



POLITECNICO
MILANO 1863

3° workshop Rifiuti e Life Cycle Thinking

Verso un utilizzo circolare delle risorse

mercoledì 15 febbraio 2017
Aula De Donato - Politecnico di Milano
piazza Leonardo da Vinci 32 - Milano



Assessment on WASTE
and RESOURCES



POLITECNICO
DI MILANO



MATERIALS FOR
ENERGY & ENVIRONMENT

Studio LCA di un processo idrometallurgico per il trattamento di piccoli rifiuti elettronici

**E.M. Iannicelli-Zubiani^a, M.I. Giani^a, F. Recanati^b,
G. Dotelli^a, S. Puricelli^a, C. Cristiani^a**

^a Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta"

^b Politecnico di Milano, Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria

- Gestione dei RAEE
 - Situazione europea e italiana
- Caso di studio LCA
 - Processo idrometallurgico
 - Risultati
- Conclusioni e sviluppi futuri



Gestione dei RAEE



R1

Freddo e clima

Frigoriferi,
condizionatori,
congelatori



R2

Grandi bianchi

Lavatrici,
asciugatrici,
lavastoviglie,
cappe, forni



R3

Tv e Monitor

Televisori e
schermi a tubo
catodico, LCD o
plasma



R4

Piccoli elettrodomestici

Computer,
telefoni,
elettronica di
consumo



R5

Sorgenti luminose

Lampadine a
basso consumo,
lampade a led, a
neon, fluorescenti

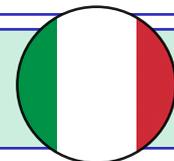
- Direttiva ErP 2009/125/CE
- Direttiva RoHs 2011/65/CE
- Direttiva WEEE 2012/19/CE

Normativa europea



- D. Lgs. 27/2014
- D. Lgs. 49/2014

Normativa italiana



RAEE: uno dei flussi di rifiuti a più rapida crescita in Europa: aumento del 3-5% all'anno^{1,2}

Oggi: un cittadino europeo produce circa 17 kg RAEE/anno

Domani (2020): 24 kg RAEE/anno³

¹ Eurostat - <http://ec.europa.eu/eurostat>

² Menikpura et al., 2014

³ EU, 2012

RAEE descritti come uno dei flussi di rifiuti a più rapida crescita in Europa: aumento del 3-5% all'anno^{1,2}

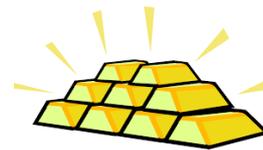
Oggi: un cittadino europeo produce circa 17 kg RAEE / anno

Domani (2020): 24 kg RAEE/anno³

Necessario applicare il concetto di “URBAN MINING”



Rifiuto
Smaltimento
Sostanze dannose



Risorsa
Acciaio, ferro, rame, alluminio,
plastiche, metalli preziosi, terre rare

¹ Eurostat - <http://ec.europa.eu/eurostat>

² Menikpura et al., 2014

³ EU, 2012

Obiettivi comunitari¹:

- entro la fine del 2015 raggiungimento di almeno 4 kg/ab/anno per i RAEE domestici
- entro il 2016 garantire la raccolta del 45% (percentuale del peso medio delle AEE immesse sul mercato nel triennio precedente)
- entro il 2019 garantire la raccolta del 65%

L'Italia nel 2015 ha raggiunto un tasso di raccolta del 35% (249254 ton) per i RAEE domestici² con un dato medio pro capite di 4.1 kg/ab

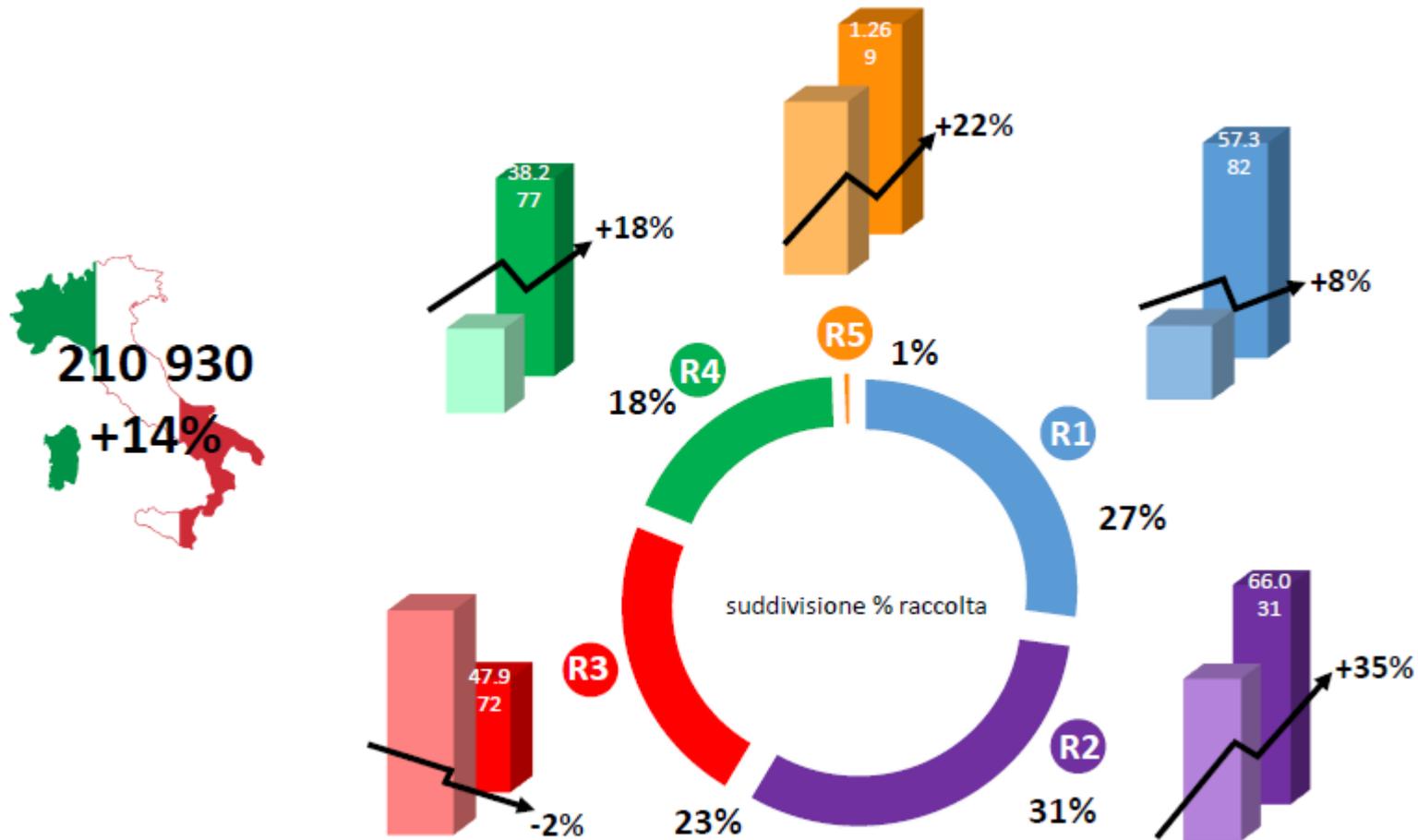
Europa: diversi livelli di raccolta, media 6.5 kg/ab nel 2013³, 11 paesi hanno raggiunto il target del 45% di raccolta

¹ Direttiva WEEE 2012/19/CE

² Centro di Coordinamento RAEE, 2015

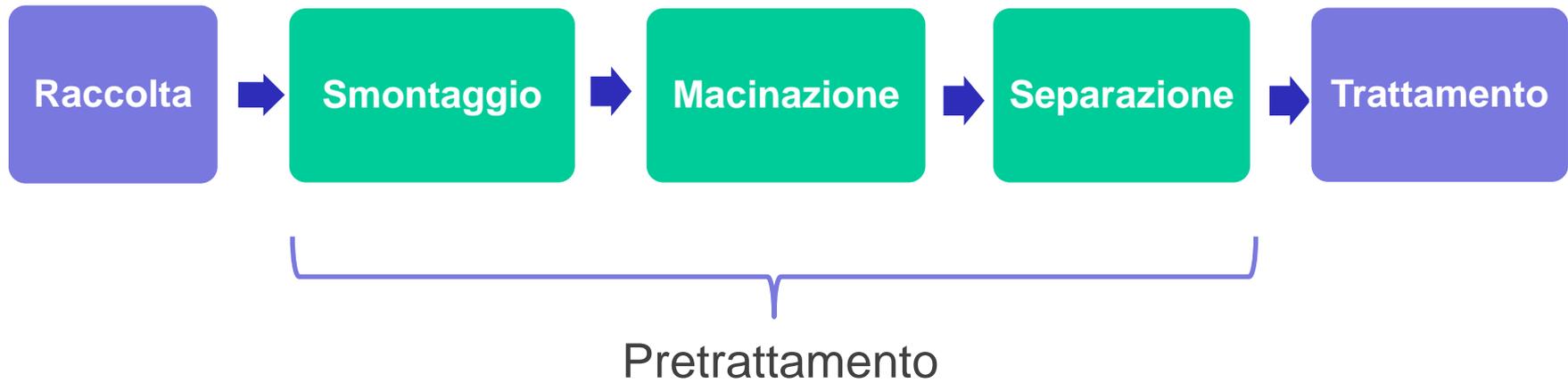
³ Eurostat - <http://ec.europa.eu/eurostat>

Raccolta gennaio-settembre 2016 vs 2015



Dezio, G., 2016

* Rispetto allo stesso periodo del 2015





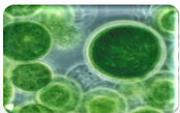
Pirometallurgia

Fusione in forni o in bagni fusi per rimuovere le materie plastiche



Idrometallurgia

Serie di lisciviazioni acide o alcaline, procedure di separazione e recupero dei metalli di interesse



Biometallurgia

Recupero selettivo di metalli attraverso l'azione di microrganismi che interagiscono con i metalli

Pirometallurgia



- + **metodo tradizionale**
- + pre-trattamento non necessario

- formazione di diossine
- perdita di metalli preziosi
- alluminio e ferro non recuperati
- parziale separazione dei metalli

Idrometallurgia



- + ridotti rischi di emissioni altamente tossiche ed inquinanti
- + efficiente separazione dei metalli
- + bassi consumi energetici

- molte fasi di processo
- consumo di agenti chimici
- elevati volumi di acque di scarico prodotte

Biometallurgia



- + processo altamente selettivo
- + minimizzazione del volume di sostanze chimiche

- basse efficienze
- elevati tempi di reazione

Caso di studio LCA

Punto di partenza: progetto “*E-waste: Il ciclo intelligente*”



E-Waste
il ciclo intelligente

Punto di partenza: progetto “*E-waste: Il ciclo intelligente*”



- Obiettivo dello studio: valutazione degli impatti ambientali del trattamento di schede elettroniche di cellulari tramite un processo idrometallurgico
- Funzione del sistema: gestione di PCBs (Printed Circuit Boards) di cellulari dismessi a fine vita
- Unità funzionale: 100 kg di schede elettroniche in ingresso al trattamento idrometallurgico
- Confini del sistema dalla raccolta degli R4 fino al recupero dei metalli: cradle-to-gate
- “*zero burden assumption*” per il rifiuto in ingresso al sistema

- Suddivisione delle unità di processo in upstream, core e downstream
- Tipologia di dati:
 - Primari in pretrattamento e impianto pilota
 - Secondari per raccolta R4², processi upstream¹ e downstream^{1,3}
- Metodo di valutazione degli impatti: CML-IA baseline 3.01^{4,5}
- Software: SimaPro 8

¹ Database Ecoinvent 3.1

² Biganzoli et al., 2015

³ ARPA Lombardia, 2014

⁴ Hischer et al., 2005

⁵ Rocchetti and Beolchini, 2014



RAEE R4



Centro di raccolta



Impianto di pretrattamento



Impianto pilota di trattamento idrometallurgico





Centro di raccolta

RAEE R4



Impianto di pretrattamento

RAEE R4

Impianto pilota di trattamento idrometallurgico





Le schede elettroniche costituiscono il 3% in peso degli R4¹



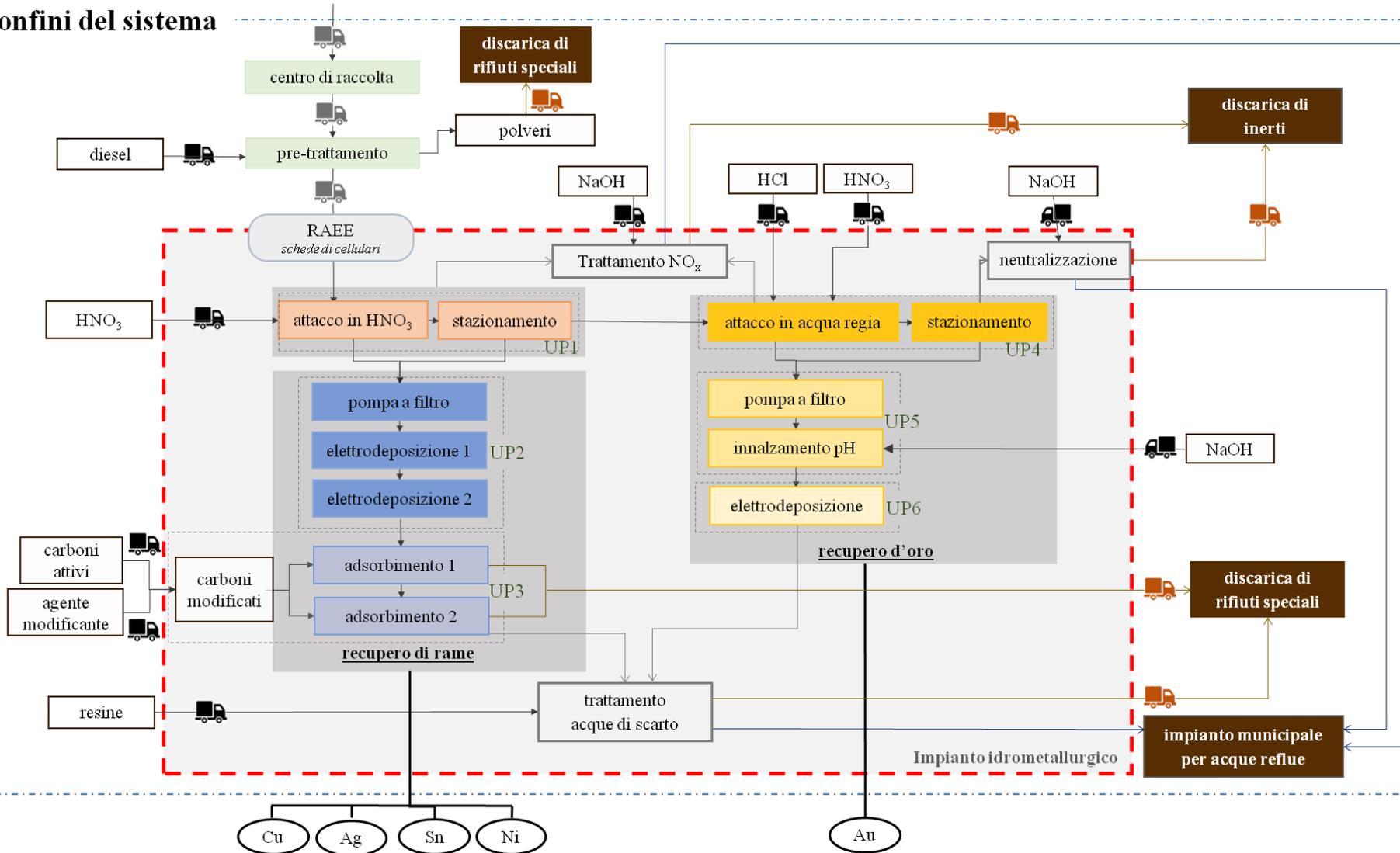
Composizione metallica delle schede elettroniche *:

| | Sn | Cu | Ni | Ag | Au |
|---|------|-------|------|------|------|
| % | 0.54 | 78.97 | 3.83 | 0.01 | 0.02 |

¹ Widmer et al., 2005

* Dati da analisi di laboratorio

Confini del sistema



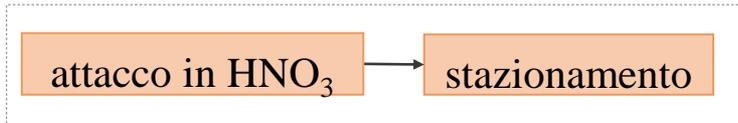
Upstream

- Centro di raccolta
- Impianto di pretrattamento
- Tutti i processi ausiliari di produzione di energia e materiali richiesti dal processo *core*

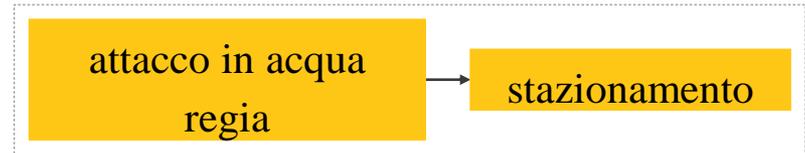
Downstream

- Trattamento municipale delle acque reflue
- Smaltimento dei rifiuti solidi

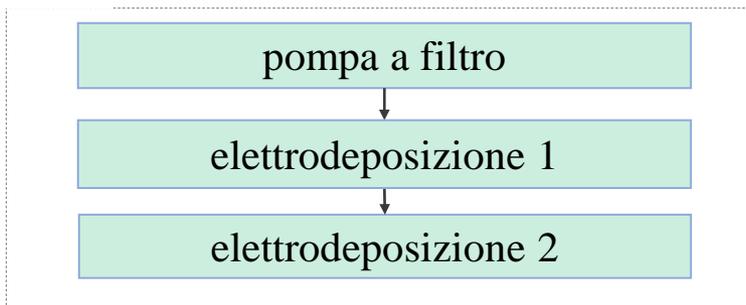
UP1



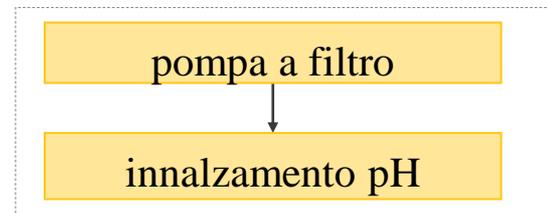
UP4



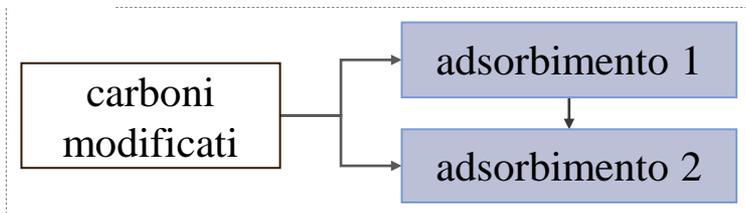
UP2



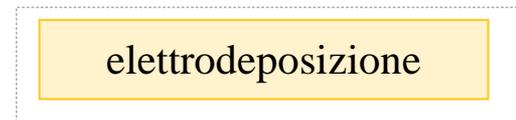
UP5



UP3



UP6



- Trattamento NO_x
- Trattamento acque con resine a scambio ionico
- Neutralizzazione rifiuto solido

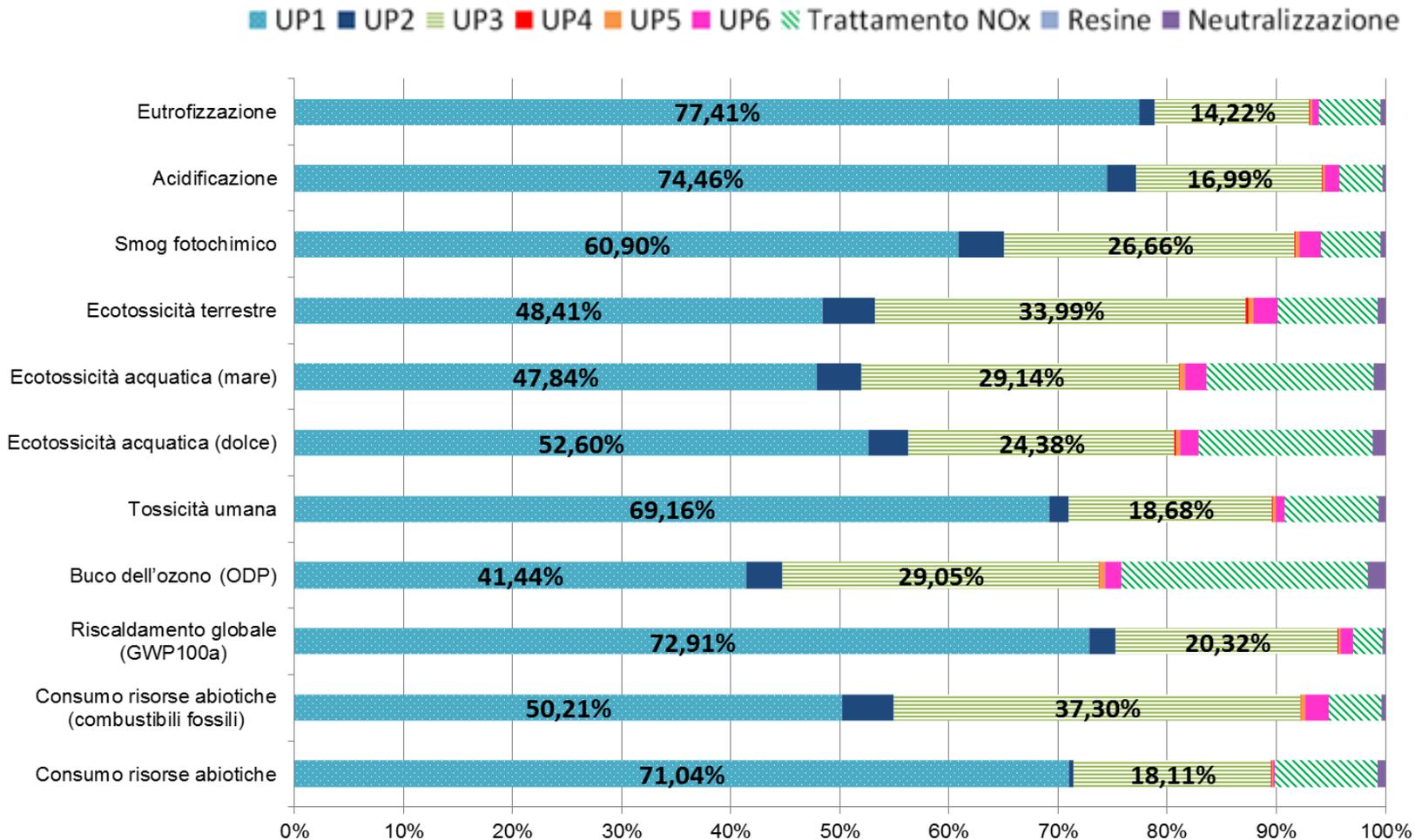
| Categoria d'impatto | Valore totale | Unità di misura | Processi upstream (%) | Processo core (%) | Processi downstream (%) |
|--|---------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|
| Consumo risorse abiotiche | 1.32E-03 | kg Sb eq | 0.62 | 98.97 | 0.41 |
| Consumo risorse abiotiche (combustibili fossili) | 4.83E+03 | MJ | 2.47 | 96.90 | 0.63 |
| Riscaldamento globale (GWP100a) | 7.02E+02 | kg CO ₂ eq | 1.49 | 94.44 | 4.07 |
| Buco dell'ozono (ODP) | 6.64E-05 | kg CFC-11 eq | 1.84 | 97.63 | 0.54 |
| Tossicità umana | 1.56E+02 | kg 1,4-DB eq | 1.72 | 90.97 | 7.31 |
| Ecotossicità acquatica (dolce) | 1.86E+02 | kg 1,4-DB eq | 6.93 | 35.50 | 57.58 |
| Ecotossicità acquatica (mare) | 2.58E+05 | kg 1,4-DB eq | 3.71 | 76.00 | 20.30 |
| Ecotossicità terrestre | 6.50E-01 | kg 1,4-DB eq | 3.17 | 83.89 | 12.95 |
| Smog fotochimico | 8.56E-02 | kg C ₂ H ₄ eq | 3.04 | 88.02 | 8.94 |
| Acidificazione | 2.51E+00 | kg SO ₂ eq | 1.34 | 98.12 | 0.53 |
| Eutrofizzazione | 9.93E-01 | kg PO ₄ ³⁻ eq | 2.17 | 82.58 | 15.25 |

| Categoria d'impatto | Valore totale | Unità di misura | Processi upstream (%) | Processo core (%) | Processi downstream (%) |
|--|---------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|
| Consumo risorse abiotiche | 1.32E-03 | kg Sb eq | 0.62 | 98.97 | 0.41 |
| Consumo risorse abiotiche (combustibili fossili) | 4.83E+03 | MJ | 2.47 | 96.90 | 0.63 |
| Riscaldamento globale (GWP100a) | 7.02E+02 | kg CO ₂ eq | 1.49 | 94.44 | 4.07 |
| Buco dell'ozono (ODP) | 6.64E-05 | kg CFC-11 eq | 1.84 | 97.63 | 0.54 |
| Tossicità umana | 1.56E+02 | kg 1,4-DB eq | 1.72 | 90.97 | 7.31 |
| Ecotossicità acquatica (dolce) | 1.86E+02 | kg 1,4-DB eq | 6.93 | 35.50 | 57.58 |
| Ecotossicità acquatica (mare) | 2.58E+05 | kg 1,4-DB eq | 3.71 | 76.00 | 20.30 |
| Ecotossicità terrestre | 6.50E-01 | kg 1,4-DB eq | 3.17 | 83.89 | 12.95 |
| Smog fotochimico | 8.56E-02 | kg C ₂ H ₄ eq | 3.04 | 88.02 | 8.94 |
| Acidificazione | 2.51E+00 | kg SO ₂ eq | 1.34 | 98.12 | 0.53 |
| Eutrofizzazione | 9.93E-01 | kg PO ₄ ³⁻ eq | 2.17 | 82.58 | 15.25 |



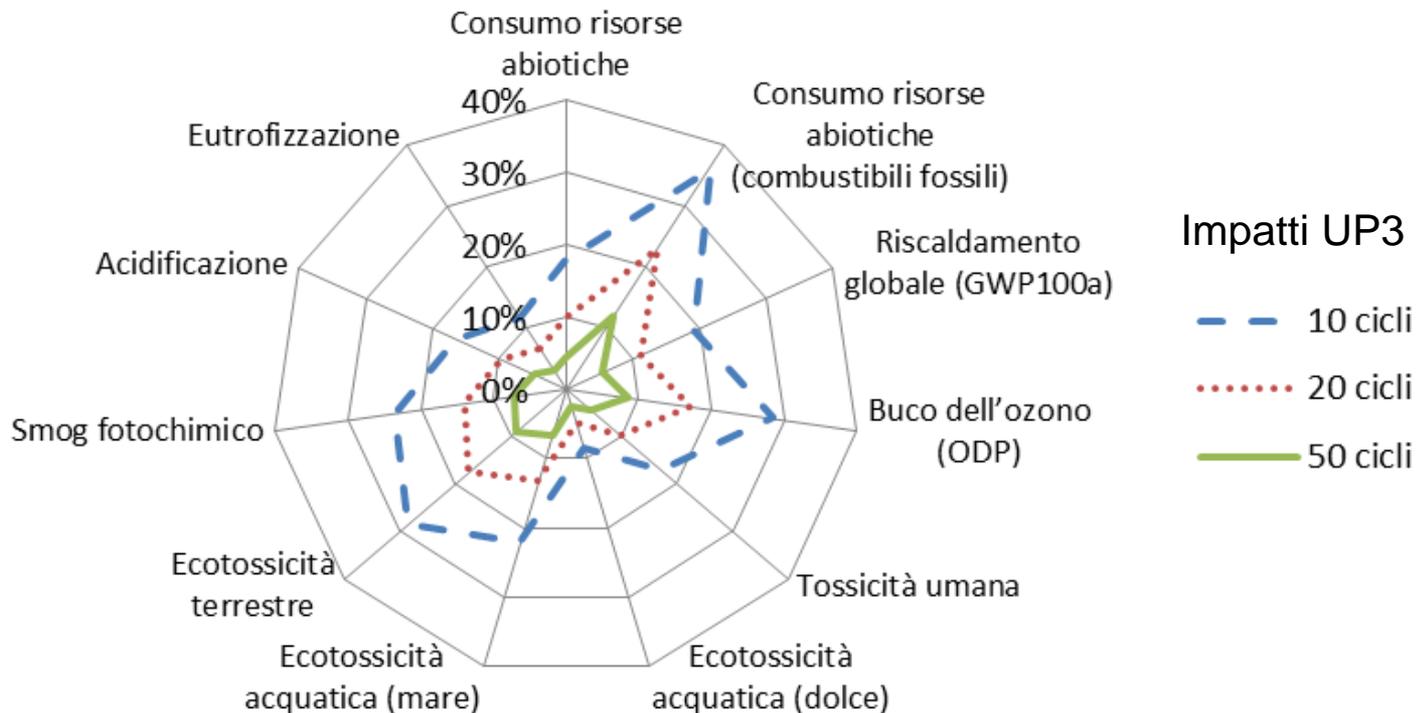
- Impatti del processo core: 76-99% del totale
- Impatti trascurabili per i processi upstream e downstream
- *“Fresh water aquatic ecotoxicity”*: 58% degli impatti totali dovuti a sanitary landfill → possibilità di scenari di fine vita diversi¹

¹ Guo et al., 2009



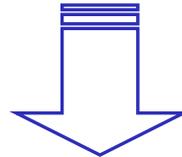
- Lisciviazione in acido nitrico: 40%-80% degli impatti dell'idrometallurgico seguita dalla fase di adsorbimento su carboni attivi

- Intervenire sulla fase di lisciviazione in acido nitrico?
 - ✗ Aumentare la diluizione di HNO_3 (16% w/w attuale) causerebbe basse efficienze di lisciviazione e alti tempi di reazione
- Intervenire nella fase di adsorbimento su CA?
 - ✓ Possibilità di aumentare il numero di cicli di utilizzo dei CA



Impatti riferiti ai metalli recuperati variano a seconda dell'allocazione seguita (massa vs economica)...non conosciamo l'esatto prezzo dei metalli secondari recuperati !

Impatti riferiti ai metalli recuperati variano a seconda dell'allocazione seguita (massa vs economica)...non conosciamo l'esatto prezzo dei metalli secondari recuperati !



Stima dei fattori di allocazione economica (assumendo rapporti uguali tra i prezzi dei metalli primari e secondari):

$$\lambda_i = \frac{\delta_i \cdot m_i}{\sum_i \delta_i \cdot m_i}$$

λ_i fattore di allocazione per l'i-esimo metallo
 m_i quantità recuperata del metallo i-esimo
 δ_i rapporto % tra prezzo del metallo i-esimo e prezzo del metallo più prezioso (Au)

| | Unità | Cu ^a | Sn ^a | Ni ^a | Ag ^b | Au ^b |
|---------------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| media prezzi 2013-2015 | USD/kg | 6.62 | 20.26 | 14.76 | 691.20 | 41,345.14 |
| δ_i | - | 0.02 | 0.05 | 0.04 | 1.67 | 100 |

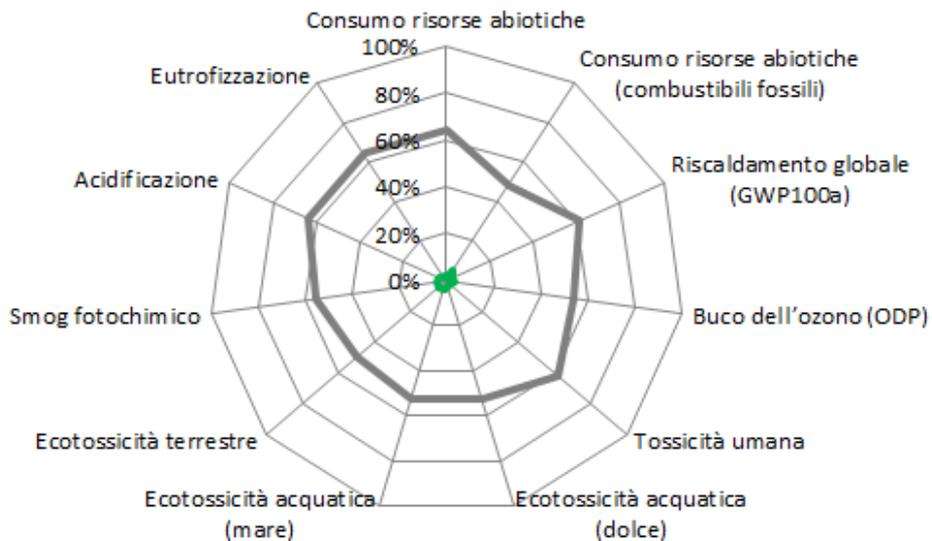
^a <http://www.westmetall.com>

^b <http://www.kitco.com>

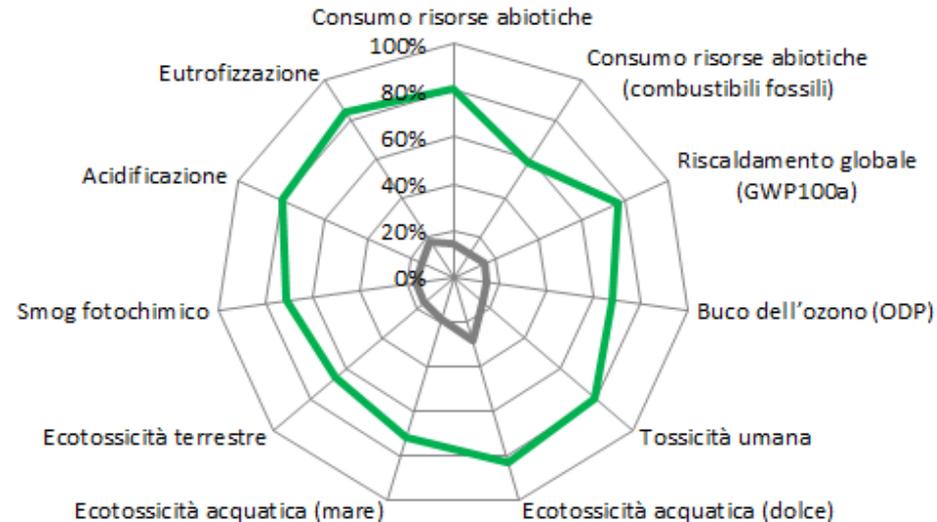
— Allocazione in massa

— Allocazione economica

Rame



Oro



Metalli recuperati da impianto pilota per 100kg di schede:

Rame [kg]

78.96



Argento [kg]

0.13



Stagno [kg]

0.78



Nichel [kg]

3.59



Oro [kg]

0.08

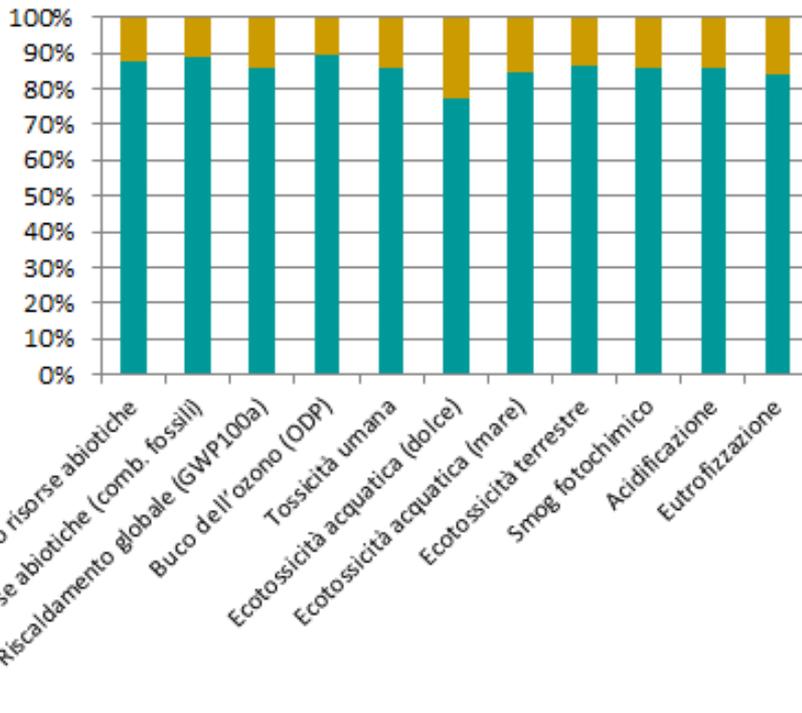


Risultati suddivisi per linea di processo:

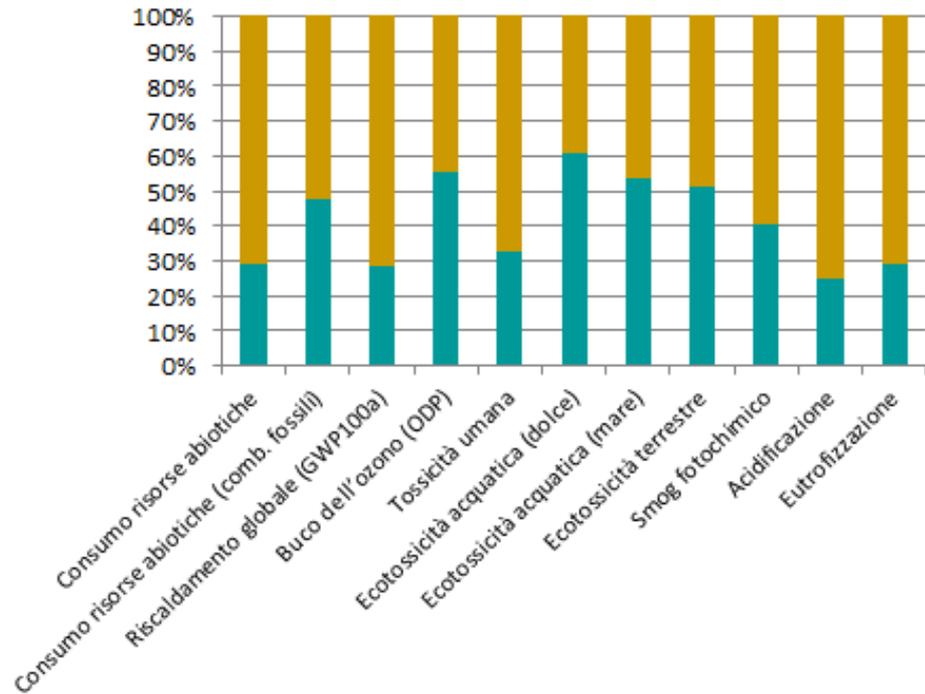
■ linea recupero Au

■ linea recupero Cu

Allocazione in massa



Allocazione economica

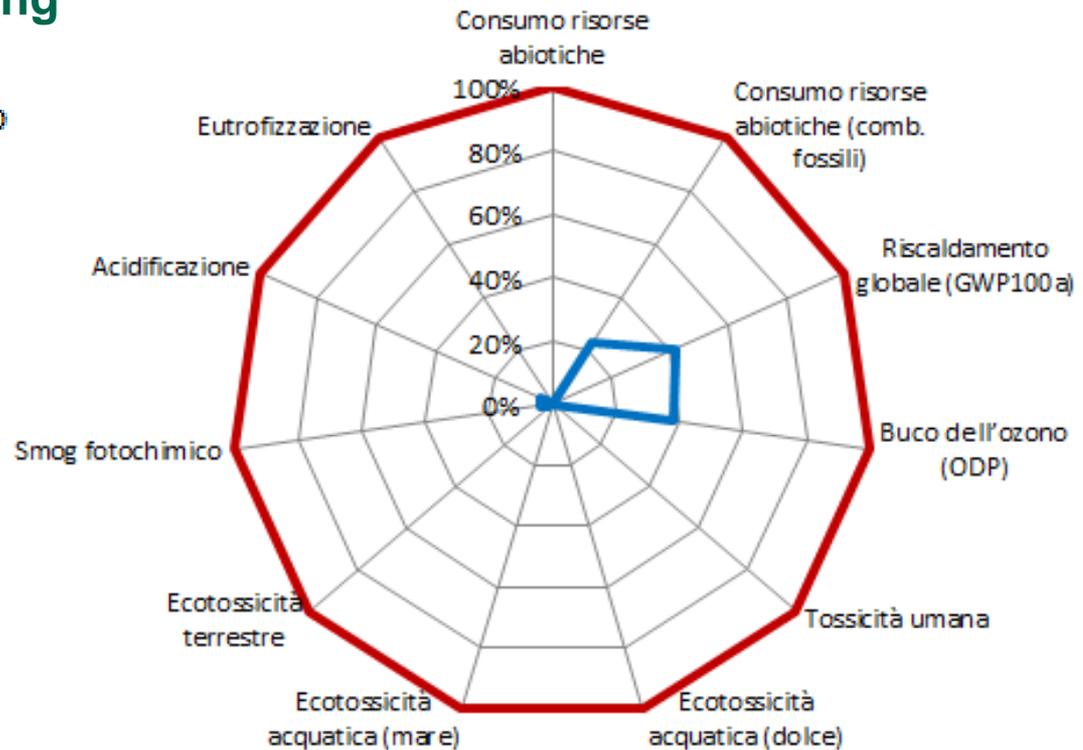


Impatti linea recupero Au: 10-20%

Impatti linea recupero Au > 40%

— produzione primaria* → mining

— produzione secondaria (impianto pilota) → urban-mining



- Recupero dei metalli da RAEE è più sostenibile dell'estrazione da miniera: gli impatti del recupero hanno un contributo sempre inferiore al 45% degli impatti della produzione primaria

* Produzione primaria: dati da Ecoinvent 3.1

Conclusioni e sviluppi futuri

- Gli impatti della fase di trattamento idrometallurgico sono preponderanti, mentre quelli relativi al pretrattamento e trasporto sono trascurabili.
- La produzione di acido nitrico è la principale causa degli impatti del trattamento.
- Possibile intervento (da valutare in impianto) per aumentare il numero dei cicli di utilizzo dei carboni attivi.
- Urban-mining vs estrazione da miniera: il recupero dei metalli ha impatti molto minori rispetto alla produzione primaria.

- Migliorare l'impianto in fase di scale-up, seguendo i principi dell'eco-design
- Applicare una rigorosa allocazione economica
- Confrontare idrometallurgia e pirometallurgia utilizzando dati primari
- Eseguire una LCC parallela all'LCA

Journal of Cleaner Production 140 (2017) 1204–1216

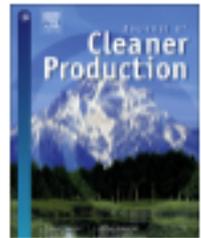


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro



Environmental impacts of a hydrometallurgical process for electronic waste treatment: A life cycle assessment case study



Elena Maria Iannicelli-Zubiani ^{a, *}, Martina Irene Giani ^a, Francesca Recanati ^b,
Giovanni Dotelli ^a, Stefano Puricelli ^a, Cinzia Cristiani ^a

^a Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta", Piazza Leonardo Da Vinci 32, 20133, Milano, Italy

^b Politecnico di Milano, Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria, Via Ponzio 34/5, 20133, Milano, Italy

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.040>

Grazie per l'attenzione !



Martina Irene Giani
02-23993231
martinairene.giani@polimi.it

Riferimenti bibliografici:

- EU, 2012. *Making Raw Materials Available for Europe's Future Wellbeing Proposal for a European Innovation Partnership on Raw Materials*. European Commission.
- Menikpura, S.N.M., Santo, A., Hotta, Y., 2014. *Assessing the climate co-benefits from waste electrical and electronic equipment (WEEE) recycling in Japan*. *J. Clean. Prod.* 74, 183e190.
- Centro di Coordinamento RAEE. *Rapporto annuale 2015*.
- Dezio, G. "Il monitoraggio dei flussi e lo sviluppo della rete di impianti per il trattamento adeguato." *Ecomondo, Rimini 8-11 novembre 2016*.
- Biganzoli et al., 2015. *Mass balance and life cycle assessment of the waste electrical and electronic equipment management system implemented in Lombardia Region (Italy)*. *Sci. Total Environ.* 524-525, 361-375.
- ARPA Lombardia. *Dati impianti trattamento rifiuti - Reportistica 2014*. Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia.
- Hischier, R., Wager, P., Gauglhofer, J., 2005. *Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss takeback and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. *Environ. Impact Assess.* 25, 525-539.
- Rocchetti, L., Beolchini, F., 2014. *Environmental burdens in the management of end-of- life cathode ray tubes*. *Waste Manag.* 34, 468-474.
- Widmer R., Oswald-Krapf H., Sinha-Khetriwal D., Schnellmann M., Böni H., 2005. *Global perspectives on e-waste*. *Environmental Impact Assessment Review* 25, 436– 458.
- Guo, J., Guo, J., Xu, Z., 2009. *Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: a review*. *J. Hazard. Mater.* 168, 567-590.
- "Impatti ambientali di un processo idrometallurgico per il trattamento di rifiuti elettronici: caso studio LCA". Iannicelli-Zubiani, E.M., Giani, M.I., Recanati, F., Dotelli, G., Cristiani, C. *Atti del X Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA, Ravenna, 23-24 giugno 2016*. ENEA, ISBN: 978-88-8286-333-3.