg
Pelle <i>wet blue</i>	949554	m ²
Energia solare	4,92*10 ⁸	kcal
Formiato di sodio	850	kg
<i>Fatliquor</i> generico 1	1980	kg
<i>Fatliquor</i> generico 2	3000	kg
Carbone	4,55 *10 ⁵	kg
Diesel	2,59*10 ⁴	kg
Metano	5,79*10⁴	Nm³

Tabella 7.3 Input processo con metano

Output			
Flusso	Quantità		Note
Pelle “finita”	949554	m²	
Acqua (<i>wastewater</i>)	1,17*10 ⁴	m ³	
Fanghi	10*10 ³	kg	
CO ₂ (fossile)	8,05*10 ⁴	kg	Camino 2
CO ₂ (fossile)	1,30*10 ⁶	kg	Camino 1
CO₂ (fossile)	1,14*10⁵	kg	Combustione del metano
NO _x	112,512	kg	Camino 2
NO _x	316,346	kg	Camino 1
O ₂	2,73*10 ⁶	kg	Camino 1
O ₂	2,59*10 ⁵	kg	Camino 2
Particolato (>PM10)	321,250	kg	Camino 1
Particolato (>PM10)	28,597	kg	Camino 2
SO ₂	153,268	kg	Camino 1

Tabella 7.4 Output processo con metano

Le voci evidenziate in grassetto fanno riferimento all'inserimento del metano al posto dell'energia solare.

La figura seguente mostra il modello grafico del processo che utilizza metano al posto dell'energia solare. Come facilmente intuibile il processo è più complesso e presenta più voci, in particolare si ha l'aggiunta del sottoprocesso per la produzione del gas naturale.

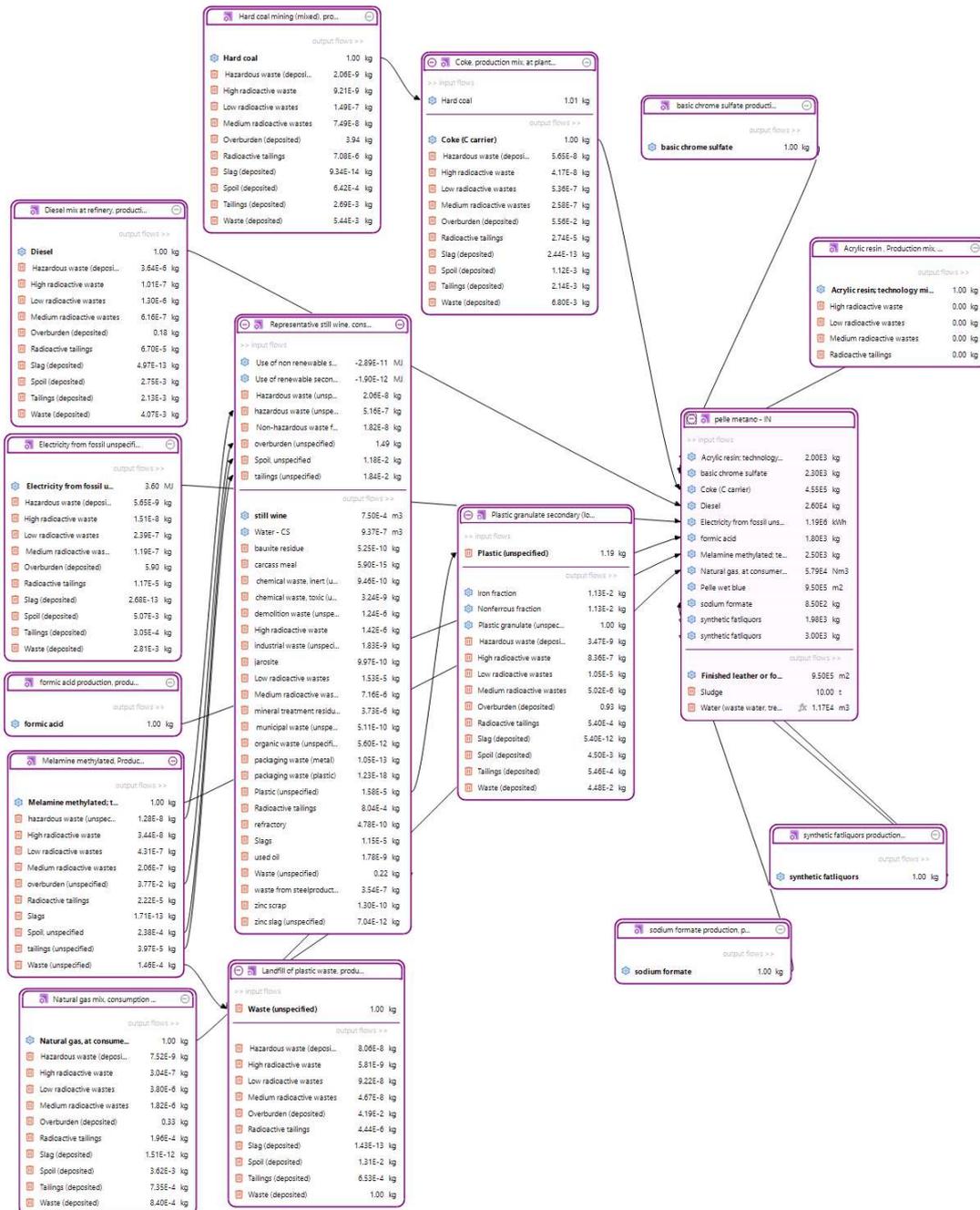


Figura 7.7 Modello grafico del processo che impiega metano

8. RISULTATI

Vengono ora presentati tutti i risultati ottenuti con i dovuti confronti. Si ricorda nuovamente che i valori e confronti fanno riferimento ad un anno di lavoro e la produzione di circa 950000 m² di pelle.

8.1 Risultati del processo analizzato

I risultati del sistema analizzato vengono mostrati nella seguente tabella:

Categoria di impatto	Unità	Valore
Acidificazione	mol H ⁺ eq	4,60*10 ³
Climate change	kg CO ₂ eq	3,11*10 ⁶
<i>Climate change-Biogenic</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	<i>506,71</i>
<i>Climate change-Fossil</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	<i>3,11*10⁶</i>
<i>Climate change-Land use and land use change</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	<i>964,31</i>
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	5,09*10 ⁵
Eutrophication marine	kg N eq	1,29*10 ³
Eutrophication, freshwater	kg P eq	5,84
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	1,29*10 ⁴
Human toxicity, cancer	CTUh	0,04211
Human toxicity, non-cancer	CTUh	0,0475
Ionising radiation, human health	kBq U-235 eq	8,47*10 ³
Land use	Pt	2,31*10 ⁶
Ozone depletion	kg CFC11 eq	0,0009666
Particulate Matter	disease inc.	0,0449
Photochemical ozone formation - human health	kg NMVOC eq	3,27*10 ³
Resource use, fossils	MJ	2,81*10 ⁷
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,29
Water use	m ³ depriv.	1,06*10 ⁸

Tabella 8.1 Risultati LCA

Attenzione: si vuole ricordare come questi risultati non rispecchino solamente l'impatto delle singole attività o emissioni riguardanti l'azienda. Corrispondono infatti all'impatto del processo di riconcilia svolto dall'azienda sull'ambiente, cioè, viene considerato l'impatto anche della produzione dei vari input, siano essi di materia che di energia (effetto matrioska) tramite una serie di sottoprocessi.

Nella sezione dei risultati, il programma fornisce grafici per mostrare i sottoprocessi responsabili degli impatti di ciascuna categoria di impatto.

Le figure sottostanti rappresentano questi grafici. Nel caso ci sia la dicitura “pelle_2 EF”, vuol dire che sono le attività/emissioni dell’azienda ad impattare su quella categoria (è il nome che è stato dato al processo). Questa funzione è molto utile per mettere in luce aspetti critici del processo e riflettere su eventuali migliorie.

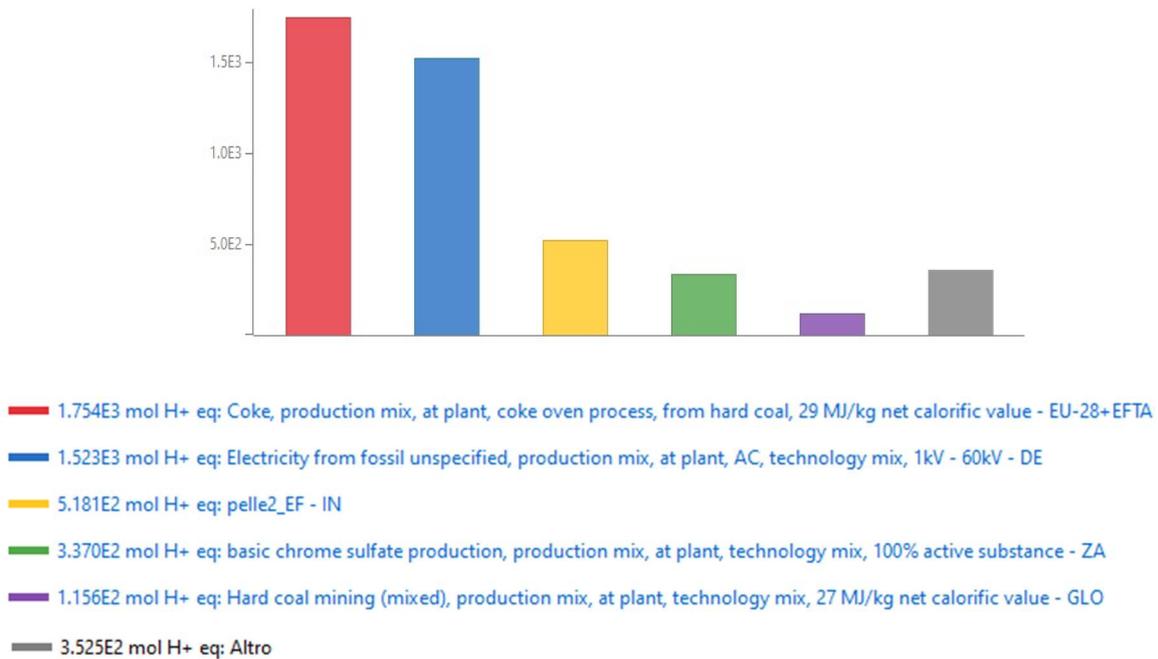
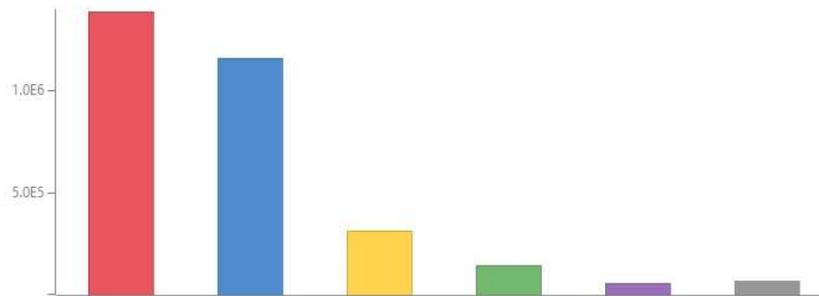


Figura 8.1 Acidificazione

I maggiori contributi all’acidificazione sono dati dalla produzione di carbone ed energia elettrica impiegati nell’azienda. Si ricorda che per la categoria energia elettrica è stata utilizzata quella proveniente da fonti fossili, non conoscendone l’origine. Seguono al terzo posto le attività svolte nell’azienda con le relative emissioni (comprese la combustione del carbone, dato che il suo utilizzo non è un sottoprocesso ma avviene direttamente nell’azienda, i sottoprocessi legati al carbone sono l’estrazione e la produzione).



- 1.385E6 kg CO2 eq: pelle2_EF - IN
- 1.155E6 kg CO2 eq: Electricity from fossil unspecified, production mix, at plant, AC, technology mix, 1kV - 60kV - DE
- 3.098E5 kg CO2 eq: Coke, production mix, at plant, coke oven process, from hard coal, 29 MJ/kg net calorific value - EU-28+EFTA
- 1.412E5 kg CO2 eq: Hard coal mining (mixed), production mix, at plant, technology mix, 27 MJ/kg net calorific value - GLO
- 5.771E4 kg CO2 eq: basic chrome sulfate production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - ZA
- 6.477E4 kg CO2 eq: Altro

Figura 8.2 Climate change

Le emissioni ai camini dovute alla combustione del carbone nella caldaia e del diesel nel generatore sono, come si vede dalla figura 8.2 (che mostra al primo posto il processo “pelle2_EF” ovvero ciò che avviene in azienda), le maggiori responsabili del cambiamento climatico, seguite dalla produzione di energia elettrica (che si ricorda derivata da fonti fossili).



- 3.932E5 CTU: basic chrome sulfate production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - ZA
- 3.210E4 CTU: synthetic fatliquors production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - RER
- 2.086E4 CTU: Electricity from fossil unspecified, production mix, at plant, AC, technology mix, 1kV - 60kV - DE
- 1.565E4 CTU: Diesel mix at refinery, production mix, at refinery, from crude oil, 10 ppm sulphur, 7.23 wt.% bio components - EU-28+3
- 1.537E4 CTU: Melamine methylated, Production mix, at plant, Technology mix, - GLO
- 3.224E4 CTU: Altro

Figura 8.3 Ecotossicità acquatica

Come si vede dalla figura 8.3, il responsabile principale della tossicità ambientale è la produzione del solfato basico di cromo, il sale utilizzato nella riconcia della pelle. Come visto nei capitoli precedenti, infatti, la concia al cromo risulta essere la più impattante a livello ambientale proprio per l'utilizzo di un sale caratterizzato da un'elevata tossicità sia verso l'ambiente che verso l'uomo.

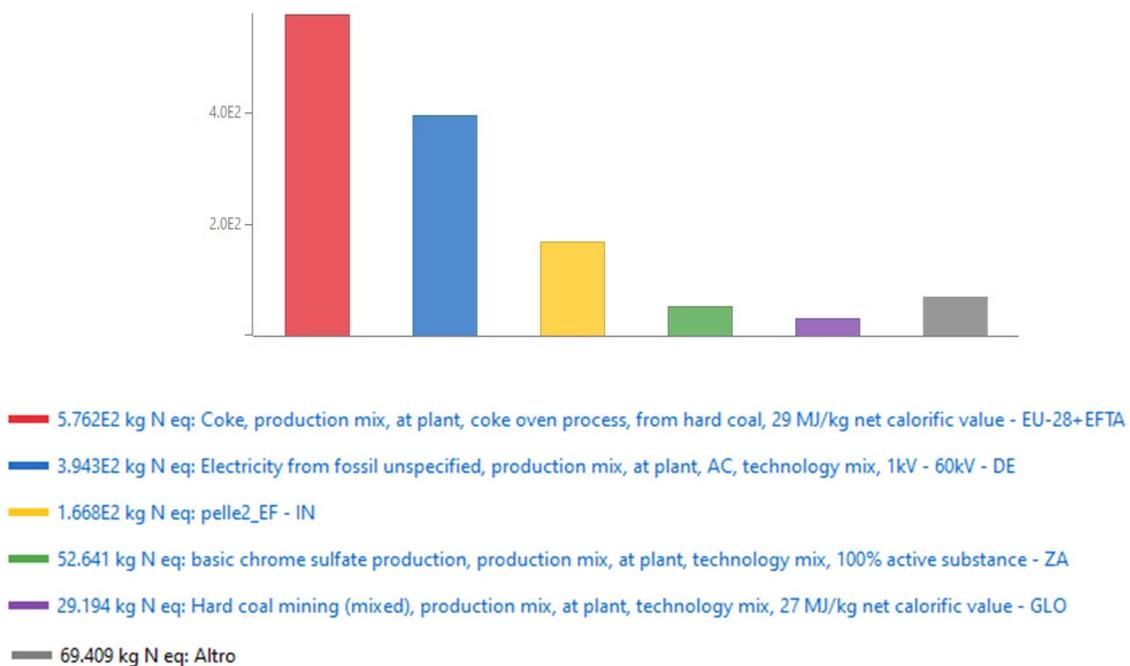
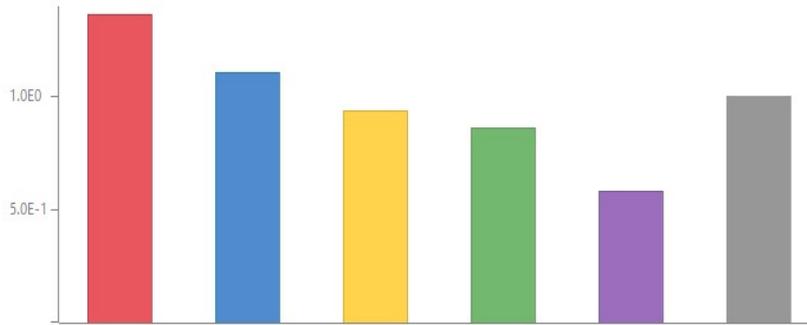


Figura 8.4 Eutrofizzazione marina

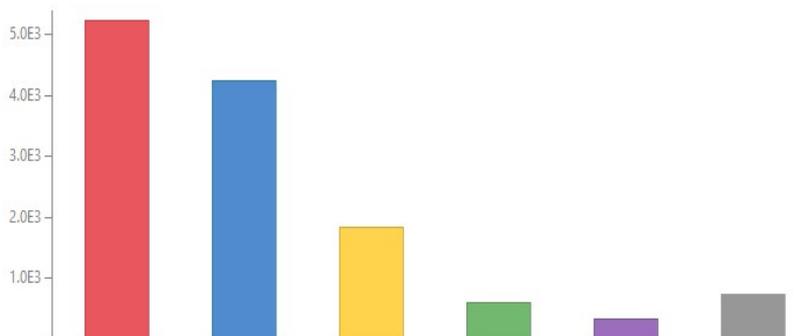
Anche per quanto riguarda l'eutrofizzazione marina i principali responsabili sono i processi per la produzione delle fonti energetiche impiegate in azienda, carbone ed elettricità, seguite dalle emissioni aziendali. Si fa notare come l'utilizzo di carbone sia tipico dei paesi in via di sviluppo, mentre in Europa negli ultimi anni si sta cercando di diminuirne l'utilizzo.



- 1.365 kg P eq: Melamine methylated, Production mix, at plant, Technology mix, - GLO
- 1.103 kg P eq: basic chrome sulfate production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - ZA
- 0.937 kg P eq: Acrylic resin, Production mix, at plant, Technology mix, Without butylacetate - EU-27
- 0.860 kg P eq: synthetic fatliquors production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - RER
- 0.581 kg P eq: Diesel mix at refinery, production mix, at refinery, from crude oil, 10 ppm sulphur, 7.23 wt.% bio components - EU-28+3
- 0.998 kg P eq: Altro

Figura 8.5 Eutrofizzazione acquatica

L'eutrofizzazione dell'acqua dolce è data principalmente dalla produzione dei reagenti utilizzati, in particolare le due resine e nuovamente i sali di cromo. Questo è un esempio lampante di come la LCA analizza gli impatti a livello "totale": nel grafico in questione non compare nessuna voce che riguardi le operazioni svolte in azienda, gli impatti sono dovuti principalmente ai processi di produzione dei chemicals utilizzati e acquistati.



- 5.241E3 mol N eq: Coke, production mix, at plant, coke oven process, from hard coal, 29 MJ/kg net calorific value - EU-28+EFTA
- 4.241E3 mol N eq: Electricity from fossil unspecified, production mix, at plant, AC, technology mix, 1kV - 60kV - DE
- 1.827E3 mol N eq: pelle2_EF - IN
- 5.856E2 mol N eq: basic chrome sulfate production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - ZA
- 3.214E2 mol N eq: Hard coal mining (mixed), production mix, at plant, technology mix, 27 MJ/kg net calorific value - GLO
- 7.343E2 mol N eq: Altro

Figura 8.6 Eutrofizzazione terrestre

L'eutrofizzazione terrestre è invece causata dalla produzione di energia. Risulta quindi chiaro come l'utilizzo di fonti energetiche alternative e più pulite potrebbe contribuire a migliorare la situazione.

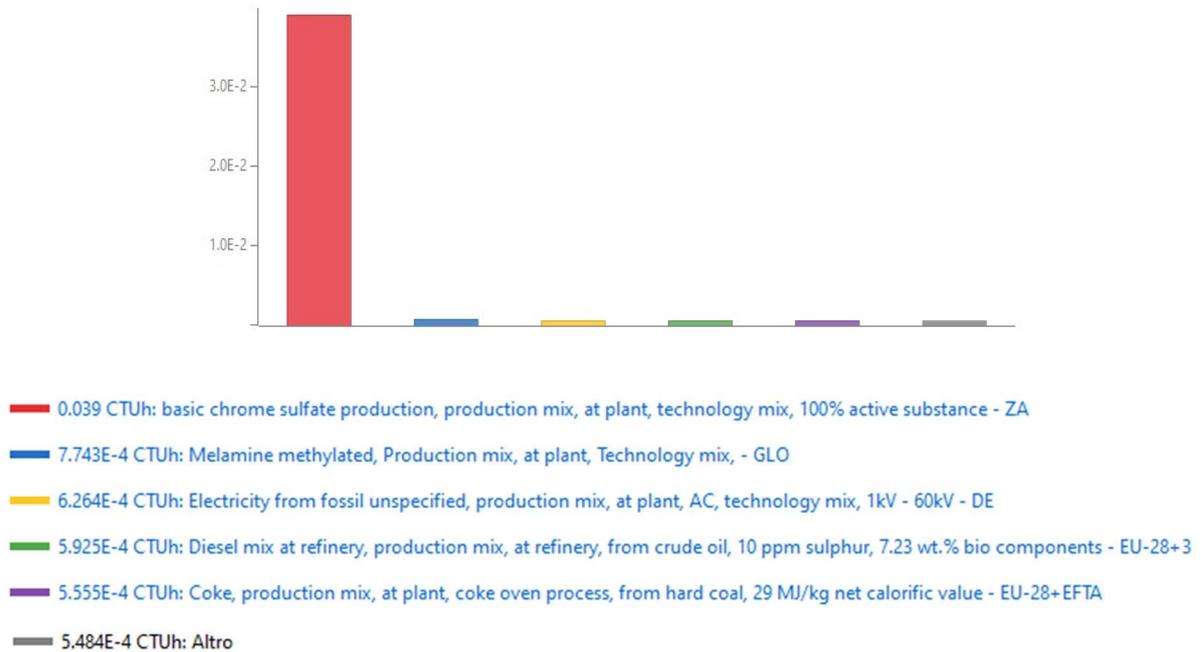
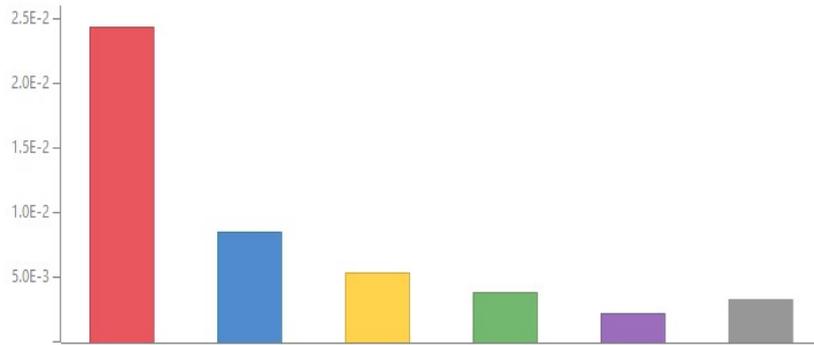


Figura 8.7 Tossicità umana cancerogena

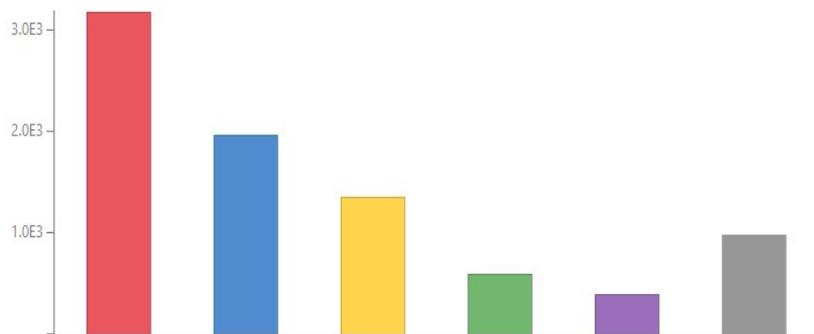
La tossicità umana legata, in termini di sviluppo di malattie tumorali, è causata praticamente solo dalla produzione del solfato basico di cromo, d'altronde tossicità e cancerogenicità di questo composto sono ormai appurati.



- 0.024 CTUh: Electricity from fossil unspecified, production mix, at plant, AC, technology mix, 1kV - 60kV - DE
- 8.550E-3 CTUh: Diesel mix at refinery, production mix, at refinery, from crude oil, 10 ppm sulphur, 7.23 wt.% bio components - EU-28+3
- 5.319E-3 CTUh: basic chrome sulfate production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - ZA
- 3.815E-3 CTUh: Coke, production mix, at plant, coke oven process, from hard coal, 29 MJ/kg net calorific value - EU-28+EFTA
- 2.254E-3 CTUh: Hard coal mining (mixed), production mix, at plant, technology mix, 27 MJ/kg net calorific value - GLO
- 3.261E-3 CTUh: Altro

Figura 8.8 Tossicità umana non cancerogena

Per quanto riguarda la tossicità “debole”, che non porta a malattie croniche, la produzione di energia elettrica ne è la principale responsabile, seguita dalla produzione del carburante diesel utilizzato nel generatore e dalla produzione dei sali di cromo.



- 3.186E3 kBq U-235 eq: basic chrome sulfate production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - ZA
- 1.968E3 kBq U-235 eq: Coke, production mix, at plant, coke oven process, from hard coal, 29 MJ/kg net calorific value - EU-28+EFTA
- 1.348E3 kBq U-235 eq: Electricity from fossil unspecified, production mix, at plant, AC, technology mix, 1kV - 60kV - DE
- 5.877E2 kBq U-235 eq: formic acid production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - RER
- 3.978E2 kBq U-235 eq: synthetic fatliquors production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - RER
- 9.795E2 kBq U-235 eq: Altro

Figura 8.9 Radiazioni ionizzanti

La produzione dei sali di cromo è anche la principale responsabile di radiazioni ionizzanti. Questa voce rispecchia l'utilizzo di energia nucleare, come fonte energetica per esempio.

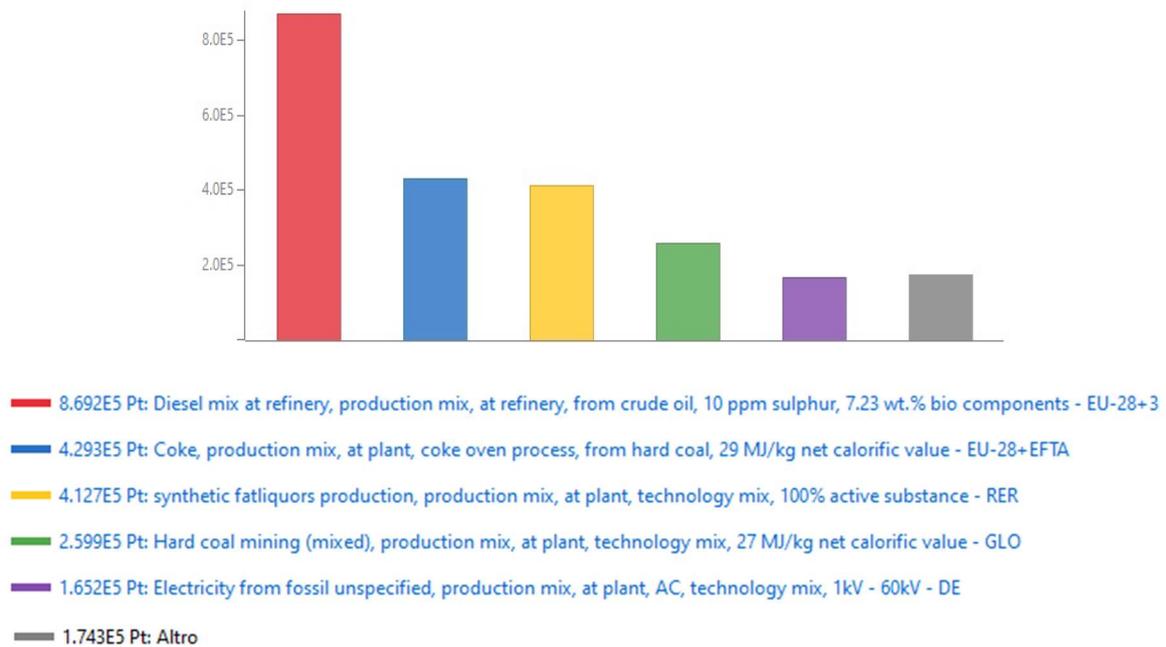


Figura 8.10 Uso del territorio

La produzione del diesel indicato come un mix, con una piccola percentuale anche di biodiesel è la principale responsabile dell'uso del territorio, mentre la produzione di carbone e dei fatliquors sono praticamente ugualmente impattanti.

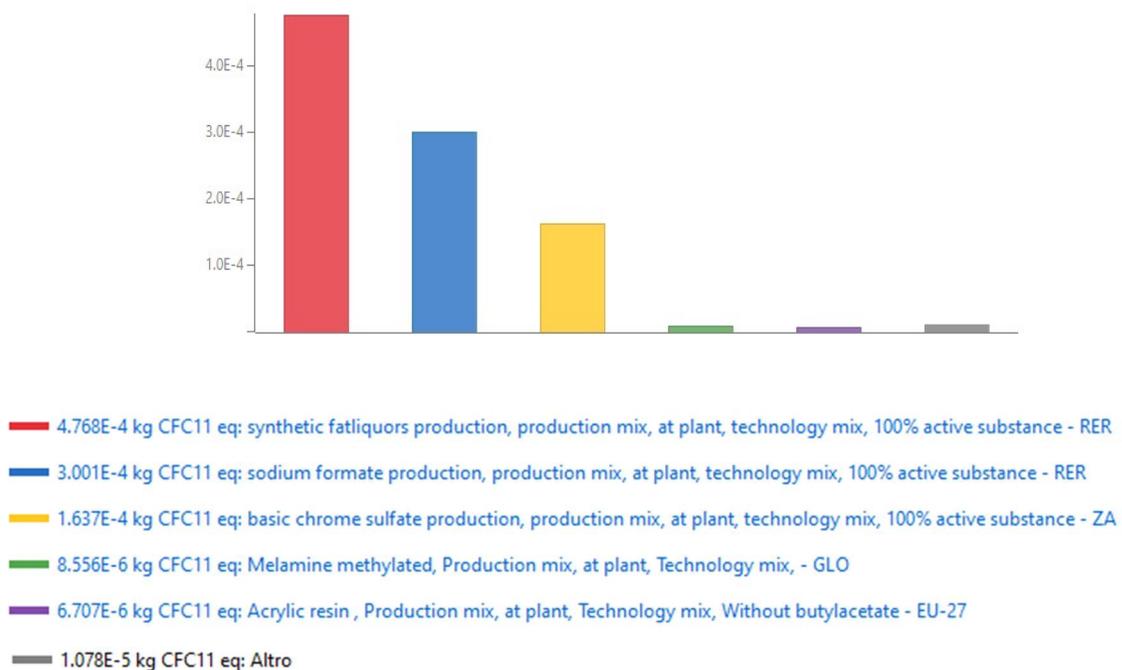


Figura 8.11 Ozone depletion

La produzione dei *fatliquors* è la principale responsabile del buco nell'ozono, seguita dalle produzioni di formiato di sodio e dei sali basici di cromo. Questo è un ulteriore esempio di come il processo di concia, a causa dei reagenti impiegati, sia molto impattante sull'ambiente.

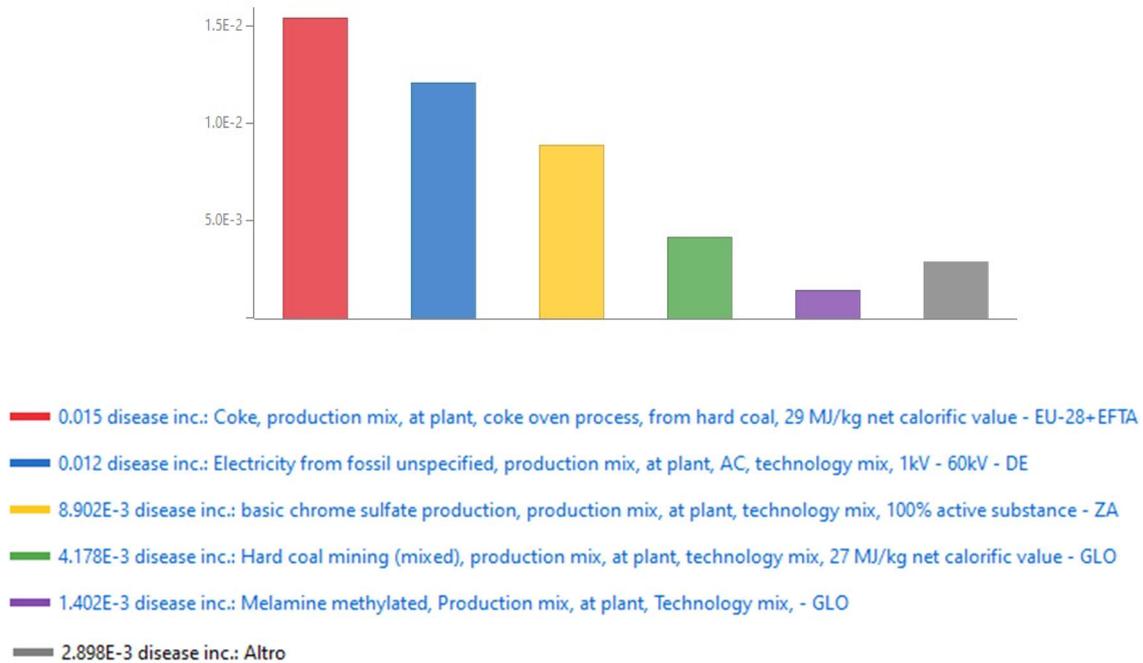
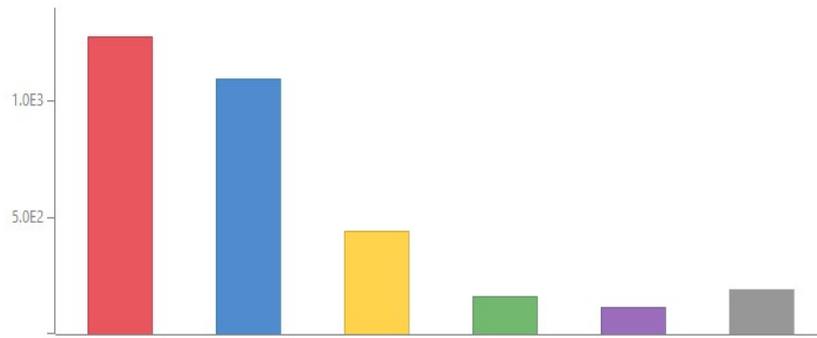


Figura 8.12 PM

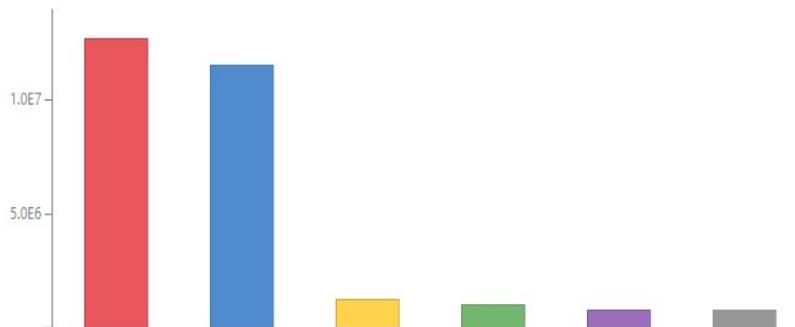
Come era facile aspettarsi, i principali responsabili dell'emissione di particolato sono la produzione di carbone e di elettricità (da fonti fossili). Si nota come non figuri la voce riguardante l'azienda, perché le emissioni di particolato sono state considerate come PM 10, sulla base delle certificazioni che l'azienda ha fornito sul trattamento degli effluenti gassosi.



- 1.272E3 kg NMVOC eq: Coke, production mix, at plant, coke oven process, from hard coal, 29 MJ/kg net calorific value - EU-28+EFTA
- 1.092E3 kg NMVOC eq: Electricity from fossil unspecified, production mix, at plant, AC, technology mix, 1kV - 60kV - DE
- 4.413E2 kg NMVOC eq: pelle2_EF - IN
- 1.588E2 kg NMVOC eq: basic chrome sulfate production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - ZA
- 1.141E2 kg NMVOC eq: Hard coal mining (mixed), production mix, at plant, technology mix, 27 MJ/kg net calorific value - GLO
- 1.910E2 kg NMVOC eq: Altro

Figura 8.13 Formazione di ozono fotochimico

Anche in questo caso, produzione di carbone ed elettricità sono i principali responsabili della formazione di ozono fotochimico.



- 1.269E7 MJ: Hard coal mining (mixed), production mix, at plant, technology mix, 27 MJ/kg net calorific value - GLO
- 1.149E7 MJ: Electricity from fossil unspecified, production mix, at plant, AC, technology mix, 1kV - 60kV - DE
- 1.253E6 MJ: Diesel mix at refinery, production mix, at refinery, from crude oil, 10 ppm sulphur, 7.23 wt.% bio components - EU-28+3
- 1.036E6 MJ: Coke, production mix, at plant, coke oven process, from hard coal, 29 MJ/kg net calorific value - EU-28+EFTA
- 7.962E5 MJ: basic chrome sulfate production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - ZA
- 7.988E5 MJ: Altro

Figura 8.14 Utilizzo di risorse fossili

L'utilizzo di risorse fossili è dato dalla produzione di carbone ed elettricità, che insieme alla produzione di olio diesel sono i responsabili di questa categoria (la prima voce diversa, la produzione di solfato basico di cromo è due ordini di grandezza in meno!).

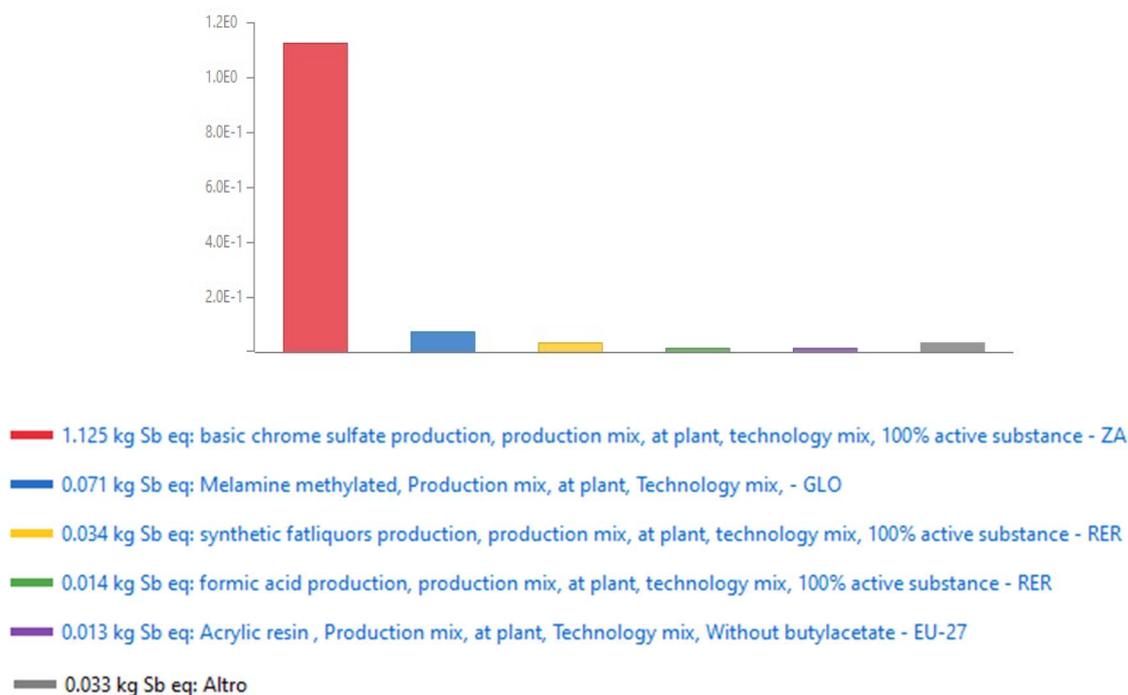


Figura 8.15 Utilizzo di risorse minerali

Al contrario, come era facile aspettarsi, il consumo di minerali è dato in maniera preponderante dalla produzione del solfato basico di cromo, seguito in maniera irrilevante dalla produzione degli altri reagenti. Questo grafico evidenzia come l'utilizzo di grandi quantità di cromo non sia un problema solamente per quanto concerne l'inquinamento ambientale, ma anche per la sua disponibilità, soprattutto se si considera l'enorme quantità di produzione mondiale annua di pelli: 17 milioni di tonnellate, di cui il 90% circa sono conciate al cromo.

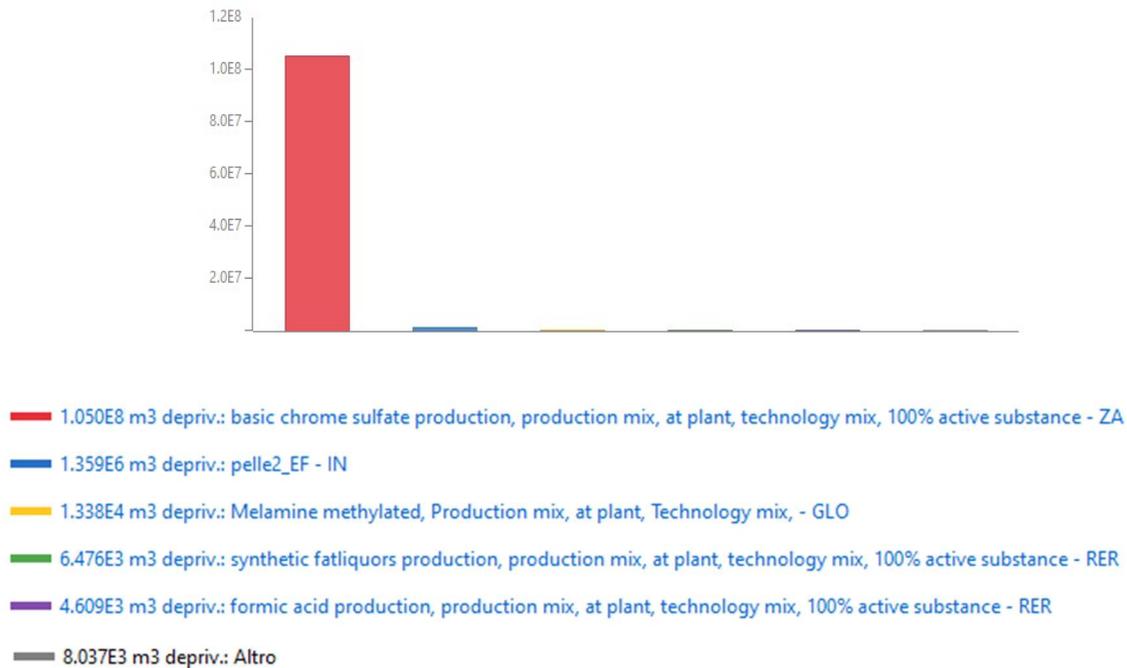


Figura 8.16 Utilizzo di acqua

Anche per quanto riguarda il consumo di acqua, il principale, e praticamente unico responsabile, è il solfato basilico di cromo in quanto la sua produzione consuma moltissima acqua. L'utilizzo di acqua da parte dell'azienda (circa 46000 m³/anno) ha un impatto di due ordini di grandezza inferiori.

Osservando i grafici, si nota come i principali responsabili degli impatti siano generalmente sempre gli stessi: la produzione dei carrier energetici (nonostante l'azienda utilizzi per l'energia termica solamente energia solare) e la produzione del solfato basilico di cromo, indispensabile per questo tipo di concia ad eccezione della categoria riguardante il cambiamento climatico, in quel caso le emissioni ai camini dell'azienda sono rilevanti. Miglioramenti per rendere il processo più sostenibile devono essere fatti ricercando fonti energetiche più sostenibili. In particolare, l'utilizzo di combustibili fossili, sia per produrre energia elettrica che all'interno dell'azienda stessa sottoforma di carbone e diesel, deve essere ridotto ove possibile.

Per quanto riguarda l'utilizzo di sali di cromo, ad oggi non è possibile sostituirli con altri tipi di concia: come visto nella tabella 2.1, la concia al cromo è quella che produce cuoi di qualità migliore rispetto alle altre, pertanto è la più utilizzata. Ulteriori osservazioni e spunti di miglioramento verranno illustrati nel prossimo capitolo.

Questi sono i risultati del processo di riconcia, tintura, ingrasso e rifinitura svolto dall'azienda, ma come si inseriscono a livello mondiale? Qual è l'impatto rispetto alla media mondiale?

8.2 Confronto con il processo integrato nel database

Per comprendere meglio e inserire nel contesto mondiale i dati del processo analizzato si confrontano ora i risultati ottenuti con quelli dell'analisi dell'intero processo di concia integrato nel database.

Il processo con cui è stato effettuato il confronto ha il nome di: *“Finished leather or footwear & leather goods, consumption mix, at tanning plant, preserved and tanned,”* e porta alla produzione del flusso *“Finished leather or footwear & leather goods_EU+28”*.

Bisogna però prima di procedere evidenziare due questioni importanti:

- 1) Il processo già integrato nel database corrisponde all'intero processo di concia a partire dalla preparazione delle pelli fino alla rifinitura finale, mentre il processo dell'azienda si occupa solo della parte finale partendo da pelli *wet blue*. Pertanto, ci si aspetta degli impatti notevolmente inferiori per il processo studiato.
- 2) Questo processo integrato rappresenta una media sia come processo di concia che provenienza delle pelli che locazione. Secondo la descrizione del programma, infatti, questo processo è *“La produzione di cuoio per abbigliamento e calzature, considerando tutto il ciclo vita [...], la tipologia di pelle è un mix di bovina, ovina, caprina e di vitello. La tecnologia è un mix di concia al cromo, concia senza cromo e concia vegetale [...].”* Il processo non considera solamente un mix di tecnologie e provenienza delle pelli ma fa anche una media sui (ex) 28 stati dell'Unione Europea, considerando quindi ancora il Regno Unito, il cui comparto conciario è caratterizzato da una gran presenza di pelli ovine.

Ovviamente il confronto è stato effettuato con la stessa unità funzionale: la produzione di 949554 m² di pelli in un anno.

Categoria di impatto	Unità	Processo Azienda	Processo Database
Acidificazione	mol H+ eq	4,60*10 ³	6,12*10 ⁵
Climate change	kg CO ₂ eq	3,11*10 ⁶	6,57*10 ⁷
<i>Climate change-Biogenic</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	<i>506,71</i>	<i>1,24*10⁷</i>
<i>Climate change-Fossil</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	<i>3,11*10⁶</i>	<i>5,03*10⁷</i>
<i>Climate change-Land use and land use change</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	<i>964,31</i>	<i>3,02*10⁶</i>
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	5,09*10 ⁵	5,50*10 ⁸
Eutrophication marine	kg N eq	1,29*10 ³	2,34*10 ⁵
Eutrophication, freshwater	kg P eq	5,84	5,79*10 ³
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	1,29*10 ⁴	2,28*10 ⁶
Human toxicity, cancer	CTUh	0,04211	3,147
Human toxicity, non-cancer	CTUh	0,0475	39,998
Ionising radiation, human health	kBq U-235 eq	8,47*10 ³	4,19*10 ⁶
Land use	Pt	2,31*10 ⁶	5,38*10 ⁹
Ozone depletion	kg CFC11 eq	0,0009666	19,225
Particulate Matter	disease inc.	0,0449	5,483
Photochemical ozone formation - human health	kg NMVOC eq	3,27*10 ³	1,74*10 ⁵
Resource use, fossils	MJ	2,81*10 ⁷	6,37*10 ⁸
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,29	371,803
Water use	m ³ depriv.	1,06*10 ⁸	5,09*10 ⁸

Tabella 8.2 Confronto tra il processo dell'azienda e quello integrato nel database

NB: le voci *Climate change-Biogenic*, *Climate change-Fossil*, *Climate change-Land use and land use change* sono sottocategorie del *Climate change*, la loro somma compone tale valore.

Siccome il confronto numerico dalla tabella può risultare di difficile lettura, i risultati vengono riportati anche graficamente.

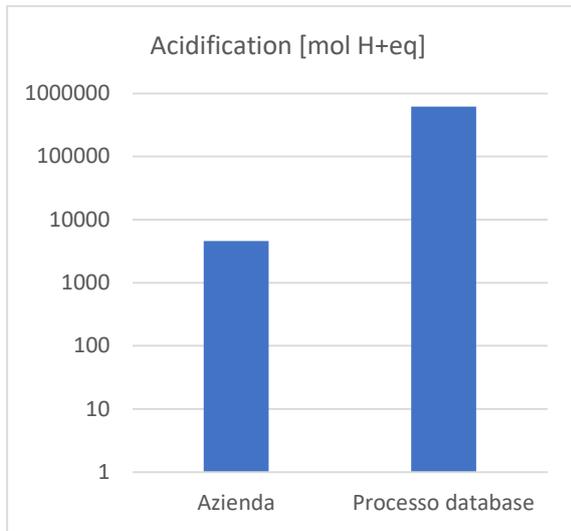


Figura 8.17: Acidificazione

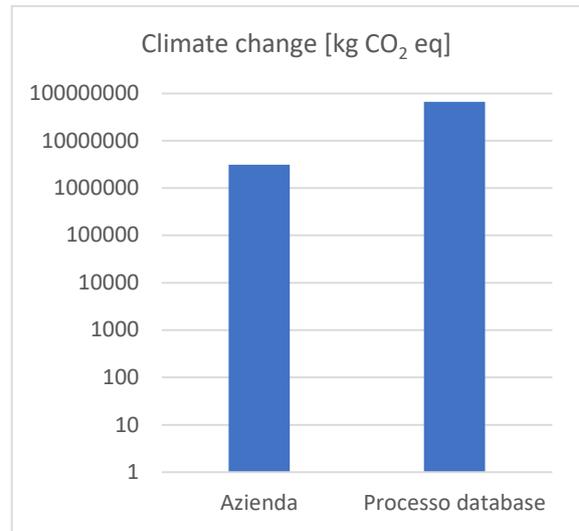


Figura 8.18: Climate change

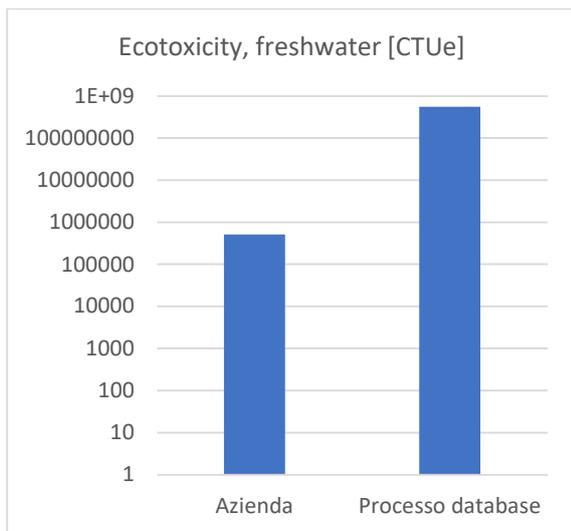


Figura 8.19: Ecotossicità (acque superficiali)

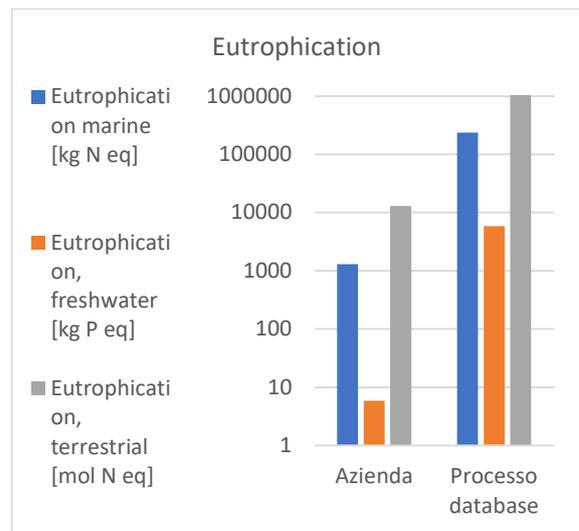


Figura 8.20: Eutrofizzazione

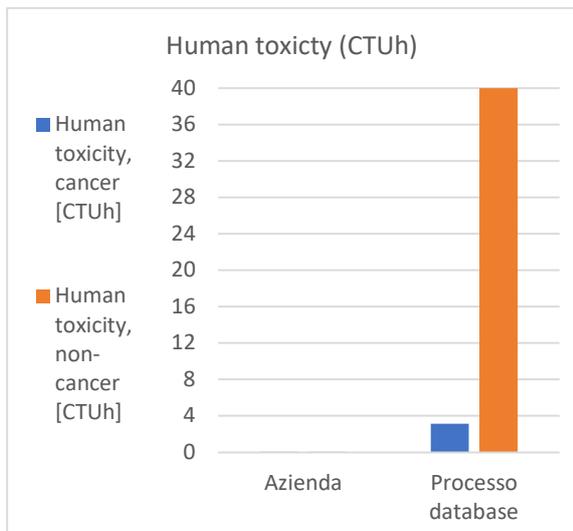


Figura 8.21: Tossicità sulla salute umana

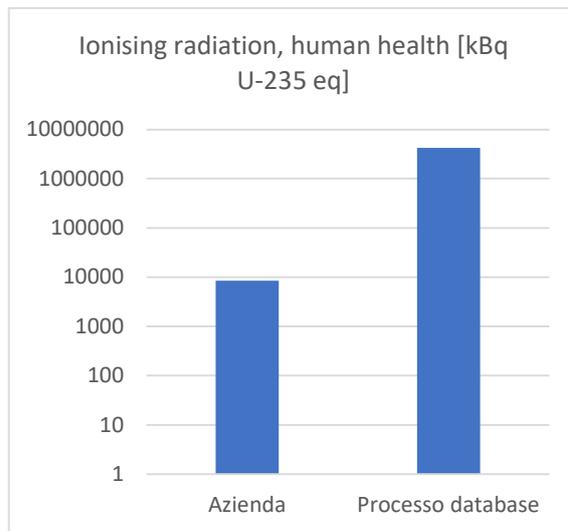


Figura 8.22: Radiazioni ionizzanti

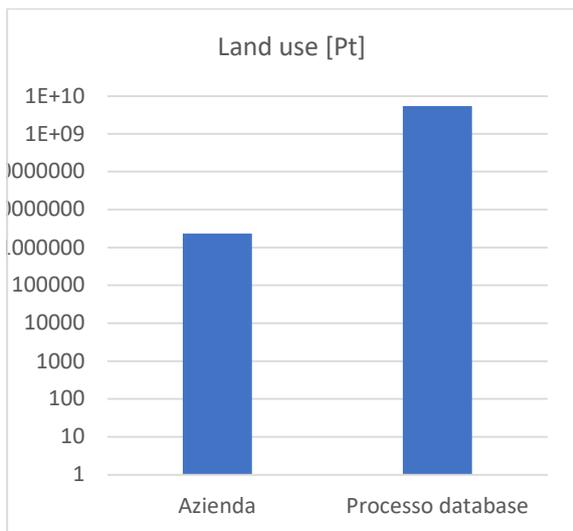


Figura 8.23: Uso del territorio

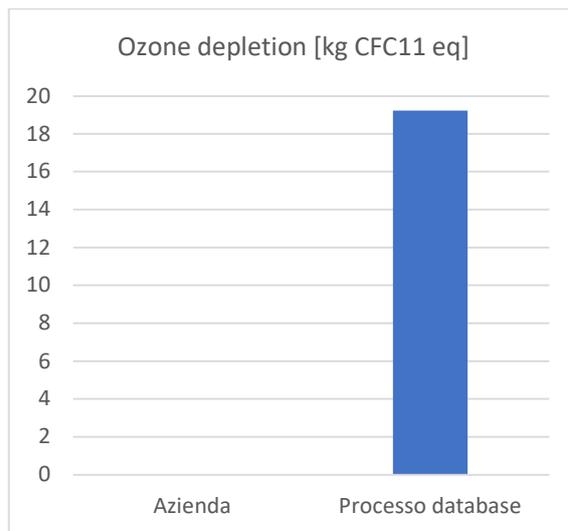


Figura 8.24: Ozono depletion

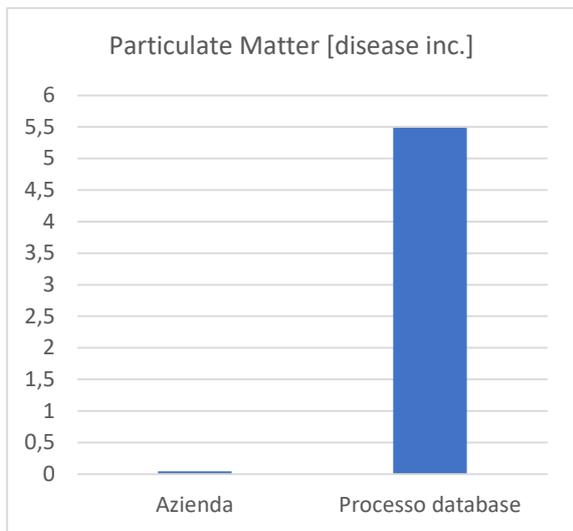


Figura 8.25: PM

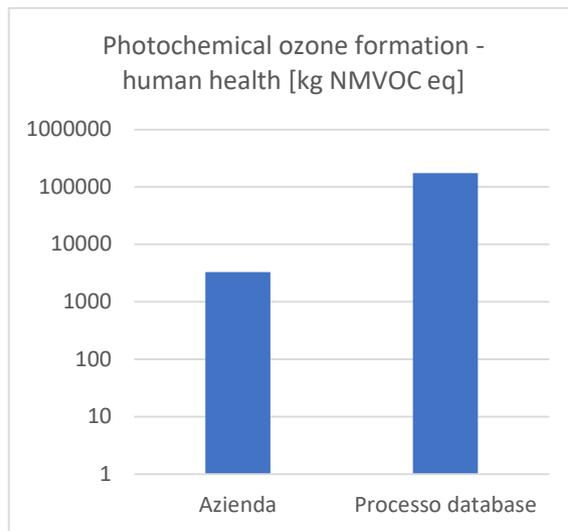


Figura 8.27: Ozono fotochimico

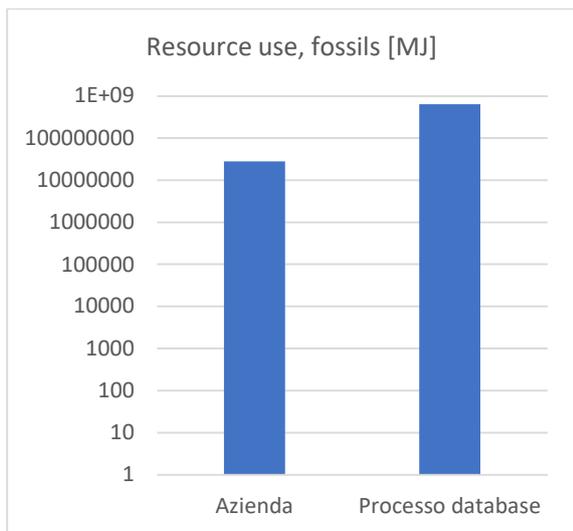


Figura 8.28 Utilizzo risorse fossili

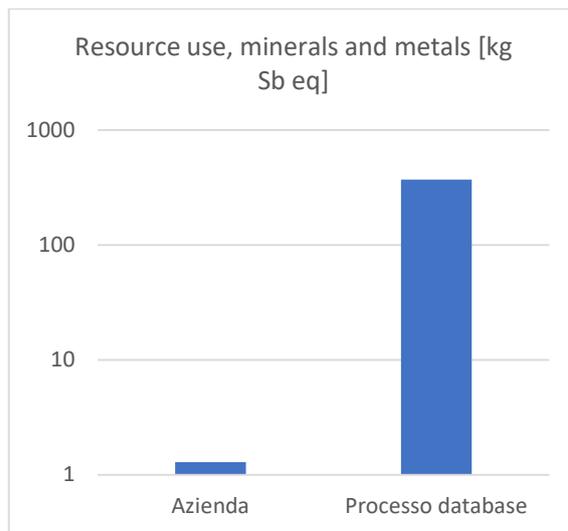


Figura 8.29: Uso di minerali

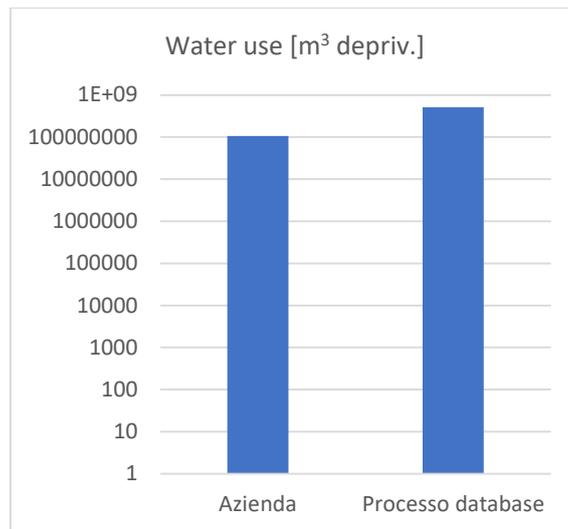


Figura 8.30: Consumo di acqua

Come si può notare dai grafici e dalla tabella 8.2, gli impatti del processo di riconcia della pelle dell'azienda sono nettamente inferiori rispetto a quello implementato nel database. Questo trova conferma in quanto il processo integrato nel database come già specificato, comprende tutte le operazioni di concia della pelle, dai processi di riviera sino alla rifinitura, per questo motivo i valori sono molto più elevati. Non solo sono più elevati ma sono maggiori oltre un ordine di grandezza (nella maggior parte dei casi ci sono almeno due o tre ordini di grandezza di differenza, per "l'ozone depletion" ci sono addirittura cinque ordini di grandezza di differenza, dovuto alla moltitudine di reagenti dannosi utilizzati).

Solamente tre categorie di impatto presentano meno di due ordini di grandezza in meno rispetto al processo "completo": "Climate change", "Resource use, fossil", e "Water use". Per quanto riguarda le prime due categorie, si ha circa un solo ordine di grandezza in meno. Questo è causato dal fatto che l'azienda analizzata utilizza carbone e diesel. D'altronde, la figura 8.2 mostra come l'impatto sul cambiamento climatico sia dato principalmente dalle emissioni dei due camini. La figura 8.14 mostra invece come l'esaurimento di risorse fossili sia dato principalmente dall'origine fossile dell'energia elettrica e da produzione e consumo di olio diesel. Il processo implementato nel database invece, facendo riferimento a un contesto europeo, limita l'utilizzo di carbone incrementando quello di risorse rinnovabili. Questo discorso verrà approfondito nel prossimo capitolo.

Per quanto riguarda l'uso di acqua, pur essendo circa 5 volte maggiore nel processo "totale", si ha lo stesso ordine di grandezza con quello della sola riconcia svolta dall'azienda. Bisogna in quest'ultimo caso fare delle considerazioni:

- Come si vede nella figura 8.16, la maggior parte del consumo di acqua non è dato dalle operazioni svolte nell'azienda analizzata ma dalla produzione del solfato basico di cromo impiegato; il processo del database, come spiegato rappresenta un mix di conce diverse, non solamente quella al cromo e questo contribuisce ad abbassare i valori.
- Come spiegato nel capitolo 5, questa categoria di impatto non presenta un rapporto di acqua usata 1:1, ma considera diversi fattori come la scarsità di acqua, la densità di popolazione,... Nel processo creato è stato indicato come paese di ubicazione l'India, mentre, come già spiegato, il processo integrato nel database fa riferimento all'Unione Europea: l'utilizzo di una certa quantità di acqua nell'Unione Europea ha un impatto minore rispetto alla stessa quantità in paesi come l'India soggetti a problemi idrici.

8.3 Ipotesi di sostituzione dell'energia solare con metano

Come spiegato nel capitolo precedente, è stata fatta una modifica al processo di calcolo per vedere come cambierebbero gli impatti dell'azienda se invece che l'energia solare per scopi termici fosse utilizzato e bruciato metano (i calcoli sono visionabili nel capitolo 7). È stato quindi rifatto il calcolo e si sono ottenuti i seguenti risultati:

Categoria di impatto	Unità di riferimento	Con energia solare	Con metano
Acidificazione	mol H ⁺ eq	4,60*10 ³	4,66*10 ³
Climate change	kg CO ₂ eq	3,11*10⁶	3,26*10⁶
<i>Climate change-Biogenic</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	<i>506,71</i>	<i>519,65</i>
<i>Climate change-Fossil</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	<i>3,11*10⁶</i>	<i>3,25*10⁶</i>
<i>Climate change-Land use and land use change</i>	<i>kg CO₂ eq</i>	<i>964,31</i>	<i>969,58</i>
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	5,09*10 ⁵	5,11*10 ⁵
Eutrophication marine	kg N eq	1,29*10 ³	1,30*10 ³
Eutrophication, freshwater	kg P eq	5,84	5,85
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	1,29*10 ⁴	1,32*10 ⁴
Human toxicity, cancer	CTUh	0,04211	0,04212
Human toxicity, non-cancer	CTUh	0,0475	0,0477
Ionising radiation, human health	kBq U-235 eq	8,47*10³	9,96*10³
Land use	Pt	2,31*10 ⁶	2,34*10 ⁶
Ozone depletion	kg CFC11 eq	0,0009666	0,000968
Particulate Matter	disease inc.	0,0449	0,0453
Photochemical ozone formation - human health	kg NMVOC eq	3,27*10³	3,33*10³
Resource use, fossils	MJ	2,81*10⁷	3,04*10⁷
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,29	1,30
Water use	m ³ depriv.	1,06*10 ⁸	1,06*10 ⁸

Tabella 8.3 Confronto tra il processo che utilizza energia solare e quello che utilizza metano

L'utilizzo dell'energia solare abbassa, seppur non di molto, gli impatti dell'azienda in tutte le categorie e non solamente sul *Climate change* poiché, come detto, non si ha solo l'impatto dell'utilizzo del metano ma anche della sua produzione e distribuzione. Ovviamente l'impatto dell'utilizzo di metano è evidente, dato che si sostituisce una fonte primaria di energia rinnovabile quale l'energia solare con un carrier energetico (che implica quindi una spesa energetica per la sua produzione) che deriva in parte da fonti fossili.

Le voci evidenziate sono quelle in cui si ha il maggior impatto e vengono riportate nei grafici seguenti

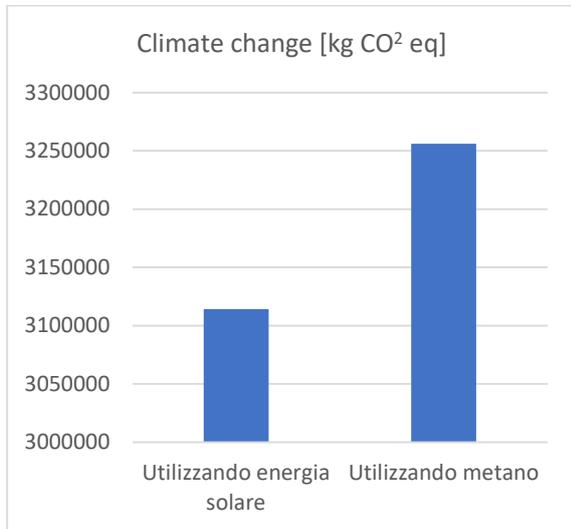


Figura 8.31 Climate change

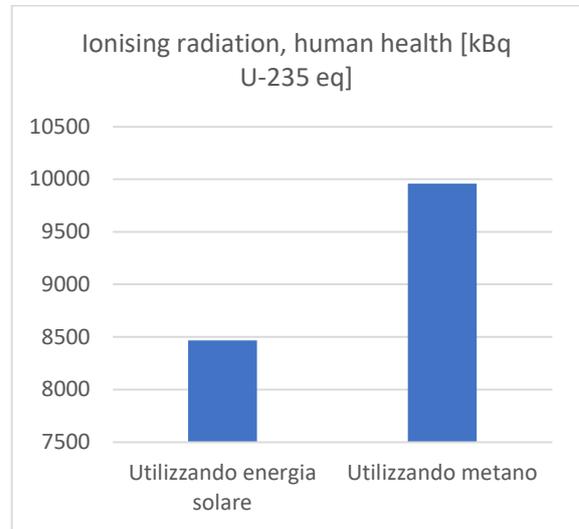


Figura 8.32 Radiazioni ionizzanti

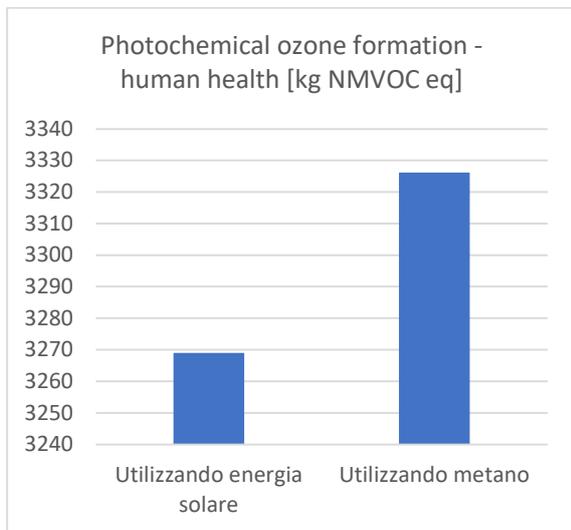


Figura 8.33 Ozono fotochimico

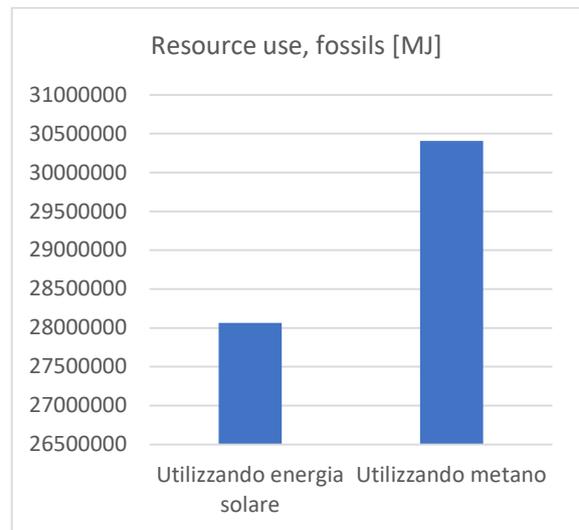


Figura 8.34 Utilizzo di risorse fossili

9. OSSERVAZIONI E CONSIDERAZIONI FINALI

Come si è visto nel capitolo precedente, il processo di riconcia della *pelle wet blue* operato dall'azienda è molto meno impattante rispetto alla media europea del processo completo. Risultato che rispecchia totalmente la realtà dato che la fase più impattante dell'intero processo è la concia stessa. L'azienda, inoltre, data l'ubicazione tropicale, riesce a sfruttare come energia termica quella solare senza bisogno di bruciare metano per produrre calore. In questo modo, diminuiscono gli impatti e i consumi. Tuttavia, si è notato che la maggior parte degli impatti è causato dalla produzione di energia elettrica e carbone impiegati nell'azienda, oltre che dalla produzione di solfato basico di cromo.

9.1 Inserimento in un contesto europeo

Prima di parlare però dei problemi presenti ed eventuali miglioramenti, si vuole cercare di capire come l'azienda in questione si inserirebbe in un contesto europeo.

La normativa europea impone di seguire quelle che sono le migliori tecnologie disponibili (Best Available Techniques - BATs).

Le BATs vengono definite dal D.Lgs. n.46/2014 [23] come “*la più efficiente e avanzata fase di sviluppo di attività e relativi metodi di esercizio indicanti l'idoneità pratica di determinate tecniche a costituire, in linea di massima, la base dei valori limite di emissione e delle altre condizioni di autorizzazione intesi ad evitare oppure, ove ciò si riveli impossibile, a ridurre in modo generale le emissioni e l'impatto sull'ambiente nel suo complesso.*”

Ma cosa comporta l'utilizzo di queste tecnologie? Che limiti ci sono all'utilizzo di acqua ed energia? Quali sono i limiti di emissioni?

Categoria	Valore azienda	Valori BAT	Unità
Consumo di acqua	10,9	6-10	m ³ /t pelle grezza
Consumo energetico	5,07	<11	GJ/t pelle grezza
Emissione di particolato	26,2	3-6	mg/m ³ aria esausta

Tabella 9.1 Confronto dei valori aziendali con le BAT dell'UE

9.1.1 Consumo di acqua

Per quanto riguarda l'acqua, il consumo previsto dalle BAT per il post concia delle pelli bovine si attesta tra i 6 e 10 m³ per tonnellata di pelle grezza trattata [24]. L'azienda analizzata consuma 46240 m³ di acqua per produrre 949554 m² di cuoio finito. Da 1 tonnellata di pelle bovina grezza si ottengono circa 225 m² di cuoio finito; pertanto, per produrre 949554 m² di cuoio serviranno quindi circa 4220 tonnellate di pelle grezza. Ciò vuol dire che si ha un consumo di acqua per tonnellata di pelle grezza di circa 10.9 m³/t di poco superiore al limite massimo. Bisogna però considerare che questo quantitativo di acqua è il totale utilizzato dall'azienda compresi i servizi “domestici” quali servizi igienici, irrigazione e acqua potabile per i dipendenti. Se si osserva la figura 8.16, si nota come l'impatto sul consumo di acqua sia per la maggior parte dato dalla produzione dei sali di cromo e che l'impiego dell'acqua nell'azienda abbia un impatto minimo rispetto a quest'ultimo.

9.1.2 Consumo di energia

Il consumo di associato all'utilizzo delle BATs deve essere minore di 11 GJ di energia totale (termica più elettrica) per tonnellata di pelle grezza trattata [24]. Dai dati forniti dall'azienda risulta un consumo di elettricità pari a 1187685 kWh all'anno che corrispondono a circa 4275.7 GJ. A questi va sommata l'energia associata alla combustione di carbone e dell'olio diesel impiegati per caldaia e generatore. Considerando un potere calorifico di circa 42,68 MJ/kg del diesel e considerando che l'azienda ne impiega 25976 kg si hanno circa 1108,7 GJ di energia. Secondo il programma OpenLCA, il carbone utilizzato ha un potere calorifero di 35,2 MJ/kg che moltiplicato per i 455149,57 kg impiegati fanno circa 16021 GJ. In totale si avranno quindi 21405,4 GJ di energia, che rapportati alle le 4220 tonnellate di pelli grezze forniscono 5,07 GJ/t di pelle grezza trattata: ampiamente sotto il limite delle BAT. D'altronde si ricorda che l'azienda utilizza per il riscaldamento interno e per i processi di tintura solamente energia termica e questa essendo una fonte primaria di energia non rientra in questi "calcoli di sostenibilità". Si pone l'attenzione a come la maggior parte dell'energia sia data dalla combustione del carbone.

9.1.3 Emissione di particolato

Secondo le BAT la concentrazione di particolato è compresa tra 3 e 6 mg/m³ di emissioni gassose [24]. Purtroppo, in questo caso i valori delle emissioni ai camini dell'azienda risultano molto elevati e superiori a 6 mg/m³: addirittura per il primo camino si ha una concentrazione di 26,2 mg/m³, cioè più di 4 volte il limite massimo indicato dalle BAT. In effetti guardando la figura 8.2 si vede subito come le attività e quindi emissioni dell'azienda siano le principali responsabili della categoria "*Climate change*", molto di più che i sottoprocessi di produzione di energia e materie prime. Non c'è da stupirsi tuttavia per questo valore, data la grande quantità di carbone utilizzata a fini energetici.

Al fine di ridurre il particolato, le BAT prevedono l'installazione di filtri a maniche o scrubber a umido per il trattamento degli effluenti gassosi. In alternativa si potrebbe pensare alla sostituzione dei carburanti utilizzati e legati alle emissioni di questo particolato; questo discorso verrà approfondito nel prossimo paragrafo.

9.2 Possibili miglioramenti

Uno degli scopi principali della LCA è l'identificazione di punti critici nel processo, per proporre miglioramenti sull'utilizzo di determinati reagenti o fonti energetiche. Analizzando i risultati del capitolo 8 si vede che per il processo studiato si hanno principalmente tre sottoprocessi critici a livello di impatto ambientale:

- 1) Produzione del solfato basico di cromo
- 2) Produzione dell'energia elettrica impiegata nell'azienda
- 3) Produzione dei combustibili per la caldaia e il generatore: carbone usato come combustibile solido in caldaia e legato alle emissioni del primo camino e il carburante diesel usato nel generatore e legato alle emissioni del secondo camino.

9.2.1 Solfato basico di cromo

Per il solfato basico di cromo c'è poco da fare, è un reagente chiave del processo di concia ed è utilizzato dal 90% delle industrie conciarie mondiali. Ci sono tecnologie alternative di concia ma non portano i risultati e la qualità data dalla concia al cromo, soprattutto in termini di

temperatura di gelatinizzazione, come visto nel secondo capitolo. Una modernizzazione continua delle tecnologie impiegate, con l'implementazione di sistemi di controllo unite a una formazione aggiornata degli operatori sono migliorie fondamentali per ridurre il consumo di cromo, migliorando l'impatto ambientale del processo. Il problema principale nell'utilizzo del cromo sta nel suo non completo assorbimento: in genere solamente il 50-60% di cromo viene assorbito dalla pelle. Due metodologie per ridurre il consumo di questo metallo sono aumentare il pH del bagno da 3,5 a 4,5 insieme alla temperatura incrementando l'assorbimento di cromo, oppure il ricircolo delle soluzioni esauste aggiungendo solo la quantità di cromo assorbita. Quest'ultima operazione è fattibile solo per cuoi di minor qualità [2].

9.2.2 Produzione di energia e combustibili fossili

Alcuni miglioramenti possono essere fatti per quanto riguarda i consumi energetici. Nonostante l'azienda sia virtuosa per quanto riguarda questi consumi, la produzione di energia elettrica è molto impattante a livello ambientale. L'utilizzo di carbone e diesel, inoltre, comporta oltre agli impatti dovuti alla produzione ed estrazione anche gravi emissioni. In particolare, si hanno alti valori di concentrazione di particolato e di emissione di CO₂ nei camini dell'azienda. Questo è un lampante esempio della difficoltà nell'analizzare l'impatto ambientale di un processo: il consumo energetico è contenuto e a primo avviso sembrerebbe una buona cosa, ma il problema è che l'azienda utilizza carbone come combustibile per la caldaia di cui è dotata!

Secondo i dati aziendali si è visto che sono necessari annualmente di 1187685 kWh. La produzione di questo ammontare di energia ha un elevato impatto ambientale, poiché si è supposto che questa derivi da fonti fossili. Il primo miglioramento sarebbe quindi utilizzare energia proveniente anche da fonti rinnovabili. Inoltre, si è visto che l'azienda usa energia solare per ottenere quella termica di cui necessita tramite un impianto solare termico. A questo punto un'importante miglioria sarebbe l'utilizzo dell'energia solare anche per coprire parte del fabbisogno elettrico tramite l'utilizzo di pannelli fotovoltaici e potenziando quindi l'impianto solare presente nell'azienda.

Ancora più importante, l'introduzione di un impianto fotovoltaico che sfrutta l'ubicazione tropicale dell'azienda potrebbe sostituire il generatore diesel collegato al secondo camino dell'azienda. In questo modo non si avrebbe solo la diminuzione dell'impatto della produzione di diesel a monte ma anche all'interno dell'azienda, dato che si abbatterebbero tutte le emissioni legate al secondo camino, comprese le emissioni di particolato. Si avrebbe in questo modo un effetto ancora più diretto nel contesto aziendale. L'impatto della produzione di energia elettrica, infatti, è "a monte" dovuto all'*effetto matrioska* della LCA (certo è comunque dovuto al processo svolto, ma non è compito dell'azienda rendere meno impattante la produzione di energia elettrica), mentre in questo caso l'utilizzo del diesel e le relative emissioni sono responsabilità diretta dell'azienda.

Come si è visto la caldaia legata al primo camino utilizza un'elevata quantità di combustibile solido (carbone). A livello ambientale, la produzione e l'utilizzo di carbone sono altamente impattanti e causa di numerose emissioni di gas serra. Sarebbe quindi opportuno sostituire il carbone con un altro tipo di combustibile come il metano. In questo modo si avrebbe sia un miglioramento "a monte" dato che la produzione di metano è meno impattante della produzione di carbone, sia diretto in azienda con una produzione minore di emissioni e meno pericolose. In più è noto come i fumi derivanti dalla combustione di carbone siano ricchi di particolato, e i dati rilevati al camino dell'azienda ne sono una prova. L'utilizzo di metano andrebbe sicuramente ad abbassare tale valore, che si ricorda essere sopra i limiti massimi previsti applicando le BAT, obbligatorie nell'Unione Europea.

Si vuole ora fare un appunto, sempre più spesso si sente parlare di biometano, il suo utilizzo in questo caso sarebbe perfetto: l'industria della concia utilizza uno "scarto" degli allevamenti e del macello, anche il biometano utilizza scarti di allevamenti e agricoltura dato che deriva dalle deiezioni animali e dagli scarti agricoli. Il suo utilizzo renderebbe quindi il processo più circolare sfruttando due scarti dello stesso settore, senza trascurare inoltre, gli enormi vantaggi dell'utilizzo del biometano rispetto ad un combustibile fossile. Ovviamente questo vuole essere solamente uno spunto di riflessione, nella realtà bisogna prima verificare la fattibilità pratica delle soluzioni proposte. In questo caso per sfruttare il biometano l'allevamento deve trovarsi ad una distanza adeguata dall'azienda per non far crescere in modo considerevole i costi e gli impatti dovuti allo stoccaggio e al trasporto del biocombustibile. Questo è purtroppo uno dei limiti della LCA: l'analisi degli impatti può infatti fornire suggerimenti e spunti di riflessione per proporre migliorie, ma non può sostituire gli studi di processo/fattibilità. Rimane comunque un valido strumento da utilizzare come punto di partenza per pensare a modifiche degli attuali processi in un'ottica di sostenibilità.

10. CONCLUSIONI

L'analisi del ciclo vita *Life Cycle Assessment (LCA)*, è uno strumento valido per analizzare e individuare i punti critici di un processo in termini di impatto ambientale. Può essere usata per proporre miglioramenti al fine di superare questi punti critici dando spunti di ricerca, ma anche per confrontare due processi con lo stesso fine valutando l'impatto relativo di entrambi.

La LCA è tuttavia una metodologia che presenta ancora dei limiti, in primis miglioramenti devono essere effettuati riguardo la qualità dei dati: un errore in un singolo dato può falsare tutta l'analisi.

La moltitudine di database e metodologie presenti può da una parte ampliare la scelta e la disponibilità di dati e metodi di calcolo, dall'altra però può rendere molto complicato il confronto tra differenti processi e la scelta della metodologia adatta ai dati in possesso. Questo è un problema che si potrebbe risolvere utilizzando programmi e/o database più completi e integrati. Resta il problema che, se si vogliono confrontare per esempio due aziende che effettuano lo stesso processo, bisogna utilizzare lo stesso database e la stessa metodologia (oltre che ovviamente la stessa unità funzionale), ma se ciò non è possibile ne risulta un confronto di difficile interpretazione.

Inoltre, come detto sopra, la LCA serve come base per pensare o proporre miglioramenti di un processo, ma non può assolutamente sostituire le prove sperimentali, in quanto non è una simulazione di processo, non calcola rese di prodotto e nemmeno i prodotti previsti, dato che i flussi sia di input che di output vanno inseriti manualmente. Un esempio lampante di questo è stata la sostituzione dell'energia solare con il metano, per arrivare alla quantità da usare si è dovuta calcolarla a parte e inserirla manualmente, lo stesso per le emissioni.

Per effettuare una LCA bisogna quindi conoscere dettagliatamente il processo e una volta valutato l'impatto bisogna verificare l'effettiva fattibilità degli eventuali miglioramenti proposti, valutando non solo le rese del processo ma anche la fattibilità economica. Inoltre, oltre alla conoscenza del processo, bisogna essere in possesso di tutti i dati riguardo le correnti entranti ed uscenti dal sistema.

Per quanto riguarda il caso di studio, tenendo conto delle approssimazioni effettuate riguardo i flussi entranti, si ha la conferma che l'impatto maggiore del processo di concia sia nelle prime due fasi, ovvero i lavori di riviera e in misura ancora maggiore la concia vera e propria. La produzione di sali di cromo e di energia sono i sottoprocessi in generale più impattanti per questo tipo di processo. Per tale motivo l'impiego delle migliori tecnologie disponibili e un maggiore utilizzo di tecnologie di produzione di energia da fonti rinnovabili sono altamente necessari.

L'azienda studiata risulta virtuosa sotto l'aspetto del consumo energetico e di acqua. In particolare, grazie alla posizione tropicale, utilizza come fonte di energia termica quella solare, senza bisogno di bruciare ulteriore metano. Uno step successivo sarebbe trasformare l'impianto da solare termico a solare fotovoltaico in modo da generare energia elettrica che vada a coprire totalmente o in parte il fabbisogno annuale.

Sono però presenti anche diversi problemi. I principali riguardano l'utilizzo di combustibili fossili il cui uso dovrebbe essere altamente ridotto. L'utilizzo di carbone in caldaia comporta elevate emissioni di particolato, per questo sarebbe opportuna l'installazione di un filtro a maniche o uno scrubber a umido. Utilizzare carbone ha un impatto non indifferente anche a monte a causa dei processi di estrazione e trasformazione della materia prima. Sarebbe quindi opportuno cercare di ridurre l'utilizzo di questo combustibile con fonti alternative come il

metano o, meglio ancora, il biometano ottimizzando ulteriori scarti degli allevamenti. Viene impiegato olio diesel in un generatore di elettricità interno all'azienda, questo causa ulteriori emissioni e comporta la presenza di un ulteriore camino per lo scarico dei fumi. La sostituzione di questo generatore con l'implementazione dell'impianto solare fotovoltaico risolverebbe questo problema azzerando le emissioni di questo camino.

Come succede di frequente, anche per il processo svolto da questa azienda la produzione di energia ha l'impatto maggiore. È opportuno quindi concentrare gli sforzi di ricerca e sviluppo sulle fonti di energia rinnovabili, e sull'utilizzo di biocarburanti, al fine di assicurare uno sviluppo sostenibile ovvero *“uno sviluppo che garantisca i bisogni delle generazioni attuali senza compromettere la possibilità che le generazioni future riescano a soddisfare i propri”*.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A.D. Covington, *Tanning Chemistry, the science of leather*, Cambridge, RSC Publishing, 2009, ISBN 978-0-85404-170-1
- [2] F. Chiampo, S. Shanthakumar, R. Ricky, G. P. Ganapathy, Tannery: Environmental impacts and sustainable technologies, *Materials Today: Proceedings*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.025>.
- [3] <https://blog.bizvibe.com/blog/top-10-largest-leather-producing-countries>
- [4] A.L. Tasca, M. Puccini, Leather tanning: Life cycle assessment of retanning, fatliquoring and dyeing, *Journal of Cleaner Production*, Volume 226, 2019, Pages 720-729, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.335>.
- [5] <https://www.unic.it/conceria-italiana/industria-conciaria-italiana>
- [6] K. Joseph, N. Nithya, Material flows in the life cycle of leather, *Journal of Cleaner Production*, Volume 17, Issue 7, 2009, Pages 676-682, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.11.018>
- [7] V. Caniglia, S. Maffè, *Chimica e tecnologia nella fabbricazione del cuoio*, Torino, Levrotto & Bella Editrice, 2001, ISBN 88-8218-054-9
- [8] G.L Tadesse, Impacts of Tannery Effluent on Environments and Human Health, *Journal of environment and earth science*, Volume 7, 2017, Pages 88-97, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54659993>
- [9] Decreto Legislativo 3.4.2006 n. 152, Norme in materia ambientale. *Gazzetta Ufficiale* 14 aprile 2006, n. 88, S.O.
- [10] J. Garai, Environmental aspects and health risks of leather tanning industry: a study in the Hazaribag area, *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, Volume 12, 2014, Pages 278-282, <https://doi.org/10.1080/10042857.2014.910875>

- [11] R. Ricky, S. Shanthakumar, G.P. Ganapathy, F. Chiampo, Zero liquid discharge system for the tannery industry - an overview of sustainable approaches, *Recycling* 7 (2022) 31, <https://doi.org/10.3390/recycling7030031>
- [12] ISO 14040 (2006) UNI EN ISO 14040 “*Environmental management, life cycle assesment, principles and framework*”, Ginevra International Organization for Standardization (UNI)
- [13] L. De Benedetto, J. Klemeš, The Environmental Performance Strategy Map: an integrated LCA approach to support the strategic decision-making process, *Journal of Cleaner Production*, Volume 17, Issue 10, 2009, Pages 900-906, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.02.012>
- [14] Jolliet, O., Margni, M., Charles, R. et al. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *Int J LCA* 8, 324–330 (2003). <https://doi.org/10.1007/BF02978505>
- [15] A.P. Acero, C. Rodriguez, A. Ciroth, LCIA methods, Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories, Version 1.5.4, 16 March 2015
- [16] <https://support.ecoinvent.org/impact-assessment#1661431165511-34b04bce-bdc4>
- [17] Fazio, S. Biganzioli, F. De Laurentiis, V., Zampori, L., Sala, S. Diaconu, E. Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods, version 2, from ILCD to EF 3.0, EUR 29600 EN, European Commission, Ispra, 2018, ISBN 978-92-79-98584-3, doi:10.2760/002447, PUBSY No. JRC114822
- [18] ReCiPe 2016, A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level, Report I: Characterization, RIVM Report 2016-0104, M.A.J. Huijbregts et al.
- [19] Dodd N., Donatello S. & Cordella M., 2021. Indicatore Level(s) 1.2: potenziale di riscaldamento globale (GWP) del ciclo di vita - manuale utente: nota introduttiva, istruzioni e orientamenti (versione 1.1)

- [20] Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2023 doi:10.1017/9781009157896.009.
- [21] <https://nexus.openlca.org/databases>
- [22] <https://manuals.openlca.org/openlca/introduction/index.html>
- [23] Decreto Legislativo 4.3.2014, n 46, Attuazione della direttiva 2010/75/UE relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento). Gazzetta Ufficiale 27 marzo 2014, n.72., S.O.
- [24] JRC Reference Report “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Tanning of Hides and Skins”, 2013, European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau. <https://doi.org/10.2788/13548>

Ringraziamenti

Ringrazio la mia relatrice, la professoressa Fulvia Chiampo, per avermi seguito in questo percorso di tesi, rendendosi sempre disponibile ad aiutarmi e supportarmi e mostrando sempre fiducia, diponibilità e professionalità.

Ringrazio inoltre, il Signor Mauro Selmi per la disponibilità mostrata nel fornire i dati e le indicazioni del processo studiato, senza i quali questo lavoro non sarebbe stato possibile.

Ringrazio i miei genitori e la mia famiglia che mi hanno permesso di intraprendere questo percorso senza farmi mai mancare nulla. Grazie perchè nonostante le innumerevoli turbolenze e litigate non avete mai smesso di supportarmi (e sopportarmi) e credere in me. Grazie per aver creduto in me quando, ormai vent'anni fa, tutto questo non sembrava possibile, anzi... questa rivincita è anche vostra.

Ringrazio tutti i miei amici, elencarvi tutti sarebbe impossibile, grazie per avermi supportato e sopportato in questi anni, per i momenti di svago e di festa e per quelli più profondi, di confronto e riflessione. Grazie per non avermi mai fatto sentire solo sapendo di poter sempre contare su di voi e grazie anche per i “mille” passaggi in macchina da me sempre “scroccati”.

Infine, grazie a me, che nonostante i mille ripensamenti non ho mai mollato riuscendo ad arrivare in fondo a questo percorso e dimostrando a me stesso e a chi non ci credeva di essere in grado di farcela da solo. Questo è solo l'inizio.

“Punta in alto, dedicalo a chi pensa tu non possa farlo” Ensi. “Change”