



**Gruppo di Lavoro 1**  
**– MERCATO –**

# P7

Analisi dei giacimenti primari di fosforo e degli utilizzi attuali del fosforo in Italia e in Europa e stima dei costi di approvvigionamento

## Indice

Introduzione .....	8
1 Il fosforo .....	9
1.1 La value chain del fosforo.....	12
1.1.1 Il modello lineare del fosforo e prospettive future .....	12
1.1.2 Il framework europeo e italiano .....	13
1.1.3 I player.....	15
1.1.4 Problematiche da affrontare .....	16
2 L'offerta di fosforo.....	19
2.1 Offerta primaria di fosforo .....	19
2.1.1 Risorse e riserve di rocce fosfatice.....	19
2.1.2 Esplorazione / Estrazione .....	24
2.1.3 Lavorazione delle rocce fosfatice .....	24
2.1.4 Produzione mondiale di rocce fosfatice e fosforo bianco.....	27
2.2 Offerta secondaria di fosforo .....	30
2.2.1 Le matrici per il recupero di fosforo.....	37
2.2.2 Tecnologie di trattamento.....	39
3 La domanda di fosforo .....	43
3.1 Applicazioni .....	44
3.1.1 Usi finali del fosforo derivante dalla lavorazione della roccia fosfatica mediante trattamenti ad umido.....	44
3.1.2 Usi finali del fosforo bianco.....	47
3.2 Materiali e sostanze utilizzate nelle applicazioni del fosforo.....	52
3.2.1 I dati economici dei settori connessi alle applicazioni di fosforo.....	55
3.2.2 Il potenziale impiego dei materiali recuperati .....	56
3.3 Consumi.....	59
3.3.1 FOCUS Consumi Fertilizzanti .....	59
3.4 I prezzi .....	65
3.4.1 FOCUS Prezzi Fertilizzanti.....	66
4 I flussi di fosforo .....	71
4.1 I paesi esportatori .....	71
4.2 Import-Export a livello europeo .....	73
4.3 Import-Export a livello italiano.....	75
5 La fotografia del mercato italiano .....	85
5.1 Metodologia .....	85
5.2 Risultati.....	88
5.2.1 Il mercato di riferimento e le applicazioni (anche potenziali) del fosforo .....	88
5.2.2 Localizzazione degli impianti di produzione e trattamento .....	88
5.2.3 Origine del fosforo in caso di recupero e/o smaltimento .....	89
5.2.4 Gestione dei rifiuti.....	90
5.2.5 Criticità del settore.....	91
Conclusioni e future work .....	93
Riferimenti bibliografici.....	94

Sitografia .....	100
Appendice A – Questionario.....	101
Appendice B – Analisi preliminare flussi import – export Italia per prodotto .....	105

## Indice delle figure

Figura 1. Il ciclo del Fosforo.....	9
Figura 2. Schema lineare della catena di valore del fosforo semplificato a livello globale.....	13
Figura 3. Le organizzazioni aderenti alla Piattaforma Italiana del Fosforo per categoria.....	16
Figura 4. Perdite lungo la catena di valore del fosforo .....	17
Figura 5. Misure sostenibili di domanda e offerta di fosforo per soddisfare la futura domanda alimentare globale.....	18
Figura 6. Variazione delle stime delle riserve di rocce fosfatice .....	21
Figura 7. Mappa europea delle Risorse di rocce fosfatice .....	22
Figura 8. I due tipi di reazioni chimiche alla base del processo ad umido con acido solforico.....	25
Figura 9. Produzione globale di roccia fosfatica, media periodo 2013 – 2017. ....	28
Figura 10. Produzione globale di P <sub>4</sub> , periodo 2017 .....	29
Figura 11. Flussi globali di P attraverso i sistemi agricoli, alimentari e fognari .....	30
Figura 12. Flussi di fosforo.....	31
Figura 13. Uso del fosforo in Europa (EU27) nel 2005 (GgP/anno).....	32
Figura 14. Uso del fosforo in Italia nel 2005 (GgP/anno). ....	33
Figura 15. Usi globali del fosforo estratto .....	43
Figura 16. Usi finali del fosforo derivante dalla lavorazione della roccia fosfatica mediante trattamenti ad umido. Media 2010-2014 .....	44
Figura 17. Schema semplificato di produzione dei fertilizzanti fosfatici.....	47
Figura 18. Usi finali del fosforo bianco. Dati medi 2010 - 2014 .....	48
Figura 19. L'albero genealogico del fosforo .....	51
Figura 20. Suddivisione geografica dell'incremento dei fertilizzanti fosfatici nel mondo. Periodo 2014 – 2018.....	60
Figura 21. Consumo dei fertilizzanti in Europa. Anno 2018.....	60
Figura 22. Stima del consumo di fertilizzanti minerali in Europa. EU -28. Periodo 2007 – 2017 (mio t) .....	61
Figura 23. Quantità distribuita di fertilizzanti e della relativa quota di concimi. Anni 2003 – 2018 (tonnellate).....	62
Figura 24. Fertilizzanti distribuiti per uso agricolo per tipo, valori percentuali. Anno 2018.....	62
Figura 25. Tipi di concimi minerali. Anno 2018 (tonnellate) .....	63
Figura 26. Elementi nutritivi contenuti nei fertilizzanti. Anno 2018 (tonnellate) .....	63
Figura 27. Elementi nutritivi contenuti nei fertilizzanti per ettaro di superficie concimabile, Anno 2018 (chilogrammi per ettaro).....	64
Figura 28. Andamento del contenuto di anidride fosforica nei fertilizzanti per ettaro di superficie concimabile – Anni 2003-2018 (chilogrammi per ettaro) .....	64
Figura 29. Variazione del prezzo della roccia fosfatica 70% BPL proveniente dal Marocco. a) Euro/ton; b) US Dollari/ton. Periodo 1999 - 2019 .....	65
Figura 30 – Confronto tra variazioni del prezzo delle rocce fosfatice e del petrolio. Periodo 1999 - 2019 .....	66
Figura 31. Variazione dei maggiori fertilizzanti a) Euro/ton DAP; b) Euro/ton TSP. Periodo 1999 – 2019 .....	67
Figura 32. Importazione UE di roccia fosfatica media periodo 2010-2014.....	72
Figura 33. Approvvigionamento UE (produzione nazionale + importazioni) di roccia fosfatica, media periodo 2010-2014. ....	72
Figura 34. Importazioni UE di fosforo bianco, media periodo 2010-2014 .....	73

Figura 35. Flussi EU relativi al commercio di roccia fosfatica.....	74
Figura 36. Flussi EU relativi al commercio Fosforo Bianco .....	74
Figura 37. Coeweb - Statistiche del commercio estero.....	75
Figura 38. Importazioni ed esportazioni italiane di materiali e sostanze contenenti fosforo in funzione del codice NC8.....	79
Figura 39. Impianto della ricerca.....	85
Figura 40. Tipologia di organizzazione .....	86
Figura 41. Provenienza geografica rispondenti.....	87
Figura 42. Posizionamento catena del valore rispondenti.....	87
Figura 43. Il mercato di riferimento .....	88
Figura 44. Localizzazione impianti di produzione e trattamento .....	89
Figura 45. Localizzazione nazionale impianti di produzione e trattamento .....	89
Figura 46. Origine del fosforo recuperato.....	90
Figura 47. Maggiori criticità del settore .....	92

## Indice delle tabelle

Tabella 1. Strutture e immagini delle differenti forme allotropiche del fosforo elementare.....	11
Tabella 2. Normative europee che regolano il mercato del fosforo .....	13
Tabella 3. Normative nazionali che regolano il mercato del fosforo .....	14
Tabella 4. Riserve di rocce fosfatiche note nel 2019.....	20
Tabella 5. Dati sulle risorse per l'UE compilati nell'annuario europeo dei minerali .....	23
Tabella 6. Produzione di rocce fosfatiche nel 2019 .....	27
Tabella 7. Quantitativi di P perso per processo in Europa e in Italia .....	34
Tabella 8. Quantitativi di P perso dai principali flussi in Europa e in Italia .....	35
Tabella 9. Quantitativi di P da offerta secondaria (kton/anno) a livello europeo ed italiano .....	36
Tabella 10. Overview degli attuali processi e tecnologie di recupero del fosforo che possono influenzare il mercato (adattamento da Li <i>et al.</i> , 2019).....	41
Tabella 11. TRL delle diverse tecnologie di recupero del fosforo .....	42
Tabella 12. Principali fertilizzanti fosfatici.....	46
Tabella 13. Principali applicazioni industriali del P <sub>4</sub> .....	48
Tabella 14. Materiali o sostanze intermedie utilizzate nelle diverse applicazioni del fosforo. ....	52
Tabella 15. Applicazioni delle rocce fosfatiche e del fosforo bianco e valore aggiunto per macrosettore (2014-2018) .....	55
Tabella 16. Dati economici applicazioni del fosforo per settore.....	56
Tabella 17. Ricognizione preliminare delle tecnologie italiane implementate.....	57
Tabella 18. Costo specifico medio annuale e percentuale di P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> per il triplo superfosfato (TSP), fosfato di-ammonico (DAP) e rocce fosfatiche.....	68
Tabella 19. Quantitativi e prezzi relativi alle importazioni di concimi fosfatici. Anno 2017 .....	69
Tabella 20. Quantitativi e prezzi relativi alle importazioni di concimi fosfatici. Anno 2018 .....	69
Tabella 21. Costo specifico di differenti fertilizzanti fosfatici in commercio .....	70
Tabella 22. Stralcio dell'elenco delle materie prime essenziali per l'UE.....	71
Tabella 23. Flussi italiani di import –export – Anno 2017 .....	76
Tabella 24. Import per provenienza geografica dei principali flussi di fosforo – Anno 2017 .....	81
Tabella 25. Export per provenienza geografica dei principali flussi di fosforo – Anno 2017 .....	82
Tabella 26. Gestione rifiuti .....	90

Tabella 27. Criticità settore ..... 91

## Introduzione

Il fosforo è una risorsa non rinnovabile in una scala temporale umana e costituisce un elemento essenziale per la vita sulla terra (Cordell et al., 2009). Esso svolge, così come l'ossigeno, l'idrogeno, il potassio, l'azoto e il carbonio, un ruolo chiave nel metabolismo degli esseri viventi, come nella formazione degli acidi nucleici (ad es. il DNA, sotto forma di gruppo fosforico), nelle trasformazioni bioenergetiche e biosintetiche (ad es. sotto forma di adenosina trifosfato (ATP)) e nella formazione delle strutture del corpo (ad es. le ossa, i denti, sotto forma di fosfato tricalcico) (Oelkers e Valsami-Jones, 2008), e non può essere sostituito. Il fosforo è, inoltre, uno dei macronutrienti, insieme all'azoto e al potassio, necessari per la crescita delle piante, e svolge un ruolo vitale nel miglioramento della fertilità del suolo, della produttività agricola e quindi della sicurezza alimentare globale. Ad oggi, la roccia fosfatica è l'unico materiale di input primario per la produzione di fosforo in tutto il mondo (USGS, 2017), e la crescente richiesta di quest'elemento nel settore agricolo e in diversi settori industriali ha portato ad un'intensificazione delle attività di estrazione mineraria. Circa il 95% del fosforo estratto viene utilizzato in agricoltura come fertilizzante e per la produzione di alimenti zootecnici, il rimanente 5% ha diversi utilizzi nell'industria, come ad esempio per la produzione di pesticidi, detergenti, estintori, prodotti per la pulizia e il trattamento delle acque, prodotti di elettronica e batterie, lubrificanti, applicazioni mediche e come componente di leghe metalliche (Deloitte, 2017).

L'importanza del fosforo risulta ancora più marcata se si considera l'aumento della popolazione mondiale e del consumo di carne e latticini con il conseguente aumento della domanda di fosforo per l'agricoltura (Enghag, 2008). Se all'importanza economica crescente si aggiunge la carenza di riserve minerarie nel nostro continente - che sostanzialmente dipende dalle importazioni di fosforo nelle sue diverse forme (roccia fosfatica, acido fosforico e fosforo bianco) da Paesi extra-europei - e quindi il rischio di approvvigionamento, non si fatica a comprendere come il fosforo sia stato inserito nella lista delle *Critical Raw Materials* (CRMs) stilata dalla Commissione Europea. Più nel dettaglio, la roccia fosfatica è stata inserita nella lista delle CRMs nel 2014 (Commissione Europea, 2014<sup>1</sup>), rappresentando il fosforo (in qualsiasi forma) necessario per la produzione di fertilizzanti minerali da utilizzare in agricoltura, alimenti per animali (integratori e foraggi) oltre che altri prodotti necessari per applicazioni alimentari ed industriali. A seguito delle indicazioni del comparto industriale, nella versione aggiornata della lista delle CRMs del 2017 compare per la prima volta anche il fosforo bianco (P<sub>4</sub>) (Commissione Europea, 2017<sup>2</sup>), ottenuto anch'esso a partire dalla roccia fosfatica, ma attraverso un differente processo di produzione, ed elemento essenziale per numerose industrie chimiche - innovative ad elevato valore aggiunto, quali aziende produttrici di lubrificanti, additivi polimerici, sistemi antincendio, prodotti farmaceutici, prodotti chimici per l'agricoltura, catalizzatori, ed aziende legate alla lavorazione dei metalli<sup>3</sup>. A causa del suo processo di produzione, il P<sub>4</sub> importato ha un'elevata impronta energetica, e la sua inclusione nell'elenco delle CRMs è stata accolta con favore al fine di stimolare lo sviluppo di processi industriali per ottenere P<sub>4</sub> da materie prime secondarie, contribuendo così all'economia circolare dei nutrienti, creando posti di lavoro nell'UE e riducendo la dipendenza dalle importazioni delle industrie europee ad elevato valore aggiunto.

---

<sup>1</sup> EU Commission. (2014). Study on the review of the list of critical raw materials. European Commission, Brussels. COM(2014) 0297 final.

<sup>2</sup> EU Commission. (2017). Study on the review of the list of critical raw materials. European Commission, Brussels. COM(2017) 490 final.

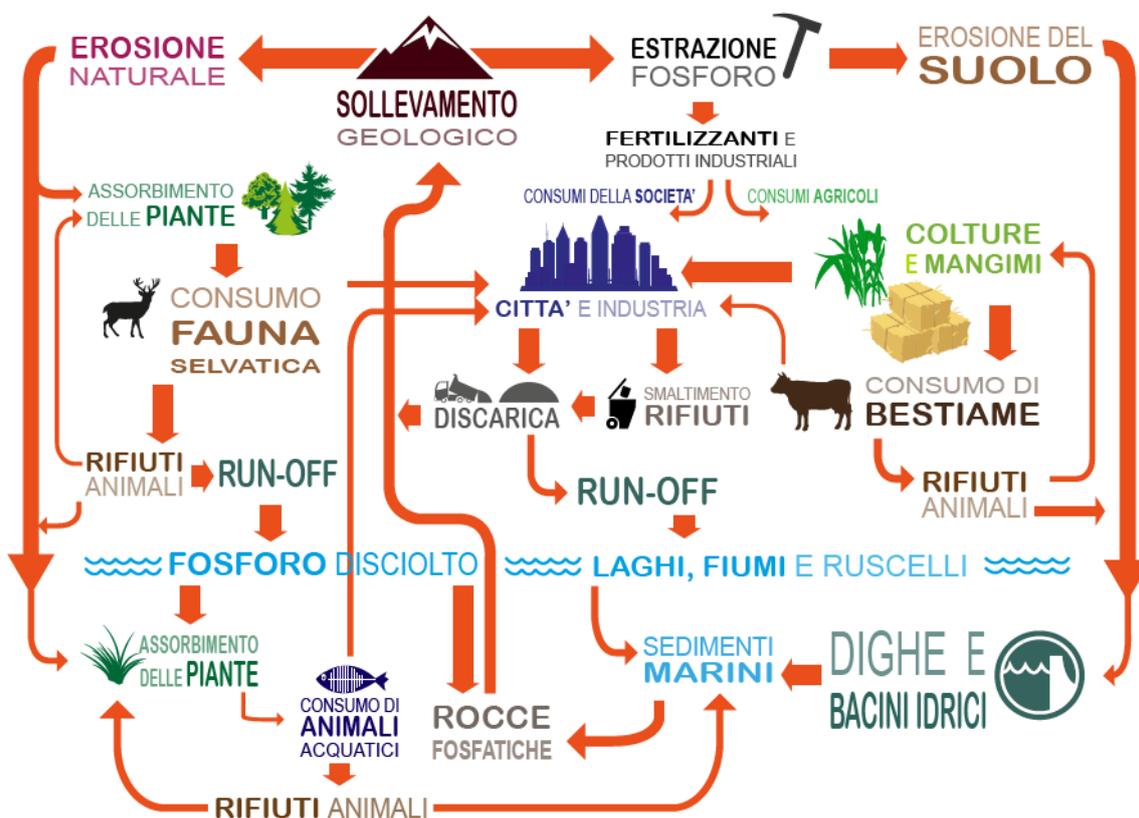
<sup>3</sup> <https://phosphorusplatform.eu/scope-in-print/news/1534-white-phosphorus-added-eu-crm>.

## 1 Il fosforo

Il fosforo (P) è l'undicesimo elemento più abbondante sulla crosta terrestre (Krauss et al., 1984) e il tredicesimo più comune nelle acque marine (Smil, 2000). Tuttavia essendo altamente reattivo, in natura non si trova allo stato libero, ma si presenta nel suo stato ossidato, sotto forma di fosfato ( $PO_4^{3-}$ ), prevalentemente nella crosta terrestre e nei sedimenti marini, oltre che nei sistemi acquatici, come ioni liberi o debolmente legati, nei suoli, chimicamente legato ad altri composti, e negli esseri viventi e in decomposizione.

Il ciclo naturale del fosforo è un ciclo biogeochimico che descrive il movimento del fosforo attraverso la litosfera, l'idrosfera e la biosfera. L'apporto di fosforo nell'atmosfera è irrilevante, in quanto comprende piccoli quantitativi che penetrano nell'atmosfera sotto forma di polvere o spruzzi di mare. Il fosforo circola attraverso l'ambiente in tre cicli naturali (Liu et al., 2008). Il primo di questi è il ciclo inorganico, e si riferisce al P presente nella crosta della terra (rocce fosfatiche), che si muove lentamente partendo dall'erosione delle rocce per arrivare al suolo e gradualmente, per lisciviazione, giungere ai fiumi e ai mari, dove eventualmente, nella sua forma insolubile di fosfato di calcio, può sedimentare e formare, su una scala temporale di centinaia di milioni di anni, nuovamente rocce fosfatiche. Oltre al ciclo inorganico, vi sono due cicli organici: il ciclo legato al comparto terrestre, nel quale il P viene trasferito dal suolo alle piante, agli animali e nuovamente al suolo e dura in media un anno, e quello legato al comparto acquatico, dove il P circola tra le creature che vivono in fiumi, laghi, e mari, e dura in media qualche settimana. La quantità di P che circola nei cicli organici sostiene la vita nei comparti terrestri ed acquatici. Su quest'equilibrio si è inserito pesantemente l'uomo, modificando il ciclo naturale del fosforo (Figura 1).

Figura 1. Il ciclo del Fosforo



Fonte: Adattamento da [http://scienceindia.in/home/view\\_article/419](http://scienceindia.in/home/view_article/419)

Lo sfruttamento agricolo dei terreni, che necessita di elevate quantità di fertilizzanti fosfatici, insieme allo sviluppo degli allevamenti intensivi, che richiede l'utilizzo di mangimi e prodotti per gli animali a base di fosforo, ha creato due pesanti conseguenze ambientali: da un lato ha intaccato profondamente i giacimenti di fosforo, e dall'altro, a causa del dilavamento del terreno, ha arricchito fiumi, laghi e mari di composti contenenti fosforo, che al pari dei composti azotati sono responsabili del fenomeno dell'eutrofizzazione. Grandi quantità di fosforo vengono inoltre impiegate in diversi settori industriali, per ottenere prodotti chimici di largo uso come ad esempio pesticidi, detersivi, estintori, prodotti per la pulizia e il trattamento delle acque, prodotti elettronici e batterie, lubrificanti, leghe metalliche. Lo sviluppo di tali attività industriali ha quindi contribuito ad aumentare le attività minerarie. Non da ultimo, l'attività antropica si è inserita nel ciclo del fosforo anche mediante la produzione di ingenti quantità di rifiuti o sottoprodotti, contenenti anch'essi fosforo, legati al settore della produzione agricola, della produzione animale, della trasformazione dei prodotti alimentari, industriale e consumo umano, che rappresentano perdite di fosforo nell'ambiente (Van Dijck 2016).

Ad oggi è fondamentale una corretta gestione di tali flussi che incoraggi il recupero e riuso del fosforo attraverso le logiche e i paradigmi dell'economia circolare.

Attualmente, la roccia fosfatica è l'unico materiale di input primario per la produzione di fosforo in tutto il mondo (USGS, 2017). Essa viene estratta ed utilizzata:

- prevalentemente per la **produzione, mediante processi ad umido, di acido fosforico** utilizzato per lo più come fertilizzante in agricoltura, ma anche per la produzione di integratori per animali, ritardanti di fiamma e sostanze ignifughe, additivi alimentari (coloranti, conservanti, emulsionanti, ecc..), detersivi, cemento, carne lavorata, per la lavorazione delle patate, nel settore zootecnico;
- per la **produzione, mediante processi termici, di fosforo elementare,  $P_4$** , che ha una grande varietà di impieghi. Tali processi termici sono molto energivori in quanto prevedono il trattamento della materia prima ad elevate temperature all'interno di forni. Il fosforo elementare è utilizzato principalmente nelle industrie chimiche per applicazioni innovative ed ad elevato valore aggiunto, quali materiali antincendio, lubrificanti, additivi polimerici, prodotti farmaceutici, prodotti chimici per l'agricoltura, catalizzatori, per la fabbricazione di leghe di fosforo che trovano impiego nella metallurgia, ma anche come base per produrre "acido fosforico puro" e suoi derivati che entrano nella preparazione di alimenti e formulazione di detersivi.

Va precisato che la maggior parte dell'acido fosforico è utilizzato come intermedio per produrre fertilizzanti e non dovendo essere molto puro è prodotto a basso costo, *mediante processi ad umido*, direttamente dai minerali di fosfato di roccia e non tramite l'elemento  $P_4$  (ECI, 2016).

Il **fosforo elementare,  $P_4$** , non è presente in natura e può esistere sotto forma di diversi allotropi, i più diffusi dei quali sono il **fosforo bianco**, il **fosforo rosso** e il **fosforo nero**, dei quali i primi due hanno una maggiore importanza dal punto di vista commerciale. Per le applicazioni nello specifico vedasi il capitolo 3. Il fosforo rosso e il fosforo nero sono prodotti a partire dal fosforo bianco.

Il **fosforo bianco**, anche denominato in maniera generica fosforo elementare o fosforo giallo e indicato anch'esso come  $P_4$  a temperatura ambiente è un solido cristallino, translucido, di aspetto e consistenza cerosa, che se perfettamente puro, è di colore bianco, tossico per ingestione ed inalazione. Fonde a  $44,1\text{ }^\circ\text{C}$  e bolle a  $280,5\text{ }^\circ\text{C}$ . A contatto con l'ossigeno presente nell'aria si ossida, emettendo luminescenza nettamente visibile al buio, da cui il nome (dal greco *phos* (luce) e *phorein* (portare)). La

reazione, che dà luogo alla formazione di anidride fosforica ( $P_2O_5$ ), è esotermica (Eq. 1) e può essere violenta, per questo motivo deve essere conservato in acqua. È insolubile in acqua, poco solubile in solventi organici e molto solubile nel disolfuro di carbonio.

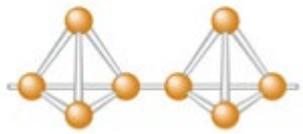
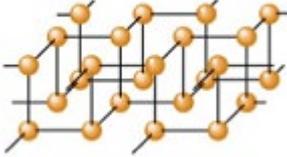


Il **fosforo rosso** si ottiene riscaldando a 250 - 300 °C il fosforo bianco in assenza di aria. Il colore può virare dal rosso chiaro al violaceo, la struttura amorfa è costituita da lunghe catene di atomi di fosforo. Per successivo riscaldamento dà luogo a cristallizzazione. È meno volatile e meno reattivo del fosforo bianco e non è tossico; sublima a 170°C e si incendia per impatto o sfregamento, non si ossida all'aria e, a differenza del fosforo bianco, è insolubile nei grassi e nei solventi, quali il solfuro di carbonio.

Infine, il **fosforo nero** si ottiene riscaldando il fosforo bianco o il fosforo rosso ad alte temperature (es. 200°C), ad alta pressione (es. 10.000 atmosfere) e in presenza di catalizzatori. Il fosforo nero è l'allotropo più raro del fosforo ed è il più stabile grazie alla sua struttura cristallina composta da piani infiniti di atomi di fosforo, con una simmetria rombica, simile al grafene. Ha punto di fusione a ~610°C. Anche il fosforo nero è chimicamente più stabile rispetto al fosforo bianco e non è tossico.

In Tabella 1 vengono riportate le strutture e le immagini delle differenti forme allotropiche del fosforo elementare.

Tabella 1. Strutture e immagini delle differenti forme allotropiche del fosforo elementare.

Forma allotropica	Struttura molecolare	Immagine
<b>Fosforo bianco</b>		
<b>Fosforo rosso</b>		
<b>Fosforo nero</b>		

Il contenuto di fosforo (P) nelle rocce fosfatice, nei fertilizzanti e nei diversi prodotti industriali è spesso espresso come percentuale di pentossido di fosforo o anidride fosforica ( $P_2O_5$ ). Inoltre, il titolo della roccia fosfatica può essere espresso anche come BPL, ovvero “bone phosphate lime”, nome comune del fosfato tricalcico ( $Ca_3(PO_4)_2$ ). È possibile passare da un’unità di misura all’altra attraverso i seguenti fattori di conversione:

- $P = 0.4364 \times P_2O_5$
- $P_2O_5 = 2.2914 \times P$
- $BPL = 2.1852 \times P_2O_5$
- $P_2O_5 = 0.4576 \times BPL$
- $P = 0.1997 \times BPL$

## 1.1 La value chain del fosforo

Nel 2018 il mondo ha consumato circa 20.5 milioni di tonnellate di fosforo (P)<sup>4</sup> dalla roccia fosfatica (U.S. Geological Survey, 2018), di cui il 95% è destinato al settore alimentare attraverso la produzione di fertilizzanti o additivi per mangimi animali (Deloitte, 2017).

Il processo di produzione dei fertilizzanti prevede prevalentemente l’utilizzo di acido fosforico (MGA = acido mercantile) ottenuto dalla lavorazione della roccia fosfatica mediante processi ad umido. Anche alcuni prodotti industriali contenenti fosforo (integratori alimentari, ritardanti di fiamma, polifosfati) possono essere ottenuti utilizzando acido fosforico, ma molti altri oggi prevedono l’utilizzo di fosforo elementare ( $P_4$ ). I prodotti derivati da  $P_4$  includono: additivi per lubrificanti, intermedi per l’industria farmaceutica, prodotti agrochimici, agenti anticancro, detergenti, ritardanti di fiamma, fiammiferi e articoli pirotecnici, agenti per la nichelatura, asfalto e additivi plastici, catalizzatori, materiali luminescenti, molecole per l’estrazione di metalli (la maggior parte del cobalto prodotto globalmente è raffinato utilizzando un intermedio al fosforo). Tra le applicazioni quantitativamente importanti si annoverano i ritardanti di fiamma (in sostituzione dei ritardanti di fiamma bromurati) e i prodotti chimici per la lotta agli incendi, i fosfonati utilizzati nel trattamento delle acque industriali e l’osmosi inversa e il glifosato (l’erbicida più venduto al mondo). Un’area di potenziale forte crescita è l’impiego nelle batterie Litio.ferro-fosfato (elettronica, veicoli elettrici, accumulo di rete) che consentono un minor rischio di incendio rispetto ai tipi esistenti di batterie agli ioni di litio<sup>5</sup>.

### 1.1.1 Il modello lineare del fosforo e prospettive future

L’attuale catena di valore del fosforo è perlopiù di tipo lineare. In Figura 2 ne viene proposto uno schema di livello globale, dove il settore della raccolta e del riutilizzo svolge solo un ruolo marginale, e dunque non è stato considerato.

A livello europeo la catena di valore del fosforo è influenzata dalle importazioni sia di roccia fosfatica sia di fosforo bianco. L’europa infatti risulta essere dipendente dalle importazioni di rocce fosfatice per circa l’88% da paesi extra-europei, e per il 100% per quel che concerne il fosforo bianco.

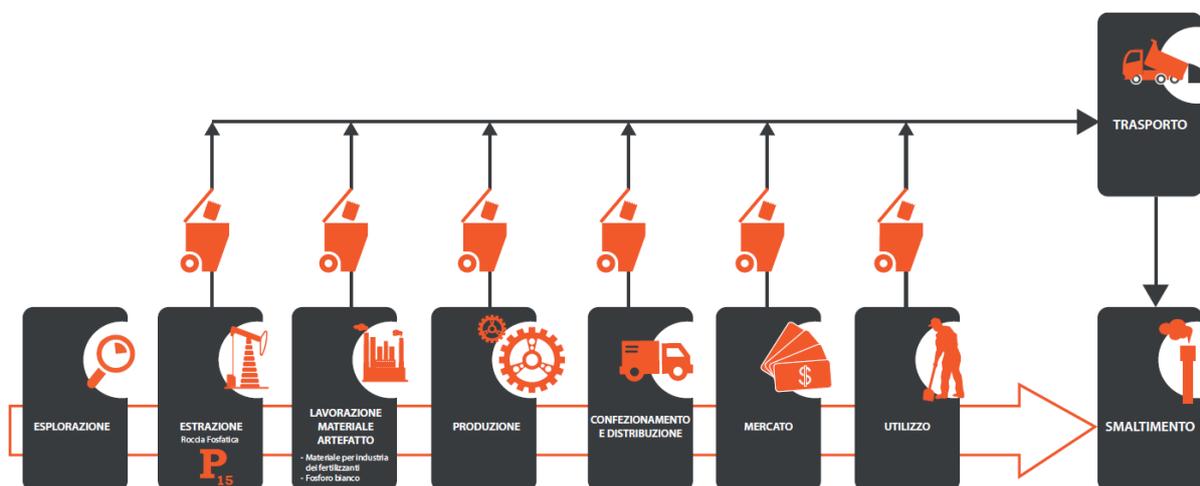
Nell’ottica di assicurare un approvvigionamento sostenibile di materie prime, occorre aumentare l’efficienza in tutta la catena di valore del fosforo, dalle fasi di estrazione, alle fasi di lavorazione e produzione, fino all’utilizzo, ridurre le perdite di fosforo per poi puntare al recupero di fosforo sia da sottoprodotti di processi di produzione di composti a base di fosforo (es. fosfogessi) sia dalle perdite dei processi di produzione agricola, animale, alimentare, industriale e nel consumo umano finale che

<sup>4</sup> Equivalenti a circa 47 milioni di tonnellate di  $P_2O_5$ .

<sup>5</sup> <http://www.phosphorusplatform.eu/images/scope/ScopeNewsletter123.pdf>.

costituiscono il ciclo antropico, in una logica di sostenibilità ambientale ed economica, implementando i criteri e i paradigmi dell'economia circolare.

Figura 2. Schema lineare della catena di valore del fosforo semplificato a livello globale



Fonte: Elaborazione ENEA

### 1.1.2 Il framework europeo e italiano

Il presente paragrafo fornisce un inquadramento delle principali fonti normative che regolano il mercato del fosforo a livello europeo e nazionale. Per una trattazione completa si rimanda al report “Normativa” (2019) della Piattaforma Italiana del Fosforo.

La legislazione sul fosforo include numerose direttive e piani d'azione adottati a livello europeo. Tali direttive sono vincolanti per ciascun Stato membro e le autorità nazionali devono adattare le loro leggi al fine di raggiungere gli obiettivi definiti, ma sono libere di decidere in che modo lo faranno. Di seguito si riportano una serie di fonti normative europee che regolano il mercato del fosforo (Tabella 2).

Tabella 2. Normative europee che regolano il mercato del fosforo

MATRICE	FONTE NORMATIVA
Fanghi di depurazione	86/278/CE Direttiva fanghi e liquami
Fanghi di depurazione	91/676/CE Direttiva Nitrati
Fanghi di depurazione	2008/98/CE Direttiva Rifiuti
Fanghi di depurazione	Documento 21 settembre 2010 su fanghi e bio waste
Fertilizzanti	REGOLAMENTO Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea 2019/1009/UE del 5 giugno 2019 (Guue 25 giugno 2019 n. L 170)
Fertilizzanti	Regolamento (CE) n.2003/2003 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 13 ottobre 2003 e successive modifiche (25 Giugno 2019)
Fertilizzanti	Regolamento (CE) n.834/2007 del Consiglio del 28 giugno 2007
Fertilizzanti	Regolamento (CE) n.889/2008 della Commissione, del 5 settembre 2008
Fertilizzanti	Regolamento (CE) n. 1069/2009 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 ottobre 2009
Fertilizzanti	Regolamento (CE) n. 142/2011
Compost	Direttiva quadro per il trattamento dei rifiuti (Direttiva 2008/98/CE )
End of waste	Directive 2008/98/EC on waste of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008. (Waste Framework Directive)
End of waste	Guidance on the interpretation of key provisions of Directive 2008/98/EC on waste. (June 2012)

MATRICE	FONTE NORMATIVA
End of waste	Direttiva (UE) 2018/851 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018
End of waste	Information document della European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP) inerente la registrazione della struvite ai sensi del regolamento REACH 5-10-2015

Fonte: Elaborazione ENEA

A livello italiano la Tabella 3 riporta le principali fonti normative nazionali che regolano il mercato del fosforo.

Tabella 3. Normative nazionali che regolano il mercato del fosforo

MATRICE	FONTE NORMATIVA
Fanghi di depurazione	Metodiche analitiche IRSA-CNR (1984)
Fanghi di depurazione	Normativa tecnica del CEN
Fanghi di depurazione	D.Lgs 99/92. Normativa fanghi
Fanghi di depurazione	D.Lgs 152/2006 e modifiche integrative. Norme in materia ambientale
Fanghi di depurazione	Decreto interministeriale n.5046 del 25 febbraio 2016. Criteri e norme tecniche generali per la disciplina regionale dell'utilizzazione agronomica
Fanghi di depurazione	D.Lgs 36/2003. Disciplina discariche
Fanghi di depurazione	D.Lgs 75/2010. Disciplina ammendanti e fertilizzanti
Fanghi di depurazione	D.Lgs 205/2010. Disciplina combustibile solido secondario
Fanghi di depurazione	D.L. 28/09/2018 n.109 (cd. Decreto Ponte Morandi). Art. 41 D.L. 109/2018 rubricato "Disposizioni urgenti sulla gestione dei fanghi da depurazione"
Fanghi di depurazione	Legge 16 novembre 2018, n. 130
Fanghi di depurazione	D. Lgs. per il recepimento nuove direttive del cd. "pacchetto rifiuti". "Disciplina della gestione dei fanghi di depurazione delle acque reflue e attuazione della direttiva 86/278/CEE concernente la protezione dell'ambiente, in particolare del suolo, nell'utilizzazione dei fanghi di depurazione in agricoltura" (bozza 28 giugno).
Fertilizzanti	D. Lgs. 29 aprile 2010 n.75 e s.m.i. Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti, a norma dell'articolo 13 della legge 7 luglio 2009,n.88
Fertilizzanti	D. Lgs. 3 aprile 2006, n.152. Norme in materia ambientale (318 articoli e 50 allegati) e s.m.i.
Fertilizzanti	DPR 28/02/2012, n.55. Regolamento recante modifiche al decreto del Presidente della Repubblica 23 aprile 2001, n.290, per la semplificazione dei procedimenti di autorizzazione alla produzione, alla immissione in commercio e alla vendita di prodotti fitosanitari e relativi coadiuvanti.
Fertilizzanti	Decreto Interministeriale n. 5046 del 25 Febbraio 2016. Criteri e norme tecniche generali per la disciplina regionale dell'utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento e delle acque reflue
Compost	D.M. 5 febbraio 1998. "Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del D.Lgs 5 febbraio 1997, n. 22.
Compost	D.M. n.203 del 08/05/03
Compost	D. Lgs. 152/2006. In vigore ma modificato dal D.L.gs. 4/08
Compost	D. Lgs. 16 gennaio 2008, n. 4 noto anche come "Correttivo" - In vigore
Compost	D. Lgs. 75/2010 del 29 aprile 2010 e ss.mm.ii. Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti, a norma dell'articolo 13 della legge 7 luglio 2009, n.88.
Compost	D.M. AMBIENTE 29 dicembre 2016, n. 266. Regolamento recante i criteri operativi e le procedure autorizzative semplificate per il compostaggio di comunita' di rifiuti organici ai sensi dell'articolo 180, comma 1-octies, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, cosi' come introdotto dall'articolo 38 della legge 28 dicembre 2015, n. 221. (17G00029) (GU Serie Generale n.45 del 23-02-2017)

MATRICE	FONTE NORMATIVA
<b>End of waste</b>	D. Lgs. 3 dicembre 2010, n. 205
<b>End of waste</b>	Cons. di Stato, Sez. IV, sent. n. 1229 del 28 febbraio 2018
<b>End of waste</b>	1 febbraio 2019: End of waste pannolini, regole italiane al vaglio UE.
<b>End of waste</b>	13 febbraio 2019: pastazzo di agrumi, qualifica come sottoprodotto all'esame dell'UE.
<b>End of waste</b>	CORTE DI GIUSTIZIA UE Sez. 2 <sup>a</sup> , 28/03/2019 Sentenza C-60/18 su disciplina "End of waste"
<b>End of waste</b>	Legge 3 maggio 2019, n. 37 (Legge europea 2018)
<b>End of waste</b>	16/05/2019. Il Ministro dell'ambiente Sergio Costa firma il decreto end of waste per il riciclo dei cosiddetti PAP
<b>End of waste</b>	Legge n. 55 del 2019 detta anche "Sblocca Cantieri"
<b>Sottoprodotti</b>	D.lgs. 3 aprile 2006, n. 152. Definizione di Sottoprodotto
<b>Sottoprodotti</b>	D.M. 13 ottobre 2016, n. 264 (MATTM). Regolamento recante criteri indicativi per agevolare la dimostrazione della sussistenza dei requisiti per la qualifica dei residui di produzione come sottoprodotti e non come rifiuti.
<b>Sottoprodotti</b>	Circolare esplicativa del Ministero dell'Ambiente del 30 maggio 2017. Con D.M. 13 ottobre 2016, n. 264 (in Gazzetta ufficiale del 15 febbraio 2017, n. 38) con cui sono stati adottati «Criteri indicativi per agevolare la dimostrazione della sussistenza dei requisiti per la qualifica dei residui di produzione come sottoprodotti e non come rifiuti».

Fonte: Elaborazione ENEA

### 1.1.3 I player

L'economia circolare applicata alla catena di valore del fosforo presuppone azioni lungo tutta la filiera, finalizzate alla chiusura del ciclo e all'uso efficiente delle risorse. L'attenzione è dunque rivolta su tutta la catena del valore, non solo alle fasi di recupero e riutilizzo, e coinvolge una pluralità di attori pubblici e privati, stimolando processi virtuosi di cooperazione e nuovi modelli di business.

Il cambiamento da un approccio lineare ad un approccio circolare sulla catena di valore del fosforo deve passare attraverso una revisione normativa che ne semplifichi l'attuazione e ne migliori la coerenza; che renda strutturale la collaborazione tra tutti gli attori coinvolti – Pubbliche Amministrazioni, imprese, istituti di ricerca scientifica e tecnologica, cittadini – che favorisca l'innovazione e il trasferimento di tecnologie e la competitività dei settori industriali, oltre che un cambio di mentalità anche da parte delle imprese e più in generale del cittadino.

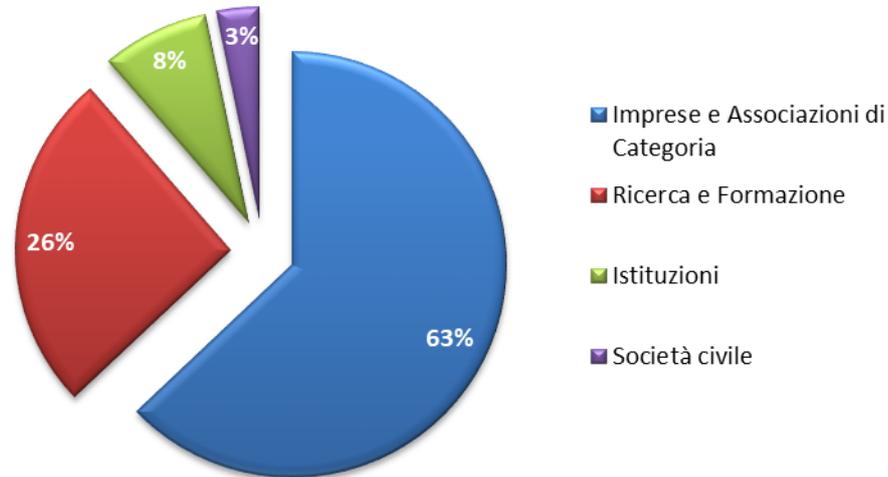
Recuperando la centralità del territorio, attraverso processi di governance che contribuiscano a costruire relazioni tra i soggetti economici e massimizzino le sinergie fra attori istituzionali e non, si possono creare modelli di "economie circolari" a livello locale (es. simbiosi industriale), fornendo così alle imprese un'alternativa all'utilizzo di materie prime importate.

In quest'ottica, a livello italiano la Legge 27 dicembre 2017, n. 205, all'articolo 1, comma 122, ha previsto l'istituzione, nello stato di previsione del Ministero dell'Ambiente, di un fondo destinato alla realizzazione della Piattaforma Italiana del fosforo. Con decreto direttoriale RIN-DEC-2018-0000155 del 13/11/2018 è stata istituita la Piattaforma Nazionale del Fosforo con l'Agenzia Nazionale per l'Energia, le Nuove tecnologie e lo Sviluppo economico sostenibile dei sistemi produttivi e territoriali – ENEA quale Gestore della Piattaforma.

La Piattaforma Italiana per il Fosforo riunisce tutti gli stakeholder italiani attivi in tutte le fasi del ciclo di vita del fosforo e ha il compito di individuare tecnologie, buone pratiche esistenti e strategie per la chiusura del ciclo su questa materia prima, fino all'elaborazione di un piano di sostenibilità a lungo

termine. Alla piattaforma partecipano attori provenienti dal settore pubblico e privato. Nel 2019 oltre 100 soggetti di 60 organizzazioni appartenenti ai vari stadi della filiera hanno preso parte alle attività.

Figura 3. Le organizzazioni aderenti alla Piattaforma Italiana del Fosforo per categoria

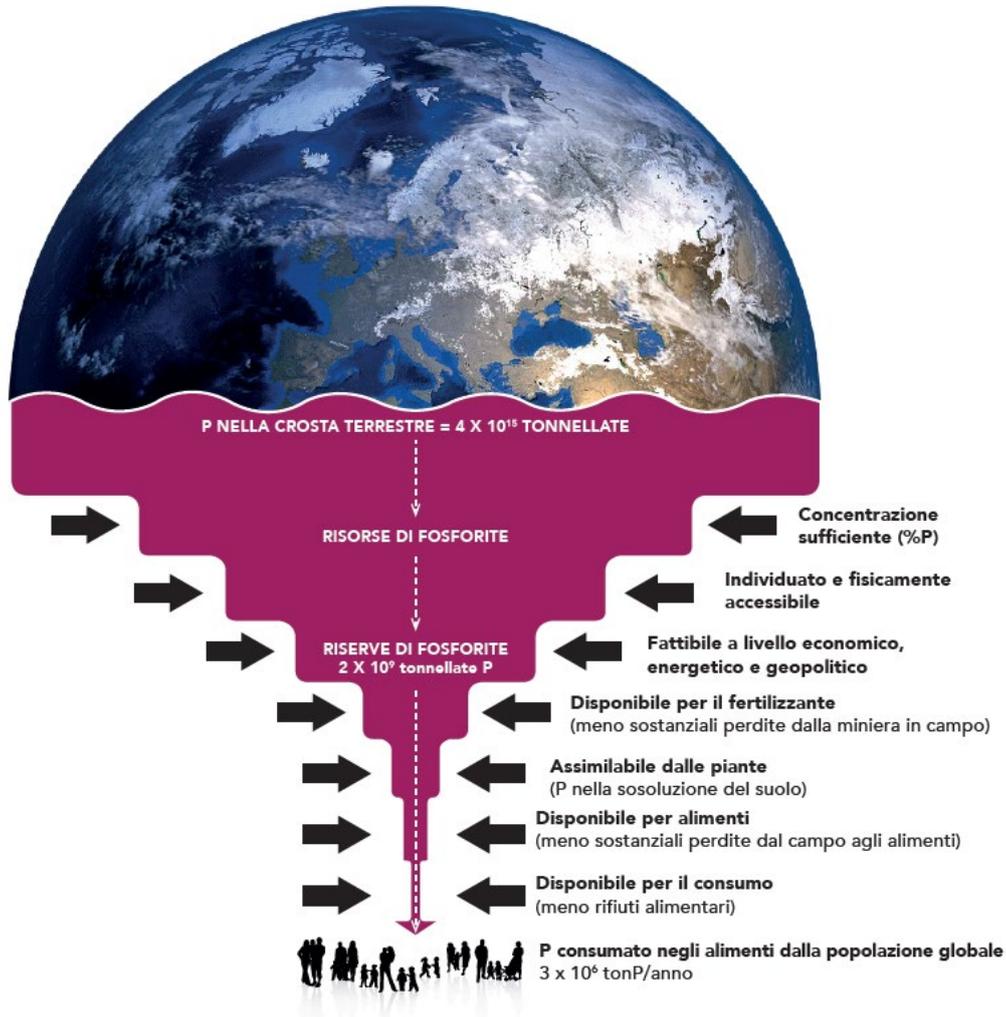


Fonte: Elaborazione dati ENEA

#### 1.1.4 Problematiche da affrontare

Le perdite e le inefficienze lungo tutta la catena di valore del P sono significative (Schröder et al. 2010; Withers et al., 2015) e oltre a contribuire ad un uso non efficiente della risorse comportano una serie di problemi ambientali dando luogo, in particolare, a fenomeni di eutrofizzazione. La Figura 4 mostra ad esempio la scala di inefficienza lungo la catena di valore del P nella filiera alimentare.

Figura 4. Perdite lungo la catena di valore del fosforo



Fonte: Adattato da Cordell (2010)

Elevate perdite di P si hanno durante la fase di estrazione, di rimozione delle impurezze (beneficiation process), stoccaggio, trasporto e trasformazione. Tali perdite richiedono decenni di innovazioni tecnologiche e di governance prima di poter giungere ad un sistema efficiente di gestione del P (Rosemarin & Ekane, 2016).

La Figura 5 indica una combinazione di misure da adottare sia dal lato della domanda che dal lato dell'offerta di P al fine di soddisfare la domanda alimentare ed industriale globale a lungo termine.

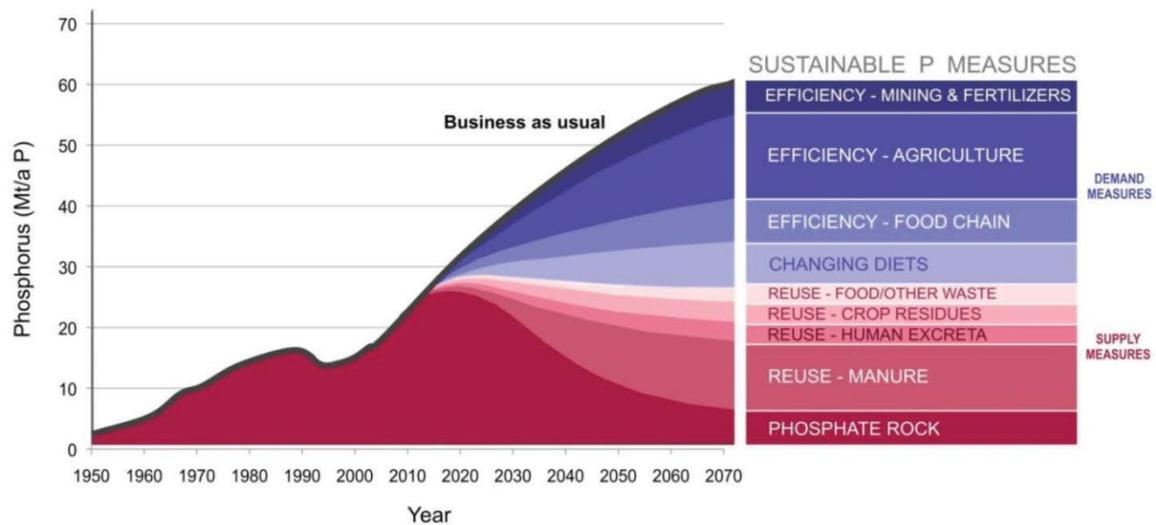
Più nel dettaglio, dal lato della domanda occorre diventare più efficienti in ogni nodo della catena di valore del fosforo, e dunque occorre:

- migliorare i processi di estrazione di P dalle rocce fosfatiche;
- ottimizzare la formulazione dei fertilizzanti che facilitano l'applicazione ottimale del fosforo;
- applicare fertilizzanti in maniera più appropriata in base alle esigenze delle colture;
- ottimizzare la formulazione di mangimi per animali;
- ridurre la produzione di rifiuti alimentari;
- ridurre l'utilizzo di fosforo nei processi industriali;
- adottare diete meno ricche di fosforo oltre e ridurre il consumo di carne.

Dal lato dell'offerta, occorre invece recuperare P da materie prime seconde (MPS), quali ad esempio fanghi di depurazione, effluenti zootecnici, rifiuti solidi organici, contribuendo ad incentivare il passaggio ad un modello di economia circolare..

Infine occorre una cooperazione intelligente tra tutti i settori lungo la catena del valore del fosforo (imprese, istituti di ricerca, organizzazioni governative e ONG) e tra Stati membri europei.

Figura 5. Misure sostenibili di domanda e offerta di fosforo per soddisfare la futura domanda alimentare globale.



Fonte: Cordell (2013)

## 2 L'offerta di fosforo

### 2.1 Offerta primaria di fosforo

Circa il 95% del fosforo nella crosta terrestre è presente, sotto forma di fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), nelle rocce fosfatiche (o fosforiti) e nelle rocce ricche di apatite (Krauss et al., 1984). Con il termine apatite vengono comunemente denominati alcuni minerali composti da fosfato di calcio insieme a fluoro (fluorapatite  $[\text{3Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaF}_2]$ ), cloro (chloroapatite  $[\text{3Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaCl}_2]$ ) o gruppi idrossilici (hydroxyapatite  $[\text{3Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}(\text{OH})_2]$ ), con formula generica  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3[\text{F}, \text{OH}, \text{Cl}]$  (Enghag, 2008).

Le fosforiti possono essere di due tipologie: sedimentarie e ignee, ciascuno con diverse proprietà mineralogiche, strutturali e chimiche (Van Enk et al., 2011).

Le rocce sedimentarie rappresentano l'80 - 90% della produzione mondiale di roccia fosfatica (USGS, 2016; Kauwenbergh, 2010), con grandi produttori come Cina, Marocco, Stati Uniti, Tunisia e Medio Oriente (IFDC, 2010). La maggior parte di rocce sedimentarie sono costituite da depositi sedimentari e contengono una ricca varietà di carbonati della fluorapatite minerale, detta francolite. I minerali di roccia fosfatica sedimentaria hanno comunemente un contenuto di  $\text{P}_2\text{O}_5$  di circa il 30 - 35% (Krauss et al., 1984), ma presentano elevate concentrazioni di metalli pesanti, come ad esempio il cadmio.

Le rocce ignee contribuiscono per il 10 - 20% della produzione attuale di rocce fosfatiche, ma rappresentano una percentuale più bassa delle risorse stimate. I principali depositi ignei si trovano in paesi quali Russia, Brasile, Canada, Finlandia, Zimbabwe e Sudafrica. Nella roccia ignea, i fosfati sono presenti come varietà di fluorapatite, idrossiapatite o clorapatite. Le rocce ignee hanno un quantitativo di fosforo inferiore rispetto alle rocce sedimentarie, con un contenuto di  $\text{P}_2\text{O}_5$  spesso inferiore al 5%, ma che può arrivare a valori di 35 - 40%, o anche maggiori, a seguito del processo di rimozione delle impurità (beneficiation) (IFDC, 2010). A differenza delle rocce sedimentarie, i depositi ignei sono generalmente privi di sostanze inquinanti come radionuclidi e metalli pesanti (Smit et al., 2009).

Oltre alle riserve geologiche conosciute, il fosforo è presente, come fosfato, anche in diverse fonti organiche, quali ad esempio, il guano, ovvero sostanza naturale formata dalla decomposizione di escrementi di vertebrati, in particolare di uccelli marini e di chiroteri troglodili. Il guano è stato trovato in grande quantità su alcune isole (come le Filippine) e coste sudamericane, in particolare del Cile e del Perù (Kiliches, 2013). Storicamente, il guano era un grande fonte di roccia fosfatica, ma è di importanza trascurabile nell'attuale produzione di roccia fosfatica mondiale, a causa di problemi di approvvigionamento, costi di lavorazione o semplicemente perché le quantità disponibili sono molto più basse.

Grandi depositi di fosforiti si trovano anche sulla piattaforma continentale e lungo le dorsali dell'Atlantico e del Pacifico, ma lo sfruttamento di queste fonti localizzate nelle profondità oceaniche non è ancora considerata un'opzione economicamente valida.

#### 2.1.1 Risorse e riserve di rocce fosfatiche

Si stima che le risorse mondiali di fosforite ammontino a circa 300 bilioni di tonnellate ( $3 \times 10^{14}$  ton P) (U.S. Geological Survey, 2018). Tuttavia non tutte le risorse sono fruibili, in quanto possono essere ad esempio non accessibili fisicamente, oppure contenere quantità eccessive di metalli pesanti che le rendono non idonee per i vari impieghi. Mentre le risorse conosciute di fosforite sono relativamente abbondanti a livello globale e sono localizzate in tutti i continenti (McKelvey, 1967), le riserve note, ovvero la parte delle risorse che è effettivamente possibile sfruttare, sono nettamente inferiori e sono

maggiormente concentrate in alcuni paesi, principalmente in Nord Africa e Cina, sebbene ci siano riserve anche negli Stati Uniti, Sud Africa, Russia e Australia.

Non esiste un unico criterio per la valutazione a livello globale delle risorse e delle riserve di fosforiti. In America lo United States Geological Survey (USGS) raccoglie informazioni sulla quantità e la qualità delle risorse minerarie, ma non misura direttamente le riserve, e le aziende o i governi non segnalano le informazioni relative alle riserve allo stesso USGS. Le singole società possono pubblicare periodicamente report sulle risorse minerali e sulle riserve, ma i report vengono prodotti utilizzando una gran varietà di sistemi di reporting in base all'ubicazione della propria attività, alla propria identità aziendale e ai requisiti del mercato azionario. La traduzione dei differenti codici nazionali è resa possibile mediante l'applicazione del modello CRIRSCO - Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards<sup>6</sup>, che è anche coerente con il sistema di classificazione delle Nazioni Unite (United Nation Framework Classification - UNFC<sup>7</sup>). Tuttavia, i dati su risorse e riserve sono in continua evoluzione man mano che le esplorazioni e le attività minerarie procedono e sono influenzati dalle condizioni del mercato e richiedono un aggiornamento costante. In Tabella 4 si riporta l'elenco delle principali riserve conosciute, ovvero dei giacimenti dai quali l'estrazione di fosforo è fisicamente, economicamente, energeticamente e geopoliticamente fattibile.

Tabella 4. Riserve di rocce fosfatiche note nel 2019

<b>Paese</b>	<b>Riserve di roccia fosfatica conosciute (stima in milioni di ton di materiale)</b>	<b>%</b>
Marocco e Sahara ovest	50.000	71,75%
Cina	3.200	4,59%
Algeria	2.200	3,16%
Siria	1.800	2,58%
Brasile	1.700	2,44%
Sud Africa	1.500	2,15%
Arabia Saudita	1.400	2,01%
Egitto	1.300	1,87%
Australia	1.100	1,58%
Stati Uniti	1.000	1,44%
Finlandia	1.000	1,44%
Giordania	1.000	1,44%
Russia	600	0,86%
Perù	400	0,57%
Kazakhstan	260	0,37%
Tunisia	100	0,14%
Uzbekistan	100	0,14%
Israele	67	0,10%
Senegal	50	0,07%
India	46	0,07%
Mexico	30	0,04%
Togo	30	0,04%
Vietnam	30	0,04%

<sup>6</sup> <http://www.criresco.com>

<sup>7</sup> <https://www.unece.org/energy/se/reserves.html>

Paese	Riserve di roccia fosfatica conosciute (stima in milioni di ton di materiale)	%
Altri paesi	770	1,11%
<b>Totale Mondo</b>	<b>68.683</b>	<b>100,0%</b>

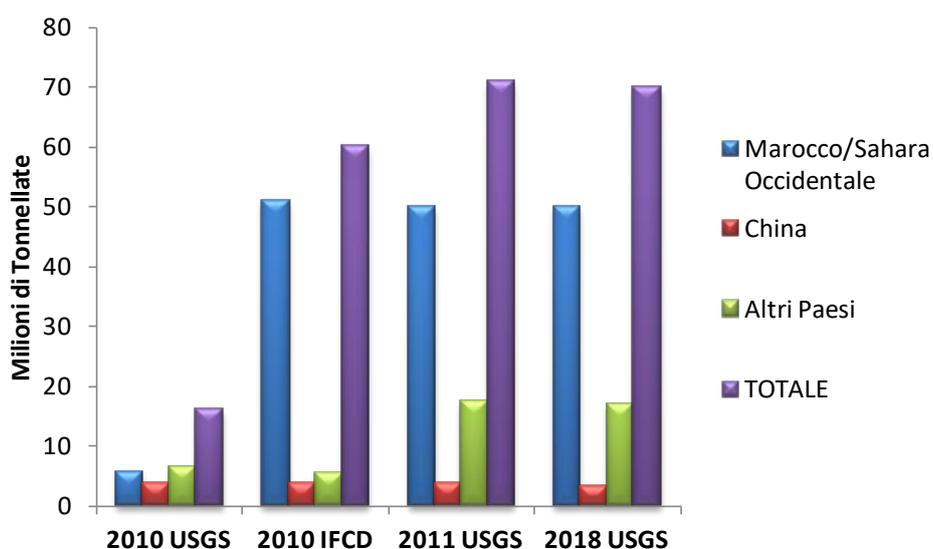
Fonte: U.S. Geological Survey (2019)

Dalle stime riportate dall'USGS, le riserve di rocce fosfatiche ammontano a circa 70.000 milioni di tonnellate (con un contenuto medio di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> del 30%). Le principali riserve minerali di fosforo si trovano in Marocco (71.7%), Cina (4.6%), Algeria (3.2%), Siria (2.6%), Brasile (2.4%), Sud Africa (2.1%), Arabia Saudita (2.0%), Egitto (1.9%), Australia (1.6%), Stati Uniti (1.4%), Finlandia (1.4%), Giordania (1.4%) e Russia (0.9%).

Nell'ultimo decennio ci sono stati molti dibattiti sulle stime globali di riserve di rocce fosfatiche e sugli scenari di consumo del fosforo (Rosemarin & Ekane, 2016). I modelli sulle stime dei flussi di prelievo/consumo di P (Déry & Anderson, 2007; Ward, 2008; Cordell et al., 2009, 2011) sono discordi sulla valutazione del momento in cui si avrà il "picco del fosforo", ovvero il momento in cui la produzione globale di fosforite raggiungerà il picco per poi cominciare a diminuire.

Cordell et al. (2009) per primi hanno suggerito che le riserve globali di rocce fosfatiche potevano esaurirsi in 30 - 40 anni. Wellmer e Becker-Platen (2013) hanno invece stimato una durata delle rocce fosfatiche di 81 anni. Nel 2010 il Centro internazionale per lo sviluppo dei fertilizzanti (IFDC) ha comunicato nuove stime, sensibilmente più alte, di riserve basate su informazioni industriali (Wellmer & Becker-Platen, 2013), e nel 2011 l'USGS ha aggiornato di conseguenza le proprie stime sulle risorse, passando da 16 milioni tonnellate di rocce fosfatiche a circa 60 milioni tonnellate (USGS, 2011<sup>8</sup>). La causa principale di tale aggiornamento è legata ad una reinterpretazione dei dati relativi alle riserve in Marocco. La Figura 6 mostra la variazione registrata nel 2010 nelle stime delle riserve e la situazione attuale.

Figura 6. Variazione delle stime delle riserve di rocce fosfatiche



Fonte: Elaborazione dati ENEA

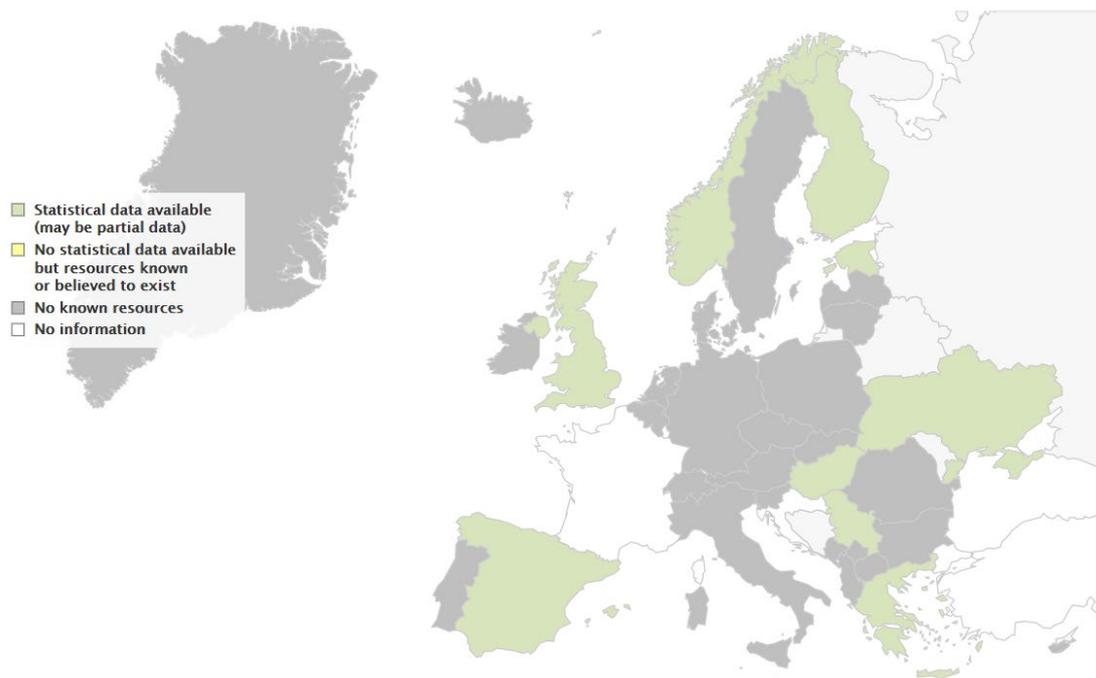
<sup>8</sup> <https://www.usgs.gov/centers/nmic/phosphate-rock-statistics-and-information>.

Pur considerando scenari ottimistici, in cui si prevede un picco di produzione intorno al 2100 (van Vuuren et al., 2010, Wellmer and Becker-Platen (2013), occorre sottolineare che la progressiva scarsità della materia prima con più elevato tenore specifico di anidride fosforica (Van Kauwenbergh, 2010) ha portato e porterà ad un sostanziale incremento di prezzo della roccia fosfatica (Indexmundi, 2019).

Per quel che concerne più nel dettaglio l'Europa, i dati sulle risorse e riserve di rocce fosfatiche di alcuni paesi europei sono disponibili nel sito Web Minerals4EU (Minerals4EU, 2017<sup>9</sup>). Tuttavia i dati presenti non sono completi ed armonizzati. L'archivio include stime basate su una varietà di codici di segnalazione utilizzati da diversi paesi e diversi tipi di set di dati non confrontabili (ad esempio stime storiche di scarsa rilevanza economica, dati stimati, ecc.). Inoltre, la traduzione dei dati del progetto Minerals4EU, mediante l'applicazione del modello CRIRSCO, non è sempre possibile, il che significa che non tutti i dati raccolti relativi alle risorse e riserve di rocce fosfatiche a livello nazionale/regionale sono coerenti con il sistema di classificazione delle Nazioni Unite (UNFC).

Per quanto riguarda le risorse, il sito web di Minerals4EU riporta informazioni legate alla distribuzione geografica (Figura 7) e ai quantitativi disponibili (Tabella 5). In Europa sono noti sette paesi con risorse di rocce fosfatiche, tra cui: Spagna, UK, Finlandia, Norvegia, Ucraina, Estonia, Grecia. Tuttavia, i dati riportati sul sito Minerals4EU non possono essere sommati in quanto trattasi di dati parziali e non ottenuti mediante l'utilizzo della stessa codifica.

Figura 7. Mappa europea delle Risorse di rocce fosfatiche



<sup>9</sup> <http://minerals4eu.brgm-rec.fr/m4eu-yearbook/pages/bycommodity.jsp?commodity=Phosphate%20rock>.

Tabella 5. Dati sulle risorse per l'UE compilati nell'annuario europeo dei minerali

Paese	Merce (sottomerce)	Quantità (Milioni ton)	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Codice risorsa (Reporting Code)
Spagna	Roccia fosfatica (Roccia fosfatica)	30,8	11,78	Risorse misurate (USGS)
UK	Roccia fosfatica (Roccia fosfatica (P2O5))	100,7	2,19	Stime storiche (Nessuno)
Finlandia	Roccia fosfatica (Fosforo (P))	540	4	Totali (JORC)
	Roccia fosfatica (Fosforo (P))	12505	4	Stime storiche (Nessuno)
Norvegia	Roccia fosfatica (Apatite (P2O5))	14,6	5,18	Indicate (JORC)
	Roccia fosfatica (Apatite (P2O5))	220	4,1	Stimate (Nessuno)
Ucraina	Roccia fosfatica (Fosforo (P2O5))	131,9	-	RUS P1 (Russian Classification)
	Roccia fosfatica (Apatite (P2O5))	76002	-	RUS P3 (Russian Classification)
	Roccia fosfatica (Fosforite)	414	-	RUS P3 (Russian Classification)
Estonia	Roccia fosfatica (Fosforite)	2935	-	Misurato & indicato (Other – Estonia)
Grecia	Roccia fosfatica (Fosforite (P2O5))	0,5	10 - 25	Misurate (USGS)
Serbia	Roccia fosfatica (Fosfato (P2O5))	72	9	Totali (JORC)

JORC Code= Codice adottato da Australasian Joint Ore Reserves Committee

RUS Code= Classificazione Russa

USGS Code= Codice adottato da U.S. Geological Survey

Fonte: Minerals4EU (2017)

Per quanto riguarda le riserve, il sito web di Minerals4EU riporta solo le riserve rocciose di fosfato in Ucraina secondo la classificazione Russa (RUS)A, e più precisamente indica la presenza di 115,8 milioni di apatite, corrispondenti a circa 4,55 milioni di ton P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, e di 108.4 milioni di ton di apatite-ilmenite ore, roccia dura, corrispondenti a circa 4,48 milioni di ton di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Inoltre indica la presenza di riserve in Spagna, ma non sono disponibili dati quantitativi.

Oltre all'entità e l'ubicazione delle riserve, altro aspetto importante è il contenuto di metalli pesanti dei depositi di rocce fosfatiche rimanenti, aspetto questo che desta preoccupazione. La fosforite è generalmente contaminata in una certa misura dal cadmio, che è un elemento tossico. Le fosforiti che vengono estratte in Finlandia, Russia e Sudafrica sono ignee e hanno un contenuto di cadmio molto basso (talvolta inferiore a 10 mg di cadmio/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Al contrario, quelle che si trovano nell'Africa settentrionale e occidentale e in Medio Oriente sono sedimentarie e, generalmente, presentano livelli di cadmio più alti, nei casi peggiori superiori a 60 mg di cadmio/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

La necessità di controllare la contaminazione del suolo da parte del cadmio contenuto nei fertilizzanti significa che, se si esauriscono le fonti più pulite, il costo della produzione di fertilizzanti che soddisfino gli standard di protezione del suolo probabilmente aumenterà, oppure gli standard più rigorosi vigenti nell'UE faranno sì che il materiale con più alto contenuto di cadmio sia venduto altrove. L'impiego inefficiente delle riserve pulite ci porterà più rapidamente a questa situazione, a meno che le tecnologie di decadmiazione diventino economicamente realizzabili.

Le rocce fosfatiche possono contenere inoltre uranio fra il 0,010 e il 0,020 %; esse sono perciò debolmente radioattive, a seconda della geologia della miniera; risultano così radioattivi anche i fosfogessi, residui delle attività di produzione di fertilizzanti e detergenti, in cui si concentrano anche altri elementi inquinanti originariamente presenti nei minerali fosfatici. Le fosforiti marocchine contengono un certo quantitativo di uranio, ma non ne è conveniente l'estrazione. I giacimenti più ricchi di uranio sono stati anche considerati come fonti commerciali di questo elemento.

### 2.1.2 Esplorazione / Estrazione

L'abbondanza nella crosta terrestre di pentossido di fosforo ( $P_2O_5$ ) è di circa lo 0,13%, il che indica una presenza relativamente elevata di questo elemento (Rudnick & Gao, 2003). Sebbene queste risorse siano presenti in tutto il mondo, come visto le riserve conosciute sono concentrate in specifiche aree geografiche (oltre il 70% in Marocco).

Nel 2011 si sono implementate le attività di esplorazione ed espansione delle miniere in Australia e in Africa. Nuove miniere sono state aperte in Peru, Arabia Saudita, Giordania. Esistono due grandi progetti in Africa: l'espansione di una miniera in Marocco e un nuovo progetto al largo delle coste della Namibia (offshore sands). L'esplorazione offshore è una pratica che sta avanzando anche in altre regioni, come ad esempio in nuova Zelanda (Chatham Island). Ulteriori progetti minori sono in fase di sviluppo in diversi paesi africani, come Angola, Congo (Brazzaville), Guinea-Bissau, Etiopia, Mali, Mauritania, Mozambico, Uganda e Zambia. Il potenziamento della capacità produttiva è prevista in Egitto, Senegal, Sudafrica, Tunisia e Togo. Altri progetti di sviluppo per nuove miniere o espansioni delle esistenti sono in corso in Brasile, Cina, e Kazakistan (USGS, 2019). La disponibilità di roccia fosfatica in Europa è limitata, esiste una piccola base di estrazione in Finlandia operante da diversi decenni (De Ridder et al., 2012).

Per incrementare la sostenibilità delle estrazioni minerarie, inoltre si sta cercando di valorizzare altri elementi oltre al fosforo, come ad esempio l'uranio nelle miniere in Giordania, piuttosto che il ferro nelle miniere in Australia, oppure il fluoro, che viene estratto e usato come materia prima per i composti fluorurati. Nel nord della Svezia (Kiruna) esistono progetti per l'estrazione del fosforo da vecchie miniere di ferro.

Attualmente, in tutto il mondo, la maggior parte delle attività di estrazione per la produzione di roccia fosfatica è effettuata in miniere a cielo aperto (Van Kauwenbergh, 2010), nelle quali la roccia viene perforata, fatta esplodere e accantonata in una zona dell'area di estrazione per la successiva lavorazione, che può avvenire *in situ* o in impianti specializzati. (MEC, 2016<sup>10</sup>). Le perdite di fosforo durante le attività di estrazione sono dell'ordine del 18% rispetto alla produzione iniziale di P, pari a circa 6 Milioni di tonnellate P all'anno (Prud'homme, 2010; Scholz et al., 2014).

### 2.1.3 Lavorazione delle rocce fosfatice

Una volta estratti, i minerali sono generalmente sottoposti a processi di preparazione per la rimozione delle impurità (*beneficiation* - termine tecnico che descrive il processo industriale di separazione meccanica dei minerali l'uno dall'altro); e se non sono ricchi a sufficienza di ossidi di fosforo, subiscono processi fisici per la separazione delle componenti non fosfatice. Lo schema del processo di *beneficiation* dipende dalle impurità presenti ( $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $F$ ,  $SiO_2$ ,  $SrO$ ,  $Cl$ ,  $CO_3$ , composti organici, cadmio, uranio) e dalle proprietà della roccia (Al-Fariss et al., 1992), e include trattamenti di essiccazione/asciugatura, triturazione, vagliatura, oltre a processi di separazione fisica quali lavaggio con acqua, flottazione, calcinazione. In particolare la flottazione è utilizzata per rimuovere ganga silicea (sabbia) e carbonati (calcite, dolomite, ecc.), mentre la calcinatura viene applicata per eliminare carbonati di calcio e materiale organico (Van Kauwenbergh, 2010). Le perdite di fosforo durante le attività di *beneficiation* sono dell'ordine del 16% rispetto alla produzione iniziale di P, pari a circa 5.5 Milioni di tonnellate P all'anno (Prud'homme, 2010; Scholz et al., 2014).

Una volta effettuate le operazioni di preparazione, e a seconda delle caratteristiche mineralogiche, strutturali e chimiche (ad es. grado di impurità del minerale), nonché della disponibilità locale di acqua

---

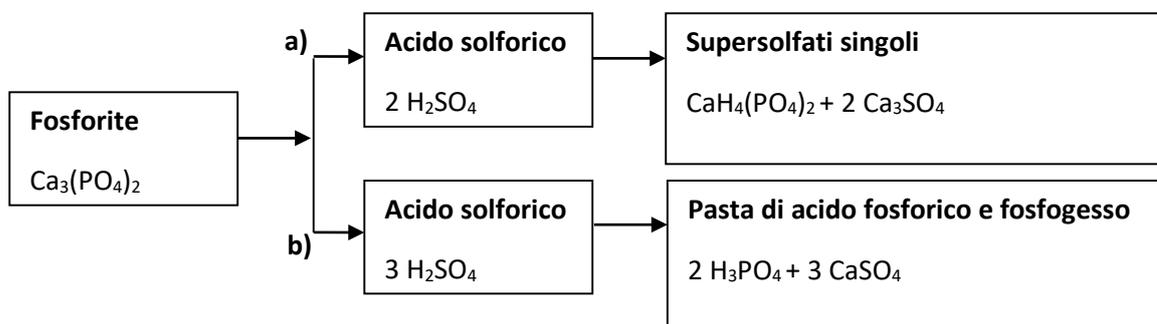
<sup>10</sup> <https://mineralseducationcoalition.org/mineralsdatabase/phosphate-rock/>.

vicino al sito di estrazione, vengono applicati diversi processi di raffinazione delle rocce fosfatiche, che possono subire o *processi umidi* (con acido solforico o più raramente acido cloridrico, nitrico, fluoridrico) o *processi di tipo termico*. Le perdite durante le fasi di raffinazione sono dell'ordine del 2% rispetto alla produzione iniziale di P, pari a circa 1 Milione di tonnellate P all'anno (Prud'homme, 2010; Scholz et al., 2014).

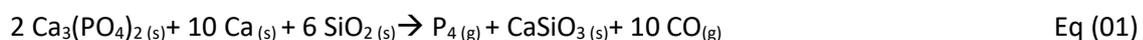
I diversi prodotti possono essere utilizzati tal quali oppure subire delle lavorazioni ulteriori per la preparazione di diversi tipi di fertilizzanti e prodotti industriali.

Nei **processi ad umido** il fosfato è estratto dal minerale tramite attacco acido diretto. Nella maggioranza dei casi viene utilizzata una soluzione di acido solforico concentrato (55 – 75%), trattamento finalizzato alla produzione di supersolfati, oppure acido fosforico. In Figura 8 sono schematizzate le due reazioni chimiche alla base del processo a umido, dalle quali è possibile ottenere supersolfati ( $P_2O_5$  tra 15 - 20%) (*reazione a*) e pasta di acido fosforico e solfato di calcio, detto fosfogesso (*reazione b*). Il gesso può essere separato per precipitazione dalla soluzione liquida. L'acido fosforico così ottenuto è abbastanza diluito (30%), e generalmente subisce una lavorazione ulteriore per ottenere concentrazioni maggiori o uguali al 50%. L'acido fosforico viene utilizzato principalmente per l'industria dei fertilizzanti; può infatti essere mescolato con le fosforiti macinate per produrre il supersolfato triplo ( $P_2O_5$  tra 40 - 45%), oppure alternativamente può essere combinato ad ammoniaca ( $NH_3$ ) per produrre fosfato di ammonio, che è il costituente base dei fertilizzanti misti.

Figura 8. I due tipi di reazioni chimiche alla base del processo ad umido con acido solforico  
Reazione a) con acido in quantità stechiometriche; Reazione b) con acido in eccesso.



I **processi termici** portano invece alla produzione di fosforo bianco ( $P_4$ ). I fosfati minerali vengono macinati, mescolati a silicati (sabbia), ossidi di ferro e carbone (o coke) e vengono fusi a  $1500^{\circ}C$  in fornaci elettriche o fornaci a combustibile.



Il fosforo così ottenuto è allo stato gassoso, quindi viene condensato e raccolto come liquido o solido e subito immerso in olio, per evitare reazioni in aria. Spesso il  $P_4$  ottenuto viene ossidato in torri di combustione e l'anidride fosforica viene disciolta in acqua ottenendo acido fosforico in soluzione ( $P_4O_{10}$ ), un acido molto puro, di ottima qualità commerciale, utilizzato nella produzione in primo luogo di fertilizzanti artificiali ma anche di ritardanti di fiamma, detergenti, composti organici, etc. L'ulteriore lavorazione e trattamento del fosforo bianco permette di produrre fosforo rosso, nero, oltre che composti come fosforo tricloruro, acidi, solfuri, sodio ipofosfito, fosfina, fosfuri.

Le attività di estrazione (18%), beneficiation (16%) e lavorazione (2%) delle rocce fosfatiche nel complesso determinano delle perdite di P nell'ordine del 33% (Villalba et al., 2008) fino al 37% (Prud'homme, 2010; Scholz et al., 2014). Il che significa che per una tonnellata di  $P_2O_5$  prodotto sono

necessarie circa 9,5 tonnellate di roccia fosfatica (30%  $P_2O_5$ ) (Villalba et al., 2008). Un ulteriore 10% di P può andare perduto durante il trasporto e la movimentazione (Lauriente, 2003).

L'estrazione e la lavorazione di rocce fosfatiche richiede inoltre ingenti impegni di risorse, quali suoli, acqua ed energia, e hanno elevati impatti ambientali, a causa sia della produzione di rifiuti sia delle attività di import/export che incrementano la carbon footprint<sup>11</sup>.

Le miniere a cielo aperto richiedono grandi estensioni di terreni. Infatti, oltre alla terra in cui si svolge l'attività estrattiva vera e propria, servono suoli su cui depositare il materiale di sterro e per i bacini di decantazione dell'argilla.

La quantità di rifiuti solidi totali prodotti può essere molto alta, ma varia sensibilmente da un impianto a un altro: secondo uno studio, per una tonnellata di  $P_2O_5$  prodotto si producono 21,8 tonnellate di rifiuti vari e 6,5 tonnellate di sterili (Villalba et al., 2008). Gli impianti di produzione di acido fosforico generano grandi quantità di un sottoprodotto denominato fosfogesso. In alcuni paesi il fosfogesso non viene riutilizzato nell'edilizia ma viene stoccato in grandi depositi a causa di normative riguardanti la radioattività o perché le alternative (gesso naturale e gesso da desolfurazione) sono più competitive. In alcuni paesi come il Brasile e la Cina, tuttavia, viene usato sempre più frequentemente nell'edilizia e in agricoltura.

L'attività estrattiva e la lavorazione della fosforite consumano grandi quantità d'acqua. Benché le miniere moderne possano riutilizzare fino al 95% dell'acqua prelevata, questo livello di efficienza non è diffuso. Esiste il rischio di sversamento o di percolazione di acque di lavorazione altamente acide, in particolare dai bacini di fosfogesso, con possibile contaminazione degli ecosistemi acquatici. Poiché i depositi di fosforite sono spesso ubicati in regioni carenti d'acqua, come ad esempio il Marocco, l'approvvigionamento idrico può costituire un significativo fattore limitante nello sviluppo dell'estrazione di fosforo.

Il processo estrattivo e di lavorazione di rocce fosfatiche è anche ad alta intensità di consumo di energia. Gli unici studi esaustivi sul consumo energetico nell'industria sono alquanto datati, ma riportano valori pari a 2,4 GJ di energia primaria richiesta per tonnellata come prodotto finale in termini di  $P_2O_5$  – un quantitativo che raddoppierebbe se si tenesse conto del trasporto in Europa (Kippenberger, 2001).

I recenti investimenti che hanno fatto seguito agli aumenti dei prezzi di produzione di acido fosforico e  $P_4$ , al depauperamento delle riserve e alla richiesta del mercato di prodotti di elevata qualità (soprattutto per quanto riguarda la decontaminazione) hanno tuttavia sensibilmente aumentato l'efficienza di alcune miniere. Numerose innovazioni tecnologiche vengono applicate o sono in corso di elaborazione per evitare sprechi di prodotti o sottoprodotti, fabbricare prodotti più puliti o risparmiare energia, acqua o sostanze chimiche.

---

<sup>11</sup> La carbon footprint (impronta di carbonio) è una misura che esprime il totale delle emissioni di gas ad effetto serra associate direttamente o indirettamente ad un prodotto, ad un servizio o ad un'organizzazione.

#### 2.1.4 Produzione mondiale di rocce fosfatice e fosforo bianco

Il quantitativo complessivo di fosforiti estratte dalle miniere mondiali è stato pari a circa 270 milioni di tonnellate nel 2017<sup>12</sup> (U.S. Geological Survey, 2019). L'estrazione di rocce fosfatice è in costante crescita (circa 5%/anno) e, su scala globale, nel 2017, il prelievo pro-capite di rocce fosfatice estratte risultava pari a circa 36 kg/persona. L'attuale produzione di fosforite è concentrata in un numero limitato di paesi, nessuno dei quali si trova nell'UE, eccezion fatta per la Finlandia che ne produce una piccola quantità.

In Tabella 6 sono riportati i maggiori paesi produttori, con Cina, Stati Uniti e Marocco leader tra i paesi produttori con rispettivamente il 53%, il 10% e il 11% della produzione globale nel 2017. Si osserva come tra i maggior produttori mondiali vi è la Cina, nonostante la maggior parte di rocce fosfatice sia localizzata in Marocco (Tabella 6). La Finlandia ha prodotto nel 2017 in media poco meno di 980Kt.

Tabella 6. Produzione di rocce fosfatice nel 2019

Paese	Produzione di roccia fosfatica (stima in kt di materiale)	%
Marocco e Sahara ovest	30.000	11,13%
Cina	144.000	53,43%
Algeria	1.300	0,48%
Siria	100	0,04%
Brasile	5.200	1,93%
Sud Africa	2.080	0,77%
Arabia Saudita	5.000	1,86%
Egitto	4.400	1,63%
Australia	3.000	1,11%
Stati Uniti	27.900	10,35%
Finlandia	980	0,36%
Giordania	8.690	3,22%
Russia	13.300	4,94%
Perù	3.040	1,13%
Kazakhstan	1.500	0,56%
Tunisia	4.420	1,64%
Uzbekistan	900	0,33%
Israele	3.850	1,43%
Senegal	1.390	0,52%
India	1.590	0,59%
Mexico	1.930	0,72%
Togo	825	0,31%
Vietnam	3.000	1,11%
Altri paesi	1.100	0,41%
<b>Totale Mondo</b>	<b>269.495</b>	<b>100,0%</b>

Fonte: U.S. Geological Survey (2019)<sup>13</sup>

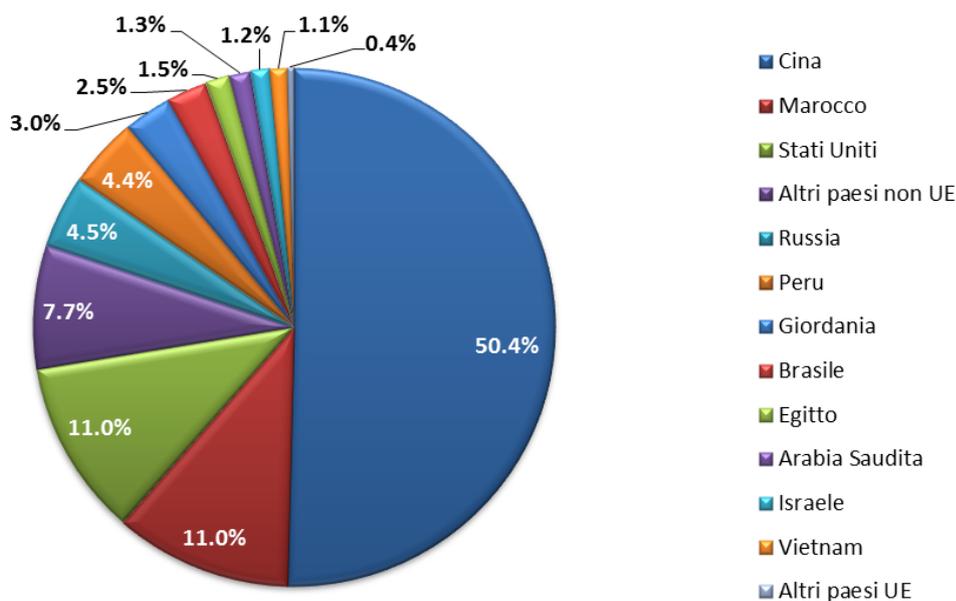
<sup>12</sup> Equivalenti a circa 81 milioni di tonnellate di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 35 milioni di tonnellate di P, considerando un contenuto medio di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> del 30%.

<sup>13</sup> <https://www.usgs.gov/centers/nmic/phosphate-rock-statistics-and-information>.

Si prevede che, in futuro, tale distribuzione possa subire modifiche, a causa della concentrazione di riserve conosciute in Marocco e del progressivo esaurimento delle riserve sfruttabili negli USA (Deloit et al 2017). Ad esempio, tra il 2004 e il 2012 la produzione globale di roccia fosfatica è aumentata a seguito di un aumento della produzione in Cina che ne ha quasi raddoppiando la produzione (BGS, 2016).

In Figura 9 sono riportate le distribuzioni delle produzioni medie di roccia fosfatica, così come riportate nel database delle statistiche minerarie mondiali BGS.

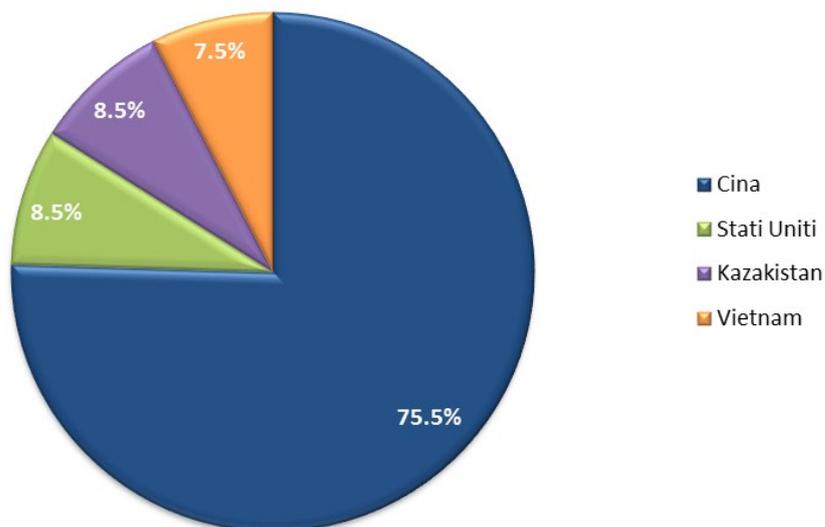
Figura 9. Produzione globale di roccia fosfatica, media periodo 2013 – 2017.



Fonte: Statistiche minerarie mondiali (BGS). Produzione 270,6 Mton/anno.

Per quanto riguarda invece il  $P_4$ , la produzione globale tra il 2010 e il 2014 è stata in media di 915.000 tonnellate (Deloitte 2017). Nell'ultimo decennio l'industria del  $P_4$  ha subito un rilevante spostamento dai paesi occidentali verso i paesi asiatici a causa delle innovazioni tecnologiche e dell'aumento dei costi dell'elettricità. Nel 2016 la Cina rappresentava circa il 75 – 80 % della produzione di  $P_4$  - nel 2012 era il 57% - seguita da Kazakistan, Stati Uniti, Vietnam e India (IHS Markit, 2017; Fertilizer International, 2018).

Figura 10. Produzione globale di  $P_4$ , periodo 2017



Fonte: CRUGROUP (2017)<sup>14</sup>

Circa il 54% del  $P_4$  prodotto viene consumato per la produzione di acido fosforico per via termica, che viene utilizzato per la formulazione dei detergenti, per additivi elementari, preparazione di reagenti chimici da utilizzare per il trattamento delle acque, per la preparazione di bevande e come materia prima per fosfati di calcio, potassio e sodio (Sarech & Yoneyama, 2002; IHS Markit, 2017). Il rimanente 46% è utilizzato nell'industria per la formulazione di produzione di tricloruro di fosforo, pentasolfuro e altri composti, utilizzati in erbicidi, insetticidi, ritardanti di fiamma, grassi per lubrificazione e plastificanti.

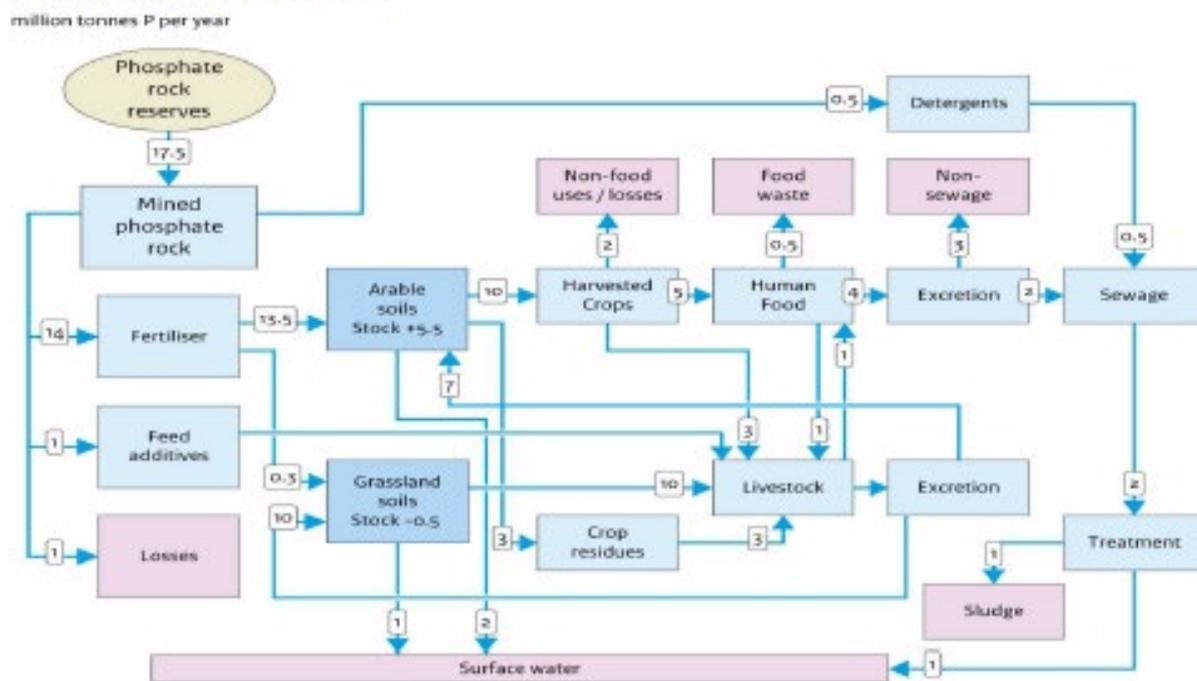
<sup>14</sup> [https://events.crugroup.com/phosphates/uploads/fertilizer-international-phosphatesconference-may\\_17.pdf](https://events.crugroup.com/phosphates/uploads/fertilizer-international-phosphatesconference-may_17.pdf).

## 2.2 Offerta secondaria di fosforo

L'analisi dei flussi e le ricerche condotte da differenti soggetti dimostrano l'esistenza di alcuni punti fondamentali nella catena di valore del fosforo in cui attualmente vanno perdute quantità considerevoli di fosforo. Oltre alle perdite nelle fasi di estrazione, beneficiation e lavorazione delle rocce fosfatiche, esistono infatti diversi flussi di origine antropica che derivano dall'utilizzo dei prodotti a base di fosforo e da cui è possibile recuperare fosforo (Materie Prime Seconde, MPS).

In Figura 11 è riportata una schematizzazione dei flussi di P a livello globale, identificando i principali usi e le maggiori perdite di P, dalla quale emergono le più principali perdite di P e le importanti fonti alternative di fosforo riciclato.

Figura 11. Flussi globali di P attraverso i sistemi agricoli, alimentari e fognari

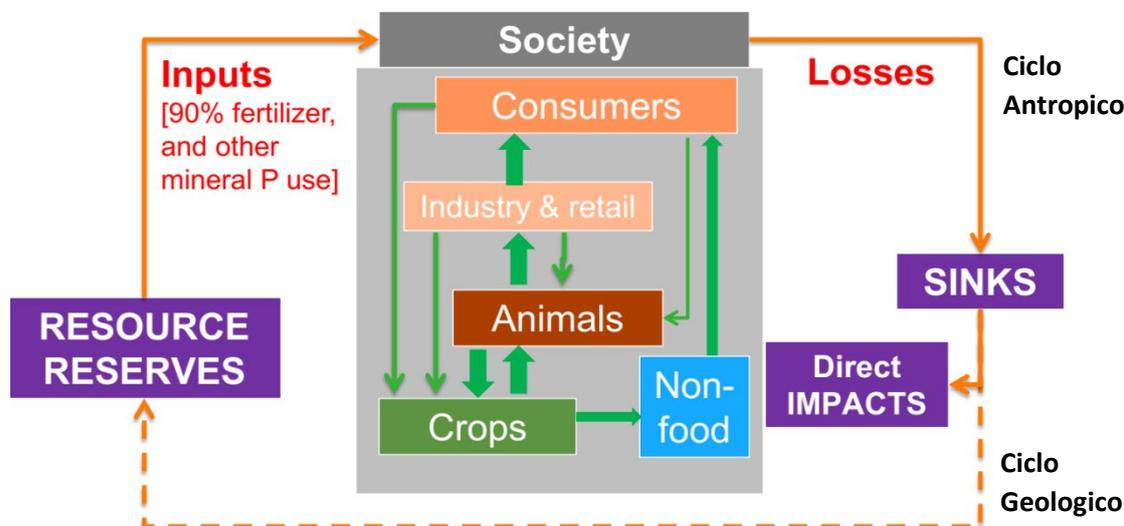


Fonte:

Recentemente, Van Dijk et al. 2016 hanno riportato l'analisi dei flussi di fosforo legata alla catena alimentare nel 2005 in Europa (EU 27) e per singolo stato, individuando un sistema (Figura 12) costituito da:

- una serie di processi antropici coinvolti nella catena di valore del P;
- flussi di P in ingresso per ogni processo (IMPORTS);
- flussi di P in uscita (EXPORT e PERDITE in ambiente) per ogni processo;
- una serie flussi di P che collegano i differenti processi.

Figura 12. Flussi di fosforo



Fonte: Van Dick et al. (2016)

I processi individuati da Van Dick et al 2016 sono:

- **Processo di produzione agricola**, che include IMPORT ed EXPORT di fertilizzanti minerali, pesticidi, semi per piante, colture e fiori, e PERDITE per il runoff ed erosione e per percolamento;
- **Processo di produzione animale**, che include IMPORT ed EXPORT di prodotti per l'alimentazione animale a base vegetale ed animale, animali vivi, additivi alimentari inorganici, effluenti zootecnici, e PERDITE per effluenti zootecnici non valorizzati, e scarti degli alimenti per animali;
- **Processo di trasformazione alimentare**, che include IMPORT ed EXPORT di colture e lavorati, prodotti di derivazione animale (es. latte, carne, pesce, uova, etc), prodotti della pesca, prodotti della foresta, additivi alimentari, e PERDITE per rifiuti dei macelli, rifiuti solidi e liquidi di lavorazioni alimentari, frazione di cibo non utilizzato;
- **Processo produzione industriale**, che include prodotti industriali a base vegetale (es tabacco, cotone, etc) e animale (es. lana), prodotti forestali (es. carta), materia prima per la formulazione di detersivi, e PERDITE per nutrienti presenti nelle ceneri di biomasse incenerite, nei rifiuti dell'industria del legno e della carta;
- **Processo di consumo umano**, che include PERDITE di P nei rifiuti prodotti dall'uomo, quali acque reflue, rifiuti solidi organici, salme, rifiuti solidi quali carta, imballaggi, rifiuti del cibo animale domestico, deiezioni degli animali domestici, carcasse di animali domestici.

Dall'analisi condotta da Van Dijk et al. 2016 si può estrapolare un bilancio generale europeo ed italiano del fosforo riferito all'anno 2005, così come mostrato in Figura 13 e Figura 14.





Con particolare riferimento alle perdite di P dal sistema, in Tabella 7 si riportano i quantitativi di P considerato perso da ogni singolo processo nel 2005 (Van Dick et al 2016), mettendo a confronto lo scenario italiano con quello europeo. Dall'analisi si evince che sia a livello europeo che italiano, i principali flussi da cui è possibile recuperare il fosforo provengono dai processi di trasformazione alimentare e del consumo umano.

Tabella 7. Quantitativi di P perso per processo in Europa e in Italia

PROCESSO	EUROPA		ITALIA	
	Quantità di P perso (kton/anno)	% P perso	Quantità di P perso (kton/anno)	% P perso
Produzione agricola	84,5	7%	17,4	14%
Produzione animale	61,942	5%	6,3	5%
Produzione industriale	76,8	6%	2,589	2%
<b>Trasformazione alimentare</b>	<b>338</b>	<b>28%</b>	<b>23,447</b>	<b>18%</b>
<b>Consumo Umano</b>	<b>653,2</b>	<b>54%</b>	<b>78,38</b>	<b>61%</b>
TOTALE PERDITE	1214,442	100%	128,116	100%

Fonte: Elaborazione dati ENEA su dati Van Dijk et al. (2016)

In Tabella 8 è riportato il dettaglio delle perdite dei processi di trasformazione alimentare e del consumo umano così come individuate dal bilancio di Van Dijk et al. (2016). Dalla tabella si evince che i flussi maggiori di perdite di P che potrebbero essere sin da subito utilizzati come MPS sono costituite dai rifiuti dei macelli, scarti alimentari oltre che fanghi di depurazione, caratterizzati da elevate concentrazioni di P. A questi si aggiungono gli effluenti zootecnici che vengono già ad oggi utilizzati per fini agronomici, pari a 1.748 kton P/anno a livello europeo e a 135 kton P/anno a livello italiano (Van Dick et al 2016).

Tabella 8. Quantitativi di P perso dai principali flussi in Europa e in Italia

PROCESSO	Tipologia perdita	EUROPA		ITALIA	
		Quantità di P perso (kton/anno)	% P perso all'interno del singolo processo	Quantità di P perso (kton/anno)	% P perso all'interno del singolo processo
Trasformazione alimentare	<b>Rifiuti macelli</b>	<b>293</b>	<b>86,7%</b>	<b>21,5</b>	<b>91,7%</b>
	Rifiuti solidi dei processi alimentari	35,9	10,6%	1,7	7,3%
	Rifiuti liquidi dei processi alimentari	9,1	2,7%	0,247	1,1%
Consumo umano	<b>Fanghi di depurazione</b>	<b>226</b>	<b>34,6%</b>	<b>40,5</b>	<b>51,7%</b>
	Effluente impianti di depurazione	37,5	5,7%	2,7	3,4%
	Acque reflue centralizzate non trattate	16,1	2,5%		
	Impianti di depurazione decentralizzati	35,7	5,5%		
	Acque reflue decentralizzate non trattate	10,6	1,6%		
	Acque reflue non collettate	31,8	4,9%	3,5	4,5%
	Compost non adatto all'agricoltura	9,4	1,4%	1,1	1,4%
	Decessi umani	3,5	0,5%	0,37	0,5%
	Scarti di cartiera	20,9	3,2%	1,3	1,7%
	Scarti lignei	8,7	1,3%	0,5	0,6%
	<b>Scarti alimentari (Industriali ed urbani)</b>	<b>175,4</b>	<b>26,9%</b>	<b>20,5</b>	<b>26,2%</b>
	Scarti di cibo per animali domestici	7,3	1,1%	0,7	0,9%
	Deiezioni animali domestici	69,2	10,6%	7,1	9,1%
Decessi animali domestici	1,1	0,2%	0,11	0,1%	

Fonte: Elaborazione dati ENEA su dati Van Dick et al. (2016)

Lo stesso Van Dijk et al 2016, nella sua analisi considera anche il recupero di P da alcuni flussi. In Tabella 9 è riportato il potenziale europeo ed italiano di recupero del fosforo da alcune fonti di fosforo secondario.

In entrambi i casi è possibile osservare che il recupero dei soli rifiuti organici (quali fanghi di depurazione, scarti alimentari ed effluenti zootecnici) consentirebbe di sostituire l'uso di fertilizzanti minerali (input primario), che ammonta rispettivamente a circa 1389 kton/anno e 127 kton/anno per l'Europa e l'Italia. A tale considerazione va, tuttavia, affiancata un'osservazione importante sulla verifica del corretto valore fertilizzante del fosforo recuperato, nonché sull'accertamento di inquinamento di origine secondaria derivante dall'utilizzo dello stesso. È possibile inoltre osservare che l'Italia registra percentuali inferiori di recupero di P da fanghi di depurazione e rifiuti solidi biodegradabili rispetto alla media europea, mentre è in linea quel che concerne il recupero di P da rifiuti di macelli. Ad oggi, sia a livello europeo che italiano, i rifiuti da macelli rappresentano il comparto che presenta ampi margini di sviluppo e recupero.

Tabella 9. Quantitativi di P da offerta secondaria (kton/anno) a livello europeo ed italiano

Principale fonte di fosforo secondaria	EUROPA			ITALIA		
	Totale	Recuperato	Potenziale	Totale	Recuperato	Potenziale
Fanghi depurazione	373	147 <sup>1</sup>	226	49,2	8,7 <sup>1</sup>	40,5
Rifiuti solidi biodegradabili	189,9	14,5 <sup>1</sup>	175,4	21,6	1,1 <sup>1</sup>	20,5
Rifiuti macelli	310,7	17,7 <sup>2</sup>	293	23,5	2 <sup>2</sup>	21,5
Effluenti zootecnici <sup>1</sup>		1748			135	

<sup>1</sup> applicato in agricoltura; <sup>2</sup> per produzione mangimi e fertilizzanti

Fonte: Elaborazione dati ENEA su dati Van Dijk et al. (2016)

Lo studio di Van Dijk et al. (2016) evidenzia inoltre altri flussi provenienti dal consumo umano che potrebbero essere considerati in futuro come MPS per il recupero del fosforo, come ad esempio i rifiuti lignei e gli scarti di cartiera (caratterizzati da minori quantitativi di P, nell'ordine di 0.2 - 0.3 gP/kg ST), piuttosto che gli escrementi degli animali domestici, le salme umane e degli animali domestici (Tabella 6).

Negli ultimi anni la possibilità di recuperare fosforo da materie prime seconde ha attirato l'attenzione in modo significativo sia nel mondo della ricerca sia nel mondo industriale ed istituzionale, in quanto il recupero di P consente di ridurre l'estrazione di P da fonti primarie e al contempo offre l'opportunità di contenere l'impatto ambientale.

Tuttavia, ad oggi, seppur sia praticata da circa 30 anni l'attività di valorizzazione agricola dei fanghi di depurazione ed effluenti zootecnici, e nonostante esistano diverse tecniche che consentirebbero di recuperare il fosforo da diversi nodi della catena di valore del fosforo, vi sono ancora pochi esempi di recupero su scala commerciale differenti dall'applicazione diretta di rifiuti organici in agricoltura e comunque in settori differenti da quello agricolo (Li et al., 2019). Si sottolinea che esistono processi per produrre direttamente fosforo bianco, P<sub>4</sub>, da flussi di rifiuti ricchi di fosforo (ad es. *Processo ICL Recophos* per produrre P<sub>4</sub> da ceneri provenienti da incenerimento di fanghi di depurazione), ma tali processi sono disponibili solo su scala pilota e non vi è alcuna installazione industriale (Thornton, 2016). Quando i prezzi della fosforite e dei suoi derivati hanno raggiunto l'apice nel 2008, alcune fonti alternative di fosforo riciclato sono divenute economicamente interessanti.

Al di là delle questioni legate ai costi, il principale vantaggio connesso all'uso del fosforo riciclato sta nella resilienza – ossia nei flussi continui, forniti localmente, e senza la volatilità dei prezzi della fosforite. Il recupero del fosforo quale strategia regionale e globale verso la sostenibilità è oggi ancora agli inizi a causa di una serie di aspetti tecnologici, socioeconomici e vincoli istituzionali e normativi. La risoluzione di questi vincoli richiede una stretta collaborazione tra gli stakeholder e l'utilizzo di un approccio integrato (Sarvajayakesavalu et al., 2018).

### 2.2.1 Le matrici per il recupero di fosforo

Come illustrato nel paragrafo precedente, i maggiori quantitativi di fosforo secondario possono essere potenzialmente recuperati dagli attuali flussi di produzione e consumo (RISE Foundation, 2016; Van Dijk *et al.*, 2016; Leip *et al.*, 2015).

A prescindere dalla qualifica di rifiuto o sottoprodotto<sup>15</sup>, le matrici che ad oggi risultano essere le più comuni e promettenti per il recupero di P sono (RISE Foundation, 2016):

- Fanghi di depurazione e ceneri
- Frazione Organica del Rifiuto Solido Urbano (FORSU)
- Effluenti zootecnici e digestati agroindustriali
- Scarti di macello
- Batterie

*Fanghi di depurazione e ceneri.* Secondo la direttiva 86/278/CE si definiscono ‘fanghi’: (i) i fanghi residui di impianti di depurazione che trattano acque reflue domestiche o urbane e quelli di altri impianti di depurazione acque reflue con composizione simile alle acque reflue domestiche e urbane; (ii) i fanghi residui provenienti da fosse settiche e altre installazioni simili per il trattamento delle acque reflue; (iii) i fanghi residui di impianti fognari diversi da quelli indicati in (i) e (ii). I fanghi di depurazione rappresentano un substrato organico relativamente ricco di sostanze nutritive e oligoelementi. La loro composizione varia a livello regionale e stagionale. In EU27 è stimato che i fanghi di depurazione siano caratterizzati da un contenuto di P variabile tra 1.6 - 5.5 % su base secca (Metcalf & EDDY). Considerando la produzione europea di fanghi di depurazione, è stato stimato un recupero potenziale di circa 230 kton di P/anno (Leip *et al.*, 2014, Sutton *et al.*, 2011; van Dijk *et al.*, 2016).

La concentrazione di P nelle ceneri provenienti da incenerimento dei fanghi di depurazione raggiunge valori compresi tra 50 e 100 g / kg (base secca) (Egle *et al.*, 2015).

*Frazione Organica del Rifiuto Solido Urbano (FORSU).* L'UE27 genera in media 88 Mt/anno di rifiuti biodegradabili da rifiuti solidi urbani, ossia circa 177 kg/capite/anno (Saveyn and Eder, 2014).

La frazione biodegradabile (FORSU) rappresenta in media il 37% dei rifiuti solidi urbani, anche se tale percentuale varia ampiamente tra i Paesi dell'UE (19 - 60%) (Commissione Europea, 2010). La maggior parte dei rifiuti è prodotta a livello domestico (43%) e nella produzione alimentare (38%), mentre la ristorazione (14%) e la vendita al dettaglio (5%) sono responsabili della produzione di quantità minori (Monier, 2010). La concentrazione di fosforo in tale frazione biodegradabile è compresa nel range 1.7 – 4.2 gP / kg (base secca) (Campuzano e González-Martínez, 2016) considerando il contenuto secco di tale frazione (25%), si stima che gli 88 Mt di rifiuti biodegradabili contengano circa 40 - 110 kton di P / anno.

*Effluenti zootecnici e digestati agroindustriali.* Il settore zootecnico in EU27 ha un'importanza considerevole. È stato stimato che la produzione di letame (liquido e solido) sia pari a circa 1400 Mt/anno (Foged *et al.*, 2011); in particolare, 600 Mt sono nella forma di letame liquido da suini e bovini, circa 300 Mt sono costituiti da letame di bestiame solido, mentre il resto viene prodotto da altri gruppi di bestiame (de Vries *et al.*, 2015). Tale matrice contiene elevate quantità di nutrienti, presenti tuttavia in forma estremamente diluita. I reflui zootecnici presentano una composizione estremamente variabile, non solo in funzione della specie animale che li origina (bovina, suina, avicola), ma anche in

---

<sup>15</sup> Per la distinzione fra rifiuto e sottoprodotto si vedano 2008/98/CE e l'articolo 183 del D.Lgs 152/2006 e si rimanda alla report “normativa” per ulteriori approfondimenti.

funzione delle modalità di allevamento e di gestione del refluo nel suo complesso. Il contenuto di P negli effluenti zootecnici è compreso tra 1 -3 % su base secca (STRUBIAS, final report, 2019). Ad esempio, nei liquami prodotti da bovini da latte il contenuto di P totale risulta essere pari a 1,0-1,6 kg/ton tq mentre nei suini esso è pari a 0,5-2,0 kg/ton tq (Bordoni *et al.*, 2010). Il letame di maiale fresco contiene lo 0,4% di  $P_2O_5$ , mentre il letame di maiale secco ha il 5% di  $P_2O_5$ ; dopo l'incenerimento la cenere ne contiene il 18,8% (DONUTS, 2016). Per i rifiuti di pollame, questi numeri sono rispettivamente pari a 1,9%  $P_2O_5$  nel caso di rifiuto fresco, 3,9% nel caso di rifiuto secco e 15,3% nelle ceneri. Negli impianti di biogas agricoli le matrici organiche impiegate per la produzione di biogas sono: effluenti zootecnici, sottoprodotti vegetali, sottoprodotti di origine animale, colture dedicate e residui colturali (Rossi *et al.*, 2017). Il digestato rispetto alle biomasse di partenza si presenta omogeneo, con un tenore di umidità più elevato (perché parte della sostanza secca è stata degradata biologicamente). La sostanza organica residua risulta quindi più stabile e contiene nutrienti quali azoto, fosforo e potassio.

**Scarti di macello.** Il settore della macellazione delle carni genera una quantità e una gamma rilevante di residui e sottoprodotti potenzialmente valorizzabili; essi rappresentano circa il 20 - 50% del peso vivo dell'animale di partenza (considerando la resa al macello che in media varia tra il 50 e l'80% a seconda della tipologia di animale, razza e età). Nella filiera della trasformazione della carne sono presenti ulteriori scarti di lavorazione che rappresentano circa il 10 - 20% del peso vivo dell'animale: grassi, ossa e vari parti del corpo, separate dalle carcasse nei vari segmenti di tale filiera (disossatura, macellerie, salumifici etc.). Recenti studi indicano concentrazioni di P nella carne di 1.09 %P in peso e nelle ossa di 8.73 – 10.9 %P in peso, rispettivamente (Cordell *et al.*, 2011) La massa di residui disponibili a livello nazionale sia dell'ordine di 1,7 milioni di tonnellate ai macelli con un peso morto commercializzato pari a 3,5 milioni di tonnellate (Colonna *et al.*, 2009).

**Batterie.** Le batterie a ioni di litio (LIBs) sono oggi ampiamente utilizzate per la produzione di veicoli elettrici e dispositivi elettronici e nei sistemi di accumulo, grazie ad una serie di caratteristiche quali elevata densità energetica e vita utile (Ordoñez *et al.*, 2016). Tra le diverse tipologie di LIBs, di largo impiego sono le batterie a catodo di litio-ferro fosfato,  $LiFePO_4$  (LFP), utilizzate in veicoli elettrici e grossi sistemi di accumulo di energia grazie ad una serie di caratteristiche tra cui costi contenuti, ridotta tossicità ed elevata capacità teorica (Kretschmer *et al.*, 2016; Gören *et al.*, 2016). Il contenuto di P nel materiale catodico delle LFP è pari al 16 - 20 % in peso (base secca) (Li *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2017). Il materiale catodico è pari a sua volta al 14,50 % in peso della batteria (La Marca *et al.*, 2014). Tenuto conto di tali dati, si può assumere un quantitativo di P, rispetto all'intera batteria, pari al 2,6%. Si fa inoltre presente che l'elettrolita contenuto nelle LIBs è generalmente costituito da un sale di litio disciolto in un solvente organico (Lebedeva *et al.*, 2016) . In particolare, l'elettrolita maggiormente utilizzato è basato sul sale  $LiPF_6$ . La quantità di P rispetto alla cella è modesta (0,3-0,4% in peso), tuttavia il  $LiPF_6$  è presente sostanzialmente in tutte le LIBs presenti oggi sul mercato.

Altre potenziali matrici secondarie per il recupero del P sono rappresentate da acque reflue, scarti di lavorazione della filiera ittica, verde pubblico, compost, ceneri di legna da ardere, rifiuti delle cartiere, fosfogesso, scarti di lavorazione presenti nei SIN (Taranto, Crotone, Gela), guano, escrementi degli animali domestici, scarti agricoli, scarti alimentari diversi dai macelli.

Un'importante risorsa secondaria potenziale è rappresentata, in particolare, dagli scarti ittici prodotti dalle aziende di lavorazioni industriali della pesca. Da uno studio condotto dall'Azienda Sanitaria Provinciale di Mazara del Vallo è emerso, ad esempio, che la quantità di scarti prodotti è pari a circa

2.500 t/anno nel comprensorio di Mazara del Vallo e Marsala, e di circa 4.000 t/anno nel solo territorio di Sciacca (Osservatorio della Pesca del Mediterraneo, 2014).

Per quanto riguarda il compost, la sua composizione è variabile a seconda della matrice iniziale, tuttavia in media esso contiene 0,5%  $P_2O_5$  (Paul *et al.*, 2019).

Gli scarti alimentari contengono generalmente il 18,8% di  $P_2O_5$ , mentre i rifiuti da attività di giardinaggio presentano un quantitativo molto più basso, dato l'elevato contenuto di cellulosa e acqua.

Il fosfogesso è un sottoprodotto derivante dal processo di produzione dell'acido fosforico. Ogni anno vengono prodotte a livello globale 280 Mt di fosfogesso (Lopez *et al.*, 2009). Esso presenta un quantitativo modesto di  $P_2O_5$ , pari a 0,8-1,56 wt% (base secca) (Hanna *et al.*, 1999; El-Didamony *et al.*, 2013; India Environment Portal, 2012). Il contenuto di P è dunque pari a 0,34-0,67 wt% (base secca).

### 2.2.2 Tecnologie di trattamento

In questo paragrafo si riportano le tecnologie di recupero del fosforo dalle diverse matrici (fanghi, acque reflue e ceneri dei fanghi). Per quanto riguarda i rifiuti solidi occorre fare un distinguo preventivo tra fanghi recuperabili in agricoltura e fanghi non destinabili a tale forma di recupero. Per i fanghi aventi caratteristiche idonee al riutilizzo agricolo, trattamenti quali il condizionamento biologico e/o chimico (stabilizzazione ed igienizzazione), la digestione anaerobica e/o aerobica, la stabilizzazione aerobica tramite produzione di ammendante compostato, la produzione di gessi di defecazione da fanghi e carbonati di defecazione sono ormai storicamente adottati. Per quanto riguarda invece tutti quei rifiuti non idonei al recupero agricolo, trattamenti quali precipitazione della struvite e acidificazione rientrano nelle pratiche comuni.

Varie tecnologie sono state introdotte per recuperare il fosforo da rifiuti liquidi, quali precipitazione chimica, trattamenti biologici e cristallizzazione. Tra le tecnologie di recupero del fosforo dalle ceneri dei fanghi vi sono, infine, trattamenti termici a secco e processi termomeccanici (Morse *et al.* 1998; Desmidt *et al.* 2015).

I rifiuti solidi a valle dei processi di trattamento sopradescritti per il successivo recupero agricolo dei fanghi biologici di depurazione, nonché i prodotti ex D.Lgs. 75/2010 e s.m.i. dagli stessi derivanti (ammendanti compostati, gessi di defecazione da fanghi e carbonati di defecazione), sono ricchi di fosforo e di altri nutrienti che vengono da tempo utilizzati come fertilizzanti.

La cristallizzazione della struvite è un processo di recupero del fosforo dalle acque reflue che ha il vantaggio di ridurre il consumo di risorse primarie e l'eutrofizzazione (Kataki *et al.*, 2016). L'effetto fertilizzante della struvite varia a seconda del tipo di terreno; in particolare la struvite ha efficacia in terreni con pH acido o moderatamente acido nel quale viene resa solubile dal terreno stesso, mentre la sua efficacia è pressoché nulla in suoli con pH non acidi.

Nei processi di biomineralizzazione il fosforo viene recuperato sotto forma di struvite o idrossiapatite. Il fosfato biomineralizzato mostra un potenziale di riciclo più elevato e minori aggiunte di reattivi chimici (Soares *et al.*, 2013); inoltre consente una composizione dell'input più flessibile (ad esempio concentrazioni di P in ingresso inferiori a 10 mg/L). Il recupero del fosforo è stato testato mediante l'utilizzo di *Myxococcus xanthus*, *Bacillus pumilus*, *Halobacterium salinarum* e *Brevibacterium antiquum* (Li *et al.*, 2017).

L'incenerimento seguito da estrazione chimica produce fosfato di calcio come sottoprodotto. L'estrazione di P è stata studiata, in particolare, mediante HCl,  $HNO_3$ ,  $H_2SO_4$ , acido citrico ed acido

ossalico. Il processo viene generalmente portato a termine in 100 minuti. Gli elementi solubilizzati, oltre al fosforo, risultano essere K, Ca, Mg e S.

La gassificazione è un'altra tecnologia per il recupero del fosforo. Tipicamente il fosfato grezzo o la cenere vengono immessi in un forno ad arco elettrico a temperature oltre il punto di fusione della cenere. Il fosforo è ridotto a gas  $P_4$  insieme a biossido di carbonio e polvere. A valle del trattamento fumi, il fosforo viene condensato e conservato in un bagno d'acqua con una purezza superiore al 99,9% (Tervahauta *et al.*, 2014).

In Tabella 10 sono evidenziati vantaggi e svantaggi di alcune tecnologie ed i potenziali elementi che potrebbero ostacolare la loro applicazione, mentre in Tabella 11 è riportato TRL raggiunto.

Tabella 10. Overview degli attuali processi e tecnologie di recupero del fosforo che possono influenzare il mercato (adattamento da Li *et al.*, 2019)

Processo	Vantaggi	Svantaggi	Tecnologia	Prodotto	Fonte	Ref.
Fanghi biologici condizionati	Costi contenuti Recupero sul sito	Impatto olfattivo	Biologico/Chimico/Fisico	R	SS	EFAR/FISE
Compostaggio	Costi contenuti	Tempo di stabilizzazione elevato	Compostaggio tradizionale	A	OW	Cieslik and Konieczka, 2017
	Recupero sul sito	Contaminazione	Vermicomposting	A	OW	Cieslik and Konieczka, 2017
Gessi di defecazione	Costi contenuti	Impatto olfattivo	Trattamento con calcio ossido e acido solforico	F	SS	EFAR/FISE
	Recupero sul sito					
Carbonati di defecazione	Costi contenuti		Trattamento con calcio ossido e CO <sub>2</sub>	F	SS	EFAR/FISE
	Recupero sul sito					
Cristallizzazione della struvite	Fertilizzante a rilascio lento	Aumento CAPEX	AirPrex®	B	DSL	Kataki <i>et al.</i> , 2016
	Volume dei fanghi ridotto	Vantaggi enomomici non chiari	NuResys®	B	DS	Schoumans <i>et al.</i> , 2015
	Carico di nutrienti ridotto		Ostara®	B	DS	Cieslik and Konieczka, 2017
			Phospaq®	B	DS	Egle <i>et al.</i> , 2015
			STRUVIA	B	DS	Egle <i>et al.</i> , 2015
			Anphos	B	DS	Picavet, 2013
Biominerizzazione	Contenuto di Mg richiesto ridotto	Tempi di stabilizzazione elevati	-	B	Urine	Simoes <i>et al.</i> , 2018
Incenerimento	Elevata efficienza	CAPEX elevati	-	C	SS	Cieslik and Konieczka, 2017
	Volumi di rifiuto ridotti	Costi energetici elevati	-	C	SS	Egle <i>et al.</i> , 2015
Fosfato di calcio	Costi ridotti	Applicazioni limitate	Filter substrate	D	SA	Loganathan <i>et al.</i> , 2014
	Agevole implementazione		RecoPhos®	D	SA	Arnout and Nagels, 2016
	Recupero sul sito		LOTUS	D	SA	Egle <i>et al.</i> , 2015
Gassificazione	Elevata efficienza	CAPEX elevati	Thermphos®	E	SA	Ribarova <i>et al.</i> , 2017
	Produce P <sub>4</sub> puro	Costi energetici elevati	InduCarb®	E	SA	Arnout and Nagels, 2016

\* A: Biomassa compostata, B: Struvite, C: Ceneri, D: Calcio P, E: P elementare, R: Rifiuto, F: Fertilizzante organico. OW: Rifiuto organico, DSL: Fango digestato, DS: Surnatante del processo di digestione, SS: Fanghi di depurazione, SA: Ceneri dei fanghi.

Tabella 11. TRL delle diverse tecnologie di recupero del fosforo

	TRL range	TRL score	Commenti
Fanghi condizionati, compostaggio, gessi di defecazione, carbonati di defecazione	7-9	9	know-how tecnologico eccellente e numero di applicazioni considerevole
Cristallizzazione della struvite	7-9	9	know-how tecnologico sufficiente, ma elevato numero di applicazioni industriali
Biomineralizzazione	1-3	1	è presente qualche studio sui meccanismi di reazione
Incenerimento	4-6	6	è presente qualche impianto pilota, know-how tecnologico buono
Fosfato di calcio	1-3	3	principio dimostrato con test pilota
Gassificazione	4-6	5	principio dimostrato e know-how tecnologico buono

Fonte: Adattamento da Li et al. (2019)

Il fosforo può essere recuperato mediante trattamenti innovativi di tipo fisico, chimico e biologico da una vasta gamma di fonti (Morse *et al.* 1998; Cornel e Schaum 2009; Autista, Lijmbach e Steen 1999; de-Bashan e Bashan 2004; Rittmann *et al.* 2011; Mayer *et al.* 2013; Batstone *et al.* 2014; Zhou *et al.* 2016). Esistono molte implementazioni a scala industriale di processi di recupero del fosforo in Europa, Nord America e Asia (soprattutto Giappone) che sono ad uno stadio iniziale. Le informazioni disponibili mostrano, ad esempio, che i costi OPEX<sup>16</sup> per il processo NuReSys per il trattamento di acque reflue ammontano a 1.6 € / kg P, mentre i costi CAPEX a 4.4 € / kg P. Ciò dimostra chiaramente che mentre il recupero è tecnicamente possibile, la fattibilità economica è molto più limitata (Balmer, 2004; Desmidt *et al.*, 2015).

Nonostante un gran numero di tecnologie siano disponibili in laboratorio e a scala pilota, esse hanno richiesto un significativo impegno finanziario per la loro commercializzazione (James, 2017). Attualmente le uniche tecnologie convalidate ed implementate a scala industriale, con costi per ricerca e sviluppo per future applicazioni molto minori, sono quelle relative ai trattamenti previsti per il recupero agricolo dei fanghi biologici (fanghi condizionati, compost, gessi di defecazione e carbonati di defecazione) nonché la cristallizzazione della struvite (Tabella 11).

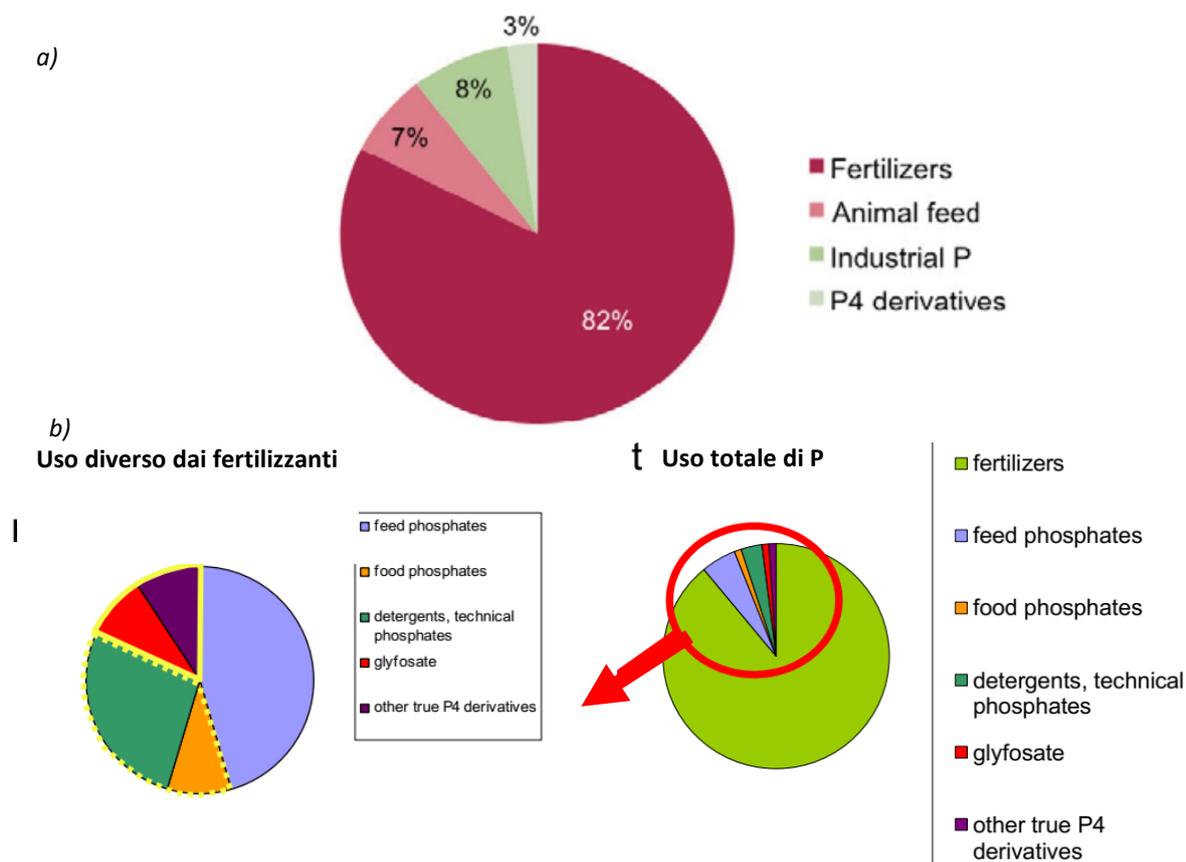
Fosfato di calcio, gassificazione e incenerimento sono tecnologie ben comprese e in grado di essere implementate. I meccanismi di reazione ed i fattori influenti la biomineralizzazione non sono stati ancora ben compresi; la mancanza di tecnologie mature ed i costi per la loro implementazione rappresentano dunque un ostacolo ad una commercializzazione diffusa.

<sup>16</sup> La spesa operativa od Opex (dal termine inglese Operating Expense) è il costo necessario per gestire un prodotto, business o sistema. La sua controparte, la spesa di capitale o Capex (Capital Expenditure), è il costo per sviluppare o fornire asset durevoli per il prodotto o il Sistema (Fonte: Il Sole 24Ore).

### 3 La domanda di fosforo

Come visto nel Capitolo 1, la catena del valore del fosforo ha origine dalle rocce fosfatiche che vengono utilizzate prevalentemente nella filiera agroalimentare, per la produzione di fertilizzanti (82%), mangimi animali (7%), per prodotti per la produzione alimentare (2%), oltre che per la produzione di detersivi e fosfati tecnici (4%), pesticidi (glifosato, 1%) e prodotti derivati da P<sub>4</sub> (2%) (Figura 15).

Figura 15. Usi globali del fosforo estratto



Fonte: a) Prud'homme (2010); b) Willem Schipper<sup>17</sup>

Più nel dettaglio, la roccia fosfatica viene utilizzata prevalentemente per la produzione, *mediante processi ad umido*, di **acido fosforico** utilizzato per lo più per la produzione di fertilizzanti da utilizzare in agricoltura, per la produzione di mangimi per animali e altri prodotti industriali come ad esempio ritardanti di fiamma e sostanze ignifughe, additivi alimentari (coloranti, conservanti, emulsionanti, ecc.), detersivi, cemento, porcellane, fosfati tecnici per la lavorazione della carne, delle patate, del pesce, oltre a tensioattivi, antischiuma, etc.

Una minima parte di roccia fosfatica viene inoltre utilizzata per ottenere, attraverso processi termici, **fosforo elementare** (Geeson & Cummins, 2018), utilizzato come intermediario per la sintesi di prodotti chimici contenenti fosforo quali ad esempio prodotti chimici per l'agricoltura (es. erbicidi), materiali antincendio (es. ritardanti di fiamma), catalizzatori, elettroliti per le batterie, prodotti farmaceutici,

<sup>17</sup>

<https://phosphorusplatform.eu/images/download/ESPP%20conference%20Phosphorus%20stewardship/Schipper-ESPP-1-12-16.pdf>

lubrificanti, additivi polimerici, precursori per la fabbricazione di leghe di fosforo che trovano impiego nella metallurgia, ma anche come base per produrre “acido fosforico puro” e suoi derivati che entrano nella preparazione di alimenti e nella formulazione di detersivi.

Tuttavia, poiché gli utilizzi industriali del fosforo sono variegati, la domanda di fosforo dipende dall’andamento del mercato dei prodotti per cui viene impiegato. Nella trattazione che segue si illustrano le principali applicazioni di fosforo con i relativi consumi e l’andamento dei prezzi.

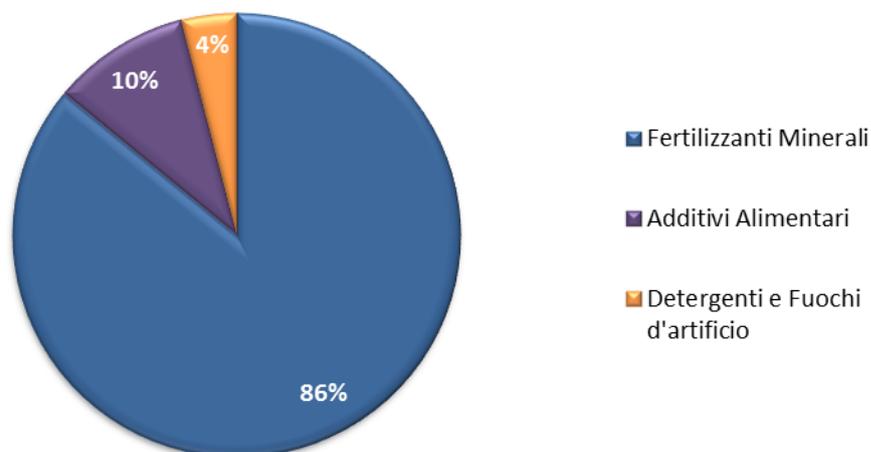
### 3.1 Applicazioni

In questa sezione vengono analizzate più nel dettaglio le differenti applicazioni e i consumi europei del fosforo, facendo una distinzione tra il fosforo derivante dalla lavorazione della roccia fosfatica mediante trattamenti ad umido e il fosforo elementare (P<sub>4</sub>) ottenuto dai trattamenti termici della roccia fosfatica.

#### 3.1.1 Usi finali del fosforo derivante dalla lavorazione della roccia fosfatica mediante trattamenti ad umido

Per quel che concerne i consumi del fosforo derivante dalla lavorazione della roccia fosfatica mediante trattamenti ad umido, in Europa si attestano a circa 7.3 milioni di tonnellate/anno. Il fosforo così ottenuto è utilizzato per circa l’86% per la produzione di fertilizzanti, il 10% per la produzione alimentare e il 4 % per ritardanti di fiamma e detersivi (Deloitte 2017).

Figura 16. Usi finali del fosforo derivante dalla lavorazione della roccia fosfatica mediante trattamenti ad umido. Media 2010-2014



Fonte: Deloitte (2017)

La maggior parte del fosforo è utilizzato a livello globale come fertilizzante per le colture, solitamente associato agli altri due principali nutrienti, l’azoto e il potassio, ma anche con altri elementi quali ad esempio lo zolfo, il manganese, il calcio o il rame.

##### 3.1.1.1 Focus fertilizzanti

Di seguito si riporta un focus sui fertilizzanti, ripreso nei successivi paragrafi in termini di consumi e di prezzo, vista l’importanza di questo tipo di applicazione nel mercato del fosforo.

A questa categoria appartengono tutte quelle sostanze che apportano vantaggi al terreno per la coltivazione delle piante. In essa possiamo distinguere tre categorie di prodotti:

- **Concimi:** sostanze la cui funzione principale è fornire elementi nutritivi alle piante;
- **Ammendanti:** sostanze la cui funzione principale è di migliorare la struttura del terreno;
- **Correttivi:** sostanze la cui funzione principale è di modificare il pH del terreno.

I concimi a loro volta si suddividono per la loro origine in:

- **Concimi organici** (di origine naturale, provenienti dal mondo vegetale, animale o mista);
- **Concimi minerali** (ottenuti mediante estrazione, o processi fisici e/o chimici industriali).

I concimi vengono inoltre classificati sulla base del tipo di elemento nutritivo:

- **Elementi nutritivi principali:** azoto, fosforo, potassio (essenziali per la crescita delle piante ed utilizzate da queste in grosse quantità);
- **Elementi nutritivi secondari:** calcio, magnesio, sodio e zolfo (importanti per la vita delle piante ed utilizzate da queste in quantità medie);
- **Microelementi:** boro, cobalto, rame, ferro, manganese, molibdeno, zinco (essenziali per la vita delle piante ed utilizzate da queste in piccole quantità).

Infine vengono ancora classificati sulla base del contenuto di elemento nutritivo:

- **Concime semplice:** contiene un solo elemento nutritivo principale (concime azotato, fosfatico o potassico).
- **Concime composto:** contiene almeno due elementi nutritivi principali (ottenuto per via chimica o per miscelazione).

Nello specifico, i concimi fosfatici hanno come costituente essenziale il fosforo, macronutriente importante per la vita delle piante, in quanto interviene sul metabolismo e nei processi fisiologici di questa, favorendo la fioritura, l'allegagione e la maturazione del frutto, l'irrobustimento dei tessuti e lo sviluppo degli apparati radicali e la formazione dei semi.

Come detto, la materia prima dei concimi fosfatici è costituita dalle rocce fosfatiche che contengono fosfato tricalcico ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ). Il  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  non è solubile in acqua e non viene assorbito dalle piante. Per renderlo assimilabile, bisogna attaccarlo con acido solforico e acido fosforico mediante processo industriale per ottenere fosfato bicalcico  $\text{CaHPO}_4$  (limitatamente assimilabile dalle piante) e fosfato monocalcico  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  (completamente solubile e assimilabile dalle piante). Il quantitativo di fosforo nei concimi viene espresso come anidride fosforica ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ).

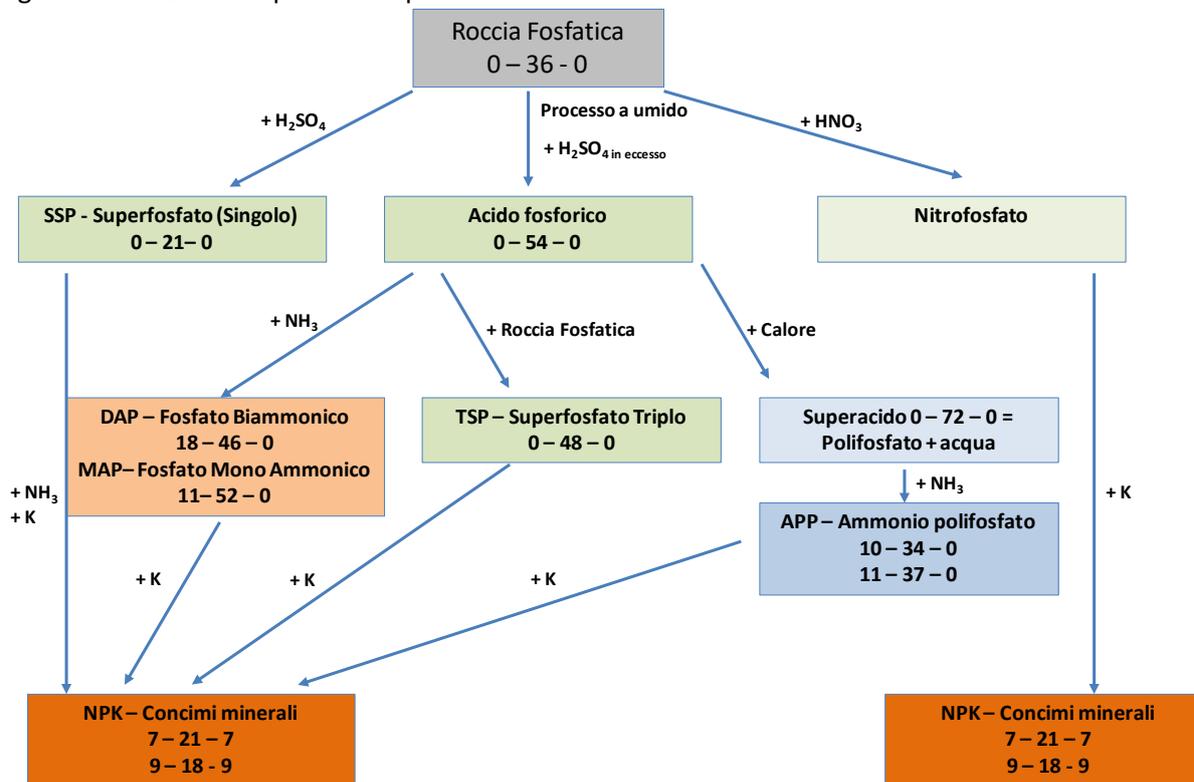
I concimi fosfatici maggiormente commercializzati sono riportati in Tabella 12.

Tabella 12. Principali fertilizzanti fosfatici

<b>Fertilizzante</b>	<b>Descrizione</b>
<b>Fosfato roccioso (Apatite)</b> Titolo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 24 – 38%	Le rocce fosfatiche possono essere direttamente commercializzate anche come fosfato naturale tenero o fosforite macinata (titolo 25%, ma con fosforo solubile in acidi minerali). A causa della loro scarsa solubilità hanno una efficacia fertilizzante molto scarsa, soprattutto in ambiente basico. Trovano impiego per concimazioni di fondo soprattutto in frutteti, prati e colture permanenti. Sono utilizzate in agricoltura biologica, e come ingrediente in altri fertilizzanti più complessi. I titoli del fosfato roccioso sono variabili: P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> al 36% (origine Togo), P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> al 38% (origine Nauru), P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> al 24%, 26%, 28%, 29%, 30% (origine Egitto), P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> al 32% (origine Giordania).
<b>Super fosfato normale (SSP - single super phosphate) o (GSSP - granular single super phosphate)</b> Titolo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 16 – 20%	Il super fosfato normale, detto 19/20, è un composto più forte e più solubile del fosfato naturale ma è meno potente dei composti di fosfato di ammonio o super concentrato. È ottenuto dal trattamento delle fosforiti con acido solforico. Il 93% del titolo deve essere fosfato monocalcico (fosforo in forma molto solubile), è un concime fisiologicamente acido, col vantaggio di contenere gesso (12% di zolfo). Il super fosfato normale si presenta in forma granulare senza additivi meccanici. Viene utilizzato in agricoltura come fertilizzante minerale. Il 19% è la %P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> solubile in acido citrico e 21% è la % di fosforo totale
<b>Perfosfato concentrato</b> Titolo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 25 – 46%	Il perfosfato concentrato è ottenuto dal trattamento delle fosforiti con acido solforico e fosforico. Il 93% del titolo deve essere fosfato monocalcico (fosforo in forma molto solubile). Il titolo dei composti concentrati più recenti arriva al 46%
<b>Super Fosfato Triplo (TSP) Granulato</b> Titolo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 38 – 48%	Il Superfosfato triplo è ottenuto dal trattamento di fosforiti grezze con acido fosforico. L'85% del titolo deve essere fosfato monocalcico (fosforo in forma molto solubile). È quindi più concentrato, per questo più economico, ma privo di zolfo. In genere contiene il 46% di fosfato, solubile in citrato ammonico neutro e acqua. Di questa, tipicamente il 90%, è solubile in sola acqua. Poiché il fosfato contenuto nel super fosfato triplo granulato non è mai completamente solubile in acqua, non può essere utilizzato nella produzione di fertilizzanti liquidi.
<b>Fosfato monoammonico (MAP)</b> Titolo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 52– 61%  N: P: K = 12-61-0; 11 – 52 – 0	Il fosfato ammonico è un buon concimatore e viene usato nella produzione di fertilizzanti complessi e può essere usato come fertilizzante supplementare per ortaggi e fiori. Può inoltre essere anche utilizzato: <ul style="list-style-type: none"> <li>- come additivo nei mangimi per allevamento del bestiame;</li> <li>- come fertilizzante supplementare per la produzione di lievito (alimentazione, alcool, prodotti da forno, birra);</li> <li>- nell'industria farmaceutica;</li> <li>- come impregnante tessile, nel compensato e nel legname per tagliafuoco;</li> <li>- per la preparazione di soluzioni tagliafuoco utilizzate nel trattamento del legno da costruzione;</li> <li>- per la produzione di estintori a polvere.</li> </ul>
<b>Fosfato di ammonico (DAP)</b> Titolo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 46 – 53%  N: P: K = 21-53-0; 18-46-0	Chiamato comunemente DAP o 18-46, dove 18% è il contenuto in N e 46% è il contenuto in P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> . Il concime fosfato diammonico è un prodotto vegetale ricco di fosforo minerale. Viene utilizzato molto dagli agricoltori per la produzione di grano e per le colture "a righe" come mais, frumento, segale e alcune erbe di prato. Alcuni agricoltori possono scegliere di mescolare questo concime con altri fertilizzanti per soddisfare le esigenze specifiche dei raccolti e dei terreni. Può essere applicato in diversi modi: prima, durante o dopo aver piantato le colture.
<b>Concimi azoto-fosfo - potassici (NPK)</b> Titolo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 18 – 21% N: P: K = 7 – 21 – 7; 9 – 18 -9	I concimi NPK sono concimi completi, contenenti azoto, fosforo e potassio in quantità variabili.

In Figura 17 si riporta invece una classificazione semplificata dei diversi fertilizzanti in funzione del loro processo produttivo. Ad oggi la maggior parte dei fertilizzanti è prodotta utilizzando acido fosforico, prevalentemente ottenuto mediante i processi ad umido.

Figura 17. Schema semplificato di produzione dei fertilizzanti fosfatici



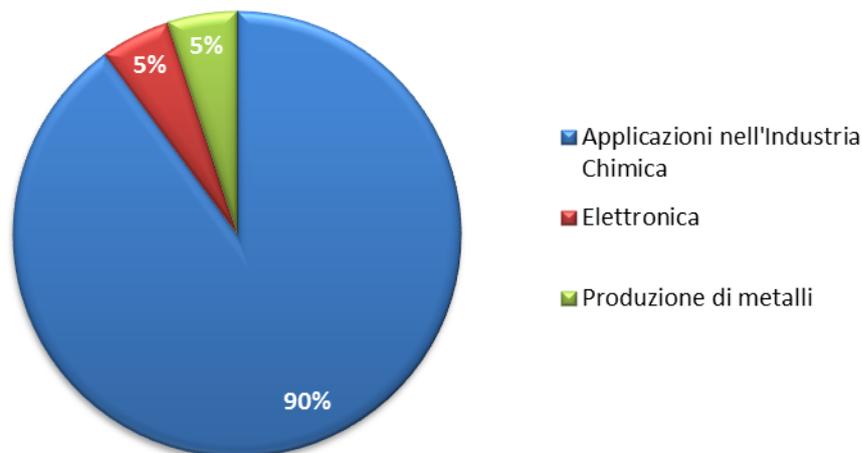
Fonte: Adattamento da Van Kauwenbergh (2010) e Università del Minnesota<sup>18</sup>

### 3.1.2 Usi finali del fosforo bianco

Le applicazioni del fosforo elementare ( $P_4$ ) ottenuto dai trattamenti termici della roccia fosfatica sono molteplici, e capirne i flussi è complesso. Il consumo europeo di  $P_4$  è pari a circa 43.600 ton/anno (Deloitte 2017). Recenti stime (Figura 18) indicano che la quasi totalità del fosforo elementare (90%) viene impiegato nell'industria chimica in svariati settori e solo in via residuale nel settore della metallurgia (5%) e nel settore dell'elettronica (5%).

<sup>18</sup> <https://extension.umn.edu/phosphorus-and-potassium/understanding-phosphorus-fertilizers#organic-vs.-inorganic-620260>.

Figura 18. Usi finali del fosforo bianco. Dati medi 2010 - 2014



Fonte: Deloitte (2017)

Un cenno particolare va agli usi in metallurgia, nella stragrande maggioranza dei casi la presenza di fosforo dei metalli risulta dannosa, quando si producono determinati tipi di acciaio, per esempio, viene effettuata un'operazione denominata "defosforazione" perché la presenza del fosforo li rende più fragili, attraverso la defosforazione si contiene la presenza dell'elemento entro il limite normativo dello 0,05%. Negli acciai da bulloneria le percentuali risultano superiori perché si vuole aumentare la loro lavorabilità. Altri usi in metallurgia sono quelli come disossidante e come componente di leghe madri in cui le percentuali di tale metalloide variano dal 5 al 20% circa.

Le applicazioni chimiche industriali del  $P_4$  sono molto variegata, includendo preparazioni alimentari, produzione di detersivi, preparazione di additivi plastici, prodotti per trattamenti superficiali e estrazioni chimiche, produzione di prodotti per l'agricoltura, quali erbicidi e pesticidi, produzione di additivi lubrificanti. È inoltre utilizzato nei LED come fosforo di Gallio (GaP) e fosforo di Indio (InP). Il fosforo è usato inoltre in medicina: i sali dello ione bisfosfonico,  $(O_3P-O-PO_3)^{4-}$ , sono adoperati per la cura di malattie ossee mentre il  $^{32}P$  (tempo di dimezzamento 14 giorni) è usato in radioterapia.

In Tabella 13 si riportano i principali prodotti finali ed intermedi delle applicazioni industriali del  $P_4$ .

Tabella 13. Principali applicazioni industriali del  $P_4$ .

Prodotto iniziale	Reazione	Prodotti Intermedi	Principali prodotti finali
	+ aria e acqua	$H_3PO_4$ (Acido Fosforico)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Additivi per preparazione alimentare (carne-pesce-patate): acidi per lavorazione pane/agenti emulsionanti alimentari/ agenti per regolare l'umidità nei cibi/ correttori di acidità nelle bevande</li> <li>- Mangimi per animali</li> <li>- Pasta dentifricio</li> <li>- Detersivi</li> <li>- Prodotti per il trattamento delle acque</li> <li>- Materiali luminescenti</li> <li>- Sequestranti di durezza</li> <li>- Agenti per il decapaggio</li> <li>- Agenti disidratanti per chimica organica</li> </ul>

Prodotto iniziale	Reazione	Prodotti Intermedi	Principali prodotti finali
Fosforo Elementare (P <sub>4</sub> )			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solventi per filatura</li> <li>- Catalizzatori</li> <li>- Ritardanti di fiamma</li> <li>- Tensioattivi</li> <li>- Inibitori di corrosione</li> <li>- Agenti antiSTATici/bagnanti</li> <li>- Agenti antischiuma</li> <li>- Solventi</li> <li>- Additivi per lubrificanti e oli</li> <li>- Agenti flocculanti</li> <li>- Reagenti per la flottazione</li> <li>- Agenti antiusura e per la lavorazione dei metalli</li> </ul>
	+ Cloro	PCl <sub>3</sub> (Tricloruro di fosforo), PCl <sub>5</sub> (Pentacloruro di fosforo), POCl <sub>3</sub> (Ossicloruro di fosforo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erbicidi</li> <li>- Pesticidi (Glifosfato)</li> <li>- Stabilizzatori per plastiche</li> <li>- Ritardanti di fiamma</li> <li>- Agenti chelanti</li> <li>- Tensioattivi</li> <li>- Elettroliti per batterie</li> <li>- Agenti cloruranti per industria farmaceutica</li> <li>- Agenti cloruranti</li> <li>- Anticalcari</li> </ul>
	+ aria	P <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (anidride fosforica) & PPA (Acido polifosforico)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ritardanti di fiamma</li> <li>- Additivi plastici</li> <li>- Agenti disidratanti</li> <li>- Additivi per asfalto</li> <li>- Tensioattivi</li> <li>- Inibitori di corrosione</li> <li>- Detergenti industriali</li> <li>- Agenti antiSTATici/bagnanti</li> <li>- Agenti antischiuma</li> <li>- Solventi</li> <li>- Additivi per lubrificanti e oli</li> <li>- Agenti flocculanti</li> <li>- Reagenti per la flottazione</li> <li>- Agenti antiusura e per la lavorazione dei metalli</li> </ul>
	+ Zolfo	P <sub>4</sub> S <sub>10</sub> (Pentasolfuro di fosforo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Insetticidi</li> <li>- Additivi lubrificanti</li> <li>- Agenti per flottazione</li> <li>- Additivi per olio motore</li> </ul>
	+ acqua e acido fosforico	PH <sub>3</sub> (Fosfina)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agenti estrattivi</li> <li>- Ligandi e catalizzatori</li> <li>- Biocidi</li> <li>- Ritardanti di fiamma</li> <li>- Liquidi ionici</li> <li>- Agenti riducenti</li> <li>- Materiale per sintesi</li> <li>- Agenti per l'attività estrattiva</li> <li>- Drogaggio per semiconduttori</li> </ul>
	+ idrossido di sodio + idrossido di calcio	NaH <sub>2</sub> PO <sub>2</sub> (Iposofito di sodio)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nichelatura elettrolitica</li> <li>- Ritardanti di fiamma</li> <li>- Agenti estrattivi</li> <li>- Additivi per la plastica/Nylon</li> </ul>

Prodotto iniziale	Reazione	Prodotti Intermedi	Principali prodotti finali
Fosforo Elementare (P <sub>4</sub> )	+ calore	Fosforo rosso	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lievito artificiale</li> <li>- Fiammiferi di sicurezza</li> <li>- Prodotti pirotecnici</li> <li>- Ritardanti di fiamma</li> <li>- Pigmentazione</li> <li>- Prodotti per sintesi organica</li> <li>- Prodotti per disinfestazione (fumigazione)</li> <li>- Bronzi speciali</li> </ul>
	calore	Fosforo nero	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Potenziale uso nel campo energetico, per la produzione di transistor più efficaci di quelli al silicio</li> <li>- Potenziale uso nell'optoelettronica, perché conduttore e se steso su una superficie diviene trasparente</li> <li>- Potenziale uso nei bio-sensori</li> </ul>

Fonte: Elaborazione ENEA da Willem Shipper<sup>19</sup>

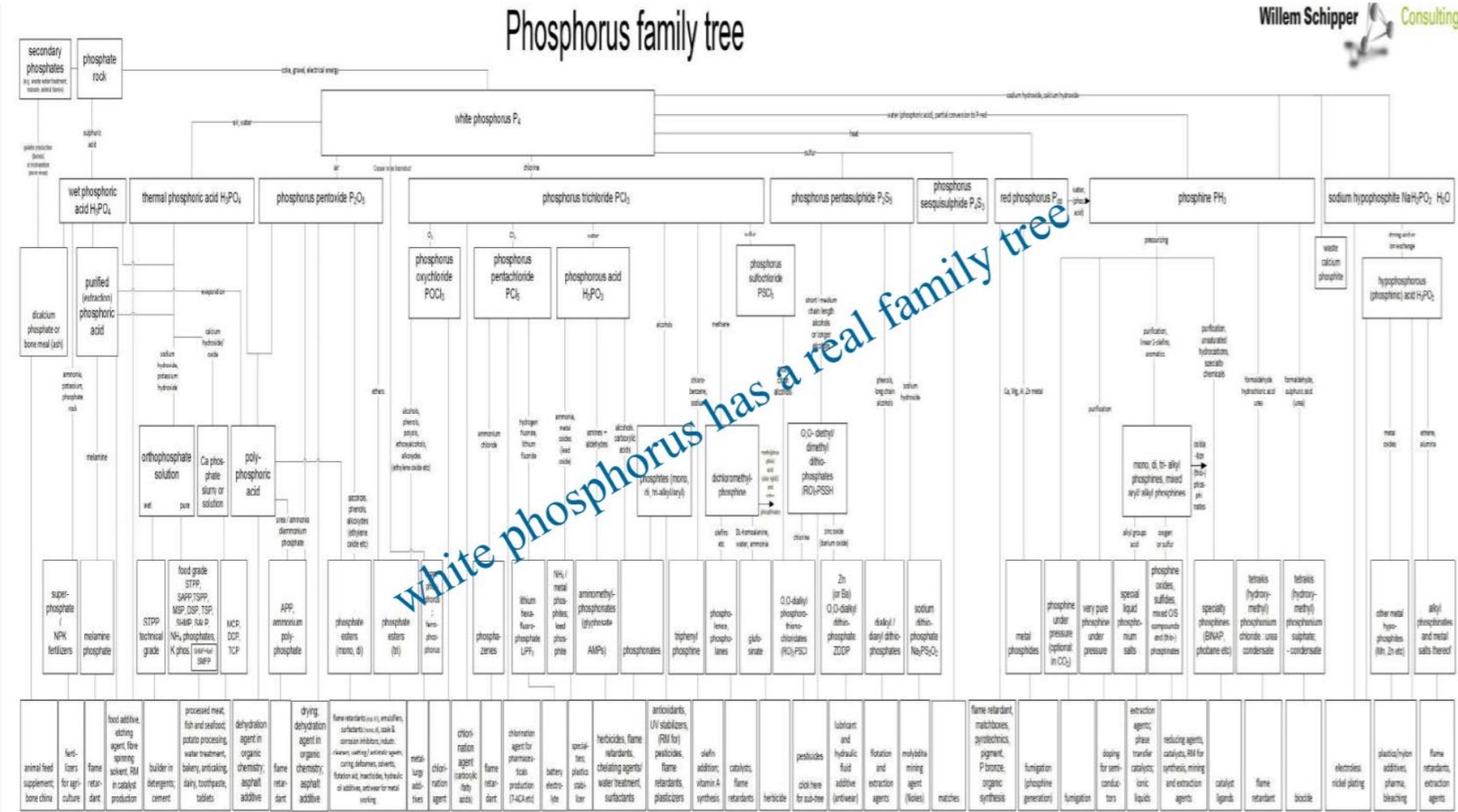
Tra le applicazioni del P<sub>4</sub> va precisato che esso è impiegato direttamente per la produzione di bombe e proiettili incendiari. Tuttavia nelle operazioni militari il fosforo bianco può essere utilizzato solo per illuminare le posizioni nemiche. L'uso diretto di tale arma è stato vietato dalla Convenzione di Ginevra in quanto al momento dello scoppio produce un forte bagliore e sprigiona energia termica, inoltre il contatto provoca ustioni inguaribili. Altra applicazione del P<sub>4</sub> prevede il suo utilizzo per la preparazione di droghe, in particolare il fosforo rosso è inserito nella lista dei precursori di alcuni stupefacenti.

I processi e le applicazioni appena descritte consentono di delineare l'"albero genealogico" del fosforo, così come illustrato in Figura 19.

<sup>19</sup>

<https://phosphorusplatform.eu/images/download/ESPP%20conference%20Phosphorus%20stewardship/Schipper-ESPP-1-12-16.pdf>

Figura 19. L'albero genealogico del fosforo



white phosphorus has a real family tree

Fonte: Willem Schipper

### 3.2 Materiali e sostanze utilizzate nelle applicazioni del fosforo

In Tabella 14 si riporta un quadro conoscitivo dei principali materiali o sostanze utilizzate nelle diverse applicazioni del fosforo. Tale tabella costituisce un utile strumento per ricostruire i flussi di fosforo nel nostro Paese, ovvero l'import, l'export e le perdite.

Tabella 14. Materiali o sostanze intermedie utilizzate nelle diverse applicazioni del fosforo.

Prodotti	Tipo di materiali o sostanze utilizzate
Produzione integratori per mangimi	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fosfato dicalcico</li> <li>- Acido fosforico e acidi polifosforici</li> <li>- Polifosfati (escl. trifosfato di sodio)</li> <li>- Fosfati e idrogenofosfati di calcio</li> <li>- Fosfati e idrogenofosfati di magnesio</li> <li>- Fosfati e idrogenofosfati di sodio</li> <li>- Fosfati e idrogenofosfati di potassio</li> <li>- Diamido fosfato</li> </ul>
Produzione ceramiche	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fosfati di calcio, fosfati alluminio-calcici e crete fosfatiche, naturali (non macinati)</li> <li>- Fosfati di calcio, fosfati alluminio-calcici e crete fosfatiche, naturali (macinati)</li> </ul>
Produzione fertilizzanti	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acido fosforico e acidi polifosforici</li> <li>- Fosfato dicalcico</li> <li>- Ossicloruro di fosforo</li> <li>- Pentasolfuro di fosforo</li> <li>- Trifosfato di sodio</li> <li>- Acido fosforoso</li> <li>- Perfosfati con P2O5 pari o superiore a 35%</li> <li>- Concimi chimici fosfatici escl. Perfosfati</li> <li>- Fosfato monoammonico, anche in miscuglio con l'idrogenoortofosfato di diammonio (fosfato diammonico), escl. quello presentato in tavolette o forme simili o in imballaggi di peso lordo &lt;= 10 kg)</li> <li>- Concimi, minerali o chimici, contenenti nitrati e fosfati, escluso fosfato monoammonico e diammonico</li> <li>- Concimi NPK, NP o PK, vari formati</li> </ul>
Produzione ritardanti di fiamma e sostanze ignifughe, sostanze stabilizzatrici per produzione di plastiche (antiossidanti e ritardanti di fiamma)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ipfosfiti e fosfiti organici</li> <li>- Fosforati</li> <li>- Acido fosforico e acidi polifosforici</li> <li>- Fosfinossidi organici</li> <li>- Fosfonati organici</li> <li>- Fosfati organici</li> <li>- Fosfinati</li> <li>- Fosforo rosso</li> <li>- Acido fosforoso</li> </ul>
Estinguenti di fiamma	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fosforo bianco</li> <li>- Fosfati</li> <li>- Fosfonati</li> <li>- Fosfinossidi</li> </ul>
Produzione additivi alimentari (coloranti, conservanti, emulsionanti, ecc..)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fosfato dicalcico</li> <li>- Acido fosforico e acidi polifosforici</li> <li>- Polifosfati (escl. trifosfato di sodio)</li> <li>- Fosfati e idrogenofosfati di calcio</li> <li>- Fosfati e idrogenofosfati di magnesio</li> <li>- Fosfati e idrogenofosfati di sodio</li> <li>- Fosfati e idrogenofosfati di potassio</li> </ul>

<b>Prodotti</b>	<b>Tipo di materiali o sostanze utilizzate</b>
	- Diamido fosfato
Produzione detergenti	- Fosfati organici (esteri fosforici)
Produzione cemento, malte e lastre di cartongesso	- Ossidi di fosforo - Acido amminofosfonico - Acido polifosfonico - Esteri fosforici
Produzione carne lavorata	- Fosfato dicalcico - Acido fosforico e acidi polifosforici - Polifosfati (escl. trifosfato di sodio) - Fosfati e idrogenofosfati di magnesio - Fosfati e idrogenofosfati di calcio - Fosfati e idrogenofosfati di sodio - Fosfati e idrogenofosfati di potassio
Lavorazione pesce	- Fosfati
Lavorazione patate	- Fosfato dicalcico - Acido fosforico e acidi polifosforici - Polifosfati (escl. trifosfato di sodio) - Fosfati e idrogenofosfati di magnesio - Fosfati e idrogenofosfati di calcio - Fosfati e idrogenofosfati di sodio - Fosfati e idrogenofosfati di potassio
Trattamento acque	- Acido fosforoso
Antiagglomeranti per alimentari	- Fosfato d'ossa
Trattamento delle pelli	- Fosfati organici (esteri fosforici) - Fosfato dicalcico - Acido fosforico
Allevamento	- Polifosfati (escl. trifosfato di sodio) - Fosfati e idrogenofosfati di magnesio - Fosfati e idrogenofosfati di calcio - Fosfati e idrogenofosfati di sodio - Fosfati e idrogenofosfati di potassio
Produzione dentifrici	- Fosfato dicalcico
Produzione pastiglie detergenti	- Fosfati organici (esteri fosforici acidi)
Processi di disidratazione in chimica organica	- Anidride fosforica P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Produzione additivi per asfalto	- Acido fosforico e acidi polifosforici
Produzione tensioattivi	- Fosfati organici (esteri fosforici a catena lunga fino a C14, esteri acidi grassi)
Produzione inibitori di corrosione e agenti ritardanti	- Fosfiti organici - Fosfonati a catena lunga
Produzione detersivi industriali	- Fosfati organici (esteri fosforici a catena lunga fino a C14, esteri acidi grassi)
Agenti antiSTATICI	- Fosfati organici (esteri fosforici)
Agenti antischiuma (tensioattivi)	- Fosfati a catena lunga - Fosfonati
Produzione di additivi per facilitare il galleggiamento di sostanze (tensioattivi)	- Fosfati a catena lunga
Produzione insetticidi e pesticidi in genere	- Fosfati e fosfonati organici - Paration ISO e parationmetile ISO metileparation - Fosfamidon ISO, Monocrotophos ISO, Fluoroacetamide ISO - Fosforo rosso - Solfuri di fosforo
Additivi per olii idraulici	- Solfuri di fosforo

<b>Prodotti</b>	<b>Tipo di materiali o sostanze utilizzate</b>
	- Fosfiti organici
Produzione cosmetici	- Fosfati organici (esteri fosforici acidi e non)
	- Fosforati
Clorurazione	- Tribromuro di fosforo
	- Fosforo rosso
Produzione di farmaci	- Tribromuro di fosforo
Produzione di elettroliti per batterie	- Fosfati inorganici (derivati dell'acido fosforico)
Produzione di esplosivi	- Fosforo bianco
Produzione di fiammiferi e fuochi artificiali	- Fosforo rosso
Produzione di semiconduttori (drogaggio)	- Fosforo rosso
Produzione lampade a LED bianchi	- Fosforo rosso
Produzione vetri speciali per lampade al sodio	- Fosforo rosso
Produzione acciai e bronzi speciali	- Fosforo rosso
Produzione di abrasivi e sostanze lucidanti	- Fosfato dicalcico
Produzione di protesi	- Fosfato dicalcico
Solventi a base di Fosforo	- Fosfati organici (tributil fosfato, triortocresilfosfato, trietilfosfato, trimetilfosfato, trifenilfosfato)
Polimeri a base di Fosforo	- Poliorganofosfazene
Produzione lampade a incandescenza	- Fosforo rosso
Produzione di materie plastiche	- Fosfati organici (esteri fosforici acidi)
	- Fosfato di triammonio
	- Fosfati di trisodio
	- Altri fosfati
	- Trifosfato di sodio
	- Fosfuri
	- Fosfato di tris(2,3-dibromopropile)
	- Esteri tiofosforici e loro sali e loro derivati, escluso parathion
	- Esteri di fosfito e loro sali, loro derivati alogenati, solfonati, nitrati e nitrosi
	- Fosfito di trietile
	- Fosfito di trimetile
	- Fosfito di dietile
	- Fosfito di dimetile
	- Tricloruro di fosforo
	- Pentacloruro di fosforo
Altri composti chimici a base di Fosforo utilizzati in ambito industriale	- Idrogenoortofosfato di diammonio
	- Metilfosfonato di dimetile
	- Dimetil propilfosfonato
	- Dietil etilfosfonato
	- Sodio 3-(triidrossisilil)propil metilfosfonato
	- 2,4,6-tripropil-1,3,5,2,4,6-triossatrifosfinan 2,4,6-triossido
	- (5-etil-2-metil-2-ossido-1,3,2-diossafosfinan-5-il)metil metil metilfosfonato
	- Bis[(5-etil-2-metil-2-ossido-1,3,2-diossafosfinan-5-il)metil]metilfosfonato
	- Sale di acido metilfosfonico ed (amminoimminometil)urea (1 : 1)
	- Difluoruro metilfosfonico
	- Dicloruro metilfosfonico
	- Acido etidronico (acido 1-idrossietano 1,1-difosfonico) e suoi sali

Prodotti	Tipo di materiali o sostanze utilizzate
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acido (nitrilotrimetanedil)trifosfonico,</li> <li>- Acido {[etan-1,2-Diilbis[nitrilobis(metilen)]} tetrachisfosfonico,</li> <li>- Acido {[2-[bis(fosfonometil)amino]etil]amino)metil]bifosfonico,</li> <li>- Acido {[esan-1,6-Diilbis[nitrilobis(metilene)]}tetrachisfosfonico,</li> <li>- Acidi inorganici (escl. cloruro di idrogeno (acido cloridrico), acido clorosolfonico, acido solforico, oleum, acido nitrico, acidi solfonitrici, acidi borici, fluoruro d'idrogeno (acido fluoridrico), bromuro di idrogeno (acido bromidrico) e cianuro di idrogeno (acido cianidrico))</li> <li>- Composti chimici separati definiti derivati organofosforici, n.n.a.</li> </ul>

Fonte: Propria Elaborazione

### 3.2.1 I dati economici dei settori connessi alle applicazioni di fosforo

I principali macrosettori nei quali viene utilizzato il fosforo sono riportati in Tabella 15 con il rispettivo valore aggiunto<sup>20</sup> a livello nazionale.

Come mostrato in Tabella 15 appare evidente che i settori delle industrie alimentari e della fabbricazione di prodotti in metallo producono più alti livelli di valore aggiunto. È tuttavia il settore della fabbricazione di prodotti chimici legata alla produzione dei fertilizzanti e dei detersivi a registrare il maggior incremento nel periodo considerato con un aumento del 26% nell'ultimo quinquennio.

Tabella 15. Applicazioni delle rocce fosfatice e del fosforo bianco e valore aggiunto per macrosettor (2014-2018)

Applicazioni	Settore ATECO (2 cifre)	Valore aggiunto (mio €) 2014	Valore aggiunto (mio €) 2015	Valore aggiunto (mio €) 2016	Valore aggiunto (mio €) 2017	Valore aggiunto (mio €) 2018	Delta %
Additivi alimentari	C10 – industrie alimentari	25.315	26.973	27.913	28.061	28.921	14,2%
Fertilizzanti, detersivi	C20 – fabbricazione di prodotti chimici	9.874	10.896	12.024	12.274	12.448	26,1%
Prodotti metallici	C25 – fabbricazione di prodotti in metallo (esclusi macchinari e attrezzature)	28.171	28.606	29.983	n.d.	n.d.	n.d.
Componenti elettronici	C26 – produzione di computer, prodotti elettronici e ottici	8.009	8.317	8.071	8.184	8.277	3,4%

Fonte: Elaborazione ENEA su dati ISTAT (2018)<sup>21</sup>

<sup>20</sup> Il valore aggiunto è l'aggregato che consente di apprezzare la crescita del sistema economico in termini di nuovi beni e servizi messi a disposizione della comunità per impieghi finali. Risulta dalla differenza tra il valore della produzione di beni e servizi conseguita dalle singole branche produttive ed il valore dei beni e servizi intermedi dalle stesse consumati (materie prime e ausiliarie impiegate e servizi forniti da altre unità produttive). Corrisponde alla somma delle retribuzioni dei fattori produttivi e degli ammortamenti (Fonte: ISTAT)

<sup>21</sup> <http://dati.istat.it/Index.aspx#>.

In Tabella 16 sono riportati i principali dati economici dei settori connessi alle principali applicazioni di fosforo. Si nota come le industrie alimentari rappresentino il settore preponderante in termini assoluti di fatturato prodotto, Margine Operativo Lordo (MOL<sup>22</sup>), numero di imprese e addetti.

Va sottolineato che il settore dei fertilizzanti è quello che registra il fatturato medio per singola impresa più elevato (in media 8.260 k€). Inoltre, il settore del trattamento e rivestimento dei metalli mostra la più elevata redditività del fatturato con un maggior rapporto fra fatturato prodotto e MOL (15,7%).

Tabella 16. Dati economici applicazioni del fosforo per settore

Applicazioni	Settore NACE 2 cifre	Settore NACE 4 cifre	Fatturato (k€)	MOL (k€)	Imprese (N)	Addetti (N)
Additivi alimentari	C10 – Industrie alimentari	10.xx Tutti i sottogruppi (carne, amidi, latticini, etc.)	117.954.883	9.408.687	52.542	413.242
Fertilizzanti, detergenti	C20 – Fabbricazione di prodotti chimici	20.15 Fabbricazione di fertilizzanti e composti azotati	1.586.030	137.790	192	3.162
Prodotti metallici, indefiniti	C25 – Fabbricazione di prodotti in metallo (esclusi macchinari e attrezzature)	25.61 Trattamento e rivestimento di metalli	5.309.640	833.334	3.682	39.110
Componenti elettronici	C26 – Produzione di computer, prodotti elettronici e ottici	26.11 Fabbricazione di componenti elettronici	4.467.773	402.636	978	23.768

Fonte: Elaborazione ENEA su dati ISTAT (2018)<sup>23</sup>

### 3.2.2 Il potenziale impiego dei materiali recuperati

Malgrado esistano moltissime tecniche e tecnologie per il recupero del fosforo, il materiale secondario non può sempre essere impiegato come alternativa alla roccia fosfatica. Uno dei casi in cui il fosforo secondario può sostituire quello primario è nell'applicazione in agricoltura.

Si evidenzia inoltre che solo una piccola parte del P estratto viene attualmente utilizzato per produrre P<sub>4</sub> e prodotti derivati, mentre la maggioranza del P estratto viene utilizzato nel settore agroalimentare. Tuttavia per cercare di recuperare il P anche dai prodotti derivati da P<sub>4</sub> occorrerebbe prendere in considerazione il design dei prodotti sin dalla nascita, riutilizzare piuttosto che abbandonare i prodotti e riciclare come ad esempio la plastica dei ritardanti di fiamma in quanto tale.

In Tabella 17 sono riportate le tecnologie esistenti a livello italiano per il recupero del fosforo dalle diverse tipologie di matrici presentate nel paragrafo 2.2.1. L'obiettivo è quello di individuare l'impatto che tali tecnologie avrebbero sul settore di riferimento, qualora venissero implementate.

<sup>22</sup> MOL (Margine Operativo Lordo), indicatore di redditività che esprime la capacità di un'impresa di generare reddito tramite la gestione caratteristica, ovvero senza tenere in considerazione le operazioni accessorie di tipo finanziario, così come le tasse, le svalutazioni e gli ammortamenti.

<sup>23</sup> <http://dati.istat.it/Index.aspx#>.

Tabella 17. Ricognizione preliminare delle tecnologie italiane implementate

<b>Organizzazione</b>	<b>Descrizione tecnologia</b>	<b>TRL*</b>	<b>Matrice coinvolta</b>	<b>Impatto (sezione ATECO)</b>
Gruppo IREN, Società IRETI SpA	Sistema side stream in cui una parte di fango di ricircolo è posta in condizioni anaerobiche per alcune ore e poi è reimpressa nel bacino di aerazione. L'alternanza aerobiosi/anaerobiosi stimola la crescita dei batteri POLIP in grado di accumulare P in presenza di ossigeno e rilasciarlo in assenza di ossigeno e in presenza di substrato carbonioso (STRIPPER). Il flusso di acqua in uscita dal comparto anaerobico, separato dal fango, è ricco di P, passa nel chiariflocculatore dove un dosaggio di calce permette di ottenere un fango chimico ricco di P	9	Acque reflue	Trattamento rifiuti (E) / Settore agricolo (A)
Università degli Studi di Napoli Federico II	Sviluppo di compost e prodotti umificati da residui agricoli e agroindustriali con e senza bio-effettori microbici specificamente adattati per migliorare l'efficienza delle strategie alternative di fertilizzazione.	5	Scarti agricoli e agroindustriali	Settore agricolo (A)
Veolia Water Technologies	Recupero del fosforo dagli effluenti prodotti da attività industriali, agricole e municipali sottoforma di cristalli di struvite (tecnologia STRUVIA)	9	Acque reflue	Settore agricolo (A)
Università di Enna Kore (UNIKORE), Gruppo Energia e Ambiente	Tecnologia termochimica di conversione (pirolisi, a secco e a umido, gassificazione e liquefazione idrotermica) per la valorizzazione di biomasse residuali. Il fosforo può essere recuperato per lisciviazione acida dei residui trattati e poi purificato tramite cristallizzazione con la formazione di struvite e/o idrossiapatite	4	Biomasse residuali (tra cui fanghi di depurazione e digestato)	Settore agricolo (A)
CREA, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria	Utilizzo della pacciamatura vivente (living mulch) in sistemi orticoli biologici per la riduzione d'uso degli input chimici (fertilizzanti e pesticidi), favorendo la riduzione della lisciviazione di P dal suolo attraverso il potenziamento delle interazioni simbiotiche radice-endomicorrize	-	Pacciamate	Settore agricolo (A)
Gruppo Ricicla - DISAA - Università degli Studi di Milano	Utilizzo del digestato in pieno campo come fertilizzante NPK rinnovabile in sostituzione dei comuni concimi minerali per la coltivazione di mais, frumento e riso	-	Digestato	Settore agricolo (A)
Gruppo Ricicla - DISAA - Università degli Studi di Milano	Cristallizzazione della struvite da digestati aggiungendo quale fonte di magnesio un sottoprodotto della lavorazione del sale marino	4	Digestato	Settore agricolo (A)
Gruppo IREN, Società IRETI SpA	I fanghi prodotti dagli impianti di depurazione gestiti dall'azienda che risultano essere idonei vengono inviati ad impianti di compostaggio	-	Fanghi di depurazione	Settore agricolo (A)
Gruppo IREN, Società IRETI SpA	I fanghi prodotti dagli impianti di depurazione gestiti dall'azienda che risultano essere idonei vengono raccolti e stoccati tutto l'anno per essere poi conferiti in agricoltura nel periodo estivo	-	Fanghi di depurazione	Settore agricolo (A)
Ingelia Italia S.p.A e Acea Ambiente Srl	Recupero fosfati da fanghi di depurazione mediante carbonizzazione idrotermica. A valle del processo di carbonizzazione, il fango è trasformato in una sospensione	n.d.	Fanghi di depurazione	Trattamento rifiuti (E) / Settore agricolo (A)

Organizzazione	Descrizione tecnologia	TRL*	Matrice coinvolta	Impatto (sezione ATECO)
	di acqua e carbone. In queste condizioni, grazie anche alla caratteristica idrofobica delle particelle di carbone, è agevole effettuare una lisciviazione acida, solubilizzando il fosforo presente, trasferendolo dalla parte solida a quella acquosa, da cui poi risulta facilmente precipitabile sotto forma di fosfati			
Università Politecnica delle Marche , Università Verona e Università Venezia	Cristallizzazione della struvite da surnatanti anaerobici (provenienti dalla sezione di disidratazione)	7	Surnatanti anaerobici	Settore agricolo (A)
ENEA	Inoculo di microrganismi che solubilizzano il fosforo isolati dal suolo e selezionati per le loro capacità metaboliche	-	Fosforo insolubile presente nel terreno	Settore agricolo (A)
ENEA	Sviluppo di nuovi materiali (bioattivatori) ottenuti a partire da sottoprodotti agroindustriali (pollina), per il recupero dei suoli degradati, poveri di sostanza organica o sfruttati, che stanno perdendo la capacità produttiva	3	Sottoprodotti agroindustriali (pollina)	Settore agricolo (A)
CCS Aosta Srl	Produzione di bioti microbici capaci di migliorare le capacità della pianta di assimilare P diminuendone l'apporto per le coltivazioni agrarie	-	Micelio	Settore agricolo (A)
Gruppo CAP	Sviluppo di una biopiattaforma dedicata all'economia circolare (simbiosi industriale). La nuova struttura prevede due linee produttive: la prima dedicata al trattamento termico dei fanghi di depurazione delle acque per la produzione di energia termica e recupero P dalle ceneri; la seconda di digestione anaerobica per il trattamento della FORSU per la produzione di biometano. La frazione liquida del digestato sarà trattata nel depuratore con recupero struvite	8	Fanghi di depurazione	Settore agricolo (A)
Pizzoli SpA	Sistema ANPHOS® basato sulla defosfatazione per precipitazione del fosforo e della frazione ammoniacale dell'azoto con applicazione di magnesio idrossido allo scopo di ottenere struvite	9	Acque reflue industria agroalimentare	Settore agricolo (A)
ACQUA & SOLE SRL	Co-digestione termofila di fanghi ed altri rifiuti organici (es. agroalimentari) propedeutico al recupero a beneficio dell'agricoltura e produzione secondaria di solfato ammonico	9	Fanghi e rifiuti agroalimentari	Settore agricolo (A)

\* Il termine *Technology Readiness Level (TRL)*, che si può tradurre con *Livello di Maturità Tecnologica*, indica una metodologia usata a livello europeo per la valutazione del grado di maturità di una tecnologia. La scala è basata su 9 punti, dove 1 è il più basso (definizione dei principi base) e 9 il più alto (sistema già utilizzato in ambiente operativo). Più nel dettaglio: 1: Osservati i principi fondamentali; 2: Formulato il concetto della tecnologia; 3: Prova di concetto sperimentale; 4: Tecnologia convalidata in laboratorio; 5: Tecnologia convalidata in ambiente (industrialmente) rilevante; 6: Tecnologia dimostrata in ambiente (industrialmente) rilevante; 7: Dimostrazione di un prototipo di sistema in ambiente operativo; 8: Sistema completo e qualificato; 9: Sistema reale provato in ambiente operativo (produzione competitiva, commercializzazione).

Fonte: Elaborazione ENEA

### 3.3 Consumi

Il consumo mondiale di fosforo, sia per la produzione di acido fosforico, di fertilizzanti e gli altri usi, nel 2018 è stato di circa 47 milioni di tonnellate di  $P_2O_5$ <sup>24</sup>.

Nel medio periodo, alcuni fattori indicano un probabile aumento della domanda, legato per lo più alla domanda di fosforo per l'agricoltura. È stato stimato che il consumo di  $P_2O_5$  è destinato ad aumentare a circa 50,5 milioni di tonnellate nel 2022<sup>25</sup>. I consumi dell'Africa, India e Sud America rappresenterebbero circa il 75% della crescita prevista.

Secondo le previsioni sul lungo periodo, la popolazione mondiale dovrebbe superare i nove miliardi di persone entro il 2050. Ciò comporterà probabilmente un'espansione della terra coltivata, e/o un'attività più intensiva sull'attuale superficie agricola, con un conseguente aumento della domanda di fertilizzanti (Malingreau et al. 2012). Si prevede un aumento anche della domanda di fosforo per i mangimi, in seguito a sostanziali incrementi della produzione animale (Rosegrant et al., 2009).

Tali incrementi saranno anche stimolati dalla maggiore produzione globale di biocarburanti (Hein & Leemans, 2012). Nel 2007/8 l'uso di fertilizzanti connesso alla produzione di biocarburanti è stato già stimato essere pari a 870 000 tonnellate di  $P_2O_5$  all'anno (Heffer & Prud'homme, 2008).

In Europa, secondo i dati Eurostat COMEXT del 2016, il consumo annuale di roccia fosfatica è stato di circa 7,3 milioni di tonnellate nel periodo dal 2010 al 2014, corrispondenti a circa 2.3 milioni di tonnellate di  $P_2O_5$ . Per quanto riguarda il consumo di fosforo bianco si parla di 46,2 mila tonnellate sia secondo i dati Eurostat COMEXT che USGS 2016.

#### 3.3.1 FOCUS Consumi Fertilizzanti

Nel 2016 il quantitativo globale di fertilizzanti prodotto è stato di 181 milioni di tonnellate di Nutrienti ( $N + P_2O_5 + K$ ), di cui 108 milioni di tonnellate (60%) fertilizzanti azotati, 41 milioni (23%) da fertilizzanti fosfatici e 32 milioni (17%) da fertilizzanti potassici (Commissione Europea, 2019). Dalle previsioni della FAO concernenti la domanda globale di fertilizzanti si evince che l'impiego di fertilizzanti nel mondo continuerà ad espandersi, soprattutto nei paesi in via di sviluppo, arrivando a circa 200 milioni di tonnellate nel 2018 (FAO, 2015).

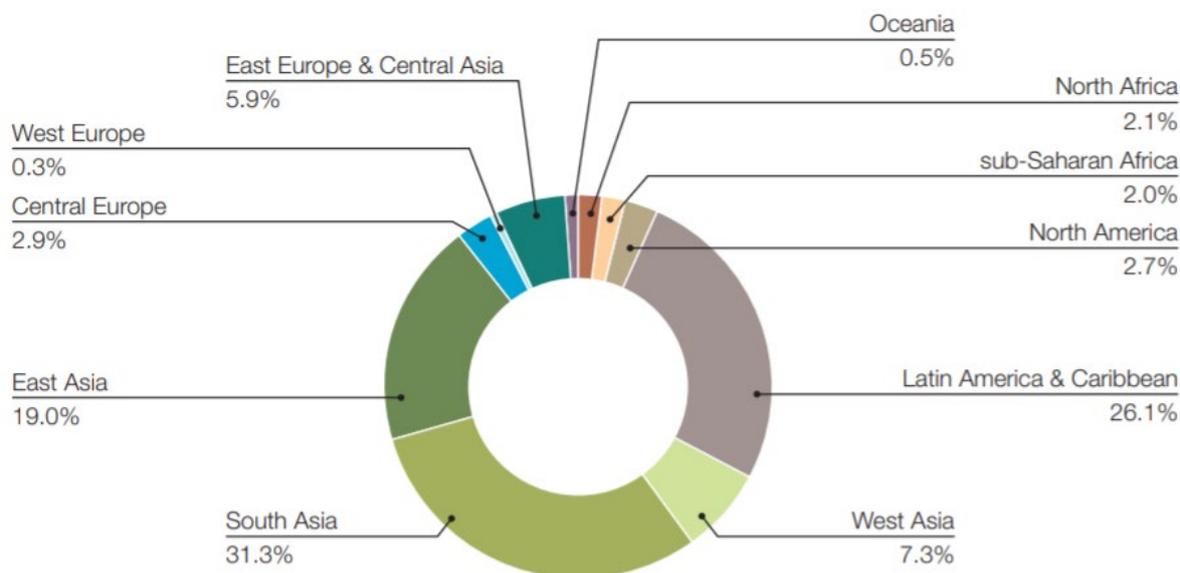
Nel 2018 il consumo di fertilizzanti fosfatici stimato dalla FAO ammontava a circa 46.6 milioni di tonnellate di  $P_2O_5$ . La Figura 19 mostra l'incremento del consumo di fertilizzanti fosfatici nei diversi paesi del mondo nel periodo 2014 e il 2018, così come stimati dalla FAO (2015).

---

<sup>24</sup> Equivalenti a circa 20.5 milioni di tonnellate di P. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/phosphate-rock-statistics-and-information>.

<sup>25</sup> <https://www.usgs.gov/centers/nmic/phosphate-rock-statistics-and-information>

Figura 20. Suddivisione geografica dell'incremento dei fertilizzanti fosfatici nel mondo. Periodo 2014 – 2018

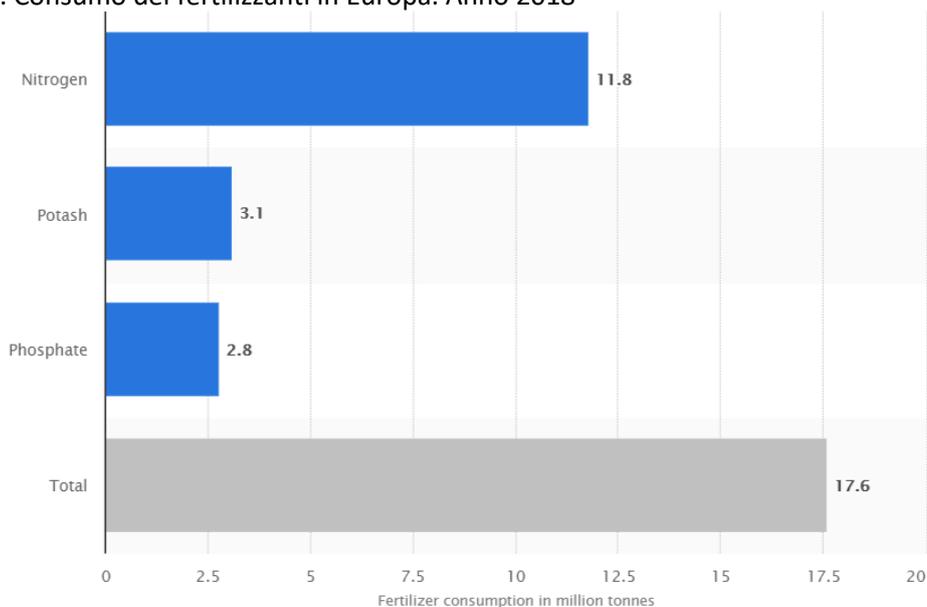


Fonte: FAO (2015).

### 3.3.1.1 Livello europeo

L'associazione europea Fertilizzanti ha stimato che su 179 milioni di ettari di suolo agricolo in europa, il 75% (134 milioni di ettari) è concimato con fertilizzanti minerali<sup>26</sup>. Nel 2018 in Europa il consumo di fertilizzanti è stato di circa 17.6 milioni di tonnellate, di cui il 67% è rappresentato da fertilizzanti azotati, il 16% da fertilizzanti fosfatici e il 17% da fertilizzanti potassici (Statista, 2019). Più nel dettaglio il consumo di fertilizzanti fosfatici ammontava a circa 2.8 milioni di tonnellate di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Figura 21. Consumo dei fertilizzanti in Europa. Anno 2018



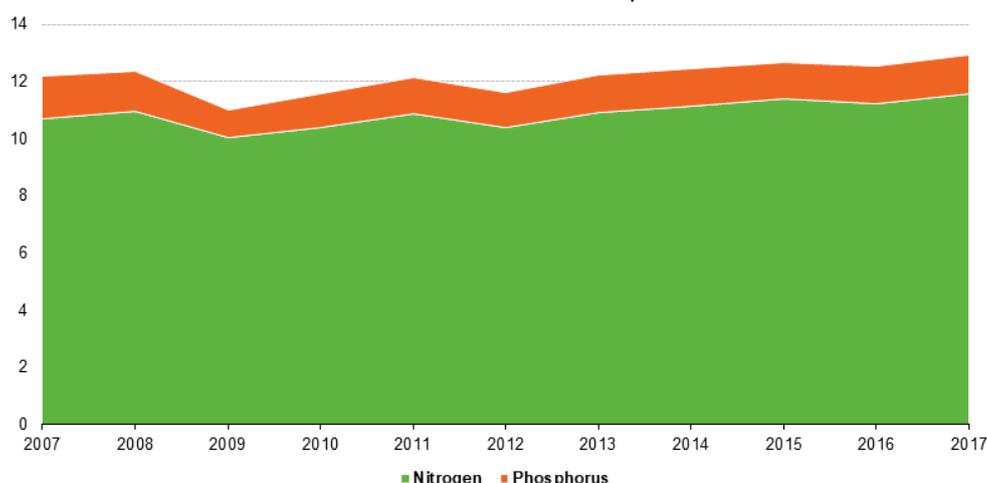
Fonte: Statista (2019)<sup>27</sup>

<sup>26</sup> <https://www.fertilizerseurope.com/>.

<sup>27</sup> <https://www.statista.com/statistics/1076303/european-fertilizer-use-by-nutrient/>.

In Figura 22 si riporta il consumo di fertilizzanti azotati e fosfatici nel periodo 2007 – 2017 in EU28.

Figura 22. Stima del consumo di fertilizzanti minerali in Europa. EU -28. Periodo 2007 – 2017 (mio t)



Fonte: Eurostat (2018)<sup>28</sup>.

La produzione europea di fertilizzanti è molto bassa rispetto a quella mondiale, pari al 9% per i fertilizzanti azotati, al 3% per i fertilizzanti fosfatici e all'8% per i fertilizzanti potassici (Commissione Europea, 2019). Da qui si evince la forte dipendenza dell'Europa dalle importazioni. I prodotti a base di fosfato provengono principalmente dal Marocco (22% delle importazioni totali dell'UE). Le esportazioni di fosfati diammonici (DAP) dal Marocco e dalla Russia verso l'Europa sono aumentate in modo significativo e hanno raggiunto il 70% del totale delle importazioni di DAP nell'UE nel 2017.

### 3.3.1.2 Livello nazionale

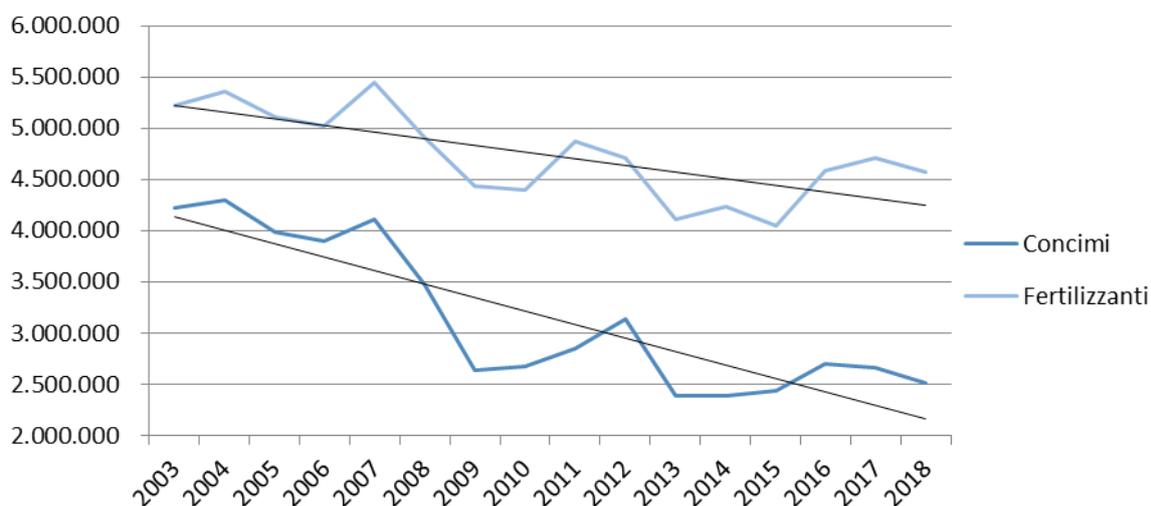
Informazioni importanti sull'utilizzo di fertilizzanti in Italia sono fornite dalla rilevazione ISTAT sulla distribuzione per uso agricolo dei fertilizzanti, indagine censuaria annuale che rileva i quantitativi di fertilizzanti prodotti o importati distribuiti dalle singole imprese, con il proprio marchio o con marchi esteri, in ciascuna provincia (ISTAT, 2019<sup>29</sup>). I rispondenti della rilevazione sono tutte le imprese che commercializzano fertilizzanti (concimi, ammendanti e correttivi) costituiti da sostanze naturali o sintetiche, minerali od organiche. L'indagine "Distribuzione, per uso agricolo, dei fertilizzanti (concimi, ammendanti e correttivi)" è prevista dal Programma statistico nazionale e per questo comporta l'obbligo di risposta da parte dei rispondenti.

Nel 2018 sono stati distribuiti 4,57 milioni di tonnellate di fertilizzanti, quantità in lieve riduzione rispetto al 2017 (-3%) ma in aumento (+12%) rispetto al 2015, anno in cui si registra il valore minimo degli ultimi quindici anni (2003-2018). Il massimo della distribuzione si ha nel 2007 con 5,44 milioni di tonnellate. In generale nel periodo 2003-2018 si osserva nelle quantità distribuite un trend in diminuzione. Rispetto all'anno 2003, nel 2018 si registra una apprezzabile riduzione del 12,4% (Figura 23).

<sup>28</sup>[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental\\_indicator\\_-\\_mineral\\_fertiliser\\_consumption](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_mineral_fertiliser_consumption).

<sup>29</sup> <http://dati.istat.it/>.

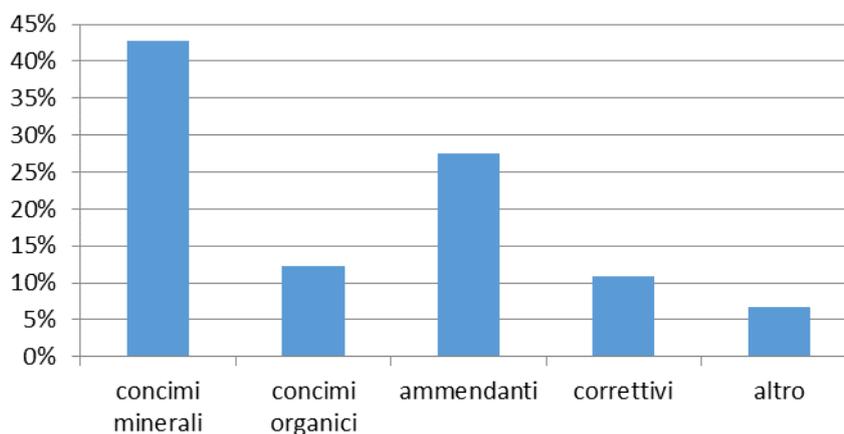
Figura 23. Quantità distribuita di fertilizzanti e della relativa quota di concimi. Anni 2003 – 2018 (tonnellate).



Fonte: ISTAT (2019)

Nei fertilizzanti la principale componente sono i concimi minerali, ovvero quelli ottenuti da giacimenti minerali, che rappresentano il 43% del totale (1,95 milioni di tonnellate) nel 2018, seguono gli ammendanti con 1,26 milioni di tonnellate (27%). Nella voce “Altro” sono considerati i “substrati di coltivazioni” e i “prodotti ad azione specifica” (Figura 24).

Figura 24. Fertilizzanti distribuiti per uso agricolo per tipo, valori percentuali. Anno 2018



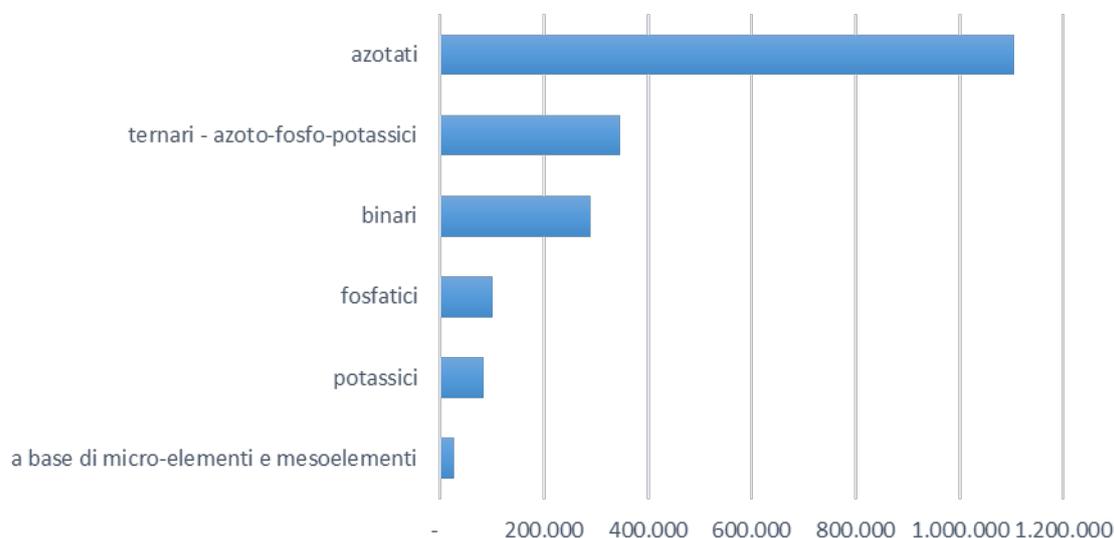
Fonte: ISTAT (2019)

L’andamento della distribuzione di concimi in Figura 23 segue quello dei fertilizzanti evidenziando però nel tempo una maggiore riduzione. A riguardo, rispetto al 2003, nel 2018 si registra una riduzione del 40% molto maggiore rispetto a quella complessiva dei fertilizzanti precedentemente descritta.

I concimi minerali rappresentano il fertilizzante con il maggiore contenuto in fosforo; nel 2018 la loro distribuzione nei diversi tipi (semplici, binari, ternari, a base di micro elementi e mesoelementi) in termini assoluti (tonnellate) è ripartita così come riportato in Figura 25. I composti del fosforo li

ritroviamo in prevalenza nei concimi semplici (fosfatici), binari (azoto-fosfatici, fosfo-potassici) e terziari (azoto-fosfo-potassici).

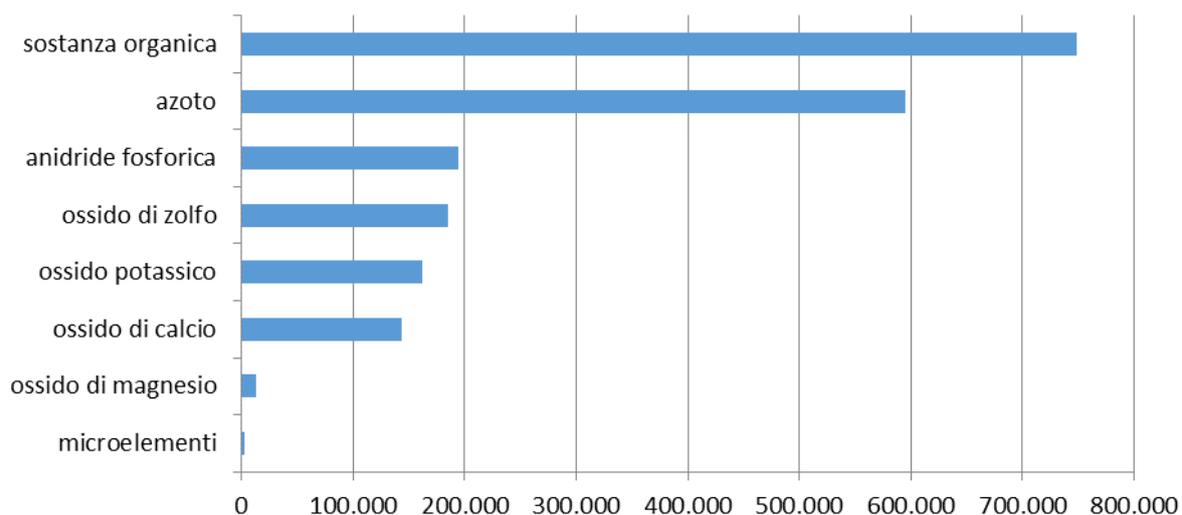
Figura 25. Tipi di concimi minerali. Anno 2018 (tonnellate)



Fonte: ISTAT (2019)

In Figura 26 sono riportati gli elementi nutritivi contenuti complessivamente nei fertilizzanti distribuiti nel 2018. La sostanza organica con 749 mila tonnellate rappresenta più di un terzo (36,6%) del totale degli elementi nutritivi, seguono l'azoto (29,1%) e più distanziati l'anidride fosforica (9,5%) e l'ossido di zolfo (9,0%).

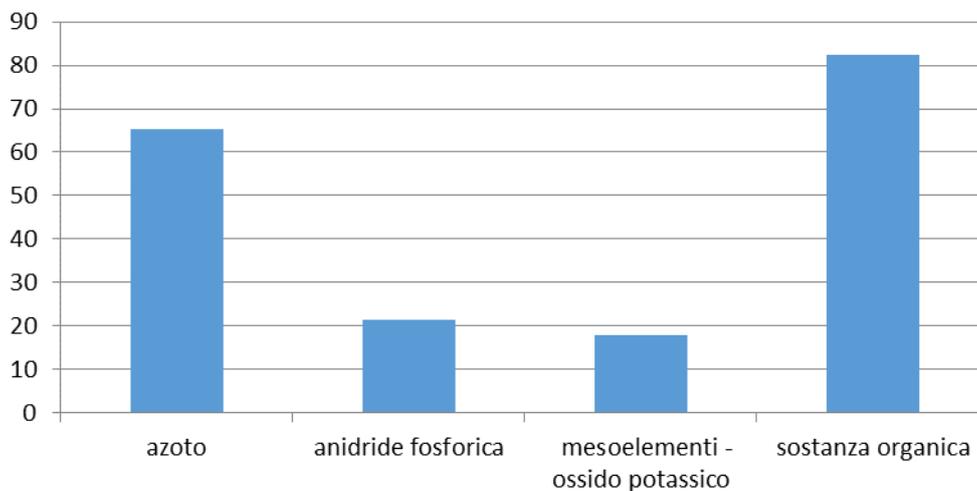
Figura 26. Elementi nutritivi contenuti nei fertilizzanti. Anno 2018 (tonnellate)



Fonte: ISTAT (2019)

Analizzando la quantità di elementi nutritivi distribuiti per ettaro di superficie concimabile si rileva che a livello nazionale sono stati utilizzati nel 2018: 82,5 chilogrammi di sostanza organica; 65,4 di azoto; 21,3 di anidride fosforica; 17,8 di ossido potassico (Figura 27).

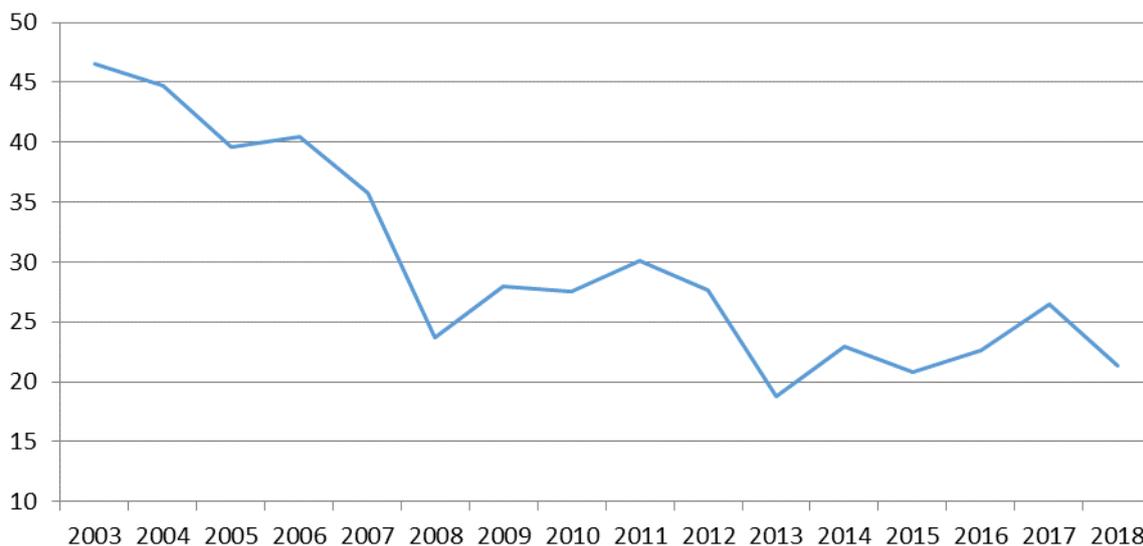
Figura 27. Elementi nutritivi contenuti nei fertilizzanti per ettaro di superficie concimabile, Anno 2018 (chilogrammi per ettaro)



Fonte: ISTAT (2019)

Analizzando la variazione della quantità di anidride fosforica distribuita annualmente sulla superficie concimabile per il periodo 2003-2018 si osserva un trend in diminuzione il cui valore minimo si è raggiunto nel 2013 raggiungendo il valore di 18,8 chilogrammi per ettaro (Figura 28). In particolare si evidenzia come tale quantità sia più che dimezzata partendo da 46,6 chilogrammi per ettaro nel 2003 fino ai 21,3 nel 2018.

Figura 28. Andamento del contenuto di anidride fosforica nei fertilizzanti per ettaro di superficie concimabile – Anni 2003-2018 (chilogrammi per ettaro)

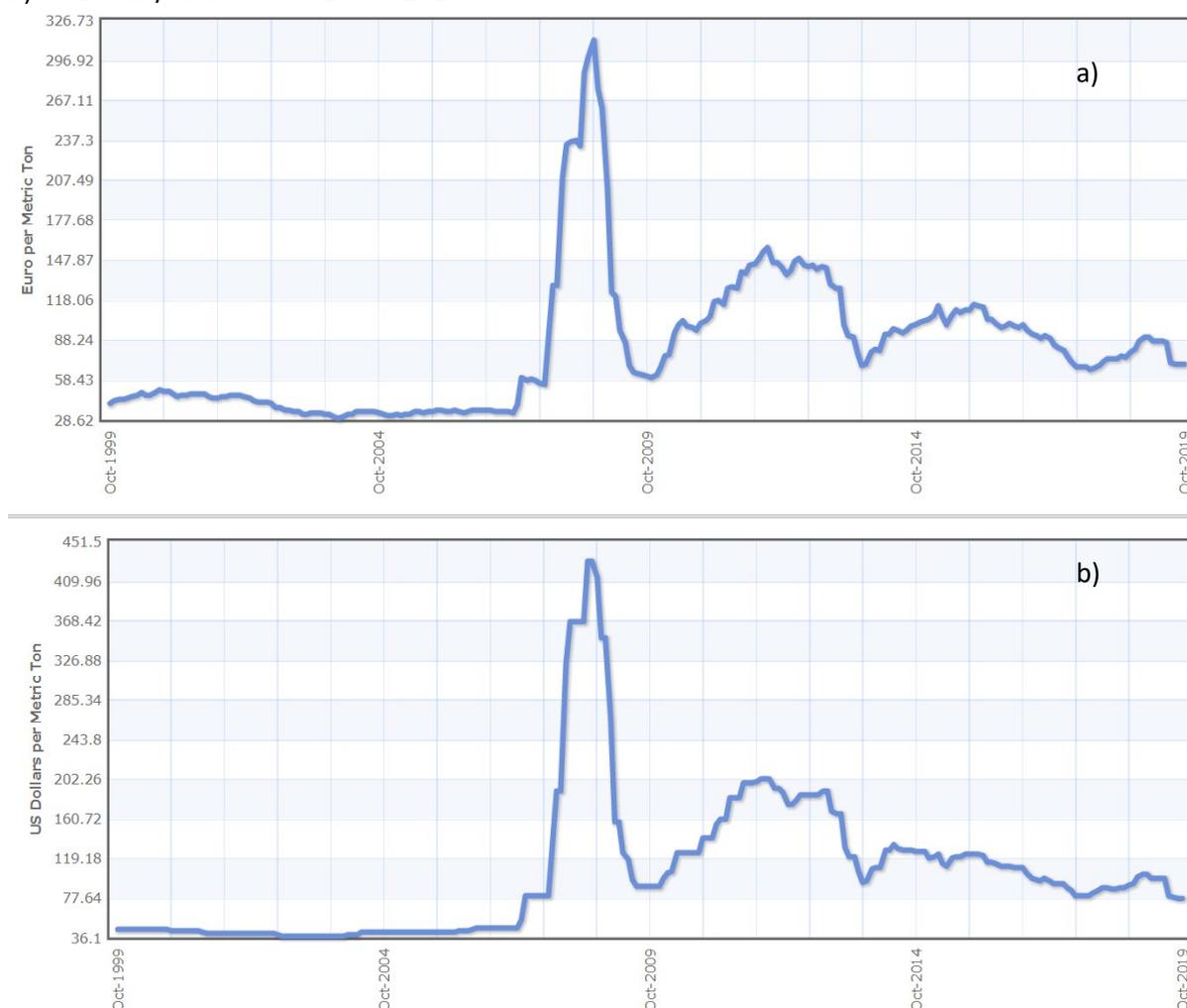


### 3.4 I prezzi

La concentrazione della roccia fosfatica in pochi siti nel mondo, insieme al costante aumento della domanda, all'aumento delle tariffe per l'export di alcuni stati e alla instabile situazione politica di alcuni paesi produttori porta a forti volatilità nel prezzo delle rocce fosfatice, che nel 2008, prevalentemente a causa dell'accisa sull'esportazione del 1000% imposta dall'Egitto e del dazio del 110 – 120% imposto dalla Cina, è addirittura duplicato in meno di un anno. Al picco del 2008 è seguito un crollo durante la recessione globale, benché i prezzi siano nuovamente aumentati dall'inizio del 2009 al 2011, per poi avere un trend negativo fino ad oggi, caratterizzato comunque da una certa variabilità.

Attualmente il prezzo della roccia fosfatica 70% BPL<sup>30</sup> proveniente dal Marocco si attesta su valori di circa 75 - 100 USD/ton FOB (Free On Board) (70 – 90 €/ton FOB), rispetto ai 45 USD/ton del 2006 (Figura 28a). Considerando il trasporto via nave, arriva in Europa a circa 110 €/t CFR (Cost and Freight). Tale roccia contiene circa il 14% di fosforo.

Figura 29. Variazione del prezzo della roccia fosfatica 70% BPL proveniente dal Marocco. a) Euro/ton; b) US Dollari/ton. Periodo 1999 - 2019



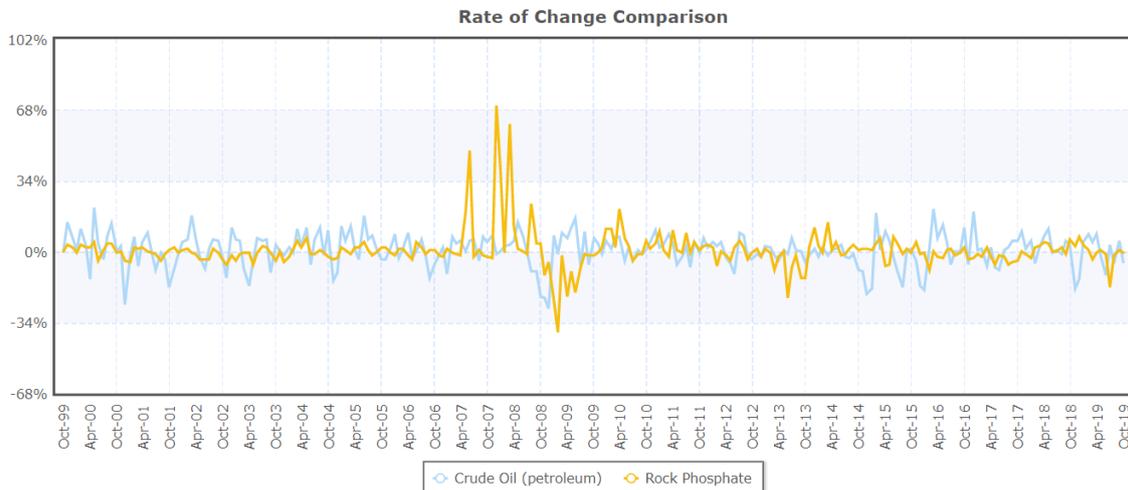
Fonte: [www.indexmundi.com](http://www.indexmundi.com)<sup>31</sup>

<sup>30</sup> 70% BPL equivalente a 32% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, e a 14% P

<sup>31</sup> <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=rock-phosphate&months=180&currency=eur>

Volendo confrontare la variabilità dei prezzi della roccia fosfatica con altre fonti non rinnovabili, si nota come il fosforo abbia subito variazioni anche più critiche del petrolio greggio.

Figura 30 – Confronto tra variazioni del prezzo delle rocce fosfatice e del petrolio. Periodo 1999 - 2019



Fonte: [www.indexmundi.com](http://www.indexmundi.com)

I prezzi del fosforo bianco sono più difficili da reperire ma tuttavia più stabili, oscillando tra 200 USD / kg e 500 USD / kg nel 2016 (Deloitte 2017). I Paesi europei importano anche acido fosforico (fertilizer grade) che ha in media un titolo del 22 -23% di P, e la media del prezzo nel 2019 è stata di 835 USD/t CFR.

L'insieme della scarsità di risorse locali e la variabilità dei prezzi ha determinato l'azione europea e degli Stati membri verso il recupero del fosforo da reflui, rifiuti e scarti.

### 3.4.1 FOCUS Prezzi Fertilizzanti

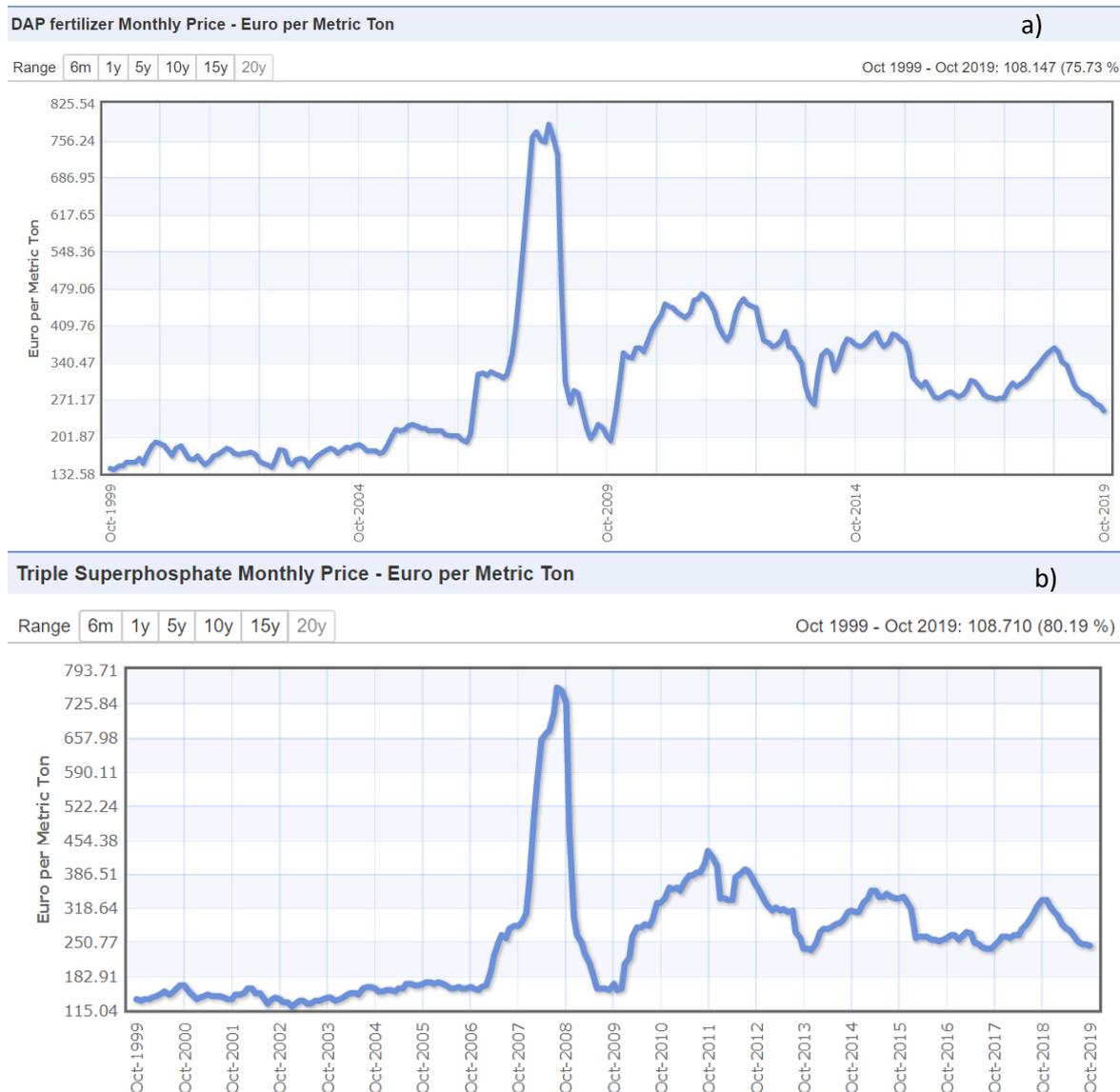
Il prezzo dei fertilizzanti sul mercato internazionale è molto variabile, in funzione della tipologia di fertilizzante (azotati, fosfatico e potassico) e di tutte le logiche di mercato ad esso connesse, quali scarsità delle risorse, incertezza sulla produzione agricola, tensioni commerciali, concorrenza, oltre che politiche ambientali.

Nello specifico parlando dei fertilizzanti fosfatici, i prodotti che maggiormente caratterizzano questa classe sono tre:

- il Perfosfato (chiamato comunemente SSP - single super phosphate - o GSSP, granular single super phosphate, o 19/21 dove 19% è la %P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solubile in acido citrico e 21% è la % di fosforo totale);
- il Superfosfato Triplo o supersolfato concentrato (chiamato comunemente TSP - Triple Super Phosphate – o GTSP – granular Triple Super Phosphate – con un contenuto di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> del 44 – 48%);
- il Diammonio Fosfato (chiamato comunemente DAP o 18-46, dove 18% è il contenuto in N e 46% è il contenuto in P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

La Figura 31 mostra la forte variabilità dei prezzi del DAP e del TSP nel periodo 1999 - 2019.

Figura 31. Variazione dei maggiori fertilizzanti a) Euro/ton DAP; b) Euro/ton TSP. Periodo 1999 – 2019



Fonte: [www.indexmundi.com](http://www.indexmundi.com)

Mentre in prima ipotesi si è sempre pensato che il prezzo dei fertilizzanti fosfatici fosse legato ai cereali (loro maggior campo di utilizzo), i trend di questi ultimi anni hanno dimostrato che, a fronte di un aumento dei prezzi del grano, i prezzi del DAP e del TSP continuano a diminuire. Il 2019 è caratterizzato da un chiaro trend negativo a causa della forte concorrenza tra paesi produttori di fertilizzanti.

La spiegazione degli utenti di settore è quella legata a logiche di puro mercato. Infatti sono sempre meno i produttori di fertilizzanti, a fronte di sempre più importatori che scatenano una guerra di prezzi a livello internazionale, facendo sì che l'Europa e l'Italia diventino un campo da conquistare.

In Tabella 18 si riportano i prezzi medi annui del mercato internazionale del superfosfato, del fosfato diammonico e della roccia fosfatica con le corrispondenti percentuali di  $P_2O_5$ . Il confronto con i costi della materia prima (roccia fosfatica) è importante per valutare la fattibilità economica del recupero di fosforo dal ciclo antropico.

Tabella 18. Costo specifico medio annuale e percentuale di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per il triplo superfosfato (TSP), fosfato di-ammonico (DAP) e rocce fosfatice

Tipologia fertilizzante		Costo specifico (€/ton)				%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
		2010	2015	2017	2019	
TSP	Superfosfato concentrato	288	340	251	265	45
DAP	Fosfato diammonico	377	375	286	278	47
-	Rocce fosfatice	92	108	80	80	32

Fonte: *www.indexmundi.com*

A livello nazionale si evidenzia che, ad oggi, in Italia l'unica produzione rimasta è quella del perfosfato; non esistono più impianti di produzione di DAP o di altri fertilizzanti fosfatici. Questo deriva dal fatto che importando fosforite (contenuto di 32% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) dai paesi del bacino del mediterraneo ad un costo di circa 70 – 80 USD/ton CIF porto Italiano, tale fosforo insolubile e non efficiente (vedi figura 4 paragrafo 1.1.4) viene trasformato in persolfato (SSP) e venduto ad un prezzo medio arrivo distributore a 180 -200 €/ton, ovvero circa 10 € ad unità di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sup>32</sup>.

Tale prodotto però risulta in netto svantaggio con i prodotti di importazione che provengono dal bacino del mediterraneo, quali ad esempio il DAP 18 - 46 che oltre a portare 18 unità di azoto porta anche 46 unità di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ed oggi viene venduto ad un prezzo di circa 270 - 340 €/ton, ovvero 5.8 – 7.4 € ad unità di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sup>33</sup>, prezzo più concorrenziale rispetto a quello di produzione dell'SSP.

In Tabella 19 e in Tabella 20 si riportano i dati relativi alle importazioni italiane di concimi fosfatici dai principali paesi di provenienza, così come estratti dal database del Commercio estero ISTAT per l'anno 2017 e 2018<sup>34</sup>, utilizzando i codici NC (Nomenclatura Combinata). Dall'analisi dei dati è possibile osservare nel periodo 2017 -2018:

- un prezzo medio di circa 80 €/ton per i fosfati di calcio, fosfati alluminio-calcici e crete fosfatice naturali macinate e non macinate
- un prezzo medio di circa 200 €/ton per i concimi fosfatici, minerali o chimici e per i perfosfati con tenore di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pari o superiore al 35%

Anche in Italia si è riscontrato nel 2019 un trend negativo dei prezzi dei fertilizzanti fosfatici, in particolare del DAP. Tale riduzione dei prezzi è imputabile alle importazioni di prodotti dai maggiori paesi produttori del bacino del Mediterraneo, quali Marocco, Tunisia, Giordania, Egitto e Russia, che arrivano in Italia con carichi sempre maggiori per aumentare la propria quota di mercato.

Ovviamente le leggi vigenti in Italia ed i costi di produzione non permettono a produttori Italiani di continuare ad essere sul mercato dove i metodi di produzioni di queste nazioni e gli effetti di scala sono irraggiungibili. Questo effetto potrebbe essere limitato attraverso processi di recupero del fosforo, svincolandosi dalle logiche di mercato internazionale e difendendo il mercato Italiano del fosforo.

<sup>32</sup> Il fertilizzante SSP porta con se circa 20 unità percentuali di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ad un prezzo di vendita di circa 200 €/ton, quindi circa 10 € ad unità di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

<sup>33</sup> Il fertilizzante DAP porta con se circa 46 unità percentuali di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ad un prezzo di vendita di circa 270 - 340 €/ton, quindi, non volendo considerare il valore aggiunto dell'azoto, circa 5.8 – 7.4 € ad unità di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

<sup>34</sup> <https://www.coeweb.istat.it/>.

Tabella 19. Quantitativi e prezzi relativi alle importazioni di concimi fosfatici. Anno 2017

Codice NC8	Descrizione	Paese di provenienza	Quantità (ton)	% importazione	valore €	Prezzo €/ton
25101000	Fosfati di Calcio, Fosfati alluminio-calcici e crete fosfatiche naturali non macinate	Egitto	10.400	21%	709.235	68,2
		Marocco	27.697	56%	2.779.918	100,4
		Algeria	6.155	12%	458.390	74,5
		Altri extra UE	5.000	10%		
25102000	Fosfati di Calcio, Fosfati alluminio-calcici e crete fosfatiche naturali macinate	Algeria	25.352	32%	2.136.290	84,3
		Egitto	31.505	40%	2.126.396	67,5
		Israele	12.511	16%	1.178.228	94,2
		Altri Extra UE	9.250	12%		0,0
31031100	Concimi fosfatici, minerali o chimici e Perfosfati con tenore di pentaossido di difosforo pari o superiore al 35%	Marocco	4.837	15%	1.267.900	262,1
31031900		Tunisia	10.000	31%	1.714.813	171,5
31039000		Egitto	17.507	54%	2.907.768	166,1
		Altri extra UE	n.d.			
<b>Totale</b>			<b>160.214</b>		<b>15.278.938</b>	

Fonte: Elaborazioni dati ISTAT

Tabella 20. Quantitativi e prezzi relativi alle importazioni di concimi fosfatici. Anno 2018

Codice NC	Descrizione	Paese di provenienza	Quantità IMPORT (ton)	% importazione	valore €	Prezzo €/ton
25101000	Fosfati di Calcio, Fosfati alluminio-calcici e crete fosfatiche naturali macinate e non macinate	Egitto	56.675	40%	3.936.003	69,4
25102000		Algeria	53.068	38%	3.581.006	67,5
		Marocco	26.733	19%	2.482.096	92,8
		Israele	4.300	3%	366.653	85,3
31031100	Concimi fosfatici, minerali o chimici e Perfosfati con tenore di pentaossido di difosforo pari o superiore al 35%	Egitto	24.328	30%	3.605.201	148,2
31031900		Israele	16.973	21%	3.837.691	226,1
31039000		Libano	23.145	29%	5.142.623	222,2
		Tunisia	15.519	19%	2.679.693	172,7
<b>Totale</b>			<b>220.741</b>		<b>25.630.966</b>	

Fonte: Elaborazioni dati ISTAT

Si ritiene opportuno evidenziare inoltre che esistono differenti mercati dei fertilizzanti. Oltre infatti al mercato industriale analizzato fin'ora, esiste un mercato a dettaglio, costituito dai consumi privati, o assimilabili ad un utilizzo privato.

In Tabella 21 è riportata una panoramica dei prezzi di alcuni fertilizzanti fosfatici disponibili nel mercato "al dettaglio".

Tabella 21. Costo specifico di differenti fertilizzanti fosfatici in commercio

Tipologia fertilizzante	Prezzo prodotto	Prezzo (€/L)
Fertilizzante specifico a base di fosforo - 250 mL <sup>1</sup> (20% P)	7.7	30.8
Fertilizzante specifico a base di fosforo - 20 L <sup>1</sup> (20% P)	199	9.95
Fertilizzante NPK – 500 mL <sup>2</sup> (NPK = 2 – 7 -4)	7.5	15
Fertilizzante NPK – 10 L <sup>2</sup> (NPK = 2 – 7 -4)	80	8

<sup>1</sup> <https://www.idroponica.it/fertilizzante-c-20/fertilizzanti-e-nutrienti-bio-nova-s-24/bionova-p-20-con-fosforo-25822.html>

<sup>2</sup> [https://www.gardenwest.it/it/fertilizzanti-fioritura-organici/436-biobizz-bio-bloom-500ml-11-5l-10l.html#/volume-10\\_1](https://www.gardenwest.it/it/fertilizzanti-fioritura-organici/436-biobizz-bio-bloom-500ml-11-5l-10l.html#/volume-10_1)

Fonte: [www.indexmundi.com](http://www.indexmundi.com)

Il prezzo a dettaglio è funzione del quantitativo venduto (piccolo o medio consumo), oltre che della formulazione del fertilizzante (es. titolo di fosforo, presenza di altri nutrienti quali azoto e potassio). Dal confronto dei prezzi a dettaglio con i prezzi industriali appare evidente una sostanziale differenza: i concimi per piccolo/medio giardinaggio (es. fiorai, ferramenta, distributori al dettaglio) hanno prezzi molto più alti rispetto ai fertilizzanti industriali, arrivando a valori anche 100 volte maggiori.

Il mercato del recupero del fosforo potrebbe svilupparsi considerando i due mercati differenti, e quindi tenendo in considerazione sia le logiche sia mercato industriale che quelle del mercato "al dettaglio".

## 4 I flussi di fosforo

### 4.1 I paesi esportatori

Nell'attuale sistema economico globale l'agricoltura e la produzione alimentare sono settori fondamentali per qualsiasi nazione (FAO, 2015). L'UE non fa eccezione, e punta ad essere autosufficiente in tale ambito. Inoltre, è da evidenziare che l'UE è un esportatore di prodotti alimentari che rappresentano il 6-7% del valore delle esportazioni totali dell'UE (Eurostat, 2016). Tuttavia, tutte le attività legate al settore agroalimentare non possono svolgersi senza una fornitura di fosforo nel sistema agricolo.

Ad oggi, purtroppo l'Europa è fortemente dipendente dalle importazioni sia di roccia fosfatica, prevalentemente utilizzata nel settore agro-alimentare, oltre chedi fosforo bianco, utilizzato in diverse applicazioni industriali (Tabella 22).

Tabella 22. Stralcio dell'elenco delle materie prime essenziali per l'UE

Materie Prime	Principali produttori mondiali (media 2010–2014)	Principali importatori nell'UE (media 2010–2014)	Fonti di approvvigionamento UE (media 2010–2014)	Tasso di dipendenza dalle importazioni *	Indice di sostituzione EI/SR **	Tasso di riciclo delle materie a fine vita ***
Fosforite	Cina (44%) Marocco (13%) Stati Uniti (13%)	Marocco (31%) Russia (18%) Siria (12%) Algeria (12%)	Marocco (28%) Russia (16%) Siria (11%) Algeria (10%) Finlandia (12%)	88%	1.0/1.0	17%
Fosforo bianco	Cina (58%) Vietnam (19%) Kazakhstan (13%) Stati Uniti (11%)	Kazakhstan (77%) Cina (14%) Vietnam (8%)	Kazakhstan (77%) Cina (14%) Vietnam (8%)	100%	0.91/0.91	0%

(\*) Nel calcolo del rischio di approvvigionamento il "tasso di dipendenza dalle importazioni" tiene conto dell'approvvigionamento mondiale e delle fonti di approvvigionamento effettive dell'UE ed è calcolato come segue: importazioni nette dell'UE / (importazioni nette dell'UE + produzione interna dell'UE).

(\*\*) L'"indice di sostituzione (SI - *Substitution Index*)" misura la difficoltà di sostituire la materia prima calcolata e ponderata in tutte le applicazioni ed è calcolato separatamente per i due parametri "importanza economica (EI - *Economic Importance*)" e "rischio di approvvigionamento (SR - *Supply Risk*)". I valori sono compresi tra 0 e 1, dove il numero 1 indica la meno sostituibile.

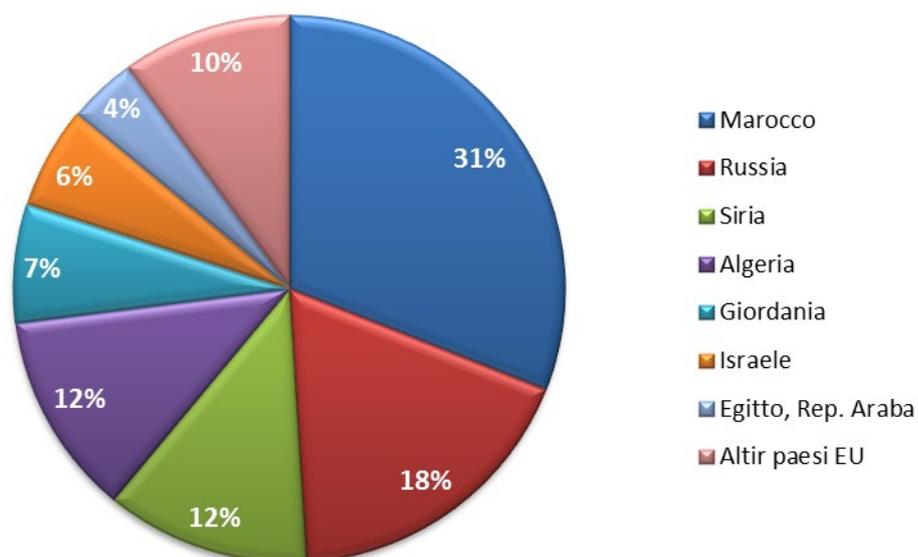
(\*\*\*) Il "tasso di riciclo delle materie a fine vita" misura il rapporto tra il riciclo di rottami metallici e la domanda dell'UE di una determinata materia prima, dove quest'ultima corrisponde all'approvvigionamento dell'UE di materie prime primarie e secondarie.

Fonte: COM(2017) 490 final *Critical raw materials for Europe 2017*

Con oltre 6 milioni di tonnellate all'anno di fosfato di calcio naturale, fosfati di calcio, fosfati di alluminio, gesso naturale e fosfatico importate, nel 2017, l'Europa aveva un tasso di dipendenza dalle importazioni di roccia fosfatica dell'88%. L'esistenza di una produzione interna dell'UE di rocce fosfatice, ed in particolare dalla Finlandia, contribuisce a ridurre il tasso di dipendenza dalle importazioni dalle importazioni di rocce fosfatice.

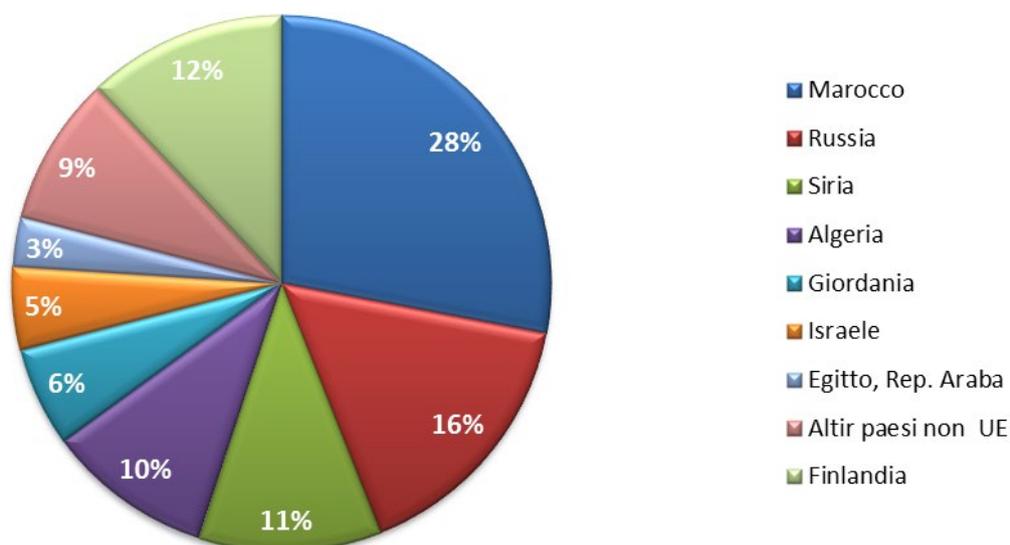
La Cina è il paese più influente in termini di approvvigionamento mondiale di rocce fosfatice e fosforo bianco, il Marocco risulta essere il principale importatore di rocce fosfatice per l'Unione Europea (31% del totale importato), seguito da Russia, Siria ed Algeria (Figura 32 e Figura 33). Le esportazioni dell'UE sono principalmente verso la Norvegia; tuttavia, tali flussi sono trascurabili rispetto alle importazioni.

Figura 32. Importazione UE di roccia fosfatica media periodo 2010-2014



Fonte: Dati Eurostat COMEXT. Importazione totale: 6.4 mln di tonnellate

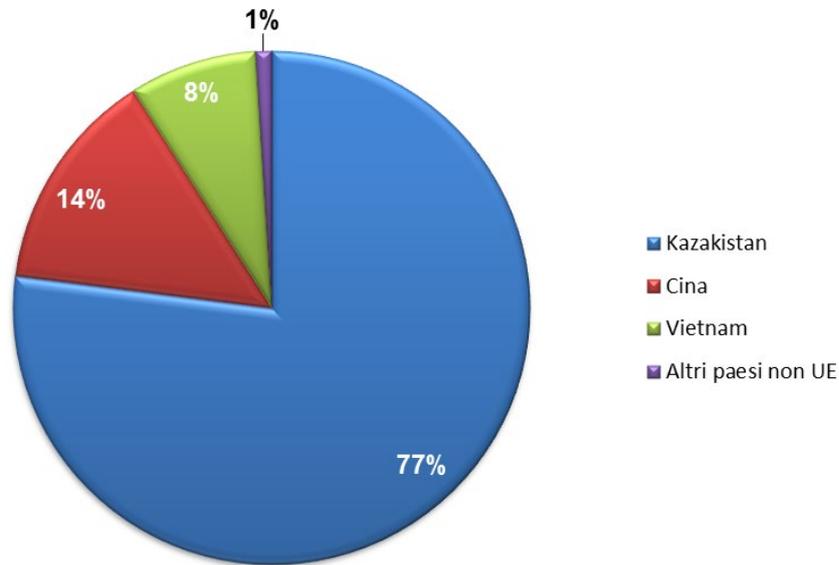
Figura 33. Approvvigionamento UE (produzione nazionale + importazioni) di roccia fosfatica, media periodo 2010-2014.



Fonte: Smol, M (2019)

Per quel che concerne il fosforo bianco, con circa 46.215 tonnellate all'anno, l'Europa ha un tasso di dipendenza dalle importazioni del 100%. Ancora una volta, anche se la Cina è il maggiore produttore mondiale di fosforo bianco, il Kazakistan risulta essere il maggiore esportatore di fosforo bianco, coprendo il 77% del fabbisogno europeo, seguito da Cina e Vietnam (Figura 34).

Figura 34. Importazioni UE di fosforo bianco, media periodo 2010-2014



Fonte: Dati Eurostat COMEXT (2016). Importazioni totali 46.215 tonnellate.

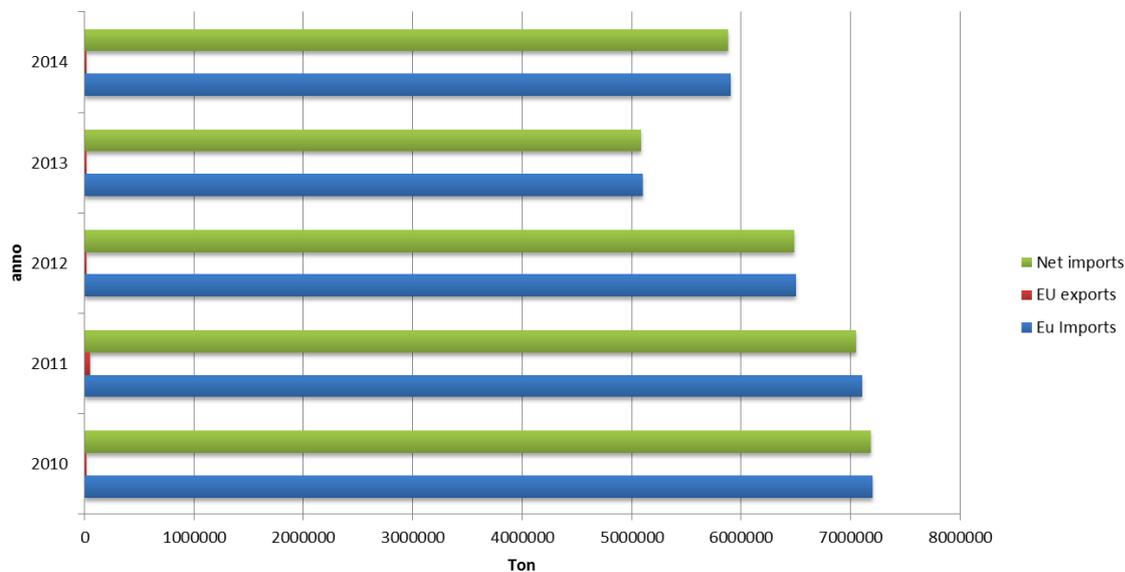
Dall'analisi dei dati inoltre emerge che la roccia fosfatica non può essere sostituita (SI - Substitution Index = 1.0), il fosforo bianco ha un Indice di sostituzione di 0.91, in quanto può essere ottenuto da materie prime secondarie.

Deloitte (2017) evidenzia che i dati pubblicati in merito alle risorse di fosforo spesso non considerano eventuali stoccaggi di P presenti in prodotti semilavorati, e il potenziale di estrazione dai sottoprodotti/rifiuti ottenuti a valle della catena di valore del fosforo e da differenti materie prime secondarie. Pertanto, è necessario valutare più nel dettaglio, con studi e ricerche di settore, la dipendenza dell'UE dall'approvvigionamento esterno di fosforo.

#### 4.2 Import-Export a livello europeo

Al netto delle poche esportazioni, prevalentemente verso la Norvegia, l'EU è un paese importatore di roccia fosfatica, per un totale di circa 6 milioni di tonnellate all'anno (Figura 35).

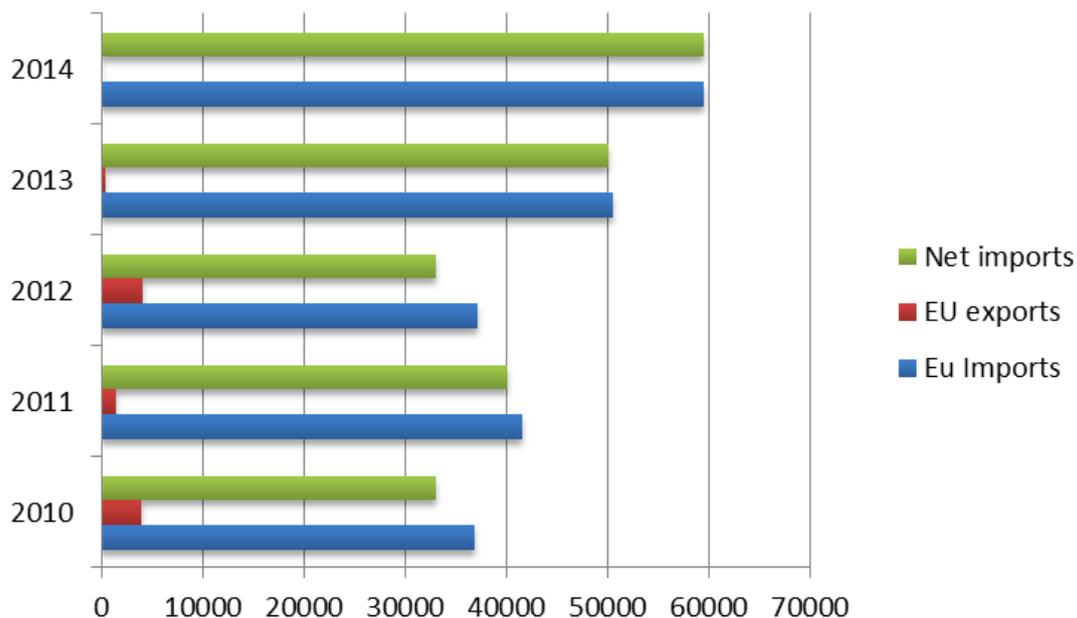
Figura 35. Flussi EU relativi al commercio di roccia fosfatica



Fonte: Dati Eurostat COMEXT (2016).

Inoltre l'Europa è divenuta sempre più dipendente dal commercio estero per quel che riguarda l'approvvigionamento di fosforo bianco (Figura 36).

Figura 36. Flussi EU relativi al commercio Fosforo Bianco



Fonte: Dati Eurostat COMEXT (2016).

Va inoltre segnalato che nel periodo 2010-2014, la Giordania e il Marocco hanno istituito tasse sull'esportazione (nell'ordine del 5% e 7,5%) per i principali gruppi di prodotti contenenti fosfato di calcio naturale. La Cina ha istituito una tassa del 35%. Nello stesso periodo, il Vietnam ha variato la tassa sull'esportazione tra il 10% e il 40%. Infine, la Russia ha istituito un obbligo di licenza e una tassa sull'esportazione del 6.5% nel periodo 2010-2011.

Analogamente, una serie di tasse sono state istituite anche per l'esportazione del fosforo bianco. Ad esempio, nel 2009 la Cina ha imposto una sovratassa del 75% sull'esportazione del fosforo bianco, ma ha mantenuto in media una tassa di esportazione del 15%. Il Marocco ha applicato una tassa del 7,5% sull'esportazione del fosforo bianco mentre il Vietnam del 5%. Per quanto riguarda l'Egitto, durante il periodo della primavera araba del 2011, ha applicato una tassa per l'esportazione non inferiore al 100% come componente del prezzo totale di fosforo, roccia fosfatica e fertilizzanti. Infine la Russia e il Brasile hanno richiesto delle licenze per commercializzare il fosforo bianco.

#### 4.3 Import-Export a livello italiano

Per il calcolo dei flussi di import-export italiani, nella sezione del Commercio Estero del database ISTAT<sup>35</sup> è possibile effettuare una "consultazione tematica" per "merce" con la "Nomenclatura Combinata". Selezionando i codici NC8 dove è presente il fosforo e i suoi derivati è possibile ottenere dati mensili e/o annuali.

Figura 37. Coeweb - Statistiche del commercio estero.



Va precisato che secondo la classificazione NC8 alcuni composti contenenti fosforo sono raggruppati in categorie insieme ad altri composti non contenenti fosforo - ad esempio il tribromuro di fosforo, che fa parte del codice 28275900 insieme ad altri composti - pertanto si rende sin d'ora necessario un ulteriore approfondimento dei flussi, anche al fine di individuare le quantità di P impiegate in ogni composto. Inoltre, altri composti, pur se chimicamente identici, sono raggruppati secondo più codici in base all'unità di vendita: è il caso di alcuni concimi, per i quali c'è un codice NC8 per le confezioni fino a 10 kg e un altro per le confezioni oltre i 10 Kg o la vendita sfusa. In tal caso per avere la quantità totale bisogna raggruppare i codici.

In Tabella 23 sono riportati i flussi di import – export italiani dei vari materiali e sostanze contenenti fosforo.

<sup>35</sup> <https://www.coeweb.istat.it/>

**Tabella 23.** Flussi italiani di import –export – Anno 2017

Codice NC8	Descrizione	import (t)	export (t)	Valore acquisto (€)	Valore vendita (€)	Costo €/ton	Prezzo €/ton
<b>25101000</b>	Fosfati di calcio, fosfati alluminio-calcici e crete fosfatiche, naturali (non macinati)	58106	56	4922405	114148	84,71	2025,09
<b>25102000</b>	Fosfati di calcio, fosfati alluminio-calcici e crete fosfatiche, naturali (macinati)	102625	3401	7941851	272952	77,39	80,26
<b>28047000</b>	Fosforo rosso	6336	0	18025058	0	2845,05	0,00
<b>28091000</b>	Anidride fosforica p2o5	1268	181	2274037	10043	1793,16	55,49
<b>28092000</b>	Acido fosforico e acidi polifosforici	129494	3987	61668969	5077589	476,23	1273,44
<b>28111910</b>	Acidi inorganici (escl. cloruro di idrogeno (acido cloridrico), acido clorosolfonico, acido solforico, oleum, acido nitrico, acidi solfonitrici, acido fosforico, acidi polifosforici, acidi borici, fluoruro d'idrogeno (acido fluoridrico), bromuro di idrogeno (acido bromidrico) e cianuro di idrogeno (acido cianidrico))	0	15	0	31633	0,00	2046,12
<b>28121200</b>	Ossicloruro di fosforo	0	0	0	0	0,00	0,00
<b>28121300</b>	Tricloruro di fosforo	0	0	0	0	0,00	0,00
<b>28121400</b>	Pentacloruro di fosforo	0	0	0	0	0,00	0,00
<b>28139010</b>	Solfuri di fosforo, incl. il trisolfuro di fosforo commerciale	5	0	35602	0	7862,63	0,00
<b>28275900</b>	Tribromuro di fosforo (Bromuri e ossibromuri, esclusi quelli di sodio, potassio e mercurio)	2658,384	542,294	3088501	1087461	1161,80	2005,30
<b>28351000</b>	Ipofosfiti e fosfiti organici	4247	985	7913975	3404521	1863,46	3455,64
<b>28352200</b>	Fosfati e idrogenofosfati di sodio	2271	737	4350387	968848	1915,23	1314,12
<b>28352400</b>	Fosfati e idrogenofosfati di potassio	9460	208	10896765	332077	1151,87	1600,15
<b>28352500</b>	Fosfato dicalcico	26531,032	2556	11935685	1216574	449,88	475,89
<b>28352600</b>	Fosfati e idrogenofosfati di calcio	7312	6767	5487531	4395256	750,51	649,50
<b>28352910</b>	Fosfato di triammonio	31	553	59860	89900	1932,78	162,57
<b>28352930</b>	Fosfati di trisodio	987	13	1031528	31562	1044,85	2411,34
<b>28352990</b>	Altri fosfati	2498	295	4595465	883357	1839,79	2996,27
<b>28353100</b>	Trifosfato di sodio	7330	242	7198504	360169	982,09	1487,05
<b>28353900</b>	Fosfati e idrogenofosfati di sodio	2271	737	4350387	968848	1915,23	1314,12
<b>28353900</b>	Polifosfati (escl. trifosfato di sodio)	16174	1426	22582920	2759807	1396,28	1935,18
<b>29191000</b>	Fosfato di tris2,3 dibromopropile	2	124	39680	675646	20142,13	5442,61

**Tabella 23.** Flussi italiani di import –export – Anno 2017

<b>29199000</b>	Fosfati organici (Esteri fosforici e loro sali, compresi i lattofosfati; loro derivati alogenati, solfonati, nitrati o nitrosi (escl. fosfato di tris(2,3-dibromopropile))	16275	3406	39454713	14899425	2424,22	4374,56
<b>29201100</b>	Paration ISO e parationmetile ISO metileparation	9	50	595	638	66,11	12,76
<b>29201900</b>	Esteri tiofosforici e loro sali e loro derivati, escluso parathion	377	170	1381448	201759	3660,23	1188,94
<b>29202100</b>	Fosfito di dimetile	6	0	18209	0	3064,97	0,00
<b>29202200</b>	Fosfito di dietile	1	0	14401	0	10604,57	0,00
<b>29202300</b>	Fosfito di trimetile	126	0	366268	0	2906,50	0,00
<b>29202400</b>	Fosfito di trietile	239	0	802980	0	3354,77	0,00
<b>29202900</b>	Esteri di fosfito e loro sali, loro derivati alogenati. solfonati, nitrati e nitrosi	4351	1440	12723189	5572991	2924,36	3870,14
<b>29241200</b>	Fosfamidon ISO, Monocrotophos ISO, Fluoroacetamide ISO	2	0	8810	151	5228,49	25166,67
<b>29313100</b>	Metilfosfonato di dimetile	0	2	0	12174	0,00	7690,46
<b>29313200</b>	Dimetil propilfosfonato	113	0	506940	0	4486,27	0,00
<b>29313300</b>	Dietil etilfosfonato	98	0	463366	0	4735,18	0,00
<b>29313400</b>	Sodio 3-(triidrossilil)propil metilfosfonato	1	0	20441	0	33237,40	0,00
<b>29313500</b>	2,4,6-tripropil-1,3,5,2,4,6-triossatrifosfinan 2,4,6-triossido	24	0	20261	0	844,21	0,00
<b>29313600</b>	(5-etil-2-metil-2-ossido-1,3,2-diossafosfinan-5-il)metil metil metilfosfonato	10	0	2035	0	210,42	0,00
<b>29313700</b>	Bis[(5-etil-2-metil-2-ossido-1,3,2-diossafosfinan-5-il)metil]metilfosfonato	0	0	0	0	0,00	0,00
<b>29313800</b>	Sale di acido metilfosfonico ed (amminoimminometil)urea (1 : 1)	887	4	1050860	15676	1185,00	3499,11
<b>29313920</b>	Difluoruro metilfosfonico	0	2	0	3770	0,00	1675,56
<b>29313930</b>	Dicloruro metilfosfonico	0	0	0	0	0,00	0,00
<b>29313950</b>	Acido etidronico (acido 1-idrossietano 1,1-difosfonico) e suoi sali	11306	3957	9712105	4906483	859,02	1239,89
<b>29313960</b>	Acido (nitrilotrimetanedil)trifosfonico, acido {[etan-1,2-diilbis[nitrilobis(metilen)]]tetrachisfosfonico, acido [{2-[bis(fosfonometil)amino]etil}amino]metil}bifosfonico, acido {[esan-1,6-diilbis[nitrilobis(metilene)]]tetrachisfosfonico, acido {[(-i]	3269	2866	2833188	3386844	866,67	1181,77

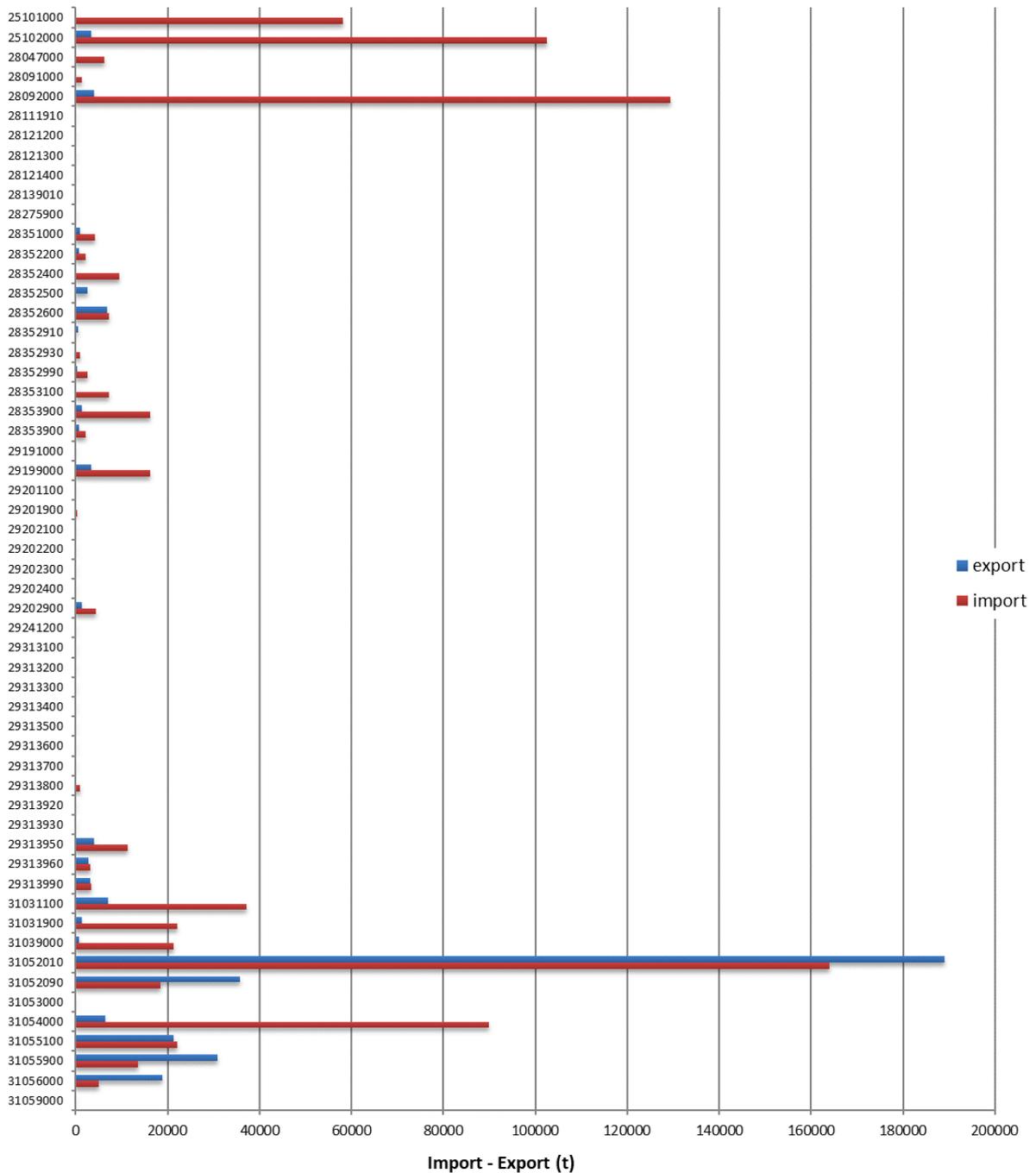
**Tabella 23.** Flussi italiani di import –export – Anno 2017

<b>29313990</b>	Composti chimici separati definiti derivati organofosforici, n.n.a.	3451	3257	20558166	7426281	5957,52	2280,26
<b>31031100</b>	Perfosfati con P2O5 pari o superiore a 35%	37155	7003	8974123	1879572	241,53	268,41
<b>31031900</b>	Perfosfati (esclusi i prodotti con tenore di pentaossido di difosforo (P2O5) pari o superiore a 35%, in peso, o in tavolette o forme simili, o in imballaggi di peso lordo inferiore o uguale a 10 kg)	22219	1408	2735183	432111	123,10	306,84
<b>31039000</b>	Concimi chimici fosfatici escl. perfosfati	21404	742	2809672	279175	131,27	376,03
<b>31052010</b>	Concimi NPK, NP o PK, vari formati	164086	189039	66290358	76130629	404,00	402,73
<b>31052090</b>	Concimi NPK, NP o PK, vari formati	18423	35701	8683838	20864922	471,36	584,44
<b>31053000</b>	Idrogenoortofosfato di diammonio	0	0	0	0	0,00	0,00
<b>31054000</b>	Fosfato monoammonico, anche in miscuglio con l'idrogenoortofosfato di diammonio (fosfato diammonico), escl. quello presentato in tavolette o forme simili o in imballaggi di peso lordo <= 10 kg)	89856	6429	36288087	2105221	403,85	327,47
<b>31055100</b>	Concimi, minerali o chimici, contenenti nitrati e fosfati (escl. diidrogenoortofosfato di ammonio (fosfato monoammonico) e idrogenoortofosfato di diammonio (fosfato diammonico) nonchè quelli presentati in tavolette o forme simili o in imballaggi di peso lordo =< 10 kg)	22186	21333	6834018	6609925	308,03	309,84
<b>31055900</b>	Concimi NPK, NP o PK, vari formati	13501	30941	7814778	15587197	578,82	503,77
<b>31056000</b>	Concimi NPK, NP o PK, vari formati	5118	18825	3476036	8121953	679,16	431,45
<b>31059000</b>	Concimi NPK, NP o PK, vari formati	0	0	0	0	0,00	0,00

Fonte: commercio estero COEWEB- ISTAT (2017)

Graficamente appare subito evidente che i concimi fosfatici siano il flusso più importante, sia in entrata che in uscita dal nostro paese, ma anche il fatto che dipendiamo essenzialmente dalle importazioni (Figura 38).

Figura 38. Importazioni ed esportazioni italiane di materiali e sostanze contenenti fosforo in funzione del codice NC8.



Fonte: commercio estero COEWEB- ISTAT (2017)

Relativamente ai Paesi da cui dipendono i flussi di import (Tabella 24) ed export (

Tabella 25) italiani si nota come a parte casi specifici (codici NC8 28352990; 28353100; 28353900; 31052010; 31055100), ci sia un dipendenza extra EU per l'importazione di materiale e sostanze contenenti fosforo. Per quanto riguarda l'esportazione, l'Italia esporta in via prevalente verso Paesi extra EU, eccezion fatta per i codici NC8 31052090, 31054000 e 31055100.

Tabella 24. Import per provenienza geografica dei principali flussi di fosforo – Anno 2017

Paese	25101000	25102000	28092000	28352500	28353900	29199000	31052010	31052090	31054000	31055100	31055900	31056000
Algeria		44157										
Austria			357		560	145	10169	1247	24	1461		550
Belgio		10	11336		684	64	51584	220	8192	16155	568	
Bosnia- Erzegovina			47									
Bulgaria				66				6		7		
Canada					51			72				
Cina			1044	820	4124	3488			6324	249	5738	998
Croazia							33176			201		
Egitto	24909	44605										
Emirati Arabi											1464	
Francia			1544	654	1599	515	7518	2008		107	1708	1594
Germania			3517	869	5201	4725	26233	1601	31	1827	57	612
Giappone						21	282				1	6
Giordania							43					
Grecia							415					
India					22	38						
Israele		12511	15031				3125	183	1702			916
Libano			17997									
Lituania							264		512		189	
Marocco	33197		16168	2438			3300		39026			
Paesei Bassi		18	397	483	119	3691	16437	4038	227	156	4	17
Polonia			535		104	14	24	192		5		120
Regno Unito			3	54	40	346		10			8	156
Rep. Ceca			4772		2953							
Ruanda									96			
Russia							7834	6999	33483		1900	
Serbia			2440	331			47				47	
Slovenia			569	4479	397				78			
Spagna		17	616	986	267	3114	3388	1282	53	14	513	143
Stati Uniti			40	1009	33		77	521	103			2
Svizzera			1008					8				
Taiwan			48			103						
Tunisia		1300	51963	9835						2000	1300	
Turchia				4502			22	9				
Altri Paesi	0	7	62	5	19	11	126	26	5	4	4	4
Extra EU	58106	102625	129494	26531	16173	16275	164086	18422	89856	22186	13501	5118
Paesi EU	0	52	27196	12426	11929	12619	157165	17627	42603	19937	4997	3195

Fonte: commercio estero COEWB- ISTAT (2017)

Tabella 25. Export per provenienza geografica dei principali flussi di fosforo – Anno 2017

Paese	25101000	25102000	28092000	28352500	28353900	29199000	31052010	31052090	31054000	31055100	31055900	31056000
Albania				177	6		319	94				2
Algeria				1344	3	40	8472	5903			7123	7502
Arabia Saudita							657	2				
Argentina						37	12					
Armenia							403	27				
Australia							4	12			4	7
Austria	8		688	2	13	68	3000	338		74	135	436
Bangladesh							3				4604	
Belgio					6	8	53	48			44	
Birmania								168				
Bosnia-Erzgovina				48	12		1243	156	24	100		
Brasile			11		13	115	22732	367			581	94
Bulgaria			24		16	3	6062	2077	1689	2004	6713	967
Camerun					14							
Cile							1	1		250	1	114
Cina				4	99	177	2699	666			143	281
Cipro					1		1746	2		5782	220	
Colombia							642	35				3
Corea del Sud					30		479	195		5		3
Costa d'Avorio					3		240					
Costa Rica							135	40			390	
Croazia					33	40	6635	789	9	102	15	769
Cuba					63							
Ecuador							379	48				
Egitto					2		952	363	6	1	20	58
Emirati Arabi						141				4	7	
Estonia					7			1			12	3
Finlandia						19	3			1		
Francia		70	223	141	14	596	998	450	2	2	181	152
Georgia							89	244			14	1681
Germania			1525	324	241	146	353	408		14	737	15
Ghana							27500					
Giordania			6				1015	166			5	3
Grecia			1		9	21	25168	1240		11997	714	533
Guatemala							110	13				9
Hong Kong					8		8	3			1	
Honduras			10				27	10				1
India			1		12	1	268	159		2	20	

Paese	25101000	25102000	28092000	28352500	28353900	29199000	31052010	31052090	31054000	31055100	31055900	31056000
Iraq						1	865	4		48	3	1
Irlanda						25						
Islanda			216					11				
Israele					4		288			1		
Kazakhstan							117	70			2	
Kosovo							115	201				
Kuwait			1				111	16				
Lettonia					1		48	13			6	
Libano					13		7466	78	25		6	3
Libia							480	3				
Lituania							170	13				15
Lussemburgo					6			44				
Malesia							4176	148			1615	
Maldive							132					
Malta					5		181	60		1		
Marocco					17		622	1330			35	1245
Messico					11	83	227	106		1	7	10
Nicaragua			15		13		433	75				7
Oman							576					15
Paesi Bassi					9	700	15				22	
Pakistan							144					
Perù							5			197	11	8
Polonia			144		52	108	236	195			134	100
Portogallo					10	35	77	28	4	7	40	19
Quatar							559					
Regno Unito			36	54	165	94		42				
Rep.Ceca			163		8		14					5
Rep.Dominicana							157	48			6	1
Rep. Isl. Iran					14		1959	346			47	75
Rep..Moldova							213	14				
Romania			13	133	40	147	858	6777	4254	64	1612	17
Russia			33		8	46	282	242		59		1
Serbia					11		318	6				
Siria			16				993	196			3	10
Slovacchia			24	24	2		46	14			14	21
Slovenia			154		33	11	11400	6143	313		117	1353
Spagna			121	24	54	294	2835	249			273	167
Sri Lanka	48						22				305	
Stati Uniti					10	11	98	13				
Sudafrica			307				27500					
Svizzera		3326	10	276	8	315	131	219		2	10	17
Taiwan						2	16	12				1

Paese	25101000	25102000	28092000	28352500	28353900	29199000	31052010	31052090	31054000	31055100	31055900	31056000
Thailandia					3		202	60				
Tunisia			6			6	182	105				2
Turchia			108		58	38	5325	3606		15	455	2729
Ucraina			3			18	795	208			23	2
Ungheria					164	36	1414	796	90	87	2757	114
Uruguay							533	4		499		
Vietnam					53		1573	41			1711	206
Altri Paesi	-	5	128	5	43	23	2722	139	12	14	42	47
Extra EU	56	3401	3987	2556	1420	3405	189038	35700	6428	21333	30940	18824
Paesi EU	0	3397	3607	1206	1024	2782	70209	24490	6391	20322	14247	7447

Fonte: commercio estero COEWB- ISTAT (2017)

## 5 La fotografia del mercato italiano

Il presente paragrafo mira a delineare una prima fotografia del mercato del fosforo in Italia mediante un campione «rilevante» rappresentato dalle imprese aderenti alla Piattaforma Italiana del Fosforo, o ad essa collegate mediante le rispettive associazioni di categoria. Gli aspetti indagati riguardano, oltre alla profilazione, le applicazioni del fosforo, l'uso annuale, i prezzi di acquisto e vendita, la localizzazione degli impianti di trattamento, la gestione dei rifiuti e dei sottoprodotti nonché le criticità del settore.

### 5.1 Metodologia

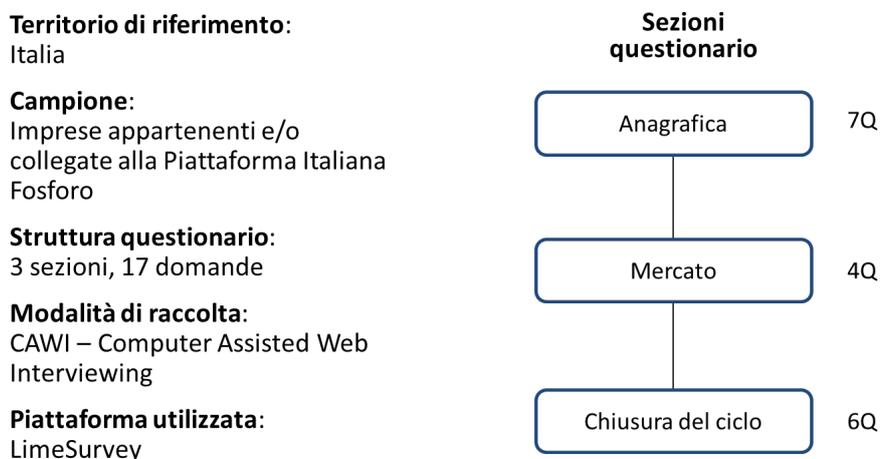
Per raggiungere l'obiettivo sopracitato, è stata svolta un'indagine di tipo quantitativo su scala nazionale che ha visto la somministrazione di un questionario con il metodo CAWI (Computer Assisted Web Interviewing) alle suddette imprese.

La ricerca quantitativa utilizza pertanto un campione costruito secondo un criterio di campionamento non probabilistico per ragioni di accessibilità e tempestività (Troilo, Molteni 2003). Il campionamento non probabilistico presenta il duplice svantaggio di non escludere l'eventualità di distorsioni nel processo di formazione dei dati e di non permettere una valutazione analitica dell'errore di stima ma presenta vantaggi di costo e di tempo (Troilo, Molteni 2003). Tale scelta è in linea con l'obiettivo della ricerca di presentare una prima fotografia del mercato del fosforo in Italia.

La richiesta di partecipazione è stata quindi inviata per mail ai partecipanti della piattaforma– 62 diverse organizzazioni per un totale di 103 mail – chiedendo alle associazioni di categoria di farsi promotrici della rilevazione presso i propri associati. Durante il periodo di raccolta dei dati (17/10/2019 - 15/11/2019) è stata inoltre svolta un'attività di supporto alla compilazione.

Il questionario, strutturato in 3 sezioni, ha indagato ad ampio raggio i diversi aspetti del mercato e della chiusura del ciclo del fosforo, con domande a risposta chiusa e a risposta aperta con un tempo medio per la compilazione stimato intorno ai 15 minuti complessivi. La Figura 39 mostra una sintesi dell'impianto della ricerca.

Figura 39. Impianto della ricerca



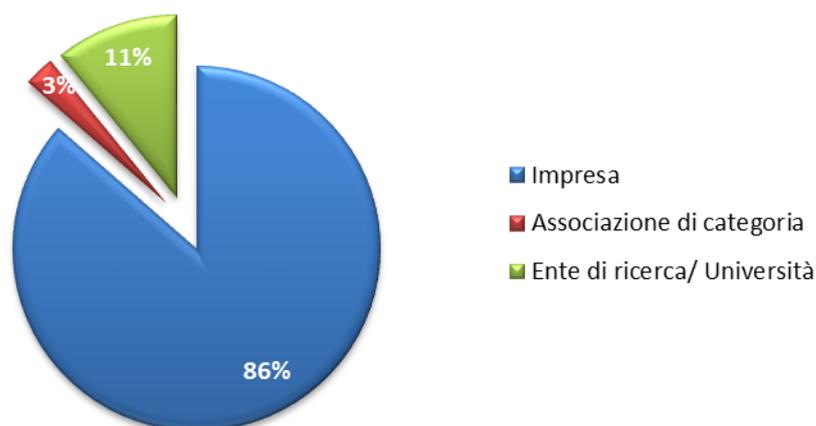
Fonte: Elaborazione ENEA

I dati sono stati estratti dalla piattaforma LimeSurvey in un file excel con il vantaggio di non dover trascrivere manualmente le risposte, riducendo così il rischio di errore. I dati sono quindi stati controllati e il database aggiornato eliminando quelle imprese con tempi di risposta eccessivamente ridotti e risposte non congruenti (es. nome azienda "xyz").

Le risposte al questionario sono state analizzate ricorrendo a tecniche di analisi statistica univariata e multivariata. I dati presentati nel proseguo fanno riferimento alle 37 organizzazioni che hanno preso parte all'indagine compilando correttamente il questionario. Va comunque sottolineato che sono stati raccolti anche 19 questionari parziali.

In termini di tipologia di organizzazione, le risposte sono state fornite quasi esclusivamente da imprese (32 risposte); seguono Università con attività sperimentali in merito e/o spin off (4 risposte) e un'associazione di categoria (Figura 40).

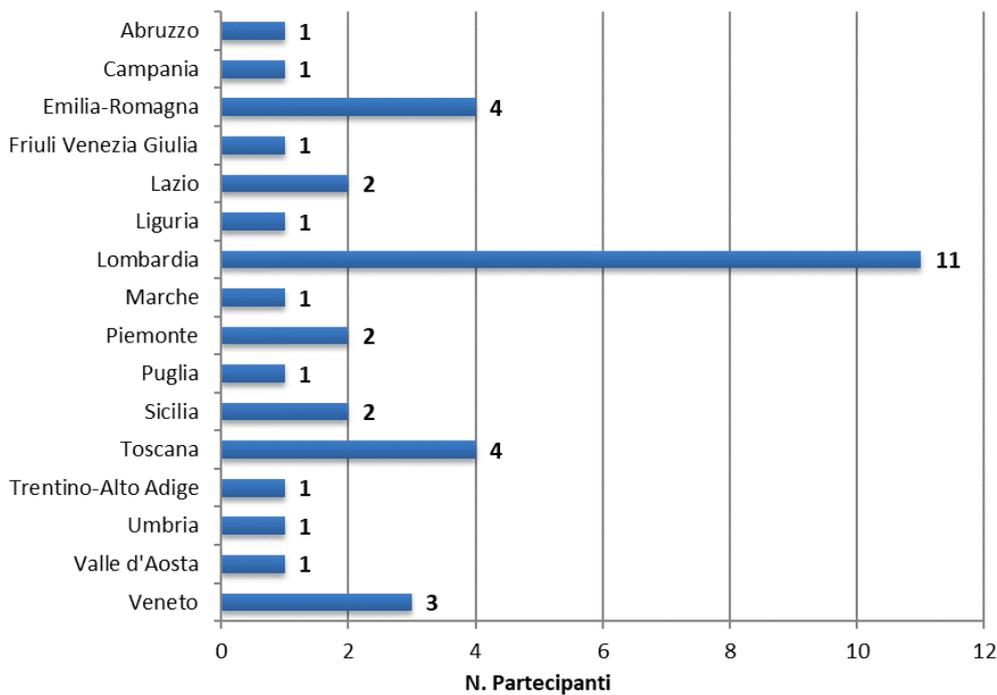
Figura 40. Tipologia di organizzazione



Fonte: Elaborazione dati ENEA

In termini di localizzazione, come mostrato in Figura 41, i rispondenti si concentrano principalmente nel centro-nord Italia ed in particolare in Lombardia (29,7%), Toscana ed Emilia-Romagna, entrambe al 10,8%.

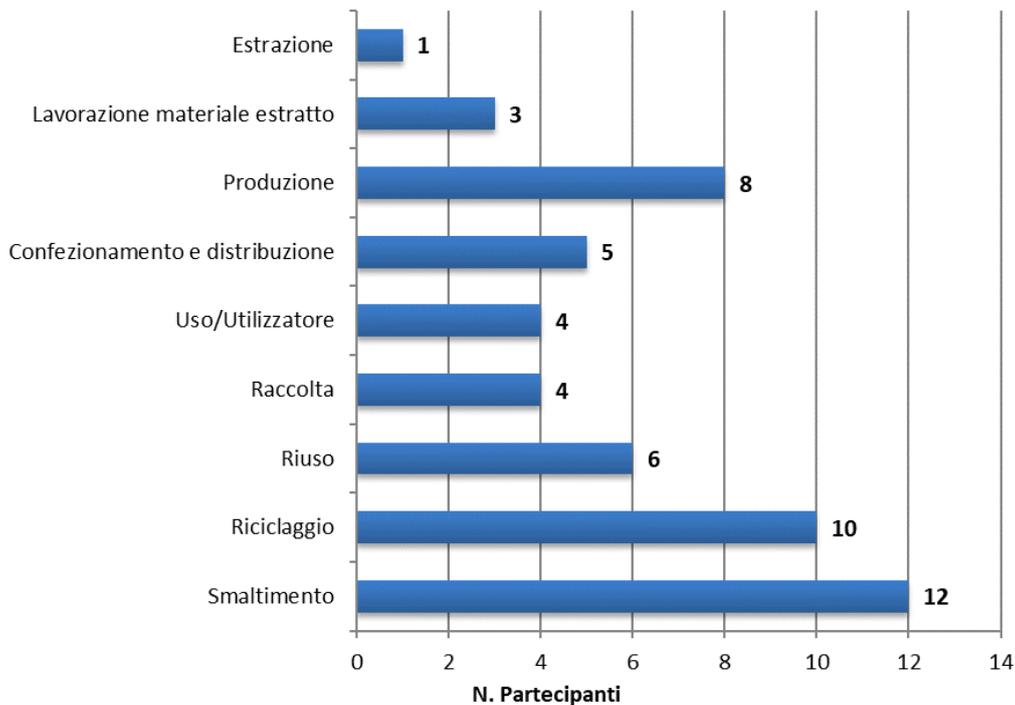
Figura 41. Provenienza geografica rispondenti



Fonte: Elaborazione dati ENEA

Con riferimento al posizionamento sulla catena del valore (Figura 42), si nota come i rispondenti appartengano per lo più alla categoria “Smaltimento” (12 risposte) e “Riciclaggio” (10 risposte).

Figura 42. Posizionamento catena del valore rispondenti



Fonte: Elaborazione dati ENEA

## 5.2 Risultati

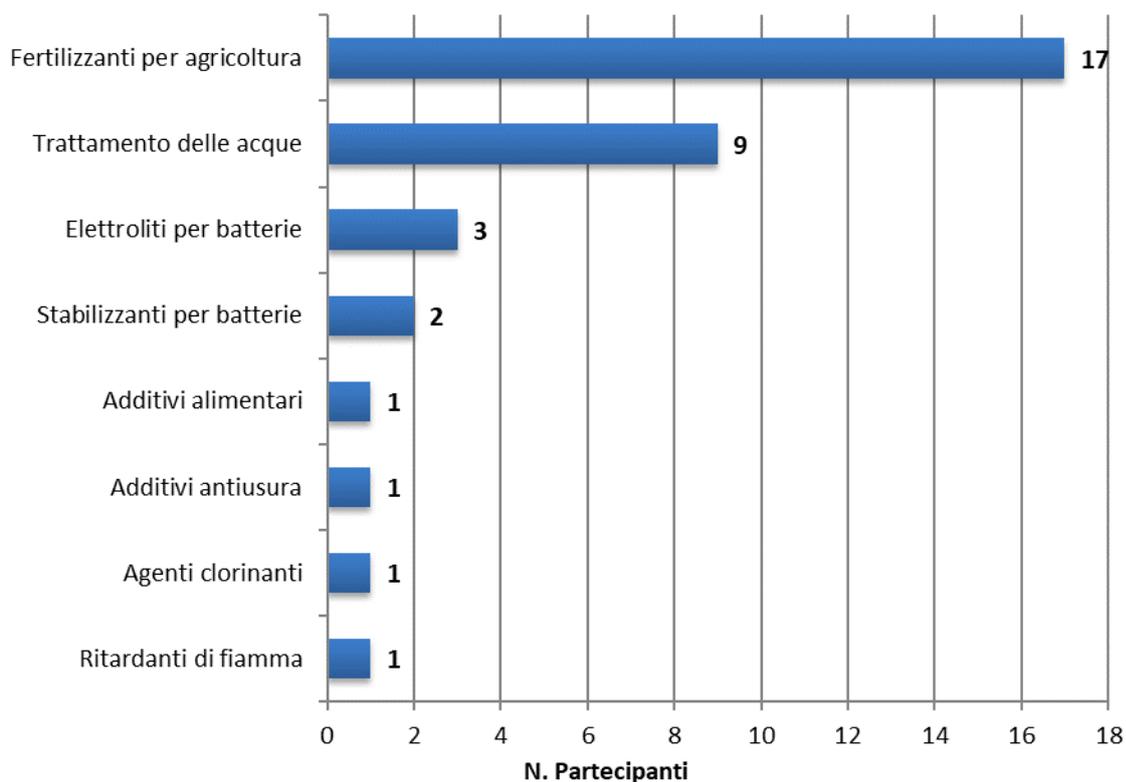
Il presente paragrafo illustra i risultati del questionario diffuso al campione. Pur avendo una “composizione mista” del campione rispondente (Figura 40), per semplicità nella trattazione dei risultati verrà esteso il termine impresa anche alle altre categorie. Nel dettaglio gli aspetti indagati riguardano:

- Il mercato di riferimento e le applicazioni (anche potenziali) del fosforo trattato nelle attività d’impresa;
- Localizzazione degli impianti di produzione e trattamento;
- Origine del fosforo in caso di recupero e/o smaltimento;
- Gestione dei rifiuti ed eventuali sottoprodotti generati dall’attività d’impresa;
- Criticità del settore

### 5.2.1 Il mercato di riferimento e le applicazioni (anche potenziali) del fosforo

Come mostrato in Figura 43, quasi la metà dei rispondenti (45,9%) dichiara il mercato dei fertilizzanti come mercato di riferimento della propria attività, seguito da trattamento acque (24,3%) e batterie - elettroliti per l’8,1% e stabilizzanti per il 5,4% . Circa i quantitativi di fosforo impiegato annualmente, i dati raccolti non sono numericamente sufficienti per inferenze sul tema.

Figura 43. Il mercato di riferimento

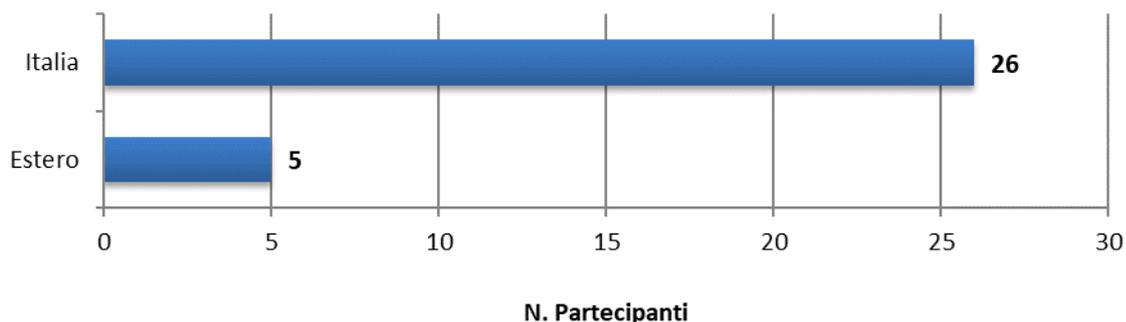


Fonte: Elaborazione dati ENEA

### 5.2.2 Localizzazione degli impianti di produzione e trattamento

Con riferimento alla localizzazione degli impianti di produzione e trattamento (Figura 44) si nota come le attività si concentrino sul territorio nazionale (70,3%) piuttosto che all’estero (13,5%).

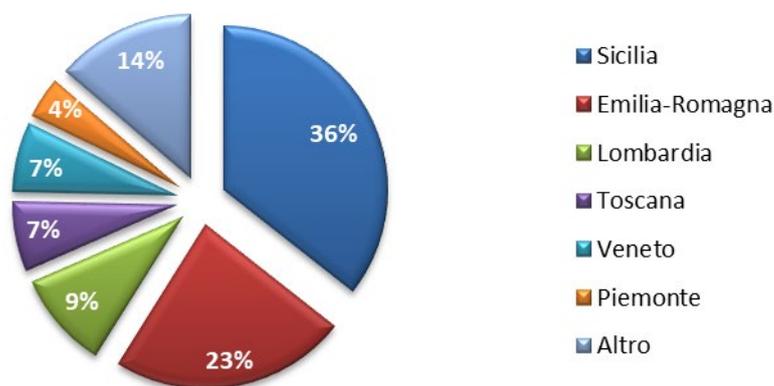
Figura 44. Localizzazione impianti di produzione e trattamento



Fonte: Elaborazione dati ENEA

Più nel dettaglio, all'estero sono presenti 12 diversi impianti (media per chi ha almeno un impianto all'estero è 2 impianti), localizzati per lo più in Germania (25%), Belgio e Spagna e UK (tutti al 17%). Sul territorio nazionale sono stati rilevati 73 impianti (media di 3 impianti a partecipante), localizzati eterogeneamente sul territorio nazionale (Figura 45), con una maggioranza in Sicilia (36%), Emilia-Romagna (23%) e Lombardia (9%).

Figura 45. Localizzazione nazionale impianti di produzione e trattamento

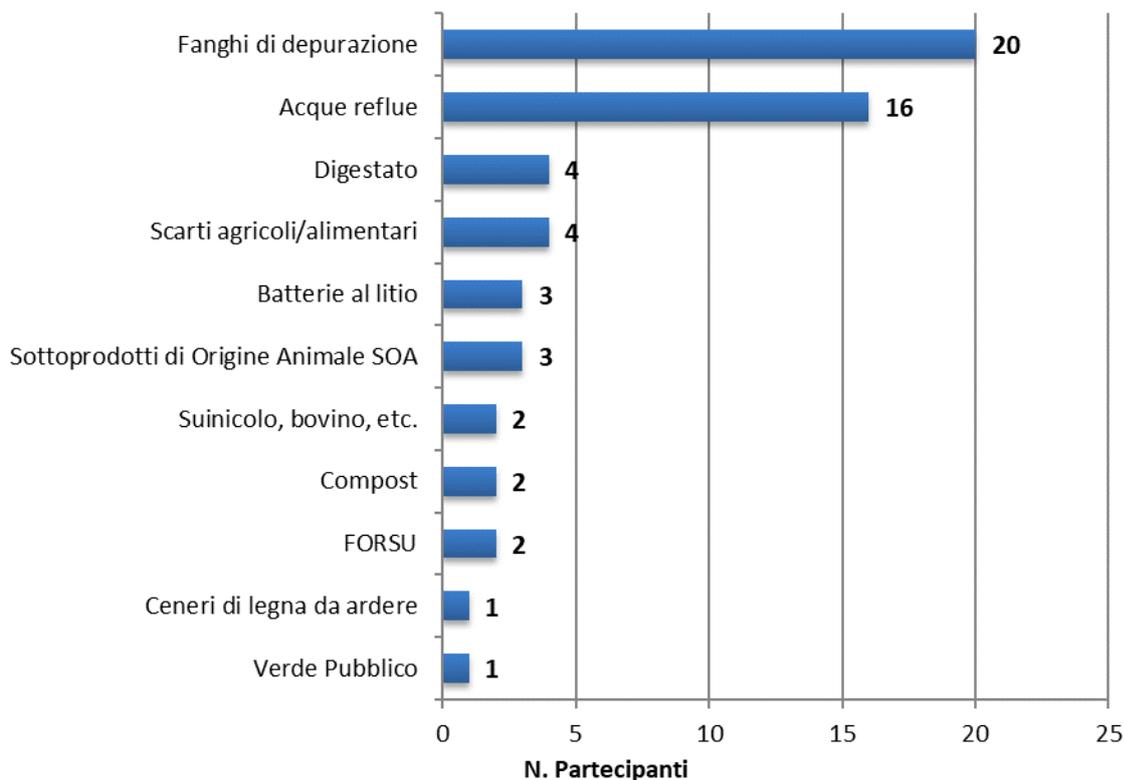


Fonte: Elaborazione dati ENEA

### 5.2.3 Origine del fosforo in caso di recupero e/o smaltimento

Con riferimento all'origine del fosforo recuperato (Figura 46) si nota come i fanghi di depurazione rappresentino il flusso più comune (54,1% delle imprese), seguito da acque reflue (43,2%), digestato e scarti agricoli/alimentari, entrambi al 10,8%.

Figura 46. Origine del fosforo recuperato



Fonte: Elaborazione dati ENEA

#### 5.2.4 Gestione dei rifiuti

Nella sezione relativa ai rifiuti (Tabella 26) i rispondenti dichiarano complessivamente oltre 5000 tonnellate annue di fosforo (anche potenzialmente disponibili) nei rifiuti prodotti (media 231 tonP/anno) e circa 1000 tonnellate annue nelle acque reflue (media: 78,5 tonP/anno). Tali quantitativi di fosforo possono abbattere i costi di smaltimento rifiuti che mediamente nei rispondenti ammontano a quasi 900 mila euro/anno (891.125,57 €).

Tabella 26. Gestione rifiuti

	Rispondenti (N)	Somma (ton P/anno)	Media (ton P/anno)
Rifiuti prodotti contenenti fosforo (anche potenziale)	19	5.101,07	231,87
Acque reflue prodotte contenenti fosforo (anche potenziale)	8	1.020,5	78,5

Fonte: Elaborazione dati ENEA

Relativamente ai sottoprodotti che si generano durante l'attività di impresa si rilevano Black mass, Calcio Fosfato, Struvite, Fango contenente fosforo, ceneri da monoincenerimento fanghi, compost, digestato da FORSU, carbonato di calcio di defecazione.

### 5.2.5 Criticità del settore

In termini di criticità del settore, è stato chiesto alle imprese di esprimere un giudizio su una scala Likert (Scala 1-5, dove 1= per nulla critico, 2= poco critico, 3 = abbastanza critico, 4 = critico, 5 = estremamente critico) sulla base delle opzioni di risposta.

Come mostra la Tabella 27, gli item che raccolgono punteggi inferiori sono le criticità geopolitiche nei Paesi fornitori (media 2,6), la scarsa disponibilità di materia prima (media 2,7) e la scarsa domanda del prodotto venduto/recuperato (media 2,9).

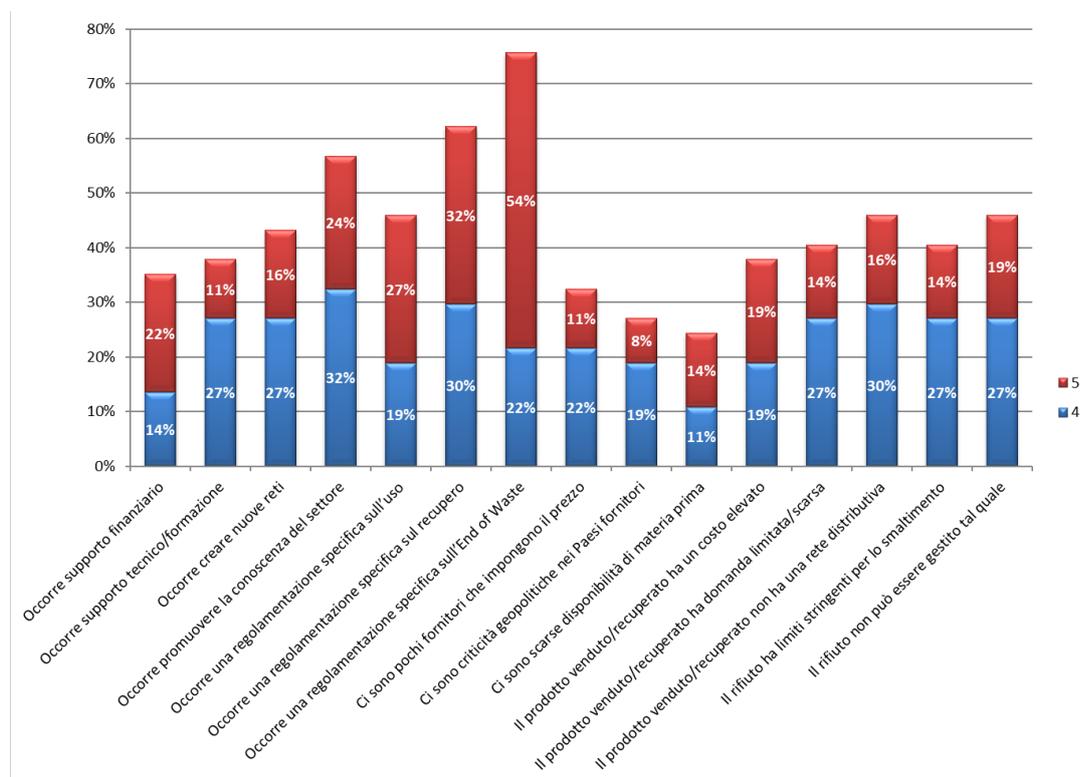
Tabella 27. Criticità settore

<b>Criticità</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>Non so</b>
Occorre supporto finanziario	3	7	<b>13</b>	5	8	1
Occorre supporto tecnico/formazione	4	8	<b>10</b>	<b>10</b>	4	1
Occorre creare nuove reti	5	4	<b>11</b>	10	6	1
Occorre promuovere la conoscenza del settore	1	0	<b>14</b>	12	9	1
Occorre una regolamentazione specifica sull'uso	5	7	7	7	10	1
Occorre una regolamentazione specifica sul recupero	4	3	6	11	<b>12</b>	1
Occorre una regolamentazione specifica sull'End of Waste	3	1	4	8	<b>20</b>	1
Ci sono pochi fornitori che impongono il prezzo	5	6	<b>13</b>	8	4	1
Ci sono criticità geopolitiche nei Paesi fornitori	<b>9</b>	<b>9</b>	8	7	3	1
Ci sono scarse disponibilità di materia prima	8	9	<b>10</b>	4	5	1
Il prodotto venduto/recuperato ha un costo elevato	5	4	<b>13</b>	7	7	1
Il prodotto venduto/recuperato ha domanda limitata/scarsa	8	6	7	<b>10</b>	5	1
Il prodotto venduto/recuperato non ha una rete distributiva	5	8	6	<b>11</b>	6	1
Il rifiuto ha limiti stringenti per lo smaltimento	4	5	7	<b>12</b>	8	1
Il rifiuto non può essere gestito tal quale	3	6	<b>10</b>	<b>10</b>	7	1

Fonte: Elaborazione dati ENEA

La Figura 47 mostra le principali criticità rilevate sommando le valutazioni “Critico” ed “Estremamente critico”. Dalla somma delle percentuali emerge come la necessità di una regolamentazione specifica sull’End of Waste sia di estrema criticità per il 76% del campione osservato, seguita dalla necessità di introduzione di una regolamentazione specifica sul recupero (62%) e dall’importanza di promozione della conoscenza del settore (57%).

Figura 47. Maggiori criticità del settore



Fonte: Elaborazione dati ENEA

## Conclusioni e future work

Il presente report costituisce un primo lavoro di inquadramento e analisi del mercato del fosforo a livello globale, europeo e nazionale in termini di domanda e offerta, primaria e secondaria, ma anche di flussi.

Dall'analisi appare evidente come il fosforo costituisca la base di una molteplicità di settori a valle, ma l'approvvigionamento primario dipende molto spesso da Paesi extra EU con condizioni geopolitiche instabili. Occorre dunque ipotizzare sin d'ora ulteriori studi volti a limitare la dipendenza nell'approvvigionamento per l'economia nazionale. I fattori limitanti per il recupero del fosforo sono le concentrazioni di fosforo nelle materie prime seconde, la qualità dei prodotti ottenuti, la possibilità di raccolta così come aspetti economici. Solo una corretta gestione dei rifiuti, innovazioni tecnologiche e il supporto normativo possono generare valide opportunità per il futuro del recupero del fosforo.

Poiché però il mercato del fosforo è apparso complesso – basti pensare alle considerevoli applicazioni del fosforo in tutte le sue forme e alle possibili fonti di recupero con l'innesto di altrettanti mercati collegati – e in continua evoluzione anche dal punto di vista normativo (a titolo di esempio si cita il decreto End of Waste sui fanghi), il gruppo di lavoro ha identificato sin d'ora una serie di ulteriori approfondimenti che verranno realizzati nel prosieguo dei lavori della Piattaforma:

- Definizione di ulteriori player italiani da coinvolgere nella Piattaforma e posizionamento delle organizzazioni coinvolte sulla catena del valore;
- Analisi dei flussi anche in settori diversi rispetto a quello dei fertilizzanti;
- Panoramica dei vari cicli industriali che producono fosfati come sottoprodotti, relativi alla quantificazione (concentrazione e quantità assoluta) ed eventuale stima dei costi di recupero;
- Analisi di flussi gratuiti (compost e fanghi);
- Stima dei costi d'investimento dovuti all'adeguamento degli impianti e supporto all'implementazione degli impianti per il recupero del fosforo;
- Approfondimento delle tecnologie di recupero sviluppate (TRL) e valutazione degli impatti sul mercato del fosforo;
- Aggregazione codici PRODCOM + ATECO + NC8 per ogni applicazione di fosforo individuata;
- Analsi di scenario con il cambio della tariffa doganale per il fosforo rosso;
- Studio di eventuali incentivi e strumenti finanziari da implementare nel settore;
- Individuazione di possibili percorsi di simbiosi industriale da valutare sia in termini ambientali che economici.

Il presente documento è pertanto da considerarsi come un "open file" soggetto a modifiche e integrazioni derivanti da approfondimenti successivi e da ulteriori studi da parte del gruppo di lavoro.

## Riferimenti bibliografici

- Al-Fariss, T. F., Ozbelge, H. O., & El-Shall, H. S. (1992). On the phosphate rock beneficiation for the production of phosphoric acid in Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 4(1), 13-31.
- Balmer, P. (2004). Phosphorus recovery-an overview of potentials and possibilities. *Water science and technology*, 49(10), 185-190.
- Bhawan, P., & Nagar, E. A. (2012). Guideline For Management and Handling of Phosphogypsum Generated From Phosphoric Acid Plants. *Delhi: Ministry of Environment and Forest*.
- Bordoni, A., Romagnoli, E., Foppa Pedretti, E., Toscano, G., Rossini, G., Cozzolino, E., & Riva, G. (2010). La filiera del biogas Aspetti salienti dello stato dell'arte e prospettive. *ASSAM-Agenzia Servizi Settore Agroalimentare delle Marche*.
- Brown, T. J., Idoine, N. E., Raycraft, E. R., Hobbs, S.F., Shaw, R.A., Everett, P., Kresse, C., Deady, E.A., Bide, T. (2019). *World mineral production 2013-17*. British Geological Survey.
- Campuzano, R., & González-Martínez, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. *Waste Management*, 54, 3-12
- Colonna, N., Alfano, V., & Gaeta, M. (2009). La stima del potenziale di biogas da biomasse di scarto del settore zootecnico in Italia. *Enea, Report Rse/2009/201*.
- Cordell, D. (2010). *The Story of Phosphorus: Sustainability implications of global phosphorus scarcity for food security* (Doctoral dissertation).
- Cordell, D., & White, S. (2011). Peak phosphorus: clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. *Sustainability*, 3(10), 2027-2049.
- Cordell, D., & White, S. (2013). Sustainable phosphorus measures: strategies and technologies for achieving phosphorus security. *Agronomy*, 3(1), 86-116.
- Cordell, D., Drangert, J. O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global environmental change*, 19(2), 292-305.
- Cornel, P., & Schaum, C. (2009). Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs. *Water Science and Technology*, 59(6), 1069-1076.
- Daneshgar, S., Callegari, A., Capodaglio, A. G., & Vaccari, D. (2018). The potential phosphorus crisis: resource conservation and possible escape technologies: a review. *Resources*, 7(2), 37.
- De Ridder, M., De Jong, S., Polchar, J., & Lingemann, S. (2012). Risks and opportunities in the global phosphate rock market: Robust strategies in times of uncertainty.
- De Vries, M. D., Van Middelaar, C. E., & De Boer, I. J. M. (2015). Comparing environmental impacts of beef production systems: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 178, 279-288.
- De-Bashan, L. E., & Bashan, Y. (2004). Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003). *Water research*, 38(19), 4222-4246.
- Della Pesca, D. P. (2009). Rapporto Annuale sulla Pesca e sull'Acquacoltura in Sicilia.
- Deloitte Sustainability, & et Minières, B. D. R. G. (2017). Study on the Review of the List of Critical Raw Materials: Critical Raw Materials Factsheets.
- Déry, P., & Anderson, B. (2007). Peak phosphorus. *Energy Bulletin*, 13, 1-14.

- Al-Fariss, T. F., Ozbelge, H. O., & El-Shall, H. S. (1992). On the phosphate rock beneficiation for the production of phosphoric acid in Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 4(1), 13-31.
- Desmidt, E., Ghyselbrecht, K., Zhang, Y., Pinoy, L., Van der Bruggen, B., Verstraete, W., ... & Meesschaert, B. (2015). Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(4), 336-384.
- Egle, L., Rechberger, H., & Zessner, M. (2015). Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 325-346.
- Enghag, P. (2008). *Encyclopedia of the elements: technical data-history-processing-applications*. John Wiley & Sons.
- EU Commission (2010). Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on future steps in bio-waste management in the European Union COM(2010)235 final. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Commission.
- EU Commission. (2014). Study on the review of the list of critical raw materials. European Commission, Brussels. COM(2014) 0297 final
- EU Commission. (2017). Study on the review of the list of critical raw materials. European Commission, Brussels. COM(2017) 490 final
- European Environment Agency. (2013). *Managing municipal solid waste: a review of achievements in 32 European countries*. Office for Official Publ. of the Europ. Communities.
- FAO (2015). World fertilizer trends and outlook to 2018. *Food and Agriculture Organization of the United Nations. Reporte*.
- Foged, H. L., Flotats, X., Blasi, A. B., Palatsi, J., Margi, A., & Schelde, K. M. (2011). Manure processing activities in Europe. *European Commission, Directorate-General Environment*.
- Ge, H., Batstone, D. J., & Keller, J. (2015). Biological phosphorus removal from abattoir wastewater at very short sludge ages mediated by novel PAO clade Comamonadaceae. *Water research*, 69, 173-182.
- Geeson, M. B., & Cummins, C. C. (2018). Phosphoric acid as a precursor to chemicals traditionally synthesized from white phosphorus. *Science*, 359(6382), 1383-1385.
- Ghosh, S., Lobanov, S., & Lo, V. K. (2019). An overview of technologies to recover phosphorus as struvite from wastewater: advantages and shortcomings. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-15.
- Gören, A., Costa, C. M., Silva, M. M., & Lanceros-Mendez, S. (2016). Influence of fluoropolymer binders on the electrochemical performance of C-LiFePO<sub>4</sub> based cathodes. *Solid State Ionics*, 295, 57-64.
- H. El-Didamony, H.S. Gado, N.S. Awwad, M.M. Fawzy, M.F. Attallah. Treatment of phosphogypsum waste using suitable organic extractants. *Journal of Hazardous Materials* 2013 244–245, 596–602.
- Hanna, A. A., Akarish, A. I. M., & Ahmed, S. M. (1999). Phosphogypsum: Part I : Mineralogical, Thermogravimetric, Chemical and Infrared Characterization. *J. Mater. Sci. Technol*, 15, 431-434.
- Heffer, P., & Prud'homme, M. (2008). Outlook for world fertilizer demand, supply, and supply/demand balance. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32(3), 159-164.

- Al-Fariss, T. F., Ozbelge, H. O., & El-Shall, H. S. (1992). On the phosphate rock beneficiation for the production of phosphoric acid in Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 4(1), 13-31.
- Hein, L., & Leemans, R. (2012). The impact of first-generation biofuels on the depletion of the global phosphorus reserve. *Ambio*, 41(4), 341-349.
- James, W. F. (2017). Diffusive phosphorus fluxes in relation to the sediment phosphorus profile in Big Traverse Bay, Lake of the Woods. *Lake and Reservoir Management*, 33(4), 360-368.
- Kataki, S., West, H., Clarke, M., & Baruah, D. C. (2016). Phosphorus recovery as struvite: Recent concerns for use of seed, alternative Mg source, nitrogen conservation and fertilizer potential. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 142-156.
- Killiches, F. (2013). *Phosphat: Mineralischer Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Kippenberger, C. (2001). Materials Flow and Energy Required for the Production of-Selected Mineral Commodities.
- Krauss, U. H., & Saam, H. G. (1984). *International Strategic Minerals Inventory Summary Report, Phosphate* (No. 930). Department of the Interior, US Geological Survey.
- Kretschmer, K., Sun, B., Xie, X., Chen, S., & Wang, G. (2016). A free-standing LiFePO<sub>4</sub>-carbon paper hybrid cathode for flexible lithium-ion batteries. *Green Chemistry*, 18(9), 2691-2698.
- La Marca, F., Ferrini, M., & Scoppettuolo, A. (2014). Pre-trattamento delle batterie litio-ione in scala di laboratorio con particolare riferimento alle modalità di apertura delle celle. Report RdS/PAR2014/187.
- Lauriente, D. H. (2003). Phosphate rock. *MenloPark, CA: Stanford Research Institute*.
- Lebedeva, N., Di Persio, F., & Boon-Brett, L. (2016). Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe. *European Commission*, Petten.
- Leip, A., Billen, G., Garnier, J., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Reis, S., ... & Westhoek, H. (2015). Impacts of European livestock production: nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environmental Research Letters*, 10(11), 115004.
- Leip, A., Weiss, F., Lesschen, J. P., & Westhoek, H. (2014). The nitrogen footprint of food products in the European Union. *The Journal of Agricultural Science*, 152(S1), 20-33.
- Lebedeva, N., Di Persio, F., & Boon-Brett, L. (2016). Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe. *European Commission*, Petten.
- Li, B., Udugama, I. A., Mansouri, S. S., Yu, W., Baroutian, S., Gernaey, K. V., & Young, B. R. (2019). An exploration of barriers for commercializing phosphorus recovery technologies. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1342-1354.
- Li, H., Xing, S., Liu, Y., Li, F., Guo, H., & Kuang, G. (2017). Recovery of lithium, iron, and phosphorus from spent LiFePO<sub>4</sub> batteries using stoichiometric sulfuric acid leaching system. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 5(9), 8017-8024.
- Liu, Y., Villalba, G., Ayres, R. U., & Schroder, H. (2008). Global phosphorus flows and environmental impacts from a consumption perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 12(2), 229-247.
- Malingreau, J. P., Eva, H., & Maggio, A. (2012). NPK: Will there be enough plant nutrients to feed a world of 9 billion in 2050. *Report for the European Commission Joint Research Centre, Brussels*.

- Al-Fariss, T. F., Ozbelge, H. O., & El-Shall, H. S. (1992). On the phosphate rock beneficiation for the production of phosphoric acid in Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 4(1), 13-31.
- McKelvey, V. E. (1967). *Phosphate deposits* (No. 1252-D). US Govt. Print. Off.,.
- Meyer, B. D., & Sullivan, J. X. (2013). Consumption and income inequality and the great recession. *American Economic Review*, 103(3), 178-83.
- Monier, V., Mudgal, S., Escalon, V., O'Connor, C., Gibon, T., Anderson, G., ... & Morton, G. (2010). Preparatory study on food waste across EU 27. *Report for the European Commission [DG ENV—Directorate C]*.
- Morse, G. K., Brett, S. W., Guy, J. A., & Lester, J. N. (1998). Phosphorus removal and recovery technologies. *Science of the total environment*, 212(1), 69-81.
- Oelkers, E. H., & Valsami-Jones, E. (2008). Phosphate mineral reactivity and global sustainability. *Elements*, 4(2), 83-87.
- Ordoñez, J., Gago, E. J., & Girard, A. (2016). Processes and technologies for the recycling and recovery of spent lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 195-205.
- Paul, N., Giri, U., & Roy, G. (2019). Composting. In *Organic Fertilizers-History, Production and Applications*. IntechOpen.
- Pérez-López, R., Alvarez-Valero, A. M., & Nieto, J. M. (2007). Changes in mobility of toxic elements during the production of phosphoric acid in the fertilizer industry of Huelva (SW Spain) and environmental impact of phosphogypsum wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 148(3), 745-750.
- PRud'hoMMe, M. (2010, March). World phosphate rock flows, losses and uses. In *International Fertilizer Industry Association, Phosphates 2010 International Conference* (pp. 22-24).
- Rittmann, B. E., Mayer, B., Westerhoff, P., & Edwards, M. (2011). Capturing the lost phosphorus. *Chemosphere*, 84(6), 846-853.
- Rosegrant, M. W., Fernandez, M., Sinha, A., Alder, J., Ahammad, H., Fraiture, C. D., ... & Omezzine, A. M. (2009). Looking into the future for agriculture and AKST.
- Rosemarin, A., & Ekane, N. (2016). The governance gap surrounding phosphorus. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 104(3), 265-279.
- Rudnick, R. L., & Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. *Treatise on geochemistry*, 3, 659.
- Sarech, B., & Yoneyama, M. (2002). CEH Marketing Research Report: Industrial Phosphates. *SBI International*.
- Sarvajayakesavalu, S., Lu, Y., Withers, P. J., Pavinato, P. S., Pan, G., & Chareonsudjai, P. (2018). Phosphorus recovery: a need for an integrated approach. *Ecosystem Health and Sustainability*, 4(2), 48-57.
- Saveyn, H., & Eder, P. (2014). End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): technical proposals. *IPTS: Sevilla, Spain*.
- Scholz, R. W., Roy, A. H., Brand, F. S., Hellums, D. T., & Ulrich, A. E. (2014). Sustainable phosphorus management. *A global transdisciplinary roadmap. (1st Ed.)*. Dordrecht Heidelberg New York London: Springer.

- Al-Fariss, T. F., Ozbelge, H. O., & El-Shall, H. S. (1992). On the phosphate rock beneficiation for the production of phosphoric acid in Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 4(1), 13-31.
- Schroder, J. J., Cordell, D., Smit, A. L., & Rosemarin, A. (2010). *Sustainable use of phosphorus: EU tender ENV. B1/ETU/2009/0025* (No. 357). Plant Research International.
- Smil, V. (2000). Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. *Annual review of energy and the environment*, 25(1), 53-88.
- Smol, M. (2019). The importance of sustainable phosphorus management in the circular economy (CE) model: the Polish case study. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(2), 227-238.
- Sutton, M. A., Howard, C. M., Erisman, J. W., Bealey, W. J., Billen, G., Bleeker, A., ... & Grizzetti, B. (2011). The challenge to integrate nitrogen science and policies: the European Nitrogen Assessment approach.
- Tervahauta, T., van der Weijden, R. D., Flemming, R. L., Leal, L. H., Zeeman, G., & Buisman, C. J. (2014). Calcium phosphate granulation in anaerobic treatment of black water: a new approach to phosphorus recovery. *Water research*, 48, 632-642.
- Troilo, G., & Molteni, L. (2003). *Ricerche di marketing. Italia: McGraw-Hill Education*.
- Van Dijk, K. C., Lesschen, J. P., & Oenema, O. (2016). Phosphorus flows and balances of the European Union Member States. *Science of the Total Environment*, 542, 1078-1093.
- Van Enk, R. J., Acera, L. K., Schuiling, R. D., Ehlert, P., De Wilt, J. G., & Van Haren, R. J. F. (2011). The phosphate balance: current developments and future outlook. *Innovation Network Reports*, (10.2. 232E).
- Van Kauwenbergh, S. J. (2010). *World phosphate rock reserves and resources* (p. 48). Muscle Shoals: IFDC.
- Van Vuuren, D. P., Bouwman, A. F., & Beusen, A. H. (2010). Phosphorus demand for the 1970–2100 period: a scenario analysis of resource depletion. *Global environmental change*, 20(3), 428-439.
- Villalba, G., Liu, Y., Schroder, H., & Ayres, R. U. (2008). Global phosphorus flows in the industrial economy from a production perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 12(4), 557-569.
- Ward, J. (2008). Peak phosphorus: quoted reserves vs. production history. *Energy Bulletin*, Available: <http://www.energybulletin.net/node/46386>.
- Wellmer, F. W., & Becker-Platen, J. D. (2000, August). Global nonfuel mineral resources and sustainability. In *Proceedings for a Workshop on Deposit Modeling, Mineral Resource Assessment, and Their Role in Sustainable Development* (p. 1).
- Withers, P. J., Elser, J. J., Hilton, J., Ohtake, H., Schipper, W. J., & Van Dijk, K. C. (2015). Greening the global phosphorus cycle: how green chemistry can help achieve planetary P sustainability. *Green Chemistry*, 17(4), 2087-2099.
- Yang, X., Thornton, P. E., Ricciuto, D. M., & Hoffman, F. M. (2016). Phosphorus feedbacks constraining tropical ecosystem responses to changes in atmospheric CO<sub>2</sub> and climate. *Geophysical Research Letters*, 43(13), 7205-7214.
- Yang, Y., Zheng, X., Cao, H., Zhao, C., Lin, X., Ning, P., ... & Sun, Z. (2017). A closed-loop process for selective metal recovery from spent lithium iron phosphate batteries through mechanochemical activation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(11), 9972-9980.

- Al-Fariss, T. F., Ozbelge, H. O., & El-Shall, H. S. (1992). On the phosphate rock beneficiation for the production of phosphoric acid in Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 4(1), 13-31.
- Zhou, Q., Chen, Q., Tong, Y., & Wang, J. (2016). Light-induced ambient degradation of few-layer black phosphorus: mechanism and protection. *Angewandte Chemie International Edition*, 55(38), 11437-11441.

## Sitografia

<http://dati.istat.it/>

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/newxtweb/>

<http://minerals4eu.brgm-rec.fr/m4eu-yearbook/pages/bycommodity.jsp?commodity=Phosphate%20rock>

<http://pti.regione.sicilia.it/portal/pls/portal/docs/33892338.PDF>

[http://scienceindia.in/home/view\\_article/419](http://scienceindia.in/home/view_article/419)

<http://www.cirisco.com>

<http://www.indexmundi.com>

<http://www.phosphorusplatform.eu/images/scope/ScopeNewsletter123.pdf>

[http://www.risefoundation.eu/images/files/2016/2016\\_RISE\\_NRR\\_Full\\_EN.pdf](http://www.risefoundation.eu/images/files/2016/2016_RISE_NRR_Full_EN.pdf)

[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental\\_indicator\\_-\\_mineral\\_fertiliser\\_consumption](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_mineral_fertiliser_consumption)

[https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/food-farming-fisheries/farming/documents/market-brief-fertilisers\\_june2019\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/food-farming-fisheries/farming/documents/market-brief-fertilisers_june2019_en.pdf)

[https://events.crugroup.com/phosphates/uploads/fertilizer-international-phosphatesconference-may\\_17.pdf](https://events.crugroup.com/phosphates/uploads/fertilizer-international-phosphatesconference-may_17.pdf)

<https://extension.umn.edu/phosphorus-and-potassium/understanding-phosphorus-fertilizers#organic-vs.-inorganic-620260>

<https://ihsmarkit.com/products/phosphorus-chemical-economics-handbook.html>

<https://mineralseducationcoalition.org/minerals-database/phosphate-rock/>

[https://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/Pnadw835.PDF](https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnadw835.PDF)

<https://phosphorusplatform.eu/images/download/ESPP%20conference%20Phosphorus%20stewardship/Schipper-ESPP-1-12-16.pdf>

<https://phosphorusplatform.eu/scope-in-print/news/1534-white-phosphorus-added-eu-crm>

<https://www.coeweb.istat.it/>

<https://www.fertilizerseurope.com>

[https://www.gardenwest.it/it/fertilizzanti-fioritura-organici/436-biobizz-bio-bloom-500ml-1l-5l-10l.html#/volume-10\\_l](https://www.gardenwest.it/it/fertilizzanti-fioritura-organici/436-biobizz-bio-bloom-500ml-1l-5l-10l.html#/volume-10_l)

<https://www.idroponica.it/fertilizzante-c-20/fertilizzanti-e-nutrienti-bio-nova-s-24/bionova-p-20-con-fosforo-25822.html>

<https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=rock-phosphate&months=180&currency=eur>

<https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=rock-phosphate&months=240&currency=eur>

<https://www.statista.com/statistics/1076303/european-fertilizer-use-by-nutrient/>

<https://www.unece.org/energy/se/reserves.html>

<https://www.usgs.gov/centers/nmic/phosphate-rock-statistics-and-information>

## Appendice A – Questionario

### Sezione Anagrafica

1. Nome Organizzazione (opzionale) \_\_\_\_\_
2. Partita iva/Codice Fiscale (opzionale) \_\_\_\_\_
3. Codice Ateco (6 digit) \_\_\_\_\_
4. Comune sede (prov.) \_\_\_\_\_ ( )
5. Organizzazione (Scelta singola):

Associazione di categoria	<input type="checkbox"/>
Collettività	<input type="checkbox"/>
Ente di ricerca/ Università	<input type="checkbox"/>
Impresa	<input type="checkbox"/>
Istituzione	<input type="checkbox"/>

6. Posizionamento sulla catena del valore del fosforo (Scelta multipla):

Estrazione	<input type="checkbox"/>
Lavorazione materiale estratto	<input type="checkbox"/>
Produzione	<input type="checkbox"/>
Confezionamento e distribuzione	<input type="checkbox"/>
Uso/Utilizzatore	<input type="checkbox"/>
Raccolta	<input type="checkbox"/>
Riuso	<input type="checkbox"/>
Riciclaggio	<input type="checkbox"/>
Smaltimento	<input type="checkbox"/>

7. Avete bilancio di sostenibilità?

Sì o No

Se sì Link \_\_\_\_\_

### Sezione Mercato

8. Tipologia dei prodotti per cui usa il fosforo che tratta nella sua attività: Scelta multipla

Additivi alimentari	<input type="checkbox"/>
Additivi antiusura	<input type="checkbox"/>
Additivi per asfalto	<input type="checkbox"/>
Additivi per olio idraulico	<input type="checkbox"/>
Agenti antischiuma	<input type="checkbox"/>
Agenti antistatico	<input type="checkbox"/>
Agenti clorinanti	<input type="checkbox"/>
Agenti clorinanti per prodotti farmaceutici	<input type="checkbox"/>

Additivi alimentari	
Agenti disidratante in chimica organica	
Agenti flocculante	
Agenti umidificante	
Anticalcare	
Cemento	
Confezionamento di carne, pesce e frutti di mare	
Dentifrici	
Detergenti industriali	
Disincrostanti	
Elettroliti per batterie	
Emulsionanti	
Fertilizzanti per agricoltura	
Indurenti	
Inibitori di corrosione	
Insetticidi	
Integratori alimentare per animali	
Lavorazione delle patate	
Materia prima nella produzione di catalizzatori	
Mordenti	
Panetteria	
Pastiglie	
Porcellane	
Prodotti Caseari	
Ritardanti di fiamma	
Sequestranti nei detersivi	
Solventi	
Solventi per la filatura delle fibre	
Stabilizzanti per batterie	
Surfattanti	
Trattamento delle acque	

9. Quantità di materiali utilizzati (prego utilizzare unità di misura ton P /anno; si utilizzi tabella di conversione  $1 \text{ tP} = 3.07 \text{ tPO}_4 = 2.29 \text{ tP}_2\text{O}_5$ ):

- Tonnellate di P annue utilizzate per ogni impiego di cui sopra

\_\_\_\_\_

10. Prezzi medi di riferimento (acquisto e vendita per ogni materiale utilizzato):

- Acquisto      € tonnellata di P      \_\_\_\_\_
- Vendita        € tonnellata di P      \_\_\_\_\_

11. Territorio (localizzazione impianti di produzione e trattamento):

- Estero (specificare Paese) \_\_\_\_\_
- Italia

Se Italia, specificare Comune e Provincia per ogni sito

---



---

## Sezione Chiusura del Ciclo

12. Se recuperato/smaltito, quale è l'origine del fosforo (Scelta multipla):

Acque reflue	
Fanghi di depurazione	
FORSU	
Scarti di lavorazione lasciati nei SIN (Taranto, Crotona, Gela)	
Sottoprodotti di Origine Animale SOA	
Scarti agricoli/alimentari	
Verde Pubblico	
Compost	
Ceneri di legna da ardere	
Effluenti zootecnici (pollina; suinicolo, bovino, etc.)	
Guano	
Digestato	
Batterie al litio	

13. Se recuperato/smaltito, quali caratteristiche tecniche e requisiti minimi deve possedere il fosforo per l'impiego previsto (per cortesia si specifichi l'impiego e se le caratteristiche possono differire dall'utilizzo di fosforo primario):

**Testo (max 2000 battute)**

---



---



---



---



---



---

14. Gestione rifiuti:

- Quantità rifiuti prodotti contenenti fosforo \_\_\_\_\_ ton di P/anno
- Quantità acque reflue prodotte contenenti fosforo \_\_\_\_\_ ton di P/anno
- Costi di smaltimento \_\_\_\_\_ €/anno

15. Eventuali sottoprodotti originati dalla vostra attività:

\_\_\_\_\_ ton P/anno

- Tipologia XXX \_\_\_\_\_

- Tipologia XXX \_\_\_\_\_
- Tipologia XXX \_\_\_\_\_

16. Criticità del settore (Scala 1-5 dove 1= per nulla critico, 2= poco critico, 3 = abbastanza critico, 4 = critico, 5 = estremamente critico)

<b>Policy</b>	<b>Voto 1-5</b>
Occorre supporto finanziario	
Occorre supporto tecnico/formazione	
Occorre creare nuove reti	
Occorre promuovere la conoscenza del settore	
<b>Normativa</b>	<b>Voto 1-5</b>
Occorre una regolamentazione specifica sull'uso	
Occorre una regolamentazione specifica sul recupero	
Occorre una regolamentazione specifica sull'End of Waste	
<b>Di approvvigionamento</b>	<b>Voto 1-5</b>
Ci sono pochi fornitori che impongono il prezzo	
Ci sono criticità geopolitiche nei Paesi fornitori	
Ci sono scarse disponibilità di materia prima	
<b>Di vendita</b>	<b>Voto 1-5</b>
Il prodotto venduto/recuperato ha un costo elevato	
Il prodotto venduto/recuperato ha domanda limitata/scarsa	
Il prodotto venduto/recuperato non ha una rete distributiva	
<b>Nello smaltimento</b>	<b>Voto 1-5</b>
Il rifiuto ha limiti stringenti per lo smaltimento	
Il rifiuto non può essere gestito tal quale	
<b>Altro</b>	<b>Voto 1-5</b>
XXX	

17. Eventuali commenti/proposte/considerazioni conclusive

**Testo (max 2000 battute)**

---



---



---



---



---

## Appendice B – Analisi preliminare flussi import – export Italia per prodotto

Prodotti	Tipo di materiali o sostanze utilizzate	Codice NC8	import (t)	export (t)	valore di acquisto (€)	valore di vendita (€)
produzione integratori per mangimi	Fosfato dicalcico	28352500	26531.032	2556.415	11.935.685	1.216.574
	Acido fosforico e acidi polifosforici	28092000	129494.410	3987.312	61.668.969	5.077.589
	Polifosfati (escl. trifosfato di sodio)	28353900	16173.619	1426.126	22.582.920	2.759.807
	Fosfati e idrogenofosfati di calcio	28352600	7311.717	6767.104	5.487.531	4.395.256
	Fosfati e idrogenofosfati di magnesio					
	Fosfati e idrogenofosfati di sodio	28352200	2271.466	737.26	4350387	968848
	Fosfati e idrogenofosfati di potassio	28352400	9460.072	207.529	10896765	332077
	Diamido fosfato					
produzione ceramiche	Fosfati di calcio, fosfati alluminio-calcici e crete fosfatiche, naturali (non macinati)	25101000	58106.001	56.367	4922405	114148
	Fosfati di calcio, fosfati alluminio-calcici e crete fosfatiche, naturali (macinati)	25102000	102625.457	3400.946	7941851	272952
produzione fertilizzanti	Acido fosforico e acidi polifosforici	28092000	129494410	3987312	61668969	5077589
	Fosfato dicalcico	28352500	26531.032	2556.415	11935685	1216574
	Ossicloruro di fosforo	28121200	0	0	0	0
	Pentassolfuro di fosforo					
	Trifosfato di sodio	28353100	7329.812	242.204	7198504	360169
	Acido fosforoso					
	Perfosfati con P2O5 pari o superiore a 35%	31031100	37155.140	7002.705	8974123	1879572
		31031900	22219.098	1408.24	2735183	432111
	concimi chimici fosfatici escl. perfosfati	31039000	21403.927	742.43	2809672	279175
	fosfato monoammonico, anche in miscuglio con l'idrogenoortofosfato di diammonio (fosfato diammonico), escl. quello presentato in tavolette o forme simili o in imballaggi di peso lordo <= 10 kg)	31054000	89856.373	6428.674	36288087	2105221
	Concimi, minerali o chimici, contenenti nitrati e fosfati, escluso fosfato monoammonico e diammonico	31055100	221863.377	21333.364	6834018	6609925
	concimi NPK, NP o PK, vari formati	31059000	0	0	0	0
		31056000	5118.151	18824.836	3476036	8121953
		31055900	13501.248	30940.812	7814778	15587197

Prodotti	Tipo di materiali o sostanze utilizzate	Codice NC8	import (t)	export (t)	valore di acquisto (€)	valore di vendita (€)
		31055100	22186.377	21333.364	6834018	6609925
		31052090	18422.967	35700.67	8683838	20864922
		31052010	164086.021	189038.68	66290358	76130629
		31055900	13501.248	30940.812	7814778	15587197
produzione ritardanti di fiamma e sostanze ignifughe, sostanze stabilizzatrici per produzione di plastiche (antiossidanti e ritardanti di fiamma)	ipofosfiti e fosfiti organici	28351000	4246.927	985.206	7913975	3404521
	fosforati					
	acido fosforico e acidi polifosforici	28092000	129494.410	3987.312	61668969	5077589
	fosfinossidi organici					
	fosfonati organici					
	fosfati organici					
	fosfinati					
	fosforo rosso	28047000	6335.588	0	18025058	0
estinguenti di fiamma	acido fosforoso					
	fosforo bianco					
	fosfati					
	fosfonati					
produzione additivi alimentari (coloranti, conservanti, emulsionanti, ecc..)	fosfinossidi					
	fosfato dicalcico	28352500	26531.032	2556.415	11935685	1216574
	acido fosforico e acidi polifosforici	28092000	129494.410	3987.312	61668969	5077589
	polifosfati (escl. trifosfato di sodio)	28353900	16173.619	1426.126	22582920	2759807
	fosfati e idrogenofosfati di calcio	28352600	7311.717	6767.104	5487531	4395256
	fosfati e idrogenofosfati di magnesio					
	fosfati e idrogenofosfati di sodio	28352200	2271.466	737.26	4350387	968848
	fosfati e idrogenofosfati di potassio	28352400	9460.072	207.529	10896765	332077
produzione detergenti	diamido fosfato					
	fosfati organici (esteri fosforici)	29199000				
produzione cemento, malte e lastre di cartongesso	ossidi di fosforo					
	acido amminofosfonico					
	acido polifosfonico					
	esteri fosforici	29199000				
produzione carne lavorata	fosfato dicalcico	28352500	26531.032	2556.415	11935685	1216574
	acido fosforico e acidi polifosforici	28092000	129494.410	3987.312	61668969	5077589

Prodotti	Tipo di materiali o sostanze utilizzate	Codice NC8	import (t)	export (t)	valore di acquisto (€)	valore di vendita (€)
	polifosfati (escl. trifosfato di sodio)	28353900	16173.619	1426.126	22582920	2759807
	fosfati e idrogenofosfati di magnesio					
	fosfati e idrogenofosfati di calcio	28352600				
	fosfati e idrogenofosfati di sodio	28353900	2271.466	737.26	4350387	968848
	fosfati e idrogenofosfati di potassio	28352400	9460.072	207.529	10896765	332077
lavorazione pesce	fosfati					
lavorazione patate	fosfato dicalcico	28352500	26531.032	2556.415	11935685	1216574
	acido fosforico e acidi polifosforici	28092000	129494.410	3987.312	61668969	5077589
	polifosfati (escl. trifosfato di sodio)	28353900	16173.619	1426.126	22582920	2759807
	fosfati e idrogenofosfati di magnesio					
	fosfati e idrogenofosfati di calcio	28352600				
	fosfati e idrogenofosfati di sodio	28353900	2271.466	737.26	4350387	968848
	fosfati e idrogenofosfati di potassio	28352400	9460.072	207.529	10896765	332077
trattamento acque	acido fosforoso					
antiagglomeranti per alimentari	fosfato d'ossa					
trattamento delle pelli	fosfati organici (esteri fosforici)					
allevamento	fosfato dicalcico	28352500	26531.032	2556.415	11935685	1216574
	acido fosforico	28092000				
	polifosfati (escl. trifosfato di sodio)	28353900	16173.619	1426.126	22582920	2759807
	fosfati e idrogenofosfati di magnesio					
	fosfati e idrogenofosfati di calcio	28352600				
	fosfati e idrogenofosfati di sodio	28353900	2271.466	737.26	4350387	968848
	fosfati e idrogenofosfati di potassio	28352400	9460.072	207.529	10896765	332077
produzione dentifrici	fosfato dicalcico	28352500	26531.032	2556.415	11935685	1216574
produzione pastiglie detergenti	fosfati organici (esteri fosforici acidi)					
processi di disidratazione in chimica organica	anidride fosforica p2o5	28091000	1268.172	0.181	2274037	10043
produzione additivi per asfalto	acido fosforico e acidi polifosforici	28092000	129494.410	3987.312	61668969	5077589

Prodotti	Tipo di materiali o sostanze utilizzate	Codice NC8	import (t)	export (t)	valore di acquisto (€)	valore di vendita (€)
produzione tensioattivi	fosfati organici (esteri fosforici a catena lunga fino a C14, esteri acidi grassi)					
produzione inibitori di corrosione e agenti ritardanti	fosfiti organici					
	fosfonati a catena lunga					
produzione detersivi industriali	fosfati organici (esteri fosforici a catena lunga fino a C14, esteri acidi grassi)					
agenti antISTATICI	fosfati organici (esteri fosforici)					
agenti antischiama (tensioattivi)	fosfati a catena lunga					
	fosfonati					
produzione di additivi per facilitare il galleggiamento di sostanze (tensioattivi)	fosfati a catena lunga					
produzione insetticidi e pesticidi in genere	fosfati e fosfonati organici					
	paration ISO e parationmetile ISO metileparation	29201100	0.009	0.050	595	638
	Fosfamidon ISO, Monocrotophos ISO, Fluoroacetamide ISO	29241200	1.685		8810	151
	fosforo rosso					
	solfori di fosforo	28139010	4.528		35602	
additivi per olii idraulici	solfori di fosforo	28139010	4.528		35602	
	fosfiti organici					
produzione cosmetici	fosfati organici (esteri fosforici acidi e non)					
	fosforati					
clorurazione	tribromuro di fosforo	28275900				
	fosforo rosso					
produzione di farmaci	tribromuro di fosforo	28275900				
produzione di elettroliti per batterie	fosfati inorganici (derivati dell' acido fosforico)					
produzione di esplosivi	fosforo bianco					
produzione di fiammiferi e fuochi artificiali	fosforo rosso					

Prodotti	Tipo di materiali o sostanze utilizzate	Codice NC8	import (t)	export (t)	valore di acquisto (€)	valore di vendita (€)
produzione di semiconduttori (drogaggio)	fosforo rosso					
produzione lampade a LED bianchi	fosforo rosso					
produzione vetri speciali per lampade al sodio	fosforo rosso					
produzione acciai e bronzi speciali	fosforo rosso					
produzione di abrasivi e sostanze lucidanti	fosfato dicalcico	28352500	26531.032	2556.415	11.935.685	1.216.574
produzione di protesi	fosfato dicalcico	28352500	26531.032	2556.415	11935685	1216574
solventi a base di Fosforo	fosfati organici (tributil fosfato, triortocresilfosfato, trietilfosfato, trimetilfosfato, trifenilfosfato)					
polimeri a base di Fosforo	poliorganofosfazene					
produzione lampade a incandescenza	fosforo rosso					
produzione di materie plastiche	fosfati organici (esteri fosforici acidi)					
Altri codici NC8 contenenti P per i quali non sono riuscito a trovare l'applicazione produttiva	fosfato di triammonio	28352910	30.971	0.553	59860	89900
	Fosfati di trisodio	28352930	987.249	13.089	1031528	31562
	altri fosfati	28352990	2497.817	294.819	4595465	883357
	trifosfato di sodio	28353100	7329.812	242.204	7198504	360169
	Fosfuri	28539090				
	Fosfato di tris,2,3 dibromopropile	29191000	1.97	124.14	39680	675646
	esteri tiofosforici e loro sali e loro derivati, escluso parathion	29201900	377.421	169.696	1381448	201759
	esteri di fosfito e loro sali, loro derivati alogenati, solfonati, nitrati e nitrosi	29202900	4350.767	1439.996	12723189	5572991
	fosfito di trietile	29202400	239.355	0	802980	0
	fosfito di trimetile	29202300	126.017	0	366268	0
	fosfito di dietile	29202200	1.358	0	14401	0
	fosfito di dimetile	29202100	5.941	0	18209	0
	tricloruro di fosforo	28121300	0	0	0	0

Prodotti	Tipo di materiali o sostanze utilizzate	Codice NC8	import (t)	export (t)	valore di acquisto (€)	valore di vendita (€)
	pentacloruro di fosforo	28121400	0	0	0	0
	idrogenoortofosfato di diammonio	31053000	0	0	0	0
	metilfosfonato di dimetile	29313100	0	1.583	0	12174
	dimetil propilfosfonato	29313200	112.998	0	506940	0
	dietil etilfosfonato	29313300	97.856	0	463366	0
	Sodio 3-(triidrossisilil)propil metilfosfonato	29313400	0.615	0	20441	0
	2,4,6-tripropil-1,3,5,2,4,6-triossatrifosfinan 2,4,6-triossido	29313500	24.000	0	20261	0
	(5-etil-2-metil-2-ossido-1,3,2-diossafosfinan-5-il)metil metil metilfosfonato	29313600	9.671	0	2035	0
	Bis[(5-etil-2-metil-2-ossido-1,3,2-diossafosfinan-5-il)metil]metilfosfonato	29313700	0	0	0	0
	Sale di acido metilfosfonico ed (amminoimminometil)urea (1 : 1)	29313800	886.798	4.48	1050860	15676
	difluoruro metilfosfonico	29313920	0	2.25	0	3770
	dicloruro metilfosfonico	29313930	0	0	0	0
	acido etidronico (acido 1-idrossietano 1,1-difosfonico) e suoi sali	29313950	11306.032	3957.194	9712105	4906483
	Acido (nitrilotrimetanedil)trifosfonico, acido {[etan-1,2-diilbis[nitrilobis(metilen)]]tetrachisfosfonico, acido {[2-[bis(fosfonometil)amino]etil]amino)metil]bifosfonico, acido {[esan-1,6-diilbis[nitrilobis(metilene)]]tetrachisfosfonico, acido {[2-i]	29313960	3269.067	2865.898	2833188	3386844
	Acidi inorganici (escl. cloruro di idrogeno (acido cloridrico), acido clorosolfonico, acido solforico, oleum, acido nitrico, acidi solfonitrici, acido fosforico, acidi polifosforici, acidi borici, fluoruro d'idrogeno (acido fluoridrico), bromuro di idrogeno (acido bromidrico) e cianuro di idrogeno (acido cianidrico))	28111910	0	15.46	0	31633
	Composti chimici separati definiti derivati organofosforici, n.n.a.	29313990	3450.795	3256.773	20558166	7426281

Fonte: commercio estero COEWB- ISTAT (2017)

