



TECNICHE ANALITICHE INNOVATIVE: UN SUPPORTO ALLE INDAGINI FORENSI

La chimica analitica è alla base delle scienze forensi moderne. L'evoluzione di tecniche cromatografiche, spettrometriche e spettroscopiche, unitamente a nuovi approcci integrati, consente di identificare e caratterizzare con precisione sostanze ignote, aumentando l'affidabilità, la riproducibilità e la robustezza dei risultati nelle indagini forensi.

Introduzione: le sfide dell'analisi forense moderna

Nell'ultimo decennio il mercato delle sostanze psicoattive illegali ha subito una trasformazione radicale. Non solo la quantità di droghe in circolazione è aumentata, ma anche la diversità chimica delle molecole disponibili è cresciuta in maniera esponenziale. Come riportato dal "European Drug Report 2025: Trends and Developments" i dati più recenti mostrano che i produttori di droghe continuano a creare nuove sostanze per eludere i controlli legali [1]. Nel corso del 2024 sono state identificate per la prima volta quarantasette nuove sostanze psicoattive (NPS), un numero che si colloca in prossimità della media annuale rilevata tra il 2016 e il 2022. Inoltre, nel 2023 sono state rinvenute, anche se in piccole quantità, circa 350 NPS delle già precedentemente segnalate. Le classi di molecole sequestrate spaziano dai derivati anfetaminici ai cannabinoidi sintetici, fino alle nuove molecole dissociative. L'identificazione di queste nuove sostanze introdotte clandestinamente nel mercato richiede strumenti analitici sempre più sofisticati. In questo contesto, le sfide da affrontare per i laboratori forensi includono: la presenza di isomeri strutturali, difficili da separare e distinguere con metodi convenzionali; l'analisi di campioni biologici, come sangue, urine o tessuti, contenenti sia la sostanza attiva sia numerosi metaboliti a basse concentrazioni; la necessità di identificare adulteranti in miscele complesse, per comprendere meglio i rischi associati all'uso delle sostanze e fornire prove solide anche in contesti giudiziari. Ad esempio, solo nel 2024 in Europa tramite

il sistema di allerta precoce (European Union Early Warning System on New Psychoactive Substances - EWS) sono stati identificati 20 cannabinoidi, 18 dei quali semi-sintetici [2]. Nel campo dei cationi sintetici, invece, si è osservato un incremento significativo della diffusione del 2-methylmethcathinone (2-MMC), che sembra emergere come sostituto del 3-methylmethcathinone (3-MMC). Sebbene i dati disponibili non siano rappresentativi a livello nazionale, le informazioni raccolte da servizi di *drug checking* operanti in 10 Stati Membri dell'Unione Europea nel primo semestre del 2024 indicano che circa il 50% dei campioni commercializzati come 3-MMC contenevano in realtà 2-MMC [3]. Tutto ciò mostra come il mercato delle NPS sia estremamente dinamico e ponga una sfida ai laboratori forensi che devono aggiornare continuamente le metodiche analitiche e la strumentazione per riuscire a riconoscere rapidamente nuove sostanze psicoattive o i loro prodotti metabolici [4]. Ciò richiede un approccio multidisciplinare che integri tecniche analitiche (ad esempio cromatografiche, spettrometriche e spettroscopiche), oltre a banche dati costantemente aggiornate e protocolli di validazione rigorosi per garantire l'affidabilità dei risultati. L'uso combinato di strumentazione avanzate, associato a elaborazione ed interpretazione dati mediante l'ausilio di software specifici, permette di affrontare problematiche che fino a pochi anni fa erano considerate irrisolvibili [5]. Dal punto di vista della ricerca scientifica, un rapido esame della letteratura mediante database Scopus ci mostra come per l'analisi di droghe sequestrate

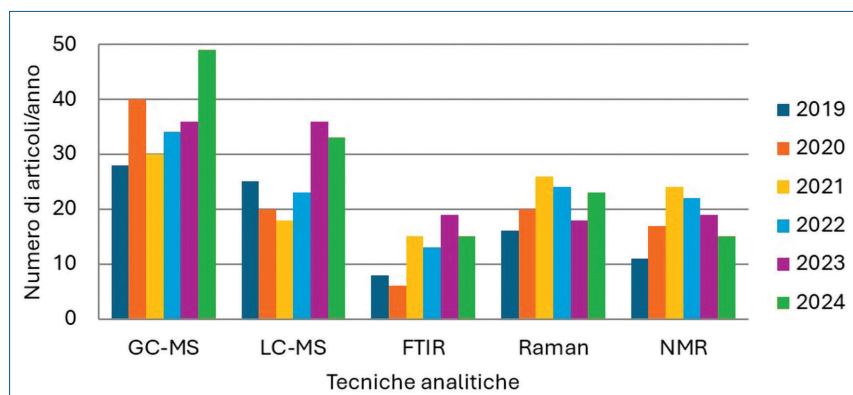


Fig. 1 - Numero di articoli pubblicati annualmente (2019-2024) aventi come oggetto, nel titolo o nell'abstract, l'analisi di *seized drugs* mediante tecniche analitiche specifiche. Risultati ottenuti da database Scopus tramite la query: TITLE-ABS ("name of the technique") AND (seized drug) e filtrati per area disciplinare (chemistry, pharmaceutical, environmental) e tipo di documento (article) [6]

(*seized drugs*) le tecniche principalmente utilizzate sono la gascromatografia accoppiata a spettrometria di massa (GC-MS, con 20-50 articoli annui nel 2019-2024) e la cromatografia liquida accoppiata a spettrometria di massa (LC-MS, con 15-35 articoli tra il 2019-2024) in considerazione dell'elevata affidabilità dei risultati, dei bassi limiti di rivelabilità e

quantificazione e data la possibilità di identificazione mediante l'utilizzo di database. Parallelamente, anche tecniche spettroscopiche quali Raman, spettroscopia di risonanza magnetica nucleare (NMR) e spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FTIR) stanno mostrando un incremento nell'utilizzo come riportato in Fig. 1.

La tecnica GC-FTIR

Tra le possibili applicazioni della tecnica FTIR in campo forense, rientra anche l'accoppiamento GC-FTIR. In particolare, queste due tecniche possono essere interfacciate mediante interfaccia a deposizione solida (*solid deposition*, -sd). La tecnica GC-sd-FTIR combina la separazione della miscela tramite cromatografia in fase gassosa, con l'analisi spettroscopica IR ad alta risoluzione dei singoli componenti, mediante deposizione solida del campione. La miscela viene vaporizzata e

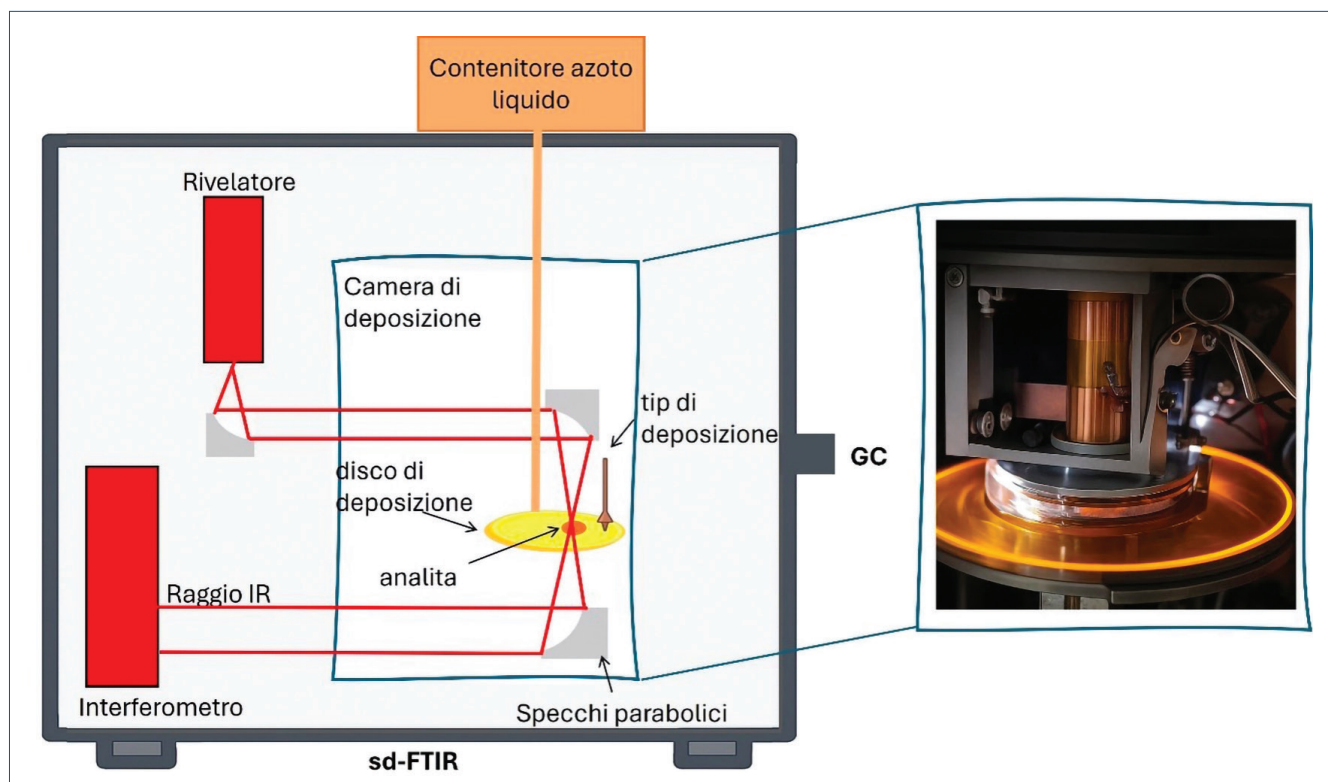


Fig. 2 - La figura mostra lo schema di funzionamento dell'interfaccia sd-FTIR (a sinistra), con una foto della camera di deposizione (nel riquadro). Maggiori informazioni sullo strumento sono disponibili sul sito del produttore [7]

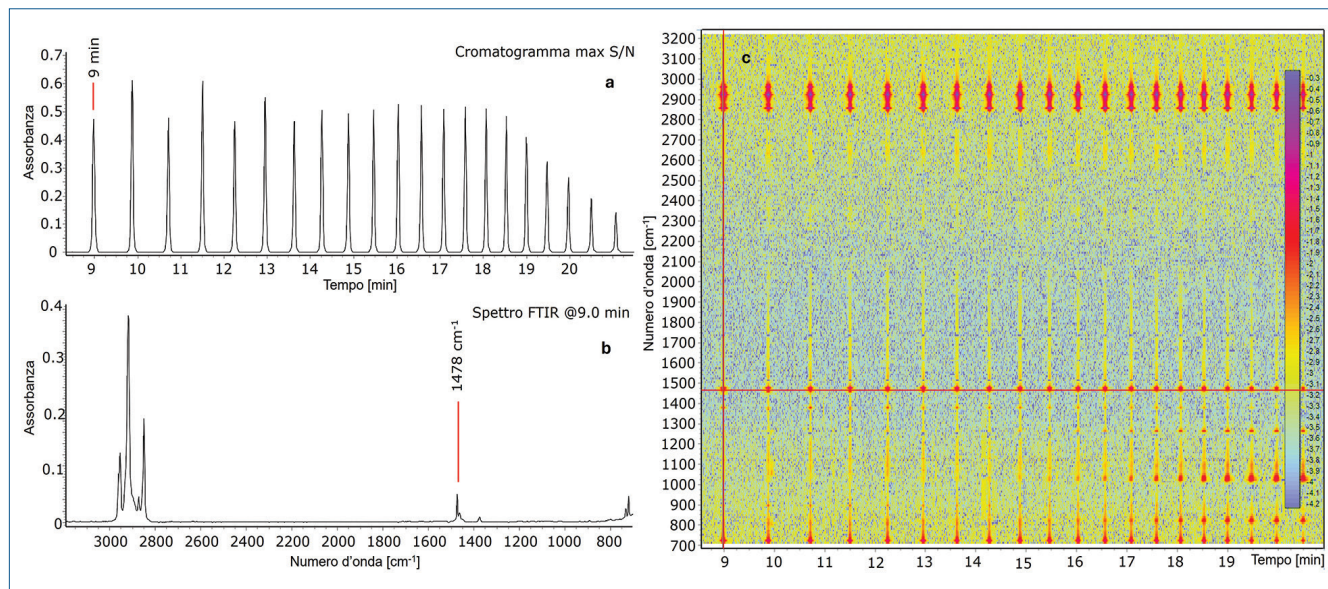


Fig. 3 - Esempio di analisi GC-sd-FTIR di un campione contenente idrocarburi a catena lineare C7-C30. Separazione ottenuta su colonna capillare di tipo SLB-5ms (30 m L x 0,25 mm i.d. x 0,25 μ m d.; a) espansione tra 8-21 min del cromatogramma ricostruito; b) spettro IR registrato a 9 min, c) plot bidimensionale tempo vs lambda di assorbimento, in cui la scala di colore indica l'intensità del segnale. Dati elaborati mediante software DiscovIR10™ [7]

iniettata nella colonna GC dove i composti vengono separati in base alla volatilità e all'affinità con la fase stazionaria. In uscita dalla colonna, il flusso di gas contenente gli analiti precedentemente separati, viene convogliato su un substrato solido, ovvero un disco di ZnSe, che è mantenuto ad una temperatura compresa tra -50°C e -100°C , mediante raffreddamento con azoto liquido. Il disco è mantenuto, inoltre, in una camera sottovuoto, per limitare interferenze spettrali dovute a vapore acqueo ed anidride carbonica. Lo strumento è schematizzato in Fig. 2.

Gli analiti in fase gassosa, entrando in contatto con il disco freddo, vengono depositati come solidi. Il disco ruota durante tutta la corsa cromatografica con un movimento a spirale controllato da un motore, permettendo la deposizione di tutti gli analiti della miscela. Una volta immobilizzati sul disco, gli analiti vengono irradiati con radiazione infrarossa (nel range compreso tra 4.000 e 700 cm^{-1}) e si registra lo spettro caratteristico della sostanza. Ciò permette l'identificazione dei gruppi funzionali e, se si utilizzano database spettrali di riferimento, si può confermare l'identità dei composti separati dalla GC con un dato valore di similarità. Questo approccio migliora la sensibilità della tecnica GC-FITR e consente di analizzare anche sostanze in tracce.

Inoltre, poiché i composti rimangono come deposito sul substrato, è possibile ricorrere a meccanismi quale la ri-deposizione o il *re-scan* per incrementare il rapporto segnale/rumore. Infine, la velocità di rotazione del disco può essere variata da 1 a 12 mm/min per ottenere il miglior compromesso tra intensità di segnale e risoluzione cromatografica [8].

L'output visualizzabile dall'operatore, mostrato in Fig. 3, comprende un cromatogramma ricostruito, noto anche come cromatogramma Gram-Schmidt [9], che permette di monitorare l'eluizione dei componenti separati mediante GC-FTIR. Può essere descritto come segue: quando una miscela passa attraverso la colonna GC e arriva sul disco, lo spettrometro IR acquisisce uno spettro completo ogni 0,5 secondi. Ogni spettro contiene informazioni di assorbimento su tutte le lunghezze d'onda, quindi è possibile calcolare l'intensità totale della luce IR assorbita in quell'istante. L'intensità totale viene poi tracciata in funzione del tempo, generando il cromatogramma ricostruito in cui l'asse delle ascisse indica il tempo di ritenzione, mentre l'asse delle ordinate rappresenta l'assorbimento totale. La risposta è molto simile a quella ottenibile tramite rivelatori convenzionali. In altre parole, il cromatogramma Gram-Schmidt somma tutti gli assorbimenti IR in tempo reale, ricostruendo la cromatografia diretta-



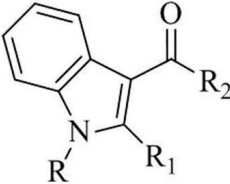
	Nome comune	Nome sistematico	R	R ₁	R ₂
	JWH-018	1-Pentil-3-(1-naftoil)indolo	n-Pentile	H	1-Naftile
	JWH-019	1-Esil-3-(1-naftoil)indolo	n-Esile	H	1-Naftile
	JWH-073	1-Butil-3-(1-naftoil)indolo	n-Butile	H	1-Naftile
	JWH-020	1-Eptil-3-(1-naftoil)indolo	n-Eptile	H	1-Naftile
	JWH-015	1-Propil-3-(1-naftoil)-5-metilindolo	n-Propile	CH ₃	1-Naftile
	JWH-250	1-Pentil-3-(2-metossibenzoil)indolo	n-Pentile	H	2-Metossi-benzile

Fig. 4 - Struttura chimica dei derivati della serie JWH e tabella riassuntiva delle principali varianti sintetiche dei cannabinoidi JWH (JWH-018, JWH-019, JWH-073, JWH-020, JWH-015 e JWH-250), con indicazione dei nomi sistematici e dei rispettivi gruppi sostituenti (R, R₁, R₂). Adattato da [10] sotto i termini della licenza Creative Commons Attribution (CC BY)

mente dai segnali FTIR. Questo approccio è particolarmente utile, poiché consente di visualizzare l'eluzione di tutti i picchi separati dalla GC, anche di composti che potrebbero generare segnali deboli o nulli con rivelatori convenzionali. Dai singoli spettri IR, acquisiti in ciascun punto del cromatogramma, è poi possibile estrarre le informazioni vibrazionali caratteristiche di ogni componente, migliorando così l'identificazione dei componenti del campione analizzato.

La spettroscopia IR è una tecnica universale, poiché quasi tutte le molecole organiche presentano assorbimenti caratteristici in questo intervallo spettrale. I principali vantaggi dell'impiego di questo rivelatore includono la possibilità di analizzare composti non ionizzabili e isobari, nonché di discriminare tra molecole isomere o strutturalmente simili. Inoltre, rispetto a tecniche analoghe basate su interfacce in fase vapore, consente di raggiungere limiti di rilevabilità dell'ordine della decina di nanogrammi, ampliando il campo di applicazione, non solo all'analisi di campioni di polveri sequestrate, ma anche a matrici biologiche.

Si riportano di seguito tre esempi di casi studio a dimostrazione dell'applicabilità della tecnica in campo forense.

Caso Studio-1: identificazione di cannabinoidi sintetici

L'articolo indaga le potenzialità della tecnica per applicazioni in campo forense, usando come *proof of concept* degli standard di cannabinoidi sintetici e un campione estratto da matrice vegetale o *herbal mixture* [10]. La capacità discriminativa della tecnica è stata testata su composti appartenenti alla classe dei derivati alchilici della naftoilindolina, comunemente indicate come JWH e rappresentate in

Fig. 4. Questi composti presentano una struttura comune costituita da un nucleo indolico legato tramite un gruppo carbonilico a un anello aromatico (solitamente naftalenico o fenil-sostituito) e da una catena alchilica legata sull'atomo di azoto. Le modifiche sui tre siti R, R₁ e R₂, consentono di ottenere un'ampia gamma di analoghi. La sostituzione può avvenire quindi sulla catena alchilica legata all'azoto dell'anello indolico R, come nei derivati JWH-018, JWH-019, JWH-073, JWH-020; sull'anello indolico, in corrispondenza del gruppo R₁, come nel JWH-015 e, infine, sulla catena legata al gruppo carbonilico R₂, come nel JWH-250 [11].

L'utilizzo della tecnica con l'interfaccia -sd consente di aumentare la sensibilità (fino a pochi nanogrammi) e la risoluzione spettrale, consentendo di osservare dettagli delle bande vibrazionali che andrebbero persi in fase gassosa. Le analisi effettuate sullo standard JWH-018, hanno mostrato che si ha una risposta lineare nel range 20-1000 ng, con limite di rilevazione (LOD) di 4,3 ng e limite di quantificazione (LOQ) di 14,3 ng. Interessante è il limite di identificazione (LOI), ovvero la minima quantità che consente il riconoscimento corretto tramite confronto in libreria (similarità <90%), che nel caso in esame è stato stimato intorno ai 50 ng.

Per validare l'efficacia del metodo, è stato creato un database di spettri IR in fase solida contenente circa 600 NPS. Le identificazioni sono state effettuate tramite un algoritmo di correlazione che fornisce una similarità, qui riportata come *Quality Match Factor* (QMF), un numero da 0 a 100, dove 100 rappresenta il massimo di similarità [11].

Dopo aver effettuato l'analisi GC-sd-FTIR, il JWH-018 è stato identificato tramite confronto con lo spettro in libreria con un QMF del 99,5%, mentre gli analoghi strutturali (JWH-073, JWH-019) hanno

mostrato valori inferiori al 90%. Tale differenza dimostra l'elevata capacità discriminante della tecnica, in particolare per molecole strutturalmente simili, che differiscono solo per la lunghezza della catena alchilica o per la posizione di un sostituito (Fig. 5). La tecnica è poi stata applicata ad un campione reale sequestrato, costituito da una miscela vegetale contenente più cannabinoidi sintetici (identificati come JWH-250, JWH-015, JWH-073, JWH-018). Le analisi GC-FTIR e GC-MS sono state condotte in parallelo. La GC-MS, pur offrendo una sensibilità maggiore, ha mostrato difficoltà nel distinguere isomeri con spettro di massa quasi identico: nel caso di JWH-250, gli isomeri JWH-201 e JWH-302 fornivano valori di similarità molto simili (QMF = 96%, 95% e 94%, rispettivamente). Al contrario, il GC-FTIR ha restituito un QMF pari a 98% per il composto corretto e valori inferiori al 45% per gli altri isomeri, garantendo così un'identificazione univoca. Questo caso dimostra la capacità della tecnica di distinguere composti con elevata somiglianza strutturale e la sua efficacia come alternativa o complementarietà agli approcci GC-MS.

Caso Studio-2: identificazione di molecole psicoattive derivate dai cationi e dalla fenciclidina in polveri e campioni biologici

Un secondo caso di studio riguarda l'identificazione di derivati della fenciclidina e dei cationi sintetici in campioni sequestrati, responsabili di numerosi casi di intossicazione, talvolta fatali [12]. In particolare, nelle metossifenciclidine (MeO-PCP) il gruppo metossilico (-OCH₃) può occupare diverse posizioni sull'anello aromatico, così come il gruppo metilico (-CH₃) nei metil-metcationi (MMC). Entrambe le classi di sostanze rappresentano una notevole sfida analitica, poiché i rispettivi isomeri posizionali (2-, 3- e 4-MMC o 2-, 3- e 4-MeO-PCP) mostrano spettri di massa e comportamenti cromatografici molto simili, rendendo difficile una discriminazione affidabile mediante le sole tecniche convenzionali [13]. Nell'articolo si analizzano due polveri sequestrate, relative a due casi di intossicazione, che riportavano in etichetta le diciture 3-MMC e 3-MeO-PCP. Su tali campioni è stata condotta un'indagine analitica integrata, basata sull'impiego combinato di GC-MS, GC-sd-FTIR e cromatografia liquida accoppiata a spettrometria di

massa ad alta risoluzione (LC-HRAM-Orbitrap-MS). Nel dettaglio, grazie alla presenza di bande di assorbimento IR caratteristiche e al confronto con librerie dedicate, è stato possibile identificare la prima polvere come 3-MMC, con un QMF del 91,6%, contro valori del 14% e 11% per gli altri due isomeri. Per la seconda polvere, identificata come 3-MeO-PCP, il QMF ha raggiunto il 96,1% per la corrispondenza corretta, e solo 14,6% per il 4-MeO-PCP; l'isomero 2-MeO-PCP non era presente nel database. Questa discriminante in termini di similarità è attribuibile alle marcate differenze osservabili nello spettro IR

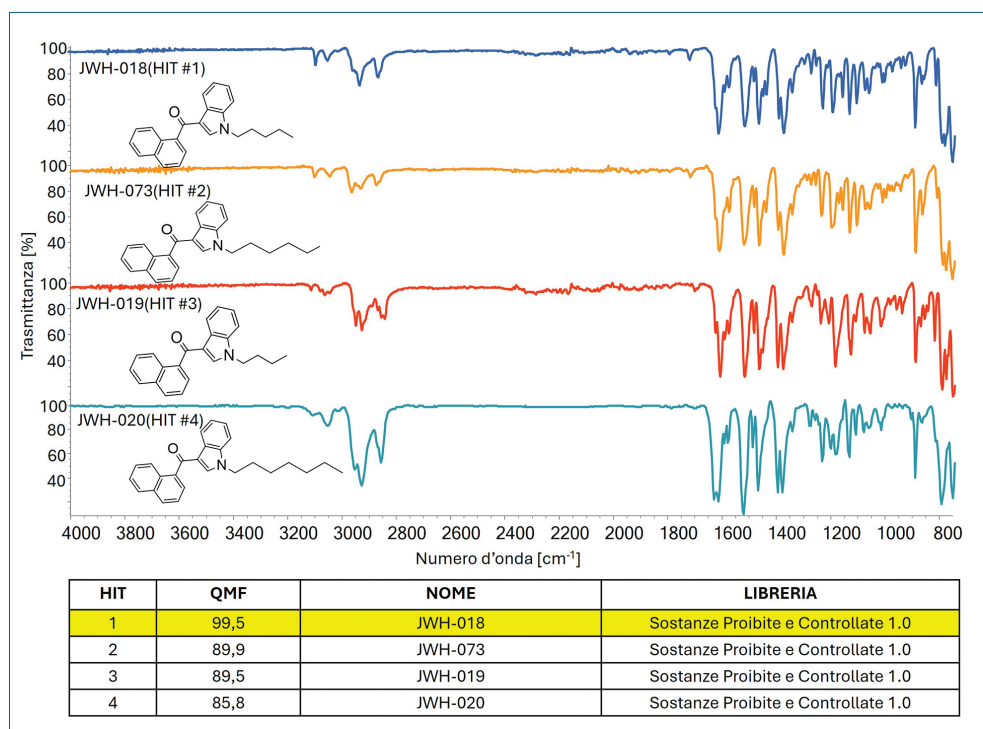


Fig. 5 - Finestra del software che mostra i risultati della ricerca in libreria per i dati spettrali IR di JWH-018. In alto: spettri infrarossi di JWH-018 e dei suoi analoghi strutturali (Hit 1-4) ottenuti dalla ricerca in libreria. In basso: valori di QMF ottenuti per JWH-018 rispetto a corrispondenze corrette e incorrette. Adattata da [10] sotto i termini della licenza Creative Commons Attribution (CC BY)

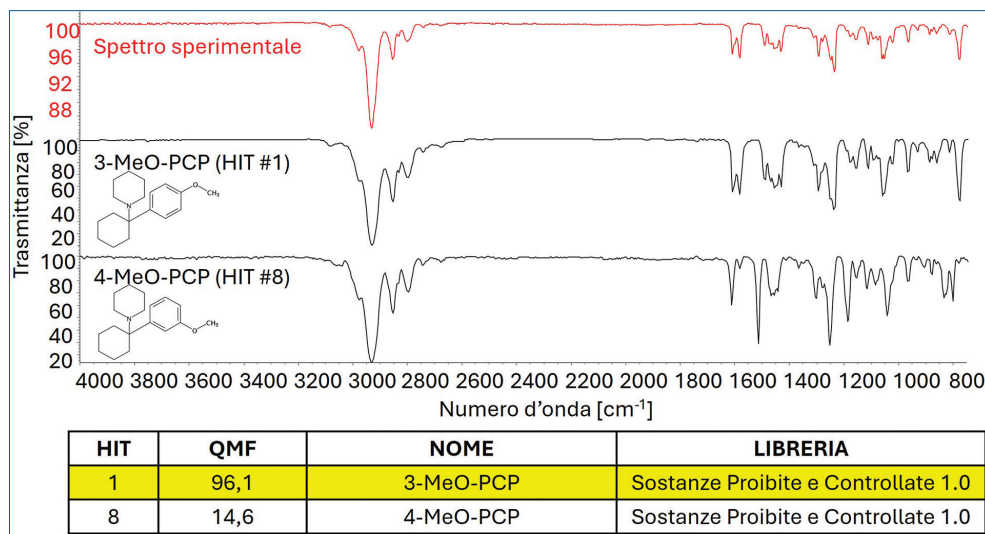


Fig. 6 - Confronto tra lo spettro IR sperimentale (in rosso) e gli spettri di riferimento presenti nella libreria. Il miglior match ottenuto (HIT #1) corrisponde al 3-MeO-PCP con un QMF pari a 96,1, mentre il composto strutturalmente correlato 4-MeO-PCP mostra una corrispondenza significativamente inferiore (QMF = 14,6). Riprodotta da [12] sotto i termini della licenza Creative Commons Attribution (CC BY)

(Fig. 6). Tali variazioni, ad esempio nella regione di circa 700-900 cm^{-1} sono tipiche di molecole aventi un anello benzenico con un sostituito in posizione *orto*-, *meta*- o *para*-, poiché si riferiscono vibrazioni di piegamento C-H fuori piano dell'anello aromatico e sono strettamente correlate al pattern di sostituzione (tipicamente si osserva una banda intensa nel range 810-750 cm^{-1} per gli *orto*, i *meta* mostrano due o più bande distinte tra 840-810 cm^{-1} , mentre i *para* sono caratterizzati da una singola banda marcata tra 860-800 cm^{-1}) [14]. Ciò a dimostrazione che, anche in assenza dello standard commerciale e del corrispondente spettro IR in database, è comunque possibile identificare la posizione del gruppo $-\text{OCH}_3$ mediante l'osservazione delle bande diagnostiche nella regione del *fingerprint* aromatico.

All'analisi delle polveri è seguita l'analisi dei campioni biologici (sangue, plasma e urina) di due soggetti intossicati. L'analisi LC-HRAM-Orbitrap-MS ha rivelato la presenza di MeO-PCP in tutti i campioni e l'assenza di MMC, indicando che solo il PCP-derivato era stato effettivamente assunto. Sono stati individuati oltre 30 metaboliti, appartenenti alle fasi I e II. Questa capacità di identificare numerosi metaboliti in modo *untargeted* è una caratteristica distintiva della spettrometria Orbitrap ad alta risoluzione. Successivamente, anche la GC-sd-FTIR è stata applicata ai campioni di urina, confermando la presenza

di 3-MeO-PCP attraverso una strategia di deposizione multipla del campione. In questo modo è stato possibile aumentare il rapporto segnale/rumore e anche il valore di QMF (>90% dopo nove ri-deposizioni) come mostrato in Fig. 7.

Questo risultato è particolarmente significativo perché dimostra che la tecnica può essere impiegata con successo anche su campioni biologici complessi, ampliando le sue potenzialità in ambito tossicologico-forense.

Caso Studio-3: campioni di eroina adulterati

Un ultimo caso studio riguarda l'analisi di campioni di eroina adulterata, nota con il nome di eroina ad alta potenza (HPH) [15]. Lo studio mette in evidenza le complessità crescente delle analisi riguardanti le miscele di eroina circolanti.

L'indagine ha riguardato 45 campioni sequestrati, analizzati con tecniche cromatografiche e spettroscopiche complementari quali GC-MS, GC-sd-FTIR e HPLC-MS/MS chirale, per identificare in modo completo i costituenti, le impurezze di sintesi e individuare eventuali nuove sostanze. Negli ultimi anni, in Europa, e in particolare in Italia, le

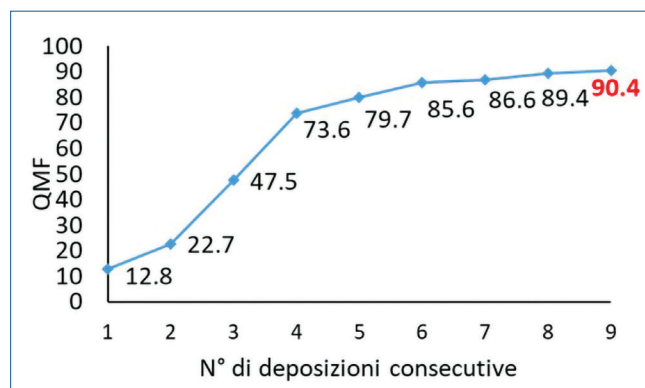


Fig. 7 - Andamento della similarità spettrale (QMF) in funzione del numero di deposizioni consecutive della stessa corsa cromatografica. Si osserva un incremento progressivo del QMF fino a raggiungere il 90% alla nona deposizione

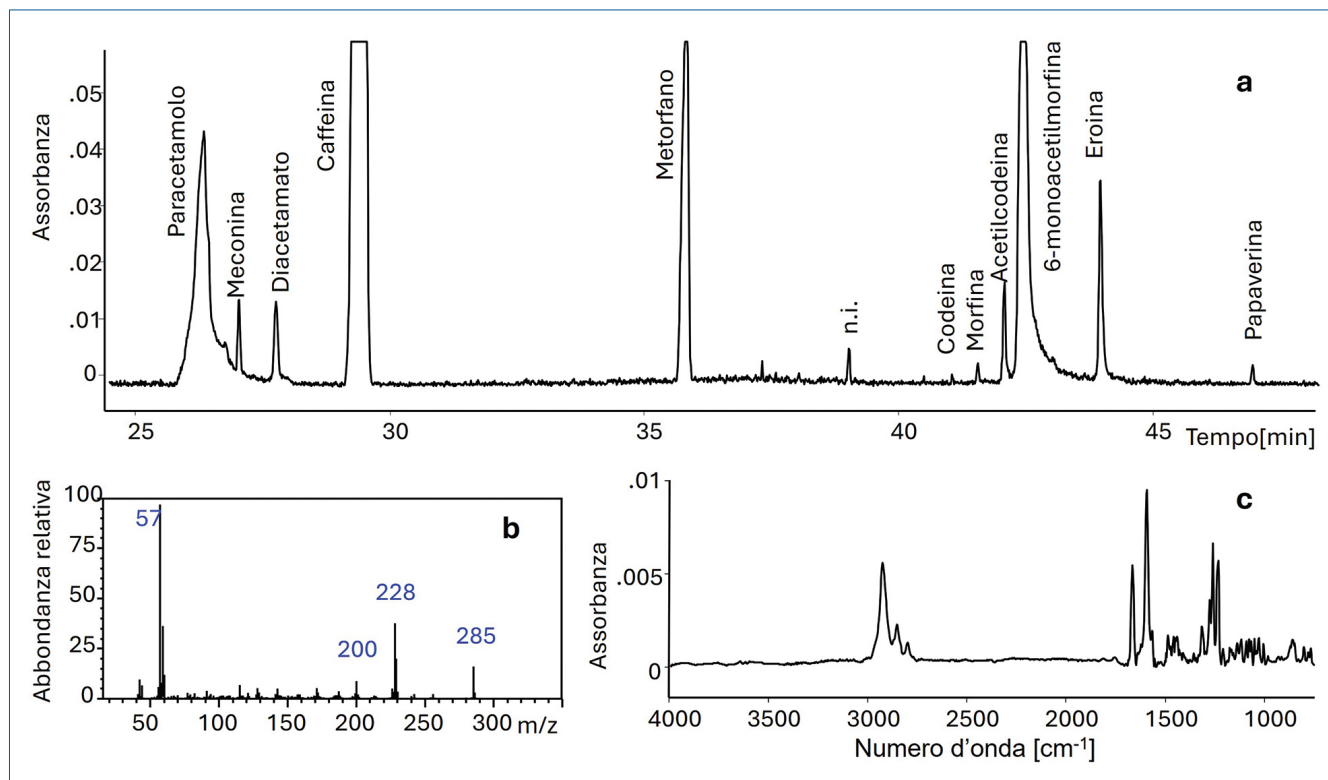


Fig. 8 - a) Cromatogramma GC-sd-FTIR di un campione di eroina sequestrato; b) spettro di massa del composto incognito e c) rispettivo spettro FTIR

pratiche di adulterazione si sono diversificate per aumentare i profitti, ma anche per modificare gli effetti farmacologici; contemporaneamente si è assistito a un aumento delle overdosi legate all'HPH. Tra gli agenti di taglio più comuni dell'eroina figurano caffeina e paracetamolo. Tuttavia, negli ultimi anni si è diffusa la presenza del metorfano, composto chirale che esiste in due enantiomeri, il destrometorfano (DXM), antitussivo e dissociativo a dosi elevate ed il levometorfano (LVM), potente analgesico oppioide, soggetto a controllo legale [16]. Lo scopo dello studio è stato quindi caratterizzare le polveri, identificare tutti i componenti e discriminare gli enantiomeri del metorfano per comprendere meglio le tendenze del mercato illecito e i potenziali rischi tossicologici. Nel complesso, sono stati identificati 26 componenti (oppiacei e derivati, adulteranti, diluenti) tra cui: eroina, 6-monoacetilmorfina, codeina, morfina, noscapina, papaverina, acetilcodeina, caffeina, paracetamolo, metorfano, lidocaina, clorochina, cocaina, mannitolo e delle impurezze di sintesi, quali triacetilnormorfina e meconina. L'uso combinato di rivelazione MS e FTIR

ha permesso l'identificazione di sostanze sconosciute. Ad esempio, nel cromatogramma in Fig. 8 è evidenziato un composto incognito (n.i.), presente in circa il 50% delle polveri analizzate, non identificabile mediante confronto con librerie spettrali. Il confronto con gli spettri di massa e quelli FTIR, in Fig. 8b e 8c, ha permesso infatti solo di restringere il campo dei possibili candidati, suggerendo una struttura di tipo morfinico. Dall'analisi dello spettro di MS e dei picchi caratteristici in IR il composto è stato tentativamente identificato come idromorfone, un oppioide con effetti 8 volte maggiori della morfina. Infine, tutti i 45 campioni contenevano metorfano in concentrazioni da 2,86 a 1.190 mg/L, confermando la sua diffusione come adulterante sistematico. L'enantiomero levogiro è stato trovato solo in due campioni in concentrazioni 0,038 e 0,21 mg/L. La presenza di LVM, pur minima, è significativa perché il composto è un oppiaceo ad alta potenza e può amplificare gli effetti depressivi dell'eroina, ciò evidenzia l'importanza dell'analisi stereochimica per la corretta interpretazione tossicologica.



Conclusioni

L'evoluzione delle metodiche analitiche ha influenzato l'approccio alle indagini forensi, consentendo la caratterizzazione accurata di sostanze sconosciute anche in matrici complesse e in presenza di isomeri strutturali difficilmente distinguibili con tecniche tradizionali. In questo contesto, la GC-sd-FTIR si è dimostrata una tecnologia ad alto potenziale discriminante, capace di integrare la selettività della gascromatografia con il potere identificativo della spettroscopia IR. L'interfaccia -sd consente analisi ad alta risoluzione spettrale su quantità minime di analita e permette anche di migliorare la qualità del segnale tramite strategie di ri-deposizione e di scansioni multiple.

I casi studio presentati dimostrano come l'approccio GC-sd-FTIR offra informazioni complementari alla spettrometria di massa, permettendo l'identificazione di analoghi strutturalmente simili, la discriminazione di isomeri posizionali e la caratterizzazione di miscele complesse. La tecnica rappresenta quindi uno strumento complementare alla GC-MS e altamente selettivo, in grado di aumentare la specificità, la robustezza e l'affidabilità delle identificazioni. L'integrazione di diverse tecniche in un *workflow* analitico, insieme all'ampliamento delle banche dati spettrali e alla standardizzazione dei protocolli di validazione rappresentano i passi successivi per consolidare l'impiego della tecnica nella routine dei laboratori forensi, contribuendo ad aumentare la riproducibilità e l'affidabilità dei risultati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction, *European Drug Report 2025: New Psychoactive Substances*, https://www.euda.europa.eu/publications/european-drug-report/2025/new-psychoactive-substances_en
- [2] European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction, *EU Early Warning System on New Psychoactive Substances*, https://www.euda.europa.eu/archived/publications/topic-overviews/eu-early-warning-system_en
- [3] J. Néfau, J. De Morais *et al.*, *Toxicologie Analytique et Clinique*, 2025, **37**, S22.
- [4] United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC), *Global SMART Update, The Continued Emergence of New Psychoactive Substances*, Vol. 29, United Nations, Vienna, 2024. <https://www.unodc.org/unodc/en/scientists/global-smart-update.html>
- [5] P. Koczoń, J.T. Hołaj-Krzak *et al.*, *International Journal of Molecular Science*, 2023, **245**(2), 1013.
- [6] Elsevier B.V., Scopus Database - Search Results for "Seized Drug" and Analytical Techniques (2019–2024), accesso Ottobre 2025, <https://www.scopus.com>
- [7] Spectra Analysis Instruments, DiscovIR GC/FTIR System Information, <https://spectra-analysis.com>
- [8] T.M.G. Salerno, C. Coppolino *et al.*, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2022, **414**, 703.
- [9] D.T. Sparks, R.B. Lam *et al.*, *Analytical Chemistry*, 1982, **54**, 1922.
- [10] T.M.G. Salerno, P. Donato *et al.*, *Frontiers in Chemistry*, 2020, **8**, 624.
- [11] K.C. Evans-Newman, G.L. Schneider *et al.*, *Molecules*, 2024, **29**, 4646.
- [12] G. Frison, F. Zancanaro *et al.*, *Frontiers in Chemistry*, 2020, **8**, 6183.
- [13] M. Verhoeven, J. Bonetti *et al.*, *TrAC Trends Anal. Chem.*, 2023, **166**, 117157.
- [14] B.C. Smith, *Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach*, CRC Press, Boca Raton (FL), 2011, 207.
- [15] T.M.G. Salerno, L. Zamengo, *et al.*, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2025, **417**, 5187.
- [16] S. Jorbenadze, T. Khatishvili *et al.*, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2024, **237**, 115769.

Innovative Analytical Techniques: a Tool for Forensic Investigations

Analytical chemistry represents the basis of modern forensic science. The evolution of chromatographic, spectrometric, and spectroscopic techniques, combined with integrated innovative approaches, enables the precise identification and characterization of unknown substances, enhancing the reliability, reproducibility, and robustness of results in forensic investigations.