

**A. MAZZATENTA, T. PIETRAGELO,
R. DEMONTIS, C. VALENTINI,
A. BERTI, M. LOCATELLI,
C. D'OVIDIO**

**L'innovativa tecnica probatoria della
Volabolomica avrebbe potuto cambiare
l'esito della sentenza sul cosiddetto
“omicidio della pittrice”?¹**

Nella scienza forense, i progressi nell'identificazione delle tracce rappresentano un aspetto cruciale. Un recente sviluppo nella ricerca Volabolomica evidenzia la possibilità di utilizzare i Composti Organici Volatili (VOCs) come prove. In questo studio, abbiamo applicato la ricerca sperimentale sui VOCs alle indagini forensi, adattando il metodo a un caso reale di omicidio. Le registrazioni dei dati volabolomici sono state effettuate utilizzando un naso elettronico (e-nose), un sensore per gas. Abbiamo testato, in condizioni che simulano quelle reali dell'omicidio, l'emissione di VOCs da sacchetti di plastica di marche diverse, la loro permeabilità ai gas della decomposizione cadaverica, cioè il *Volaboloma mortis*. Tutti i tipi di sacchetti di plastica utilizzati rilasciano VOCs, con lievi differenze a seconda del materiale e del metodo di lavorazione. Inoltre, tutti i sacchetti consentono la permeazione dei VOCs, in modo coerente, con un tasso di permeazione più elevato tra le 48 e le 72 ore. Questi risultati sottolineano l'importanza dello studio delle tracce volabolomiche, potenzialmente rappresentano una svolta nell'analisi della scena del crimine, arricchendola con un nuovo insieme di prove oggettive misurabili.

Volabolomics' innovative evidence technique could have changed the outcome of the 'painter murder' sentence?

In the context of forensic science, advances in trace identification are a crucial aspect. A recent advance in the investigation of volatile compounds highlights the possibility of using VOCs as evidence. In this paper, we applied experimental research on Volaboloma mortis to forensic investigations, applying the method to a real murder case. Volabolomic data recordings were made using an e-nose sensor. We tested, under conditions mimicking the true circumstances of a murder, the emission of VOCs from plastic bags and their permeability to the gases of cadaveric decay. All types of plastic bags used release VOCs, with slight differences depending on the material and processing method. In addition, all bags allow permeation to VOCs, in a consistent manner, enabling a higher permeation rate between 48 and 72 hours. These results highlight the importance of studying volabolomic traces, which could enable a breakthrough in crime scene analysis by enriching it with a new set of measurable evidence.

SOMMARIO: 1. Introduzione. – 2. Il caso giudiziario. – 3. La domanda sperimentale forense. – 4. Materiali e Metodi. – 5. Risultati. 5.1. Controllo negativo: emissioni da sacchetti per rifiuti compostabili. 5.2. Controllo positivo: emissione di VOCs da resti animali. 5.2.1. Controllo positivo: emissione di VOCs da

¹ Articolo già pubblicato in lingua inglese in *Forensic Science International*, online dal 15 aprile 2025.

resti umani. 5.3. Esperimento: i VOCs umani permeano i sacchi della spazzatura compostabili. 5.4. Impronta digitale dei VOCs umani permeati nell'auto laboratorio. – 6. Discussione. – 7. Conclusioni.

1. *Introduzione.* La morte comporta l'arresto della circolazione sanguigna e, di conseguenza, la cessazione dell'ossigenazione dei tessuti, generando progressivamente ipossia e anossia cellulare. La fisiologia di questa condizione implica il rigonfiamento delle cellule, la rottura delle membrane cellulari e il rilascio di enzimi che portano all'autolisi dei tessuti molli [1]. La lisi cellulare favorisce la replicazione, la migrazione e l'attività dei batteri endogeni, causando rigonfiamento gassoso e gonfiore dei tessuti molli [2]. Altri fattori fisiologici intrinseci che contribuiscono alla produzione di gas sono la modalità della morte (ad esempio, trauma, patologia e tipo di patologia, ecc.), l'indice di massa corporea, ecc. [3-5]. Inoltre, fattori biotici estrinseci, come i microrganismi esterni al corpo (principalmente aerobi), insetti, micro- e macro-necrofagi, insieme a parametri ambientali abiotici estrinseci, come umidità, temperatura, esposizione al sole, ventilazione e contesto di sepoltura, influenzano il tasso di produzione dei gas [4-7]. I gas derivanti da un corpo in decomposizione sono fisiologicamente associati al rilascio di diversi tipi di composti organici volatili (VOC) [8-9], che variano in base a fattori intrinseci ed estrinseci, formando il cosiddetto *Volaboloma mortis* [10]. In linea con la produzione di molecole odorogene da parte del cadavere, è stata creata una banca dati degli odori di decomposizione (*Decomposition Odour Database*, DOA) per definire le impronte chimiche prodotte dai VOCs durante i vari stadi della decomposizione dei resti umani [11]. Di conseguenza, i VOCs non sono prodotti solo dal metabolismo dei viventi, rilasciati attraverso respiro, sudore, urina e feci, ma anche dalla decomposizione del corpo [12]. I VOCs sono attualmente oggetto di studio da parte di una nuova specialità della biologia, la *Volabolomica* [12], utilizzata in diagnostica umana [13-19] fino al 2024, quando Mazzatenta et al. ne dimostrarono l'applicazione in ambito forense [12]. Di conseguenza, i VOCs rilasciati possono essere considerati vere e proprie tracce, analizzabili dalla scienza forense, come nel caso del DNA. In questo lavoro, abbiamo applicato la ricerca sperimentale sul *Volaboloma mortis* a un'indagine forense ispirata a un caso reale di omicidio.

2. Il caso *giudiziario*. L'omicidio è noto come il caso della pittrice, descritto nella sentenza [20], che ha condannato in via definitiva l'ex marito, un pensionato di 67 anni suicidatosi in carcere nel 2024, e il figlio disoccupato di 43 anni, a oltre 20 anni di carcere per omicidio in concorso. La motivazione del figlio, secondo la sentenza, sarebbe stata il disprezzo per la figura materna unito al movente economico, poiché non voleva che il padre pagasse l'assegno di mantenimento. In sintesi, la pittrice, 64 anni, residente ad Ancona, scomparve il 9 ottobre 2017 dopo aver incontrato l'ex marito e il figlio presso la loro abitazione a Giulianova, in provincia di Teramo, a circa un'ora di treno a sud della sua città, anch'essa sulla costa adriatica. Il corpo fu ritrovato circa un mese dopo, sulle sponde del fiume Chienti, nei pressi di Tolentino, in campagna, a metà strada tra Ancona e Giulianova. Secondo la sentenza, il cadavere fu tenuto per circa tre giorni nel bagno e poi nell'auto, una vecchia Fiat 600 parcheggiata vicino all'ingresso del condominio, a una temperatura media di circa 22 °C. Il corpo della vittima, del peso di 80 kg, era stato avvolto in un sacco per rifiuti compostabile. Successivamente, padre e figlio avrebbero trasportato il corpo nel veicolo per oltre 105 km e lo avrebbero abbandonato, rimuovendo i sacchi, in una zona fangosa. Una sola immagine stradale registrò un'auto compatibile sulla strada per Tolentino, a supporto dell'impianto accusatorio. Il giorno successivo, l'auto fu portata dal meccanico per un guasto al cambio, ma non furono rilevate né tracce di fango né odori sgradevoli. Non furono trovate tracce genetiche della pittrice né nell'appartamento né nell'auto, mentre altri DNA furono rinvenuti negli stessi luoghi [20].

3. *La domanda sperimentale forense*. Un corpo in decomposizione a 22 °C di temperatura media può emettere VOCs? I VOCs possono permeare i sacchi per rifiuti compostabili utilizzati per avvolgere il corpo? E infine, tali VOCs sono rilevabili?

4. *Materiali e metodi*. Lo studio è stato condotto in conformità con la Dichiarazione di Helsinki ed è stato approvato dal comitato etico locale (COET n. 6065-04.03.2021). I familiari dei soggetti deceduti hanno firmato il consenso informato. Sono stati raccolti campioni di circa un grammo di tessuto muscolare superficiale e profondo (muscolo tiroideo e ileopsoas) da cadaveri di 40

anni (♂), 43 (♀), 45 (♂) e 71 (♀) [12; 21]. Come controllo, nelle stesse condizioni sperimentali, è stato utilizzato un grammo di tessuto muscolare animale (bovino, suino e pollo). I sacchi per rifiuti compostabili in polietilene a bassa densità (LDPE) utilizzati nell'esperimento sono di tre marche differenti: Bizeta - maxy (spessore 50µm), Spazzy - Maxi Strong (spessore 48µm), Virosac - Sacco Forte (spessore 42µm; quest'ultimo si presume sia stato usato nel caso [20]). Il LDPE ha una densità tra 0,91 e 0,925 g/cm³, una temperatura di fusione (T_m) di 110 °C e una temperatura di transizione vetrosa (T_g) di -130 °C. Gli spettri FT-IR dei campioni di sacco sono stati ottenuti con uno spettrofotometro Shimadzu IRAffinity-1S (Shimadzu Italia S.r.l., Milano, Italia), dotato di interferometro sigillato ed essiccato, rivelatore DLATGS (Deuterated Triglycine Sulphate dopato con L-Alanina) e ATR con diamante a riflessione totale attenuata singola (QATR 10, Shimadzu Italia S.r.l., Milano, Italia). Tutti gli spettri sono stati registrati nell'intervallo 4000-400 cm⁻¹ con 45 interferogrammi a una risoluzione di 4 cm⁻¹, con apodizzazione Happ-Genzel. Prima di ogni analisi è stata eseguita una pulizia accurata del cristallo e la registrazione dello spettro di fondo. Gli spettri sono stati elaborati con il software LabSolution IR, versione 2.27 (Shimadzu Italia S.r.l., Milano, Italia). I tessuti umani sono stati sottoposti a esame istopatologico, come controllo aggiuntivo, e non hanno mostrato segni di lesioni tissutali. Le registrazioni volabologiche sono state effettuate con un sensore tipo naso elettronico (*e-nose* - iAQ-2000; Applied Sensor, CO₂Meter.com, Beach, FL, USA) basato su sensore a semiconduttore di ossido metallico (MOS), secondo il metodo analitico standard [13-19]. L'*e-nose* è collegato direttamente a un computer per acquisire in tempo reale, a 1 Hz, il segnale generato dal legame dei VOCs e conservarlo per l'analisi. Le registrazioni volabologiche sono state effettuate in condizioni controllate a 22 °C in due ambienti compatibili con la ricostruzione omicidiaria. Il primo ambiente è il laboratorio, sotto cappa a flusso laminare biologico, per simulare il primo luogo di conservazione del cadavere; il secondo è un'automobile compatibile per dimensioni con quella presente nei fatti (Figura 1). I VOCs campionati in modo continuo sono stati analizzati in quattro momenti: 0, 24, 48 e 72 ore. La scelta di questi intervalli temporali è finalizzata al confronto dei risultati con il caso reale. I dati grezzi sono stati trasformati, normalizzati e analizzati utilizzando i software MatLab v. R2024b, Jamovi 2.4.14 e

Origin 2018b (9.55). I test statistici utilizzati sono MANOVA e ANOVA post-hoc, con livello alfa fissato a 0,01. Infine, sono stati condotti test di ripetibilità e riproducibilità per valutare la coerenza e la replicabilità delle misurazioni multiple — tre sacchi in LDPE per tre misurazioni ripetute — su tutti i tessuti e in tutte le condizioni.

5. *Risultati.* L'esperimento prevede la registrazione in tempo reale, tramite *e-nose*, durante la decomposizione di tessuti avvolti in sacchetti di plastica, da 0 a 72 ore. L'obiettivo è campionare i VOCs prodotti dal comportamento fisiologico della decomposizione, che permeano i sacchi per rifiuti, come ipotizzato nel caso reale. Questo esperimento rivoluzionerà le indagini sulla scena del crimine, introducendo un nuovo elemento scientifico da ricercare durante le investigazioni criminalistiche da parte della polizia forense: la traccia volabolo-mica.

5.1 *Controllo negativo: emissioni dai sacchi per rifiuti compostabili.* Il controllo negativo preliminare ha riguardato la registrazione delle emissioni passive dei tre sacchi per rifiuti compostabili. Tutti e tre i sacchi rilasciano VOCs a frequenze diverse, comprese in un intervallo limitato tra 2,710 e 2,745 ppm, con un Δ di 0,035 (Figura 2); la lieve differenza è dovuta ai diversi materiali e ai procedimenti di produzione. Sulla base degli spettri FT-IR, tutti e tre i campioni di sacchi di plastica sono composti da LDPE non puro, confermando le specifiche fornite dai produttori. Infatti, il LDPE presenta un singolo picco di oscillazione del CH_2 a circa 720 cm^{-1} e un picco di deformazione della catena CH_2 a circa 1470 cm^{-1} . Nei tre campioni, entrambi i picchi appaiono raddoppiati, caratteristica dell'inserimento di HDPE; inoltre, il picco a 1375 cm^{-1} suggerisce la presenza anche di polietilene lineare a bassa densità (LLDPE). I segnali a 1739 e 876 cm^{-1} sono attribuibili a coloranti o materiali chimici aggiuntivi a supporto del LDPE, come stabilizzatori UV. Il picco tra 3200 e 3400 cm^{-1} corrisponde allo stretching del gruppo OH. I picchi a 2914 e 2846 cm^{-1} sono attribuiti allo stretching asimmetrico e simmetrico delle unità CH_2 intracatena, mentre i segnali a 1472 e 1462 cm^{-1} si riferiscono alle deformazioni asimmetriche e simmetriche delle suddette unità (Figura 3). La differenza nei VOC rilasciati tra i tre sacchi è significativa: MANOVA $p < 0,001$ ($F(2,546) =$

1982,88), e tutte le ANOVA post-hoc restituiscono $p < 0,001$ (sacco 1 vs. sacco 2 $F(1,364) = 415,62$; sacco 2 vs. sacco 3 $F(1,364) = 1869,34$; sacco 1 vs. sacco 3 $F(1,364) = 2864,87$), (Figura 4).

5.2.1 Controllo positivo: emissione di VOCs da resti animali. Un altro controllo preliminare è stato effettuato sui resti tissutali animali di pollo, maiale e bovino, sia senza che con barriera in LDPE; l'intervallo di fluttuazione dei VOCs in tutte le condizioni è ridotto, pari a $2,85 \pm 0,01$ ppm di VOC (Figura 5). Sono stati condotti test di ripetibilità e riproducibilità per valutare la coerenza e la replicabilità delle misurazioni, con $p < .001$.

5.2.2 Controllo positivo: emissione di VOCs da resti umani. Il controllo positivo è stato ottenuto registrando l'emissione di VOCs dai tessuti umani. I tessuti umani rilasciano VOCs a frequenze diverse durante i tre giorni del processo di decomposizione, con valori compresi tra 2,86 e 3,94 ppm, Δ pari a 1,08 (Figura 6). Sono stati condotti test di ripetibilità e riproducibilità su tutte le prove, con $p < 0,001$; in particolare, il test di ripetibilità ha restituito $p = 0,000581$ e quello di riproducibilità $p = 0,001627$. La variazione nei VOCs durante i tre giorni di decomposizione è risultata significativa: MANOVA $p < 0,001$ ($F(3,796) = 2124,70$) e tutte le ANOVA post-hoc hanno restituito $p < 0,001$: 0h vs. 24h $F(1,398) = 922,14$; 0h vs. 48h $F(1,398) = 1352,60$; 0h vs. 72h $F(1,398) = 3106,56$; 24h vs. 48h $F(1,398) = 77,90$; 24h vs. 72h $F(1,398) = 2034,36$; 48h vs. 72h $F(1,398) = 1748,52$ (Figura 7).

5.3 Esperimento: i VOCs umani permeano i sacchi per rifiuti compostabili. Consiste nella registrazione dei VOCs emessi dai tessuti umani durante tre giorni di decomposizione che permeano attraverso i sacchi per rifiuti compostabili. I VOCs umani prodotti dal processo di decomposizione permeano tutti e tre i sacchi, con valori compresi tra 2,884 e 3,392 ppm, con un Δ di 0,508, pari a circa il 50% di riduzione imposta dalla barriera fisica del sacco (Figura 8). I test di ripetibilità e riproducibilità restituiscono $p < .001$; in particolare, il test di ripetibilità ha restituito: sacco 1: $p = 0,000879$; sacco 2: $p = 0,006601$; sacco 3: $p = 0,008995$. Il test di riproducibilità ha restituito: sacco 1: $p = 0,002461$; sacco 2: $p = 0,018484$; sacco 3: $p = 0,025186$. La variazione nei

VOCs durante i tre giorni di decomposizione e attraverso il sacco 1 è significativa: MANOVA $p < 0,001$ ($F(3,796) = 2676,7$) e tutte le ANOVA post-hoc restituiscono $p < 0,001$: 0h vs. 24h $F(1,398) = 146,92$; 0h vs. 48h $F(1,398) = 320,28$; 0h vs. 72h $F(1,398) = 4012,59$; 24h vs. 48h $F(1,398) = 306,87$; 24h vs. 72h $F(1,398) = 42786,18$; 48h vs. 72h $F(1,398) = 11861,89$ (Figura 9A). La variazione nei VOCs durante i tre giorni di decomposizione e attraverso il sacco 2 è significativa: MANOVA $p < 0,001$ ($F(3,796) = 10060,22$) e tutte le ANOVA post-hoc restituiscono $p < 0,001$: 0h vs. 24h $F(1,398) = 48,35$; 0h vs. 48h $F(1,398) = 479,49$; 0h vs. 72h $F(1,398) = 21441,9$; 24h vs. 48h $F(1,398) = 501,9$; 24h vs. 72h $F(1,398) = 13714,58$; 48h vs. 72h $F(1,398) = 61252,66$ (Figura 9B). La variazione nei VOCs durante i tre giorni di decomposizione e attraverso il sacco 3 è significativa: MANOVA $p < 0,001$ ($F(3,796) = 12443,08$) e tutte le ANOVA post-hoc restituiscono $p < 0,001$: 0h vs. 24h $F(1,398) = 17,53$; 0h vs. 48h $F(1,398) = 759,57$; 0h vs. 72h $F(1,398) = 31964,67$; 24h vs. 48h $F(1,398) = 995,78$; 24h vs. 72h $F(1,398) = 146804,60$; 48h vs. 72h $F(1,398) = 14341,16$ (Figura 9C).

5.4 Impronta digitale dei VOCs umani permeati nell'esperimento in automobile. L'esperimento è stato replicato all'interno di un'automobile. L'impronta digitale dei VOCs nell'esperimento in auto restituisce il comportamento delle molecole. I resti umani mostrano l'impronta digitale naturale dell'emissione dei VOCs (Figura 10A). Questa impronta viene modificata dalla barriera fisica imposta dai sacchi, come già osservato nelle condizioni controllate di laboratorio (Figura 10B, C, D).

6. Discussione. Dal punto di vista fisiologico, i resti umani rilasciano un bouquet complesso di Composti Organici Volatili (VOCs) che fluttuano nel tempo e in base a fattori intrinseci ed estrinseci [11;22-26]. Il *Volaboloma mortis* è composto da VOCs e, come il DNA, ha valore di traccia: questi marcatori devono quindi essere considerati e studiati dalla scienza forense. In questo studio abbiamo esplorato la possibilità di utilizzare il *Volaboloma mortis* in un caso reale, l'omicidio della pittrice [20]. Il punto chiave della sentenza è la conservazione del corpo per tre giorni in casa e in auto a una temperatura media di 22 °C [20]. Seguendo il paradigma di Locard «ogni contatto lascia una traccia»

[27], è lecito chiedersi: erano rilevabili tracce volabologiche nella casa o nel veicolo? Per rispondere a questa domanda, abbiamo misurato, usando un naso elettronico come suggerito dalla letteratura recente, i VOCs permeati attraverso i sacchi in plastica LDPE contenenti resti umani in decomposizione [28;12]. Il LDPE dei sacchi è un materiale semicristallino con elasticità moderata, tende a deformarsi in modo permanente, è resistente a molti solventi a temperatura ambiente, ma gli idrocarburi aromatici e clorurati lo fanno rigonfiare, ed è dotato di un'eccellente impermeabilità all'acqua. Tuttavia, come dimostrato dal nostro esperimento e dalla letteratura, il LDPE è permeabile a gas, VOCs e vapori [29]. Le tecnologie portatili, come i nasi elettronici, rappresentano un'alternativa agli strumenti da banco costosi per il rilevamento dei VOCs. Inoltre, i nasi elettronici sono sensori che simulano il sistema olfattivo in tempo reale [28]. I VOCs emessi sia dai tre comuni sacchi di plastica per rifiuti (incluso quello presumibilmente usato nel crimine) sia dai resti umani sono stati registrati per 72 ore. L'analisi mostra una leggera ma significativa differenza tra i VOCs emessi dai sacchi. I sacchi di plastica rilasciano VOCs legati ai materiali e ai processi di fabbricazione. Questi VOCs, da un lato, possono costituire contaminanti della scena del crimine, ma dall'altro lato sono utili per determinare quale marca di sacco è stata usata. Questo risultato ha due risvolti d'interesse: uno generale, poiché l'analisi dei VOCs può supportare la chimica forense e l'ingegneria dei materiali nello studio delle proprietà funzionali di materiali come i sacchi in LDPE; uno specifico per il caso, poiché avrebbe potuto aiutare gli investigatori a rintracciare tracce dei sacchi di plastica e a verificarne la compatibilità con una determinata marca. Come già riportato in Mazzatenta et al. [12], la decomposizione dei tessuti umani rilascia VOCs chiaramente rilevabili in relazione al tempo trascorso e alle fasi di decomposizione, il che è importante anche per la stima dell'intervallo post-mortem (PMI). Anche in questo caso, il risultato ha due implicazioni rilevanti: una generale, poiché l'analisi dei VOCs può supportare la medicina legale e l'antropologia forense nello studio delle proprietà funzionali della decomposizione dei tessuti umani; una specifica per il caso, perché avrebbe potuto aiutare a rilevare tracce del cadavere umano all'interno dell'abitazione e/o dell'automobile. Poiché i film polimerici usati per i sacchi della spazzatura sono permeabili ai VOCs [30;31], abbiamo verificato se fosse possibile registrare il *Volaboloma mortis* umano che

permea attraverso questi sacchi nel tempo, in due condizioni che simulano le circostanze reali dell'omicidio. L'esperimento dimostra che tutti i sacchi di plastica consentono la permeazione dei VOCs; inoltre, tutti e tre si comportano in modo compatibile, permettendo un aumento del tasso di permeazione tra le 48 e le 72 ore. Tuttavia, il sacco 1 mostra una leggera differenza nel tasso di permeazione, probabilmente dovuta alla composizione del materiale o al processo di fabbricazione. I risultati sottolineano l'importanza di questa indagine, che potrebbe rappresentare una svolta nell'analisi delle scene del crimine, arricchendola con un nuovo insieme di tracce misurabili. Infine, abbiamo replicato l'esperimento nel contesto complesso dell'automobile. I risultati suggeriscono che i VOCs prodotti in queste condizioni variano nel tempo. Osservando la permeazione, i sacchi agiscono chiaramente come barriera nella fase iniziale, per poi aumentare la permeazione nel tempo; anche in questo caso, tutti i sacchi si comportano in modo simile, con il sacco 1 che mostra una lieve differenza, come già osservato nelle condizioni controllate di laboratorio. L'esperimento dimostra la fattibilità del *Volaboloma mortis* come traccia in crimini violenti, e la sua potenziale applicazione medico-legale e forense.

7. Conclusioni. In conclusione, lo studio del *Volaboloma mortis* rappresenta una nuova scienza biomedica applicabile alle indagini criminali. La forza dell'analisi dei VOCs risiede nel mondo effimero delle molecole volatili invisibili che, tuttavia, pervadono l'intero ambiente e che ogni investigatore ricorda quando entra per la prima volta su una scena del crimine, specialmente in caso di omicidio: dai gas di decomposizione di un cadavere, ai fluidi corporei, alla polvere da sparo, fino ai prodotti per la pulizia. Nel presente esperimento, così come nei nostri lavori precedenti, abbiamo studiato l'applicazione del *Volaboloma mortis* in un caso reale, con evidenze sperimentali e per lo studio dell'intervallo post-mortem (PMI). Oggi ci troviamo in un'epoca simile a quella in cui si ipotizzava per la prima volta che il DNA potesse essere una traccia forense.

Bibliografia

1. Javan-Finley-Can-Wilkinson-Hanson-Tarone. *Human thanatomicrobiome succession and time since death*, Sci. Rep. 6 (2016) 29598. doi: 10.1038/srep29598.
2. Hyde-Haarmann-Lynne-Bucheli-Petrosino. *The living dead: Bacterial community structure of a cadaver at the onset and end of the bloat stage of decomposition*, PLoS ONE 8 (2013) e77733. doi: 10.1371/journal.pone.0077733.
3. Mickleburgh-Schwalbe-Bonicelli-Mizukami-Sellitto-Starace-Wescott-Carter-Procopio. *Human bone proteomes before and after decomposition: Investigating the effects of biological variation and taphonomic alteration on bone protein profiles and the implications for forensic proteomics*, J. Proteome Res. 20 (2021) 2533-2546. doi: 10.1021/acs.jproteome.0c00992.
4. Megyesi-Nawrocki-Haskell. *Using accumulated degree-days to estimate the postmortem interval from decomposed human remains*, J. Forensic Sci. 50 (2005) 618-626.
5. Carter-Tomberlin-Benbow-Metcalf. *Forensic Microbiology*, John Wiley & Sons: Hoboken, NJ-USA, 2017.
6. Melichar-Spisarová-Bartoušková-Krcmová-Javorská-Študentová. *Neopterin as a biomarker of immune response in cancer patients*, Ann. Transl. Med. 5 (2017) 280. doi: 10.21037/atm.2017.06.29.

7. Mizukami-Hathway-Procopio. *Aquatic decomposition of mammalian corpses: A forensic proteomic approach*, J. Proteome Res. 19 (2020) 2122-2135. doi: 10.1021/acs.jproteome.0c00060.
8. Vass. *Odor mortis*, Forensic Sci. Int. 222 (2012) 234-241. doi: 10.1016/j.forsciint.2012.06.006.
9. Clases-Ueland-Gonzalez de Vega-Doble-Pröfrock. *Quantitative speciation of volatile sulphur compounds from human cadavers by GC-ICP-MS*, Talanta 221 (2021) 121424. doi: 10.1016/j.talanta.2020.121424.
10. Ciesla-Skrobisz-Nicinski-Kloc-Mazur-Pałasz-Javan-Tomsia. *The smell of death. State-of-the-art and future research directions*, Front. Microbiol. 14 (2023) 1260869. doi: 10.3389/fmicb.2023.1260869.
11. Vass-Smith-Thompson-Burnett-Dulgerian-Eckenrode. *Odor analysis of decomposing buried human remains*, J. Forensic Sci. 53 (2008) 384-391. doi: 10.1111/j.1556-4029.2008.00680.x.
12. Mazzatenta-Pietrangelo-Demontis-D'Ovidio. *Volabonomic Fingerprinting for Post-Mortem Interval Estimation: A Novel Physiological Approach*, Biomolecules 14 (2024) 286. doi.org/10.3390/biom14030286.
13. Mazzatenta-Di Giulio-Pokorski. *Pathologies currently identified by exhaled biomarkers*, Respir. Physiol. Neurobiol. 187 (2013) 128-134. doi: 10.1016/j.resp.2013.02.016.

14. Mazzatenta-Pokorski-Di Giulio. *Volatile organic compounds (VOCs) in exhaled breath as a marker of hypoxia in multiple chemical sensitivity*, *Physiol. Rep.* 18 (2021) e15034. doi: 10.14814/phy2.15034.
15. Mazzatenta-Pokorski-Sartucci-Domenici-Di Giulio. *Volatile organic compounds (VOCs) fingerprint of Alzheimer's disease*, *Respir. Physiol. Neurobiol.* 209 (2015) 81-84. doi: 10.1016/j.resp.2014.10.001.
16. Mazzatenta-Pokorski-Di Giulio. *Real time analysis of volatile organic compounds (VOCs) in centenarians*, *Respir. Physiol. Neurobiol.* 209 (2015) 47-51. doi: 10.1016/j.resp.2014.12.014.
17. Mazzatenta-Pokorski-Di Giulio. *Real-time breath analysis in type 2 diabetes patients during cognitive effort*, *Adv. Exp. Med. Biol.* 788 (2013) 247-253. doi: 10.1007/978-94-007-6627-3_35.
18. Scarano-Lorusso-Di Giulio-Mazzatenta. *Evaluation of the Sealing Capability of the Implant Healing Screw by Using Real Time Volatile Organic Compounds Analysis: Internal Hexagon Versus Cone Morse*, *J. Periodontol.* 87 (2016) 1492-1498. doi: 10.1902/jop.2016.160076.
19. Mazzatenta-Pokorski-Cozzutto-Barbieri-Veratti-Di Giulio. *Non-invasive assessment of exhaled breath pattern in patients with multiple chemical sensibility disorder*, *Adv. Exp. Med. Biol.* 756 (2013) 179-188. doi: 10.1007/978-94-007-4549-0_23.
20. Cassazione, Sez. I, 3 maggio 2023, n. 569, inedita.
21. Pietrangelo-Demontis-Santangelo-Pini-Bonelli-Rosato-Roberti-Locatelli-Tartaglia-Marramiero, et al. *New Perspectives for Postmortem*

- Human Satellite Cells of Different Embryological Origin*, Front. Physiol. 13 (2022) 886149. doi: 10.3389/fphys.2022.886149. eCollection 2022.
22. Dekeirsschieter-Stefanuto-Brasseur-Haubrue-Focant. *Enhanced characterization of the smell of death by comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry (GCxGC-TOFMS)*, PLoS One 7 (2012) e39005. doi: 10.1371/journal.pone.0039005.
23. Vass-Smith-Thompson-Burnett-Wolf-Synsteliën-Dulgerian-Eckerdode. *Decompositional odor analysis database*, J. Forensic Sci. 49 (2004) 760-769. doi: 10.1111/j.1556-4029.2008.00680.x.
24. Statheropoulos-Spiliopoulou-Agapiou. *A study of volatile organic compounds evolved from the decaying human body*, Forensic Sci. Int. 153 (2005) 147-155. doi: 10.1016/j.forsciint.2004.08.015.
25. Deo-Forbes-Stuart-Ueland. *Profiling the seasonal variability of decomposition odour from human remains in a temperate Australian environment*, Aust. J. Forensic Sci. 52 (2020) 654-664. doi.org/10.1080/00450618.2019.1637938
26. Statheropoulos-Agapiou-Spiliopoulou-Pallis-Sianos. *Environmental aspects of VOCs evolved in the early stages of human decomposition*, Sci. Total Environ. 385 (2007) 221-227. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.07.003.

27. Mummery. *Every contact leaves a trace*, British Journal of General Practice, 71 (712) (2021) 512, doi.org/10.3399/bjgp21X717569.
28. Brown-Lamb-Deo-Pasin-Liu-Zhang-Su-Ueland. *The use of novel electronic nose technology to locate missing persons for criminal investigations*, iScience 26 (2023) 106353. doi: 10.1016/j.isci.2023.106353.
29. Gholizadeh-Razavi-Mousavi. *Gas permeability measurement in polyethylene and its copolymer films*, Materials & Design 28(9) (2007) 2528. doi.org/10.1016/j.matdes.2006.09.018.
30. Franz. *Permeation of volatile organic compounds across polymer films- Part I: Development of a sensitive test method suitable for high-barrier packaging films at very low permeant vapour pressures*, Packaging Technology and Science (1993). doi.org/10.1002/pts.2770060207.
31. Feldman. *Polymer Barrier Films*, J. of Environmental Polymer Degradation 9(2) (2001) 49-55. doi:10.1023/A:1020231821526.

Fig. 1. Impostazioni sperimentali sia in laboratorio (A) che in auto (B) per simulare lo scenario reale di conservazione del cadavere (bagno e auto Fiat 600 d'epoca); (C e D) registrazione del controllo dei VOCs di fondo; (E e F) registrazione del controllo dell'emissione di VOCs dai muscoli umani; (G e H) registrazione sperimentale dell'emissione di VOCs dai muscoli umani attraverso la permeazione della busta compostabile per rifiuti.

Fig. 2. Risultati sperimentali delle emissioni passive di VOCs (ppm) delle tre buste compostabili, Δ è 0,035, $T = 22^{\circ}\text{C}$. Le frequenze sono significativamente diverse, MANOVA $p < 0,001$. Sono stati utilizzati colori falsi per evidenziare le differenze.

Fig. 3. Spettri FT-IR sovrapposti delle tre buste.

Fig. 4. Le emissioni di VOCs dalle tre buste compostabili sono significativamente diverse, post-hoc one-way ANOVA $p < 0,001$, a causa dei materiali/procedure di produzione.

Fig. 5. Un controllo preliminare è stato eseguito su resti di tessuti animali di pollo, maiale e mucca senza e con barriera LDPE.

Fig. 6. Emissioni passive di VOCs da tessuti umani durante tre giorni di processo di decomposizione a 22°C , Δ è 1,08. Le frequenze sono significativamente diverse, MANOVA $p < 0,001$. Sono stati utilizzati colori falsi per evidenziare le differenze.

Fig. 7. Le emissioni passive di VOCs da tessuti umani a 22°C sono significativamente diverse, post-hoc one-way ANOVA restituisce un $p < 0,001$, a causa dei tre giorni di processo di decomposizione.

Fig. 8. Permeabilità delle tre buste differenti ai VOCs dei resti umani durante il processo di decomposizione a 22°C , Δ è 0,508. Le frequenze sono significativamente diverse, MANOVA $p < 0,001$. Sono stati utilizzati colori falsi per evidenziare le differenze.

Fig. 9. La permeabilità delle tre buste differenti ai resti di VOCs umani è significativamente diversa, post-hoc one-way ANOVA restituisce un $p < 0,001$, a 22°C .

Fig. 10. Permeabilità delle tre buste differenti ai resti di VOCs umani durante il processo di decomposizione a 22°C , Δ è 0,508. Le frequenze sono

significativamente diverse, MANOVA $p < 0,001$. Sono stati utilizzati colori falsi per evidenziare le differenze.



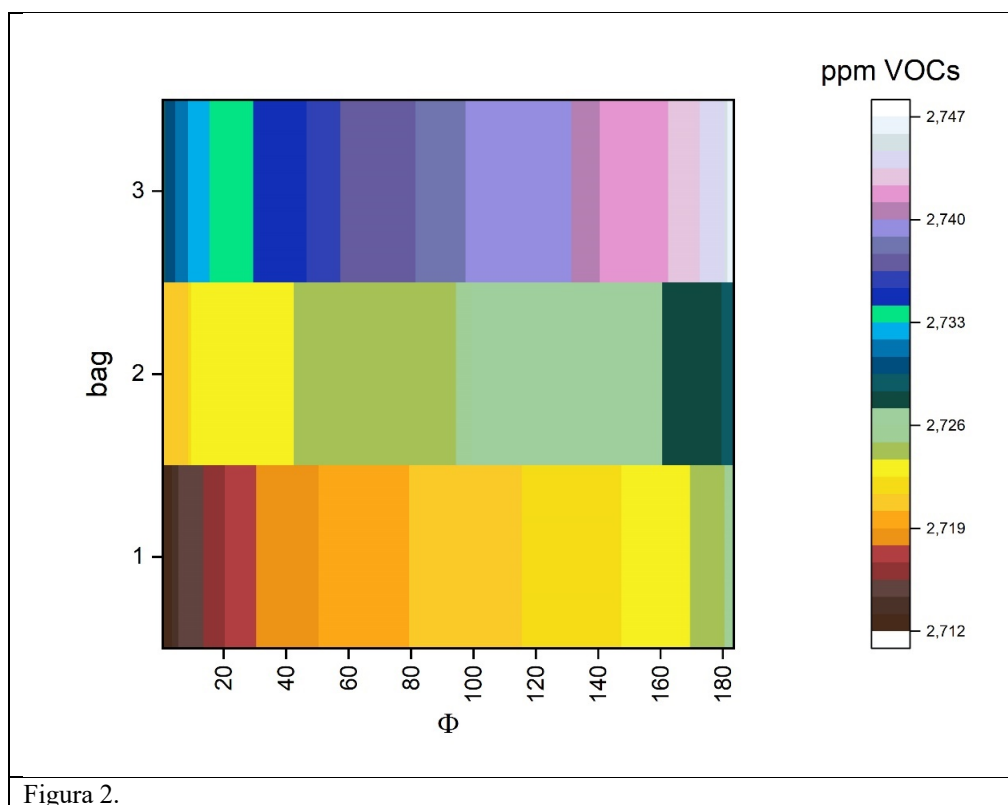
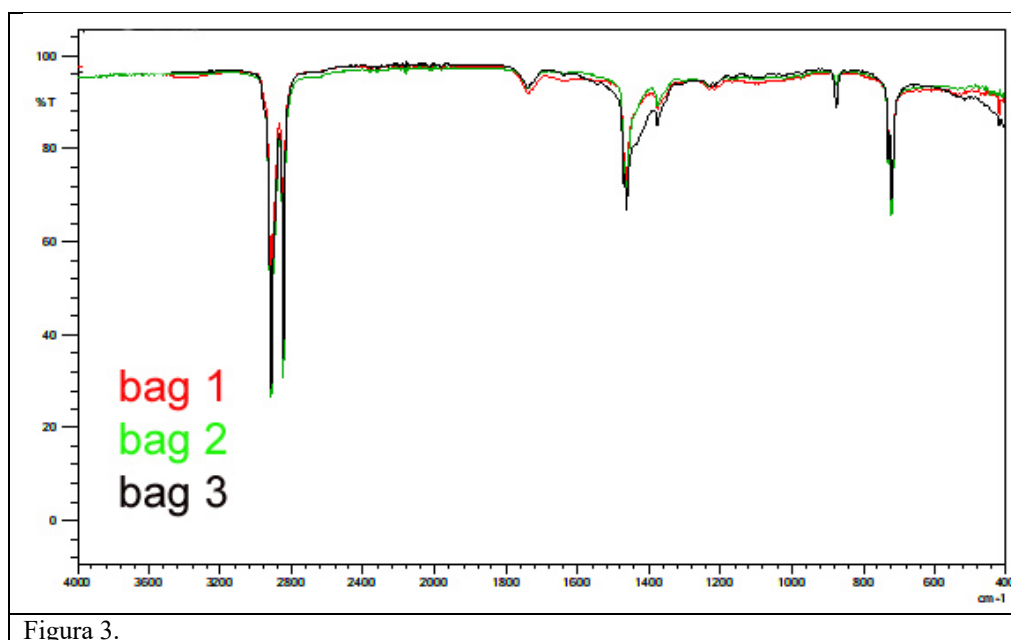


Figura 2.



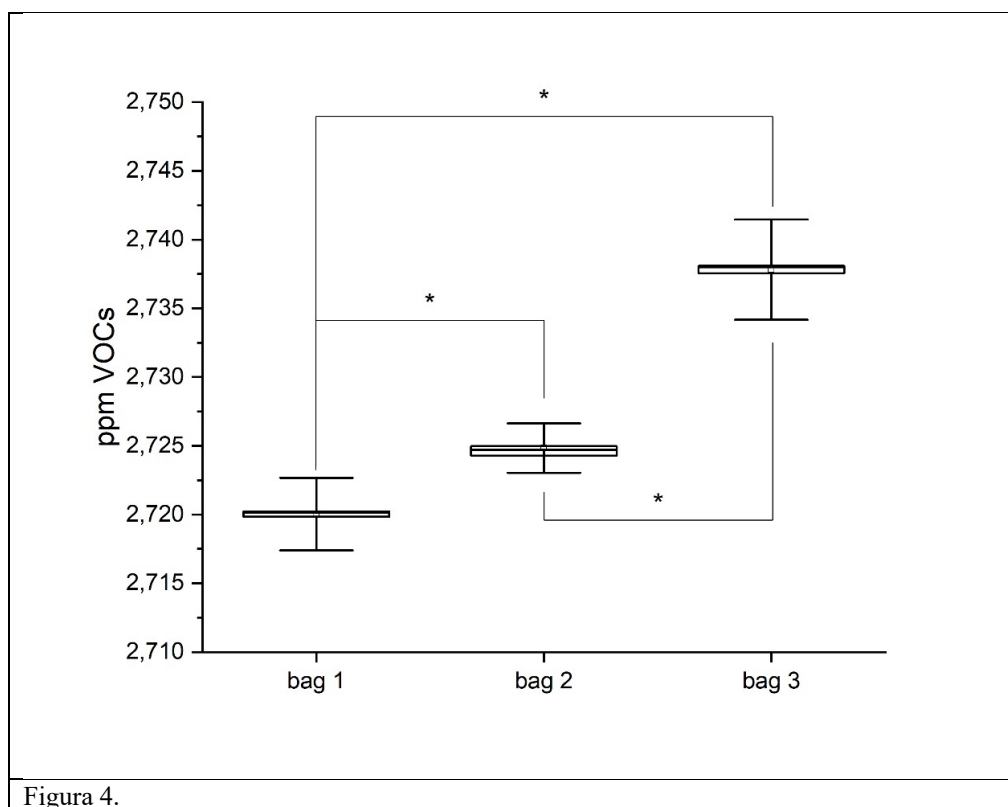


Figura 4.

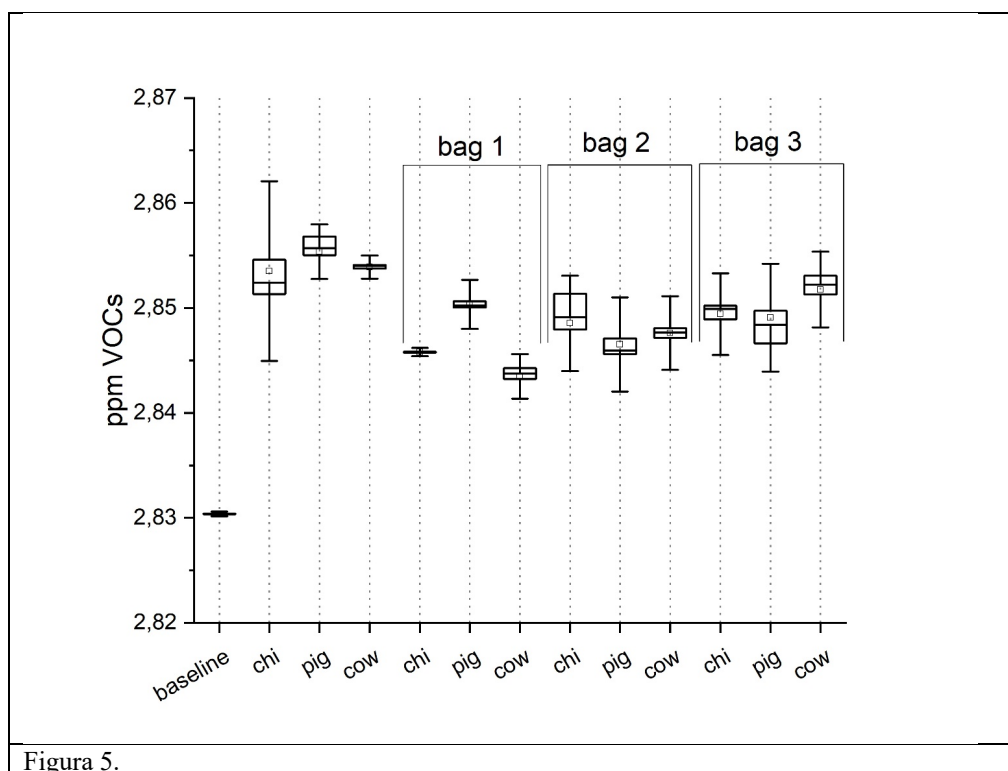
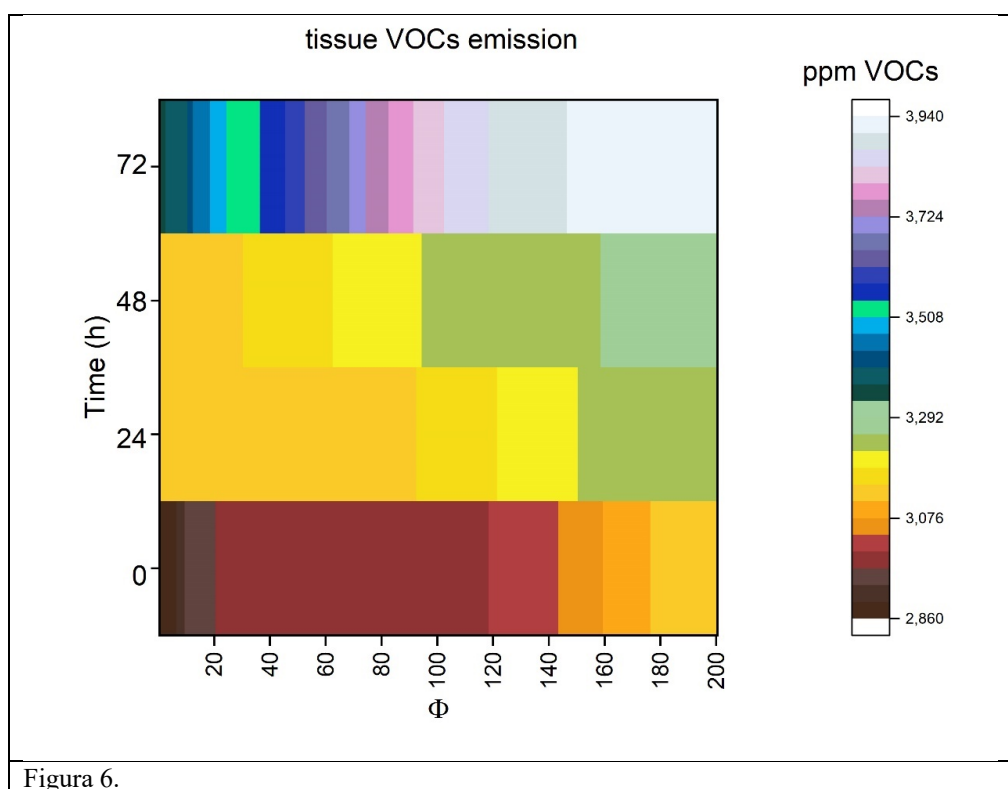


Figura 5.



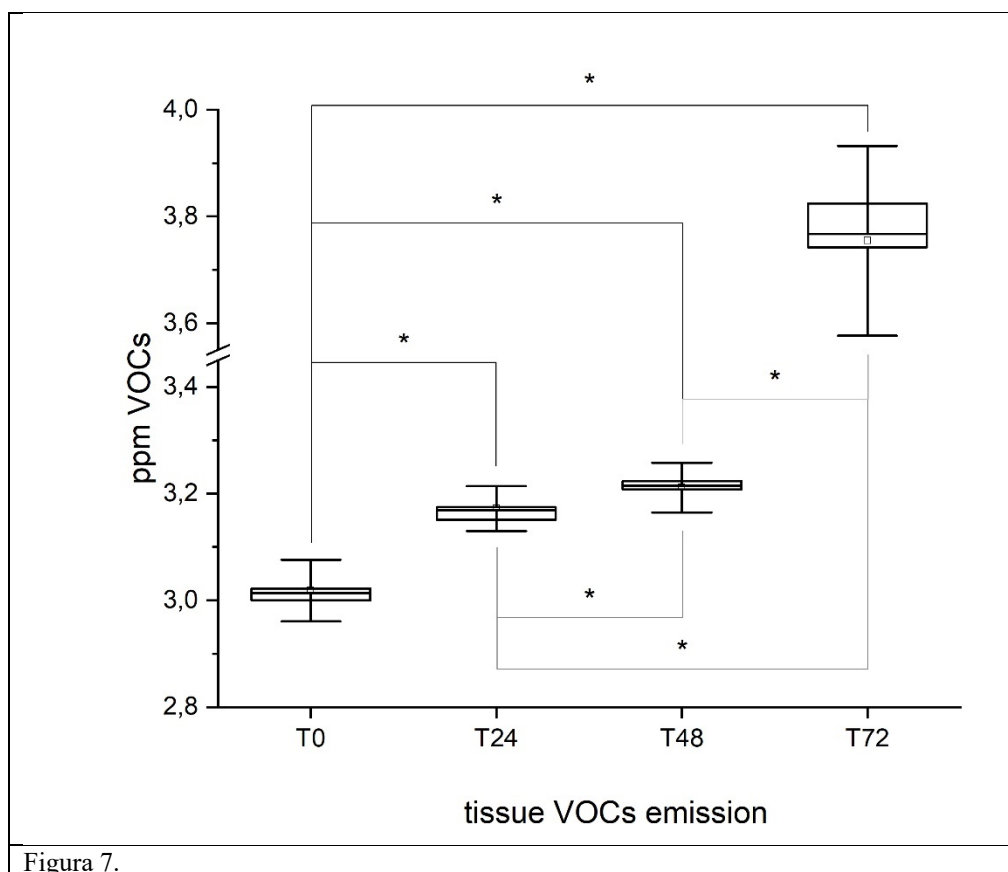


Figura 7.

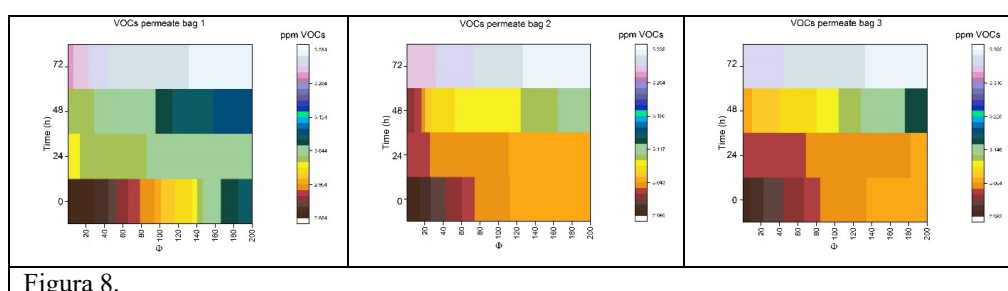


Figura 8.

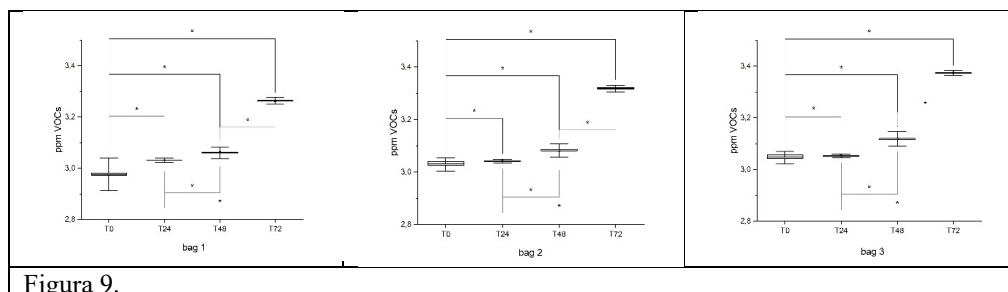


Figura 9.

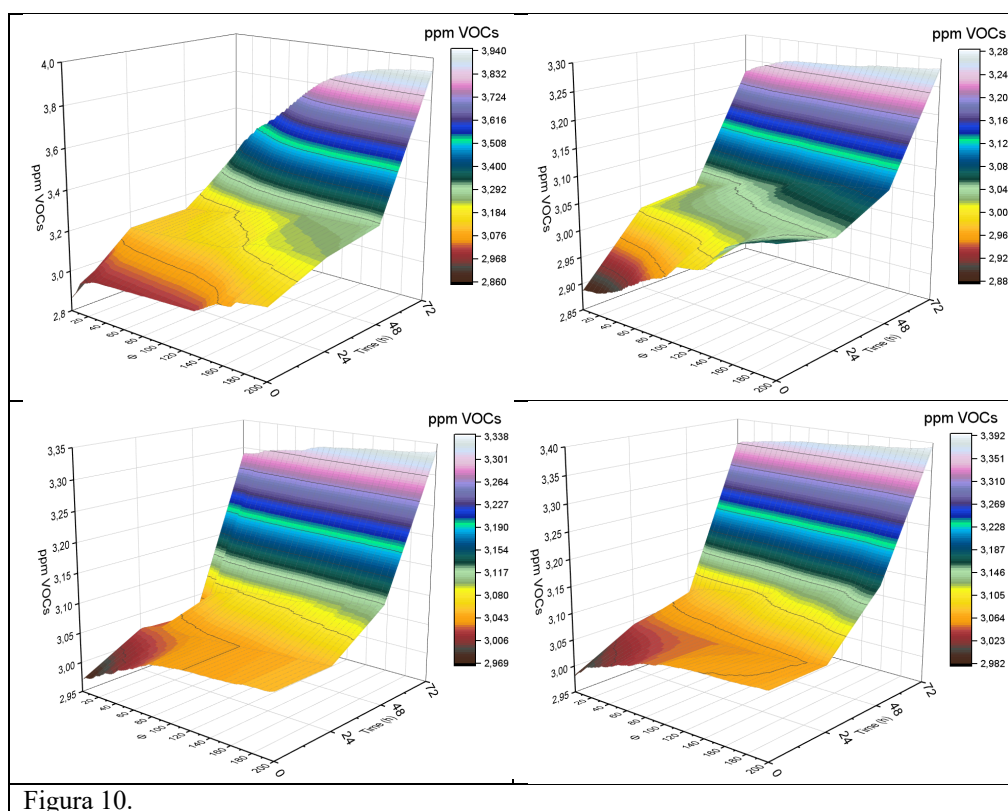


Figura 10.