

Paola Albanese^a, Francesca Cardano^b, Luca Consentino^c, Sara Fulignati^d, Tommaso Giovannini^{e*}, Daniele Mazzearella^f, Nicola Mirotta^g, Roberto Nisticò^h, Emilia Paoneⁱ, Giacomo Trapasso^j

^aDipartimento di Biotecnologie, Chimica e Farmacia e Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, Università degli Studi di Siena

^bDipartimento di Chimica, Università degli Studi di Torino

^cIstituto per lo Studio dei Materiali Nanostrutturati, CNR, Palermo

^dDipartimento di Chimica e Chimica Industriale, Università di Pisa

^eDipartimento di Fisica, Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Roma

^fDipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche, Università degli Studi di Roma Tor Vergata

^gMIMIT - Divisione V - "Materie prime, elettronica e fotonica" |

Direzione Generale per le nuove tecnologie abilitanti, Roma

^hDipartimento di Scienza dei Materiali, Università degli Studi di Milano-Bicocca

ⁱDipartimento DICEAM, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria

^jDipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica, Università Ca' Foscari Venezia

*tommaso.giovannini@uniroma2.it

LE 10 TECNOLOGIE EMERGENTI IN CHIMICA DI IUPAC 2025

Per mettere in luce il contributo della chimica al progresso tecnologico, IUPAC seleziona ogni anno le Top Ten Emerging Technologies in Chemistry: dieci innovazioni con potenziale dirompente per affrontare alcune delle principali sfide globali. In questo articolo, i 10 Young Observers italiani (<https://www.iupac.cnr.it/it/young-observers>) presentano e discutono le tecnologie emergenti scelte per il 2025.



Introduzione

La chimica è chiamata a rispondere in modo concreto alle grandi sfide globali, quali crisi climatica, transizione energetica, sostenibilità delle filiere e nuove esigenze in ambito sanitario. In questo contesto, l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) non è solo il riferimento globale per standard, nomenclatura e linguaggio della disciplina, ma anche un punto di riferimento sulle innovazioni che possono diventare tecnologie del prossimo futuro.

Dal 2019, l'iniziativa "Top Ten Emerging Technologies in Chemistry" seleziona queste innovazioni per aumentarne la visibilità e favorirne il loro trasferimento tecnologico. Come ogni anno, anche le tecnologie selezionate nel 2025 spaziano da tematiche verdi, come materiali e processi più sostenibili, e soluzioni per cattura e valorizzazione della CO₂, a strumenti digitali avanzati per prescreening computazionali (Fig. 1).

IUPAC riunisce 57 nazioni affiliate; per l'Italia la National Adhering Organization è il CNR (<https://www.iupac.cnr.it/>), che, tramite il programma Young Observers, promuove la partecipazione dei giovani ricercatori alle attività dell'Unione. Gli autori di questo articolo fanno parte della selezione italiana 2024-2025, e in questo articolo discutono le dieci tecnologie scelte per il 2025 [1].

1. Xolografia

La xolografia è una tecnica di stampa 3D volumetrica ad alta risoluzione che unisce la scienza dei materiali e la fotochimica per lo stampa di componenti dalle più svariate matrici polimeriche con altissimo

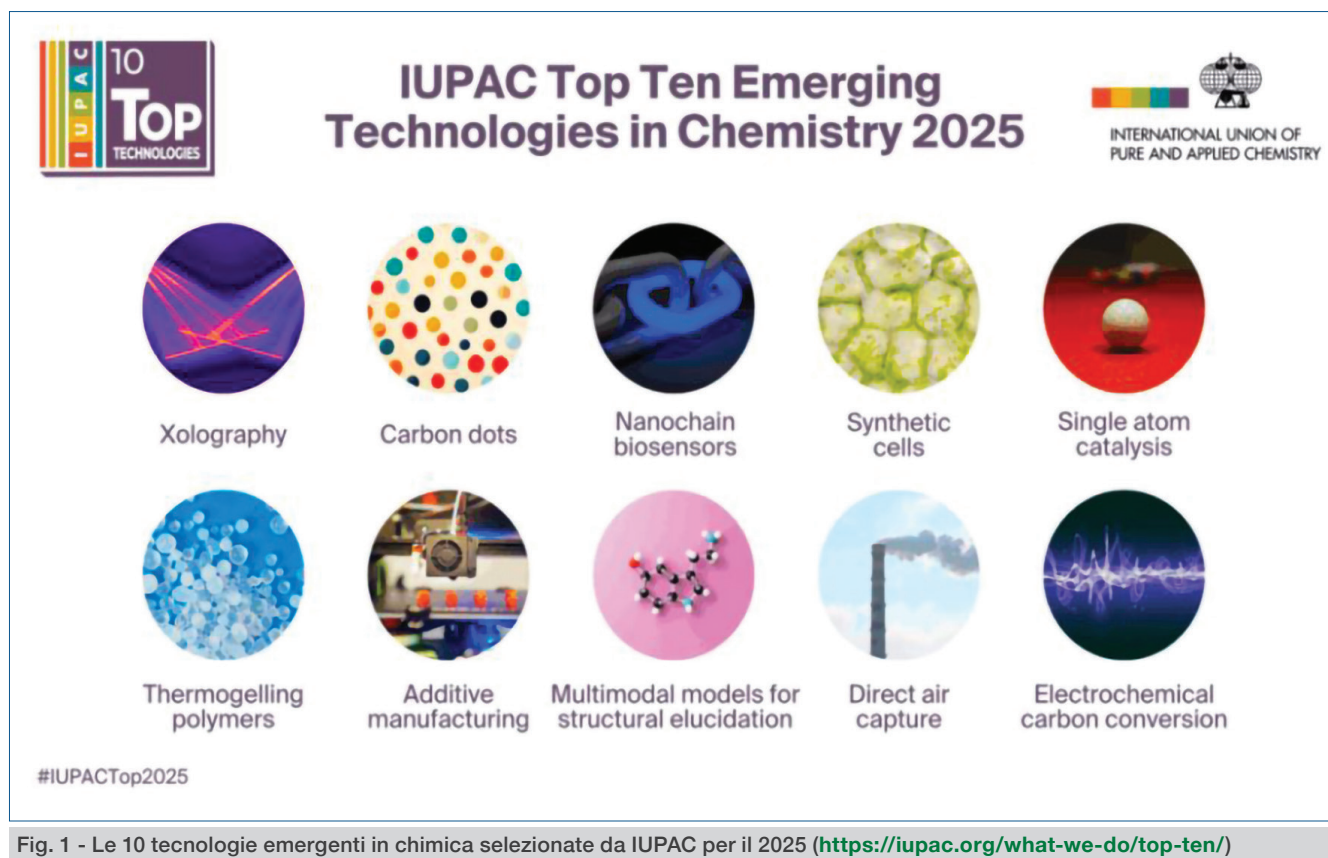


Fig. 1 - Le 10 tecnologie emergenti in chimica selezionate da IUPAC per il 2025 (<https://iupac.org/what-we-do/top-ten/>)

grado di definizione applicate nella produzione di materiali innovativi, componenti ottici e biomedicali [2, 3]. La xolografia sfrutta l'uso di due fasci di luce intersecanti e molecole foto-commutabili che consentono una polimerizzazione ad altissima risoluzione e precisione, garantendo un livello di dettaglio nel materiale stampato e nelle applicazioni potenziali senza precedenti (Fig. 2) [2, 4].

2. Carbon Dots

I carbon dots sono nanomateriali fluorescenti a base di carbonio che rappresentano un'alternativa più sostenibile ai quantum dots tradizionali [5]. Presentano varie strutture, da nuclei cristallini simili al grafene a forme amorfe o polimeriche, e sono caratterizzati da elevata stabilità, solubilità, bassa tossicità e facile funzionalizzazione chimica. Grazie alla fluorescenza modulabile e alla possibilità di funzionalizzazione mirata, trovano applicazione in sensing, bioimaging, rilascio di farmaci, terapie avanzate, catalisi ed energia, spesso attraverso processi produttivi basati su risorse rinnovabili [6].

3. Biosensori a nanocatena

Le nanocatene sono strutture composte da nanosfere di ossido di ferro e oro connesse chimicamente in maniera lineare a formare una catena, le cui superfici sono funzionalizzate con molecole specifiche [7]. Data la loro estrema sensibilità a campi magnetici, possono essere usati come sistemi di drug delivery guidabili tramite un campo magnetico esterno [8]. Le nanocatene possono anche essere applicate come barre di agitazione nei sistemi microfluidici per l'identificazione e la quantificazione ultrasensibile di biomarcatori proteici tumorali, con limiti di rilevabilità dell'ordine di ~10 ng/L [10], aprendo la strada a diagnosi cliniche più rapide e precise [9].

4. Cellule sintetiche

Le cellule sintetiche sono sistemi artificiali che ricreano, in modo semplificato, le funzioni fondamentali delle cellule viventi. Possono essere ottenute con un approccio top-down, che consiste nella progressiva riduzione della complessità genetica di cellule preesistenti, oppure bottom-up, basato sull'assemblag-

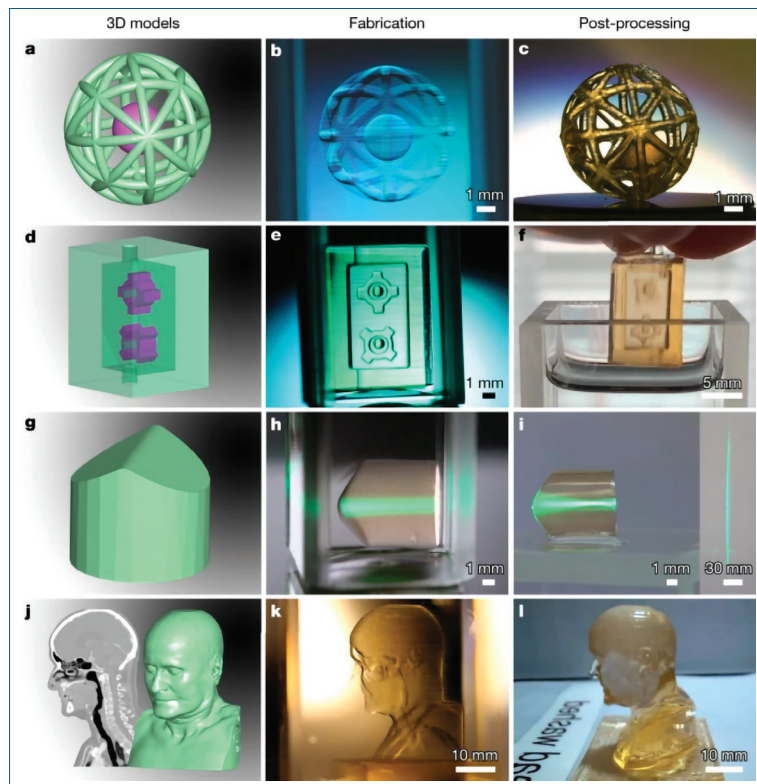


Fig. 2 - Modelli 3D (a, d, g, j) e immagini di oggetti realizzati tramite xolografia prima (b, e, h, k) e dopo (c, f, i, l) il post-processing. Immagine riprodotta da [2]

gio controllato di componenti molecolari in sistemi progressivamente più complessi [10-12]. Questa tecnologia apre prospettive scientifiche promettenti per lo studio dei meccanismi fondamentali della vita e per lo sviluppo di applicazioni avanzate: dal rilascio mirato di farmaci fino alla costruzione di bioreattori e piattaforme per la sostenibilità ambientale [10-12].

5. Catalisi a singolo atomo

I catalizzatori eterogenei rappresentano ancora oggi la tecnologia più diffusa nel settore industria-

le. Tradizionalmente, i siti catalitici attivi sono costituiti da nanoparticelle disperse su materiali di supporto. L'approccio innovativo della catalisi a singolo atomo si basa sull'utilizzo di atomi metallici isolati supportati. In questo modo, è possibile aumentare la reattività e la riciclabilità del catalizzatore, aumentando la sostenibilità dei processi [13], e la selettività, inibendo reazioni indesiderate [14]. Grazie a queste caratteristiche, i catalizzatori a singolo atomo stanno diventando soluzioni scalabili e adatte al mercato di massa (Fig. 3) [15].

6. Polimeri termogelificanti

I polimeri termogelificanti sono materiali che rispondono a stimoli esterni e subiscono una transizione sol-gel indotta dalla sola temperatura, passando da una soluzione fluida a un gel tridimensionale quando la temperatura raggiunge valori fisiologici [17]. Questa proprietà ne ha favorito l'impiego in ambiti quali la cosmetica, la diagnostica per immagini e il rilascio controllato di farmaci [18].

La chiave del loro successo è l'iniettabilità: somministrati come soluzioni liquide, gelificano spontaneamente *in situ*, consentendo un rilascio sostenuto di principi attivi o la formazione di impalcature per l'ingegneria tissutale. La ricerca attuale esplora inoltre applicazioni emergenti quali la bio-stampa 3D e la robotica soffice [19].

7. Manifattura additiva

Costruiamo il futuro, strato dopo strato: l'Additive Manufacturing sta rivoluzionando il modo in cui progettiamo e realizziamo la produzione [20]. Non

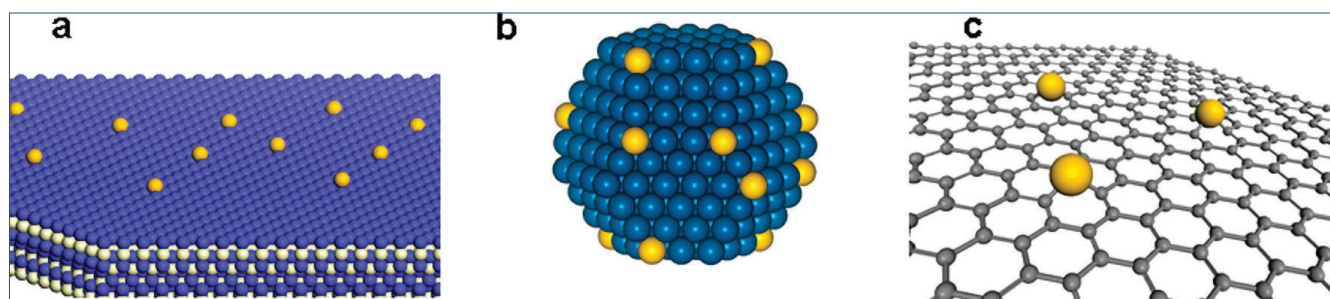


Fig. 3 - Diverse tipologie di catalizzatori a singolo atomo, dove atomi metallici isolati sono ancorati a (a) ossidi metallici, (b) nanosuperfici metalliche e (c) grafene. Immagine riprodotta da [16]

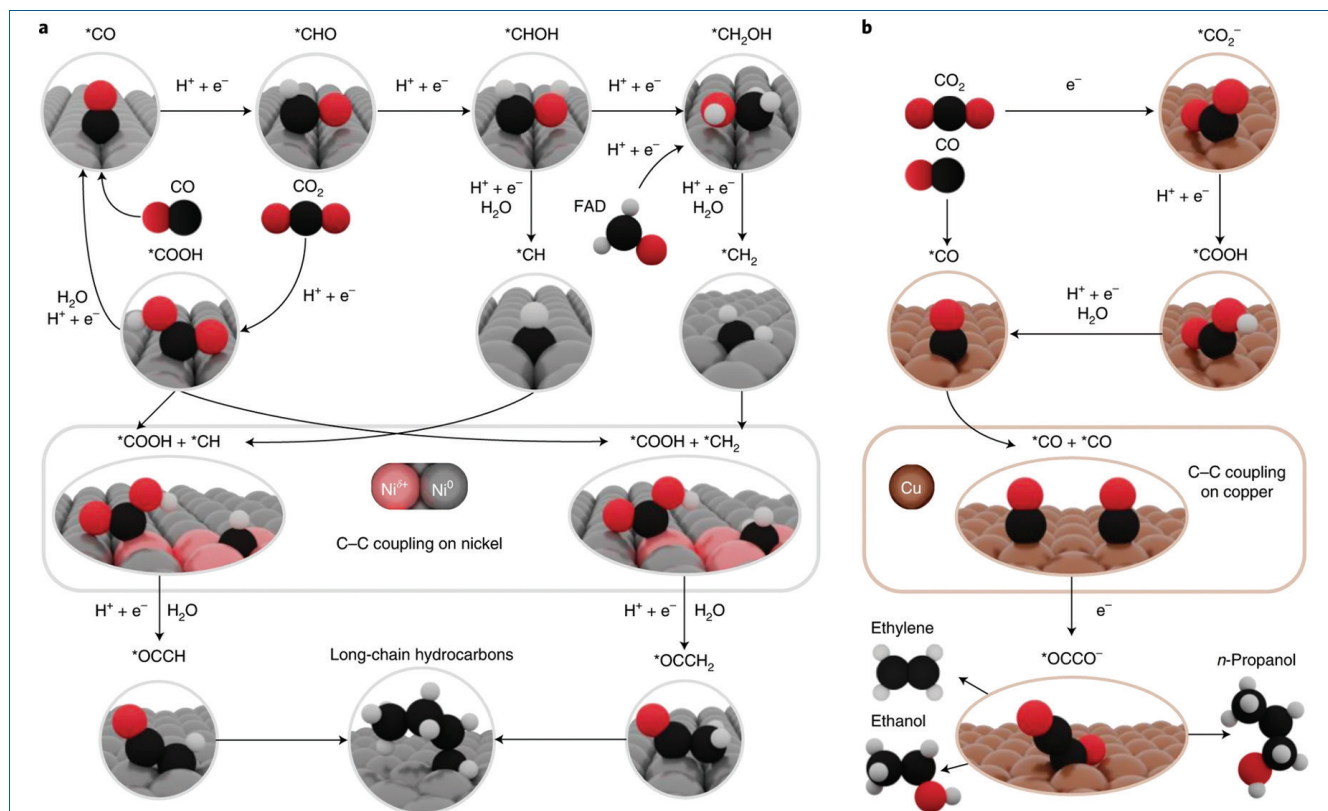


Fig. 4 - Esempi di coupling C-C tramite conversione elettrochimica dell'anidride carbonica sulla superficie di catalizzatori a base Ni (a) e Cu (b). Immagine riprodotta da [28]

è solo stampa 3D, ma un vero cambio di paradigma nella manifattura. Una trasformazione guidata dalla chimica, dove materiali innovativi, dai polimeri riciclabili ai metalli avanzati, prendono forma con precisione estrema e minimo spreco [21]. Dalla medicina rigenerativa all'aerospazio, questa tecnologia apre la strada a prodotti più leggeri, performanti e personalizzati, accelerando innovazione, efficienza e sostenibilità [22].

8. Modelli fondazionali multimodali per l'elucidazione strutturale

I modelli fondazionali multimodali basati su intelligenza artificiale per l'elucidazione strutturale integrano varie tecniche spettroscopiche (IR, NMR, UV e MS), superando metodi basati su singole tecniche, accelerando così l'assegnazione della struttura molecolare. In questo modo, permettono di ridurre sostanzialmente tempi e costi [23]. Sono addestrati su banche dati pubblici e dati brevettuali [24] e forniscono un supporto innovativo alla drug discovery, al design di nuovi materiali, al mo-

nitoraggio dell'inquinamento, al controllo qualità e all'analisi forense.

9. Cattura diretta dall'aria

La cattura diretta dall'aria (Direct Air Capture, DAC) rappresenta un'opzione strategica per ridurre la concentrazione atmosferica di CO₂ [25], attraverso l'adsorbimento reattivo su sorbenti basici con formazione di carbonati, ma con rigenerazione energivora, o su reticoli metallo-organici (MOF), materiali porosi "a spugna" con rigenerazione più facile. Quest'ultima soluzione è già arrivata ad impianti pilota e, talvolta, a dimostrazioni industriali [26]. Su scala globale la DAC è già operativa, con costi stimati <100 \$/ton di CO₂, oltre le stime più ottimistiche dell'International Energy Agency.

10. Conversione elettrochimica della CO₂

La conversione elettrochimica della CO₂ in combustibili e/o prodotti chimici, tra cui CO, CH₄, metanolo e idrocarburi/alcoli a catena più lunga, rappresenta un importante passo in avanti nella valorizzazione

di un prodotto di scarto (e fonte di inquinamento atmosferico) quale la CO₂ in una fonte di carbonio ed energia [27]. Grazie ai recenti sviluppi nella scienza dei materiali e in catalisi è stato possibile effettuare il design di catalizzatori (tipicamente a base Cu e Ni) in grado di permettere la conversione della CO₂ in idrocarburi sempre più complessi confermando la potenzialità di questa tecnologia emergente [28] che può anche essere integrata con fonti rinnovabili (Fig. 4) [29].

Conclusioni

Le tecnologie emergenti selezionate da IUPAC per il 2025 confermano il ruolo centrale della chimica nel rispondere alle grandi sfide globali, in particolare quelle legate alla sostenibilità, alla salute e alla transizione energetica. Come per l'edizione 2024 [29], la selezione evidenzia come la chimica sia tuttora una disciplina in rapida evoluzione, sempre più orientata verso soluzioni circolari, processi a basso impatto ambientale e materiali progettati con criteri di efficienza e responsabilità.

Un elemento trasversale alle ultime edizioni è la crescente integrazione di approcci digitali e computazionali, con l'intelligenza artificiale che sta diventando uno strumento chiave per accelerare l'analisi dei dati, l'elucidazione strutturale e l'innovazione in ambito chimico. Parallelamente, l'interdisciplinarietà emerge come fattore cruciale, con forti connessioni tra chimica, scienza dei materiali, biologia, ingegneria ed elettrochimica, come dimostrano le tecnologie per la cattura e la conversione della CO₂, i nuovi materiali funzionali e i sistemi ispirati a strutture e funzioni di sistemi biologici.

Nel complesso, le innovazioni del 2025 evidenziano come la ricerca chimica grazie alla sua visione integrata possa trasformare idee emergenti in strumenti concreti per affrontare le esigenze della società e contribuire a un futuro più sostenibile.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Gomollón-Bel, *Chem. Int.*, 2025, **47**, 6.
- [2] M. Regehy *et al.*, *Nature*, 2020, **588**, 620.
- [3] L. Stoecker *et al.*, *Adv. Mater.*, 2025, **37**, 2410292.
- [4] L. Stüwe *et al.*, *Adv. Mater.*, 2024, **36**, 2306716.
- [5] J. Ren *et al.*, *Adv. Sci.*, 2024, **11**, 2405472.
- [6] Z. Kang *et al.*, *Nanoscale*, 2019, **11**, 19214.
- [7] E. Karatahnasis *et al.*, *WIREs Nanomed. Nanobiotechnology*, 2016, **8**, 5.
- [8] S. Kralj *et al.*, *Pharmaceutics*, 2021, **13**, 8.
- [9] Q. Xiong *et al.*, *Nat. Commun.*, 2018, **9**, 1743.
- [10] W. Jiang *et al.*, *ACS Nano*, 2022, **16**, 15705.
- [11] S. Giavieri *et al.*, *Nat. Commun.*, 2025, **16**, 7488.
- [12] C.A. Hutchinson *et al.*, *Science*, 2016, **351**, aad6253.
- [13] M.A. Bajada *et al.*, *Cell Rep. Sustain.*, 2025, **2**, 100286.
- [14] S. Mitchell *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2018, **57**, 15316.
- [15] T.A. Gazis *et al.*, *ACS Catal.*, 2025, **15**, 6825.
- [16] X-F. Yang *et al.*, *Acc. Chem. Res.*, 2013, **46**, 1740.
- [17] H.A. Pearce, A.G. Mikos, *Curr. Opin. Biomed. Eng.*, 2022, **24**, 100412.
- [18] Z. Liu *et al.*, *Nat. Biomed. Eng.*, 2019, **8**, 598.
- [19] Q. Lin *et al.*, *Acc. Mater. Res.*, 2021, **2**, 881.
- [20] E. Sanchez-Rexach *et al.*, *Chem. Mater.*, 2020, **32**, 7105.
- [21] K. You *et al.*, *npj Adv. Manuf.*, 2025, **2**, 1.
- [22] T.D. Ngo *et al.*, *Compos. B Eng.*, 2018, **143**, 172.
- [23] M. Alberts *et al.*, *arXiv 2024*, arXiv.2407.17492.
- [24] Y. Su *et al.*, *arXiv 2025*, arXiv.2508.08441.
- [25] <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022>
- [26] X. Zhang *et al.*, *Carbon Capture Sci. Technol.*, 2023, **9**, 100145.
- [27] A.M. Zito *et al.*, *Chem. Rev.*, 2023, **123**, 8069.
- [28] Y. Zhou *et al.*, *Nat. Catal.*, 2022, **5**, 545.
- [29] M. Agliuzza *et al.*, *Appl. Energy*, 2023, **334**, 120649.
- [30] P. Albanese *et al.*, *La Chimica e l'Industria online*, 2025, **9**(1), 15.

The 2025 IUPAC Top Ten

Emerging Technologies in Chemistry

To showcase the role of chemistry in driving technological progress, IUPAC annually identifies the Top Ten Emerging Technologies in Chemistry: ten innovations with transformative potential to address major global challenges. In this article, the 10 Italian Young Observers (<https://www.iupac.cnr.it/it/young-observers>) present and discuss the emerging technologies selected for 2025.

