

Scienze forensi e Processo penale. Evoluzione delle tecniche investigative.

di **Alessandro Continiello** e **Noemi Procopio**

*«Ogni qualvolta una teoria ti sembra essere l'unica possibile,
prendilo come un segno che non hai capito né la teoria
né il problema che si intendeva risolvere».*

Karl Popper

Sommario. 1. Introduzione. – 2. L'apporto attuale delle scienze forensi nel processo penale. – 3. Il contributo futuro della scienza in ambito forense. – 4. Conclusioni.

1. Introduzione

Come correttamente afferma la Prof.ssa Procopio nell'*incipit* del suo capitolo «il processo di ricerca in ambito forense è un'operazione volta allo sviluppo di nuovi approcci scientifici, in grado di sfruttare i più recenti avanzamenti tecnologici, per offrire contributi tangibili in ambito penale, sia in campo investigativo sia nel settore processuale».

Effettivamente le scienze forensi hanno apportato – e tuttora producono – significativi contributi per l'accertamento della verità in ambito processuale, al fine di riconoscere la (penale) responsabilità di un indagato/imputato nonché, *ca va sans dire*, la sua estraneità ai fatti.

La 'scienza forense' o criminalistica viene, quindi, definita come la scienza applicata all'amministrazione della giustizia, attraverso l'applicazione di tecniche e metodologie scientifiche parallelamente alle tradizionali investigazioni.

«La ricerca applicata in scienza forense ha, certamente, contribuito allo sviluppo di tecnologie innovative (il sequenziamento del DNA ne è un esempio).

Il DNA, appunto, l'esame delle impronte digitali e l'analisi delle droghe sono accertamenti noti a tutti, ma esistono altri ambiti in cui molto lavoro di ricerca deve essere ancora svolto.

Se le tecniche di analisi non sono, però, precedute da una rigorosa attività di ricerca, gli sforzi dell'investigatore scientifico potrebbero essere vani o addirittura dannosi.

Senza ricerca la scienza forense è un'arma spuntata e lascia spazio all'improvvisazione di strategie analitiche non sempre adeguate»¹.

Questo il (giusto) grido di allarme di alcuni ricercatori.

Vero è che, come affermato in uno stralcio di un interessante capitolo, «in tutti i tipi di processo si ravvisa la tendenza a espandere il ricorso alla scienza forense, con un impiego massivo di procedure scientifiche da parte degli investigatori, che si pensa possano fornire al giudice elementi più oggettivi, sicuri e controllabili.

Il giudice, al momento del processo, per quanto sia *peritus peritorum*, (nota: sebbene la dottrina italiana ha abbandonato tale 'illusione', per una visione in cui il giudice dev'essere pronto a esaminare contrapposte visioni scientifiche e a scegliere quella più convincente, non in base ad opzioni pregiudiziali, ma dopo aver dato spazio ampio al contraddittorio, tenendo conto delle eventuali evidenze probatorie atte a confermare o a smentire il giudizio dell'esperto²), ha necessità di farsi coadiuvare da esperti delle varie scienze, che lo aiutino a stabilire quali siano le affermazioni scientifiche vere o false delle parti.

La scienza ha, però, modalità e tempi diversi dal diritto: da un lato è piuttosto chiaro che la conoscenza scientifica non sia sinonimo di verità e che la caratteristica di fondarsi su metodi empiricamente controllabili non garantisca la certezza dei risultati; anzi, in molti contesti, la scienza può fornire solo dati statistici (espressi in forma di probabilità) sul verificarsi o meno di una certa affermazione. D'altro canto, le decisioni giuridiche sono soggette a vincoli di tempo e di risorse e gli interessi contrapposti delle parti possono portare a condurre una "ricerca interessata", volta a trovare evidenze favorevoli e/o a screditare evidenze non favorevoli, piuttosto che a "cercare la verità".

Le differenze intrinseche tra scienza e diritto, per quello che attiene a prove e procedure probatorie, possono essere affrontate con gli strumenti dell'epistemologia, ma una "epistemologia giuridica" – ovvero una epistemologia che indaghi il rapporto tra evidenza, ricerca scientifica e ricerca guidata dal contenzioso ("interessata") –; che affronti il rapporto tra probabilità e giustizia, chiarendo il ruolo della testimonianza scientifica esperta nel difficile bilanciamento tra inammissibilità e completezza.

Per definire una cornice concreta per tutte quelle "procedure e pratiche che danno struttura agli sforzi giuridici di determinare la verità", serve comprendere la natura dell'evidenza scientifica e come essa si rapporti al concetto giuridico di prova, spiegare come questa debba essere valutata a

¹ "Cos'è la scienza forense?" in

<http://www.disc.chimica.unipd.it/grsp/pubblica/ricerca%20forense.htm>

² Brusco, *La prova scientifica nel processo penale*, C.S.M., 2009

garanzia del grado di prova richiesto, stabilire come valutare la testimonianza c.d. esperta di natura scientifica e definirne le strategie di inammissibilità»³. In estrema sintesi, si può osservare che, come "il percorso che porta alla formulazione alla convalida di una teoria scientifica, si snodi in una serie di passaggi inferenziali di stampo abduttivo, induttivo e deduttivo che culminano nelle fasi progressive della formulazione di un'ipotesi e della verifica della medesima in funzione del consolidamento della teoria scientifica; così anche il processo penale segue un *iter* che, assunta un'ipotesi di spiegazione, a fronte di un problema di fatto (nella specie la formulazione dell' imputazione da parte del pubblico ministero all' esito delle operazioni ricostruttive del fatto in sede di indagini preliminari), giunge al risultato finale che si pone in termini di convalida o negazione delle ipotesi ricostruttiva ed esplicativa del fatto (ovvero la decisione definitiva sul capo d'accusa contenuta in sentenza, al termine dell'istruzione probatoria)"⁴.

Nel passato, il giudice, colui che è deputato a decidere attraverso l'emissione di una sentenza (di condanna o di assoluzione in Italia/*civil law*; di colpevolezza – *guilty* - vs non colpevolezza – *not guilty* - nei paesi di *common law*), ha richiesto conforto alla comunità scientifica, per comprendere la validità metodologica di una prova scientifica. Uno dei casi più famosi di acquisizione in tal senso, è quello risalente al cosiddetto *affaire* Dreyfus. Il capitano dello Stato maggiore francese, protagonista della controversia vicenda giudiziaria, fu processato e condannato sulla base di quella che, all'epoca in cui si svolsero i fatti, venne ritenuta una evidenza scientifica. Nel tentativo di stabilire la paternità del celebre documento incriminato, caduto in mano nemica, l'accusa aveva sottoposto ad interrogatorio alcuni testimoni, in qualità di esperti calligrafici, i quali avevano concluso in favore dell'appartenenza dello scritto a Dreyfuss, sulla base di una serie di precise analogie riscontrate tra i caratteri del documento in esame e quelli della corrispondenza privata del capitano. Ebbene, la frequenza statistica di tali coincidenze, aveva determinato la condanna, nonostante i giudici avessero ammesso di non avere compreso la *ratio* sottostante le complesse dimostrazioni matematiche esposte dei testimoni⁵.

È avvenuto anche con la 'sentenza Frye vs United States' (1923) ove, in un caso di omicidio, i giudici ritennero opportuno interrogare la comunità

³ Brighi R.-Maioli C., *Un cambio di paradigma nelle scienze forensi. Dall'armonizzazione tecnico-giuridica a una nuova cornice epistemologica*, in Informatica e Diritto, XLI annata, Vol. XXIV, 2015, n. 1-2, pp. 217-234

⁴ Ferrua P., *Epistemologia scientifica ed epistemologia giudiziaria: differenze, analogie, interrelazioni*, 2007

⁵ Tribe H. L., *Processo e matematica: precisione e rituale nel procedimento giudiziario*, in Aa. Vv., *I saperi del giudice. La causalità e il ragionevole dubbio*, a cura di F. Stella, Milano 2004, pp.185 ss.

scientifico di riferimento, alla quale venne conferito il potere decisionale in merito alla circostanza se potesse essere considerata valida la metodologia che ottenesse il consenso generale degli scienziati. Nel caso in esame la risposta fu negativa, quindi il *test* – volto a valutare la veridicità delle affermazioni in base alla pressione sanguigna – fu considerato inammissibile⁶.

Altro *leading case* fu la ‘sentenza *Daubert vs Merrell Dow Pharmaceuticals*’ (1993). Qui la parte offesa richiese ai giudici di poter acquisire anche la testimonianza di altri esperti, i quali possedevano evidenze scientifiche, non ancora pubblicate, contrarie a quelle portate dalla difesa. La difesa, sulla base del principio di Frye, si era opposta all’ammissibilità di queste testimonianze poiché prodotte con metodologie nuove – e, quindi, non riscontravano l’accettazione della comunità scientifica -. In questo specifico caso, però, la Corte decise di aggirare il principio di Frye esprimendosi a favore⁷: da quel momento in poi ‘*Daubert*’ (ed i c.d. criteri scientifici *Daubert*) è divenuto il punto di riferimento per la valutazione della prova scientifica.

Nel nostro Paese è con la sentenza 43786/2010 (c.d. sentenza Cozzini) che si affronta esplicitamente la questione sull’ammissibilità di una teoria scientifica: <<*Per valutare l’attendibilità di una teoria occorre esaminare gli studi che la sorreggono; le basi fattuali sulle quali essi sono condotti; l’ampiezza, la rigosità, l’oggettività della ricerca; il grado di sostegno che i fatti accordano alla tesi; la discussione critica che ha accompagnato l’elaborazione dello studio [...]. Infine, dal punto di vista del giudice è di preminente rilievo l’identità, l’autorità indiscussa, l’indipendenza del soggetto che gestisce la ricerca, le finalità per le quali si muove. [...] Gli esperti dovranno essere chiamati [...] a delineare lo scenario degli studi e a fornire gli elementi che consentano al giudice di comprendere [...]. Di tale complessa indagine il giudice infine è chiamato a dar conto in motivazione, esplicitando le informazioni scientifiche disponibili e fornendo razionale spiegazione, in modo completo e comprensibile a tutti, dell’apprezzamento compiuto*>>⁸.

Orbene, in questo *paper* verranno affrontate le attuali tecniche di ricerca – e l’apporto delle scienze forensi – per giungere alle nuove scoperte ancora (in parte) oggetto di ricerca scientifica, cercando di rispondere al seguente quesito: “Quale scienza utilizzare?”.

⁶ Principio della *general acceptance*; ciò che la comunità scientifica condivide, è scienza; il giudice delega alla comunità scientifica la decisione

⁷ Una conoscenza è scientifica se rispetta i seguenti criteri; controllabilità empirica; *peer review and publication*; *error rate* di teoria e sua applicazione; *widespread acceptance* (compatibile con dissenso)

⁸ Cass. Pen., sez. IV, 17/09/2010, n. 43786, Pres. Marzano

2. L'apporto attuale delle scienze forensi nel processo penale⁹.

Sinceramente non si ha la tracotanza di avere una risposta univoca alla domanda suindicata, ma si possono certamente richiamare le riflessioni di Karl R. Popper – anche con l'opera 'Scienze e Filosofia', che rappresenta la sintesi del suo pensiero epistemologico, all'interno del dibattito sui criteri di validità della scienza – in cui l'autore tratta degli scopi e delle responsabilità della scienza, dell'accrescimento del sapere scientifico e del processo di costruzione e verifica delle teorie..

Al centro del pensiero di Popper c'è sicuramente il principio di falsificabilità. Questo criterio, ancora oggi utilizzato come metodo scientifico, nasce in contrapposizione al metodo della verifica, per cui una teoria scientifica si limita a cercare conferme nei fatti. Per Popper, invece, è ben più importante la ricerca di possibili confutazioni (ovvero falsificazioni), perché è questo il motore che muove la scienza e soprattutto perché una teoria inconfutabile non può dirsi affatto scientifica.

Insomma, una teoria, per essere davvero scientifica, dunque controllabile, deve essere anche confutabile. Sono, infatti, molte le verità scientifiche che sono state confutate, così come restano potenzialmente confutabili tutte quelle attuali. Il valore della scienza è dunque nella sua rinuncia a ogni assolutismo: "L'inconfutabilità di una teoria non è (come spesso si crede) un pregio, bensì un difetto - scrive il filosofo - Ogni controllo genuino di una teoria è un tentativo di falsificarla, o di confutarla".

Qualche anno fa io scrissi un saggio¹⁰ sulle (neo) indagini neuroscientifiche e sul loro apporto nel nostro – ma non solo - processo penale, concentrandomi su un aspetto specifico del cosiddetto neurodiritto (*neurolaw* nell'originale formulazione inglese) ossia sull'applicazione alla sfera giuridica delle conoscenze sul nostro cervello, sulla sua struttura e le sue funzioni, sulle basi materiali della cognizione e delle emozioni, sulle distorsioni che lesioni o patologie potrebbero provocare.

La *neuro-imaging* può dirsi l'insieme specifico degli strumenti tecnologici e di procedure sperimentali per la visualizzazione del cervello 'in vivo', sia nei suoi dettagli strutturali e anatomici (*neuro-imaging* morfologico), sia nel corso di esecuzione di particolari compiti motori e cognitivi (*neuro-imaging* funzionale), attraverso l'utilizzo della tomografia a emissione di positroni (PET) o la risonanza magnetica funzionale (fMRI).

⁹ Dott. Alessandro Continiello, Avvocato del Foro di Milano. Responsabile della Formazione interna presso uno studio legale internazionale. Specializzato in diritto penale; autore di articoli e testi in materia penale, processual-penale, criminologia e scienze forensi.

¹⁰ Continiello A., *Il gene del delitto. Indagini neuroscientifiche e teorie post lombrosiane*, A. Stango Editore, 2017

L'obiettivo di tali studi era ed è quello di rilevare, appunto, lesioni o difetti neurologici tali da annullare il controllo volontario. "Non sono stato io ma il mio cervello", potrebbe essere la (paradossale) affermazione a discolpa, idonea a minare lo stesso principio base della libertà di autonomia di scelta, lo stesso concetto del libero arbitrio.

Per arrivare a queste nuove scoperte scientifiche (*melius*: neuro-scientifiche) sono partito, nel mio *excursus* storico, dagli studi della personalità del criminale compiuti da Cesare Lombroso (il reo-nato), richiamando, altresì, la cosiddetta 'legge biogenetica fondamentale' nella ontogenesi (ossia durante la formazione embrionale); citando, inoltre, i caratterologi ed i biotipologi (per i quali la morfologia, con i suoi diversi tipi umani, la *facies* e le sue personalità fisionomiche, la corpulenza o la gracilità – ed anche le antiche 'stigmati fisiche di degenerazione', sono degli indizi significativi da considerare nell'esame fisico dei cosiddetti delinquenti); gli studi dei c.d. frenologi (vedasi Franz J. Gall) e la teoria biocriminogenetica dei professori Pende e Di Tullio.

Le attuali ricerche, che si svolgono con i moderni strumenti di indagine neurologica, trovano probabilmente la loro genesi, quantomeno in Italia, nel fisiologo Angelo Mosso che, negli ultimi decenni del diciannovesimo secolo, indagava le variazioni della pressione del sangue nelle arterie cerebrali. Gli studi continuarono e, con ulteriori scoperte, si arrivò all'attuale modello secondo cui i neuroni, per potersi scambiare informazioni - trasmettendo scariche elettriche attraverso le connessioni sinaptiche - necessitano di un'energia che, nel nostro cervello, è prodotta utilizzando glucosio con ossigeno. Poiché il glucosio e l'ossigeno sono trasportati dal sangue dove c'è necessità, cioè dove occorre scambio sinaptico dei neuroni, ecco che in quella regione del cervello vi sarà maggiore afflusso di sangue e, reciprocamente, l'incremento del flusso (che oggi è misurabile attraverso le tecniche di neuro-immagine).¹¹ Questo è proprio ciò che misurano le neuroimmagini: i cambiamenti metabolici collegati all'attività cerebrale, attraverso l'uso della fMRI (*Funzionale Magnetic Resonance Imaging*).

Un esempio molto indagato con le nuove tecniche neuroscientifiche riguarda l'impulsività e l'aggressività, attraverso lo studio del funzionamento alterato del sistema cerebrale della serotonina.

Un'altra circostanza esaminata è quella del gene che codifica per il recettore D4 della dopamina, i cui polimorfismi (ossia le variazioni genetiche presenti in più dell'uno per cento della popolazione) sono associati a diversi gradi di comportamento aggressivo ed iperattivo, indipendentemente dalle prestazioni cognitive.¹²

¹¹ Merzagora Betsos I., *Colpevoli si nasce?* Raffaello Cortina, 2012

¹² Lavazza A.-Sammicheli L., *Il delitto del cervello*, Codice Edizioni, 2012

Si potrebbe quindi ipotizzare, secondo gli studi citati, che il comportamento criminale avrebbe la sua genesi – o almeno una delle sue cause –, nella disconnessione tra la corteccia frontale e l'amigdala, ovvero tra le regioni deputate alla modulazione della risposta comportamentale e strutture implicate nella risposta a stimoli emotivi.

Altre ricerche, condotte sempre con risonanza magnetica, hanno mostrato come individui maschi con allele a bassa attività del gene MAOA, posseggono una riduzione del volume dell'amigdala, del cingolo anteriore e della corteccia orbitofrontale.

Ma come si sono pragmatizzate queste scoperte e questi studi (*rectius*: neo-prove scientifiche) all'interno del nostro sistema giuridico e che riverbero hanno avuto nel processo penale?

In primis, come non ricordare la sentenza emessa dalla Corte d'Assise d'Appello di Trieste¹³, con cui viene dato riconoscimento, all'interno del nostro ordinamento, di una predisposizione genetica a comportamenti violenti.

Una successiva pronuncia della nostra Suprema Corte – specificatamente in riferimento al risultato di una prova scientifica – ha chiarito che: *<<Un risultato di prova scientifica può essere ritenuto attendibile solo ove sia controllato dal giudice, quantomeno con riferimento all'attendibilità soggettiva di chi la sostiene, alla scientificità del metodo adoperato, al margine di errore più o meno accettabile ed all'obiettiva valenza ed attendibilità del risultato conseguito. Insomma, secondo un metodo di approccio critico non dissimile, concettualmente, da quello richiesto per l'apprezzamento delle prove ordinarie, al fine di esaltare, quanto più possibile, il grado di affidabilità della "verità processuale" o - se si preferisce - ridurre i margini ragionevoli l'ineludibile scarto tra verità processuale e verità sostanziale>>*.¹⁴

Naturalmente, con l'espressione 'prova scientifica' si fa riferimento a una peculiare componente che dà un apporto all'operazione probatoria, avulsa rispetto al catalogo dei c.d. mezzi di prova.

Come potutosi notare, queste indagini neuroscientifiche hanno apportato un *quid pluris* che ha permesso una evoluzione e applicazione della scienza nel processo penale, quantomeno limitatamente ad una specifica branca della scienza medica.

Ma vi sono ulteriori studi e scoperte che spaziano in altri settori delle scienze forensi, con ripercussioni più ampie e un impiego più esteso nel campo del processo penale, a partire dalla fase delle indagini/investigazioni: ma, questo,

¹³ Sentenza nr. 5/2009, 18/09/2009, Pres. Reinotti - riportata anche dalla rivista *Nature* come prima sentenza in Europa ad aver accolto l'istanza della c.d. vulnerabilità genetica al comportamento aggressivo violento

¹⁴ Cass. Pen. n. 36080/2015

sarà oggetto di specifica analisi della Prof.ssa Procopio nel capitolo successivo.

Alcuni esempi di nuove tecniche di indagine scientifica, al di fuori delle neuroscienze, possono comunque essere: 1) la nuova frontiera dell' indagine dattiloscopica, rappresentata dall'analisi poroscopica (che ha per oggetto i singolarismi poroscopici, cioè le particolarità che circoscrivono gli orifizi sudoriferi delle estremità papillari); 2) l'analisi grafica basata sul principio che la grafia implica una serie di movimenti accessori involontari, che si sottraggono al potere di controllo da parte di chi scrive; 3) l'indagine stilometrica, basata sull'accertamento dello stile linguistico presente in uno scritto confrontato con quello usato, ad esempio dall'indagato (è lo studio statistico delle caratteristiche degli stili letterali, quali le scelte lessicali, la lunghezza delle parole, le costruzioni sintattiche, il modo di collegare le parti del discorso); 4) il sonogramma, che consente di misurare frequenza, durata e intensità di un segnale vocale in raffronto con altro campione vocale (utilizzato in concreto per escludere la corrispondenza di due voci e non per l'affermazione di identità).

Orbene, l'attuale competenza delle scienze forensi, secondo la definizione già citata nel prologo/introduzione, è vastissima, spaziando dalla chimica alla fisica, dalla medicina alla psicologia forense: tra le sue ramificazioni si può, certamente, ricordare l'antropologia forense (ossia l'applicazione degli studi antropologici nel contesto legale, per l'identificazione di resti umani); la balistica forense (che studia i proiettili e i materiali impiegati tramite l'uso di armi da fuoco); la *BPA (Bloodstain Pattern Analysis*, l'esame scientifico delle macchie di sangue rinvenute sul c.d. *locus commissi delicti*, ossia sulla scena del crimine). A cui naturalmente aggiungere, come già visto, la genetica forense (che analizza il DNA per acclarare un'attribuzione di paternità, la presenza di uno specifico soggetto sulla scena del crimine); la dattiloscopia forense (lo studio delle impronte digitali) e l'entomologia forense (l'analisi degli insetti sul corpo della vittima per accertarne i tempi della morte), *et c.* La progressiva influenza della prova scientifica e la conseguente marginalizzazione della prova dichiarativa sono tra i connotati più significativi dell'attuale processo penale.

Jeremy Bentham affermava che "i testimoni sono gli occhi e le orecchie della giustizia": ma oggi, il richiamato pensiero, è sicuramente da aggiornarsi alla luce della citata incombente influenza della prova scientifica.

Se è vero che l'impiego nel processo delle conoscenze derivanti dal progresso tecnico-scientifico consente di ottenere una più accurata ricostruzione dei fatti, è altrettanto vero, come contraltare, che ciò comporta l'insorgere di problematiche connesse soprattutto al tema dell'ammissibilità e dell'affidabilità della prova scientifica.

È necessario compiere una distinzione tra strumenti tecnico-scientifici già noti - e ampiamente utilizzati nella realtà giudiziaria - e quelli nuovi, non

ancora consolidati nella comunità scientifica. Si parla, in quest'ultimo caso, di "nuova prova scientifica", formula che si contrappone alla "prova scientifica comune" in quanto quest'ultima si riferisce ad operazioni probatorie nelle quali vengono impiegati strumenti affidabili (mentre la prima concerne operazioni probatorie caratterizzate dall'uso di strumenti e metodi di elevata specializzazione e ancora controversi, non dotati di una generale accettazione da parte della comunità scientifica).

In tal guisa sorgono insidie circa l'affidabilità di questi nuovi metodi o strumenti che influiscono sul processo; motivo per cui il giudice deve affrontare tali criticità non già in sede di valutazione, bensì in fase di ammissione delle prove.

A tal proposito, secondo autorevole dottrina, devono essere seguiti i criteri fissati dall'art. 189 c.p.p.¹⁵ che disciplina le prove atipiche (*rectius*: prove non disciplinate dalla legge), giacché la nuova prova scientifica viene ricondotta a tale categoria.

In contrapposizione, laddove la prova non sia qualificabile né come nuova, né come controversa, allora la norma di riferimento, ai fini dell'ammissione della prova (scientifica), sarà l'articolo 190 c.p.p. (diritto alla prova),¹⁶ applicabile a tutte le ipotesi di prova tipica, vale a dire che tutte le prove sono ammesse, ad eccezione di quelle vietate dalla legge e quelle manifestamente superflue o irrilevanti.

Dunque, il vaglio di affidabilità del metodo scientifico impone al giudice un duplice onere: *in primis* di acquisire gli elementi di valutazione necessari per un consimile giudizio, in particolare sfruttando il contraddittorio fra le parti, il contributo dell'esperto, l'uso dei propri poteri officiosi; e, in seconda istanza, di motivare adeguatamente sul punto, a pena di annullamento della sentenza per vizio di giustificazione esterna (il saggiare la validità della legge scientifica) o interna (la dimostrazione della validità del risultato conseguito adottando la regola-ponte).

Ciò che, invece, il giudice non può fare è sicuramente trasformarsi, da mero fruitore del sapere scientifico in scienziato lui stesso, come può avvenire nel caso di: 1) contrasto fra più tesi controverse, allorché si schieri a favore di una di esse, senza dar conto delle fonti e delle opinioni degli esperti alle quali andata la propria condivisione; 2) a fronte della possibilità di ricostruire con

¹⁵ <<Quando è richiesta una prova non disciplinata dalla legge, il giudice può assumerla se esse risulta idonea ad assicurare l'accertamento dei fatti e non pregiudica la libertà morale della persona. Il giudice provvede all'ammissione sentite le parti sulle modalità di assunzione della prova>>

¹⁶ <<Le prove sono ammesse a richiesta di parte. Il giudice provvede senza ritardo con ordinanza escludendo le prove vietate dalla legge e quelle che manifestamente sono superflue o irrilevanti>>

perizia tecnica un determinato fenomeno, procede lui stesso, secondo propri indimostrati parametri valutativi.

Peraltro, il giudice deve necessariamente confrontarsi con le possibili spiegazioni alternative dell'evento concreto e, per pervenire a convalidare la tesi dell'accusa, dovrà approdare alla certezza processuale - secondo la nota regola dell'oltre ragionevole dubbio, scolpita nell'articolo 533 del codice di procedura penale - che tutte le possibili spiegazioni alternative siano radicalmente implausibili, in tal modo dimostrando di poter resistere ai tentativi di falsificazione miranti a spiegare diversamente l'evento. Dunque, l'ipotesi accolta, si deve manifestare come l'unica plausibile a fronte della inidoneità esplicative delle altre ipotesi discusse nel contraddittorio tra le parti.

In conclusione, la prova scientifica è soggetta a una serie di regole che devono essere osservate, a partire dalla formazione della prova sino alla sua valutazione, regole che vanno a costituire lo statuto epistemologico (nota: <<secondo gli orientamenti epistemologici e giurisprudenziali più recenti, l'inferenza controfattuale – un tipo specifico di inferenza razionale oggi trattabile con strumenti formali rigorosi – ha un ruolo importante nel riconoscimento delle relazioni causali e in particolare nell'eliminazione delle correlazioni causali spurie e dei sofismi *post hoc, ergo propter hoc*. Questo garantisce il recupero della teoria condizionalista della causa - cioè della causa come *condicio sine qua non* - in un quadro più articolato di quello tradizionale>>¹⁷ della prova scientifica (nota: <<la prova scientifica deve rispondere ai requisiti della rilevanza nell'ottica della sua idoneità epistemologica da valutarsi secondo i criteri dell'art. 190 c.p.p. e pertanto si distingue dalla cosiddetta "pseudo-scienza" per il suo rigore metodologico>>¹⁸).

È innegabile che tale strumento probatorio sia più affidabile della prova dichiarativa e che, quindi, contribuisca maggiormente all'accertamento della verità, senonché il problema principale deriva proprio dall'elevata attendibilità che offre la prova scientifica, trasmettendo un'apparenza di assoluta obiettività dalla quale viene falsamente rassicurato il giudice.

Del resto, nemmeno la prova scientifica garantisce la certezza assoluta: l'accertamento basato sull'impiego di metodi tecnico-scientifici resta pur sempre caratterizzato dalla probabilità.

Il margine di errore e, conseguentemente, il grado di affidabilità saranno quantificabili a seconda della legge di copertura utilizzata: il che comporta, ancora una volta, la proposizione del quesito "quale scienza utilizzare?"

¹⁷ Cfr. 'Linee-guida per l'acquisizione della prova', redatte dall'Istituto Superiore Nazionale di Scienze Criminali, 15 giugno 2008

¹⁸ *Ut supra*

3. Il contributo futuro della scienza in ambito forense¹⁹.

Il processo di ricerca in ambito forense è un'operazione volta allo sviluppo di nuovi approcci scientifici in grado di sfruttare i più recenti avanzamenti tecnologici per offrire contributi tangibili in ambito penale, sia in campo investigativo, sia nel settore processuale.

Nonostante il ritmo incalzante a cui i progressi scientifici in dominio biologico e biotecnologico, chimico, fisico e medico avanzino su scala globale, permettendo lo sviluppo di tecnologie sempre più performanti, la creazione di terapie geniche e cellulari, lo sviluppo di farmaci *ad personam* e l'espansione della cosiddetta "*precision medicine*", lo stesso non può certo dirsi per il settore forense.

Complici i ridotti investimenti economici da parte dei consigli di ricerca e degli enti statali volti a finanziare la ricerca e l'innovazione, in alcune nazioni maggiormente che in altre, i progressi volti allo sviluppo di nuove metodologie applicabili in ambito giudiziario e processuale procedono più lentamente che le loro controparti negli altri settori, ed altrettanto lentamente vengono integrate ed adoperate nel sistema processuale.

In campo giudiziario, è di vitale importanza la validazione di ogni procedura scientifica volta ad una futura applicazione forense, il rigore della metodologia stessa, la stima della precisione e dell'accuratezza predittiva, l'accreditamento alle normative richieste e la riproducibilità del risultato, anche quando esso è ottenuto presso diversi laboratori per mano di differenti esperti e professionisti del settore. Sebbene i criteri da soddisfare per integrare nuovi tipi di analisi e procedure in fase investigativa, ed ancor più processuale, siano quindi laboriosi e complessi, è fondamentale sottolineare l'importanza del raggiungimento di tali progressi al fine ultimo di garantire il corretto funzionamento del sistema giuridico.

L'esempio che inevitabilmente è opportuno menzionare a tal proposito è quello di Sir Alec Jeffreys, reputato padre della genetica forense, grazie agli studi che gli consentirono nel 1984 di sviluppare la prima tecnica di *fingerprinting* genetico basato sui polimorfismi di lunghezza, metodologia tuttora utilizzata su scala globale, considerata ora il "*gold standard*" per l'identificazione personale e definita dai media "prova regina" a fini probatori. A partire dalla sua scoperta, questa tecnica fu impiegata per la prima volta e con successo per scagionare Sir Richard Buckland, accusato e reo confesso dello stupro e omicidio della quindicenne Dawn Ashworth nel 1986; e per identificare Colin Pitchfork come il reale colpevole, partendo da campioni di

¹⁹ Dr.ssa Noemi Procopio, PhD. *Senior Research Fellow in Forensic Science, Dep. of Applied Sciences Health and Life Sciences at Northumbria University, U.K. / UKRI Future Leaders Fellow / Principal Investigator of the Forens-OMICS Team at Northumbria University, U.K. / Visiting Professor* presso il Dipartimento di Scienze della Salute dell'Università del Piemonte Orientale, Novara.

sangue e saliva prelevati da più di quattromila uomini residenti nell'area vicina al luogo del delitto.

Ad oggi, l'analisi delle tracce biologiche e la loro conseguente tipizzazione genetica, è diventata una procedura altamente consolidata ed accettata globalmente ed i progressi tecnologici permettono ormai di ottenere profili genetici completi da poche cellule depositate tramite un contatto tra un individuo ed una superficie; o di identificare multipli contribuenti ad una traccia mista partendo da tracce biologiche di quantità e dimensioni tali da risultare talvolta invisibili all'occhio umano.

Ritenendo, dunque, che si sia illustrata a sufficienza l'importanza dello sviluppo di nuove metodologie a supporto delle investigazioni forensi, risulta chiara l'esigenza di condurre livelli di ricerca idonei alle tecnologie e alle strumentazioni disponibili sul mercato, tali da permettere il raggiungimento di progressi significativi in grado di rispondere oggettivamente e puntualmente ad alcune delle domande da sempre più rilevanti e dibattute in ambito forense.

Recentemente, è stato introdotto il termine "*Forens-OMICS*"²⁰, tradotto in italiano come "*Forens-OMICA*", volto ad indicare l'applicazione multidisciplinare delle tecnologie "omiche" – ormai di comune uso in ambito biotecnologico e medico, nel settore forense –, al fine principale di stimare l'epoca della morte (o *post-mortem interval*, PMI) e l'età del cadavere al momento della morte. In biologia molecolare, sono riconosciute come "omiche" tutte le discipline volte allo studio della *totalità* di specifiche biomolecole contenute in un organismo, in un tessuto o in una cellula: a seconda della biomolecola considerata, si parlerà dunque di genoma (studio della totalità dei geni), di trascrittoma (studio della totalità dei trascritti in RNA), di proteoma (studio della totalità delle proteine), di lipidoma (studio della totalità dei lipidi) e di metaboloma (studio della totalità dei metaboliti)²¹.

La stima del PMI è una delle questioni da sempre maggiormente dibattute in patologia e antropologia forense, trattandosi di un quesito particolarmente complesso, in grado di influenzare e determinare l'esito finale di un'indagine. I metodi più efficaci, al momento, consistono nell'analisi del *livor*, *rigor* e *algor*

²⁰ Procopio N, Langley N, Dudzik B, Wood PL. "Forens-OMICS": The Application of Omics Sciences to Forensic Investigations. In: *Proceedings of the American Academy of Forensic Sciences 72nd Annual Scientific Meeting Anaheim, CA February 17 - 22, 2020.* ; 2020: 836.

²¹ Lay Jr JO, Liyanage R, Borgmann S, Wilkins CL. Problems with the "omics." *TrAC Trends Anal Chem.* 2006; 25 (11): 1046 - 1056.

*mortis*²² e nella stima dei fenomeni sopravvitali²³, tuttavia tali approcci sono applicabili soltanto durante le prime fasi posteriori alla morte e non risultano adottabili nelle fasi più avanzate della decomposizione cadaverica. In tali circostanze, l'entomologia forense, ossia lo studio degli insetti necrofagi colonizzanti il corpo durante le varie fasi di decomposizione²⁴ e la valutazione del livello di decomposizione tissutale e dei cambiamenti morfologici²⁵ associati a specifici intervalli *post mortem*, sono i metodi più utilizzati e performanti.

Nonostante queste tecniche siano in grado di fornire stime piuttosto realistiche circa il PMI, ossia il minimo intervallo di tempo necessariamente trascorso tra la morte e la scoperta del cadavere, esse non sono in grado di fornire stime precise quando il corpo raggiunge la fase di scheletrizzazione: in quel caso, nessuno dei metodi precedentemente citati è in grado di dare informazioni utili circa la stima del PMI. A complicare queste predizioni entrano in gioco una serie di variabili sia estrinseche (quali temperatura, umidità, accessibilità del corpo a insetti e animali necrofagi e tipo di terreno), che intrinseche, (quali età, massa corporea, sesso, presenza di traumi, causa della morte e trattamenti con farmaci). Tutte queste variabili sono in grado di influenzare il tasso di decomposizione e, quindi, rendere la valutazione del PMI ancora meno accurata.

In queste circostanze, la possibilità di analizzare uno o più *biomarkers* appartenenti all'osso stesso potrebbe essere uno strumento utile per ottenere una stima del PMI oggettiva, misurabile attraverso modelli matematici e curve predittive. Tra le biomolecole appartenenti all'osso, le proteine risultano essere quelle più longeve. Esse sono protette da una matrice minerale di idrossiapatite di calcio, sono in grado di sopravvivere più a lungo del DNA e sono meno soggette a problemi di contaminazione durante le successive fasi di analisi di laboratorio. In particolare, si sono trovate proteine endogene all'interno di ossa appartenenti a dinosauri

²² Madea B. Methods for determining time of death. *Forensic Sci Med Pathol.* 2016; 12 (4): 451 - 485.

²³ Cordeiro C, Ordóñez-Mayán L, Lendoiro E, Febrero-Bande M, Vieira DN, Muñoz-Barús JI. A reliable method for estimating the postmortem interval from the biochemistry of the vitreous humor, temperature and body weight. *Forensic Sci Int.* 2019; 295: 157 - 168.

²⁴ Catts EP, Goff ML. Forensic entomology in criminal investigations. *Annu Rev Entomol.* 1992; 37 (1):253-272.

²⁵ Wescott DJ, Steadman DW, Miller N, et al. Validation of the total body score/accumulated degree-day model at three human decomposition facilities. *Forensic Anthropol.* 2018; 1 (3): 143.

risalenti a ottanta milioni di anni fa²⁶, garantendone, pertanto, una preservazione più che adeguata per intervalli di tempo di interesse forense. Recentemente sono stati eseguiti alcuni studi su carcasse di animali (*Sus scrofa*) sepolte in terra ad una profondità simile a quella a cui solitamente vengono seppelliti, in seguito ad azioni criminali, cadaveri che per volontà dell'omicida vengono occultati al fine di sviare le indagini e di non consentire il ritrovamento della salma. Tali carcasse sono state lasciate decomporre per periodi di tempo compresi tra uno e sei mesi; e ad intervalli di tempo regolari, i corpi sono stati riesumati, le ossa recuperate e le proteine estratte partendo da pochi microgrammi di polvere di tibia, al fine di valutare il proteoma osseo e la sua degradazione nel tempo in correlazione a PMI crescenti²⁷.

Lo studio ha rivelato la presenza di alcune proteine la cui abbondanza decresceva in maniera direttamente proporzionale all'aumentare del PMI e l'esistenza di una proteina tipica dell'osso, il "*biglycan*", che veniva modificata chimicamente tramite processi non enzimatici (che è noto che accadano *post mortem* in maniera direttamente proporzionale al tempo trascorso). Questa ricerca ha, dunque, permesso di individuare la presenza, in ossa animali, di alcuni "*biomarker*" proteici correlabili al PMI, aprendo di fatto la strada alla cosiddetta disciplina della proteomica forense.

A questa indagine sono seguite diverse altre, volte ad esempio a determinare la modifica del proteoma osseo animale in ambienti deposizionali non terrestri, quali la presenza di cadaveri sommersi in diverse tipologie di acqua²⁸, ed è stato anche eseguito un primo studio esplorativo su quaranta scheletri umani di intervallo *post mortem* compreso fra cinque e venti anni, che ha rivelato la presenza di trentadue proteine utili per discriminare ossa appartenenti a cadaveri con un PMI rispettivamente minore o maggiore di dodici anni.

Ad oggi sono in corso ulteriori ricerche su cadaveri umani che, combinando insieme diverse tecniche omiche, oltre che esami riguardanti la degenerazione biochimica e meccanica della matrice ossea²⁹, dovrebbero consentire lo sviluppo di un modello predittivo accurato che possa essere utile per discriminare in maniera più precisa il PMI.

²⁶ Link AJ, Eng J, Schieltz DM, et al. Direct analysis of protein complexes using mass spectrometry. *Nat Biotechnol.* 1999; 17 (7): 676 - 682.

²⁷ Procopio N, Williams A, Chamberlain AT, Buckley M. Forensic proteomics for the evaluation of the post-mortem decay in bones. *J Proteomics.* 2018; 177: 21 - 30.

²⁸ Mizukami H, Hathway B, Procopio N. Aquatic Decomposition Of Mammalian Corpses: A Forensic Proteomic Approach. *J Proteome Res.* 2020.

²⁹ Bonicelli A, Zioupos P, Arnold E, Rogers KD, Xhemali B, Kranjoti EF. Age related changes of rib cortical bone matrix and the application to forensic age-at-death estimation. *Sci Rep.* 2021; 11 (2086).

In aggiunta al discorso della proteomica forense, è opportuno citare anche lo stato dell'arte inerente allo studio dei lipidi presenti in osso e dei loro metaboliti generati in seguito alla loro degradazione *post mortem*, sempre al fine ultimo della valutazione del PMI.

Infatti, così come le proteine, anche i lipidi contenuti all'interno del midollo osseo possono sopravvivere a lungo dopo la morte, andando incontro ad una degenerazione lenta e progressiva che segue un andamento prevedibile nel corso del tempo. A causa del fatto che il decadimento progressivo dei fosfolipidi e degli acidi grassi nel tessuto muscolare è stato ritenuto un *biomarker* promettente nella stima del PMI, laddove i tessuti molli sono ancora presenti o parzialmente presenti (e quindi, durante le fasi più precoci della decomposizione)³⁰, si è pensato di applicare la stessa strategia sui tessuti ossei. Al momento sono in corso alcune analisi lipidomiche, eseguite su cadaveri umani tramite cromatografia e spettrometria di massa, e presto si avranno i primi risultati circa l'accuratezza e la precisione di questo metodo per l'identificazione del PMI in osso.

In aggiunta allo studio dei *biomarker* presenti nell'osso, un approccio altrettanto nuovo e promettente consiste nell'analisi metagenomica delle popolazioni microbiche (batteri e funghi) presenti sul corpo in fase di decomposizione, o nel terreno e nell'ambiente circostante la carcassa, in grado di dare informazioni sul PMI. Le analisi metagenomiche consistono nello studio sistematico della comunità microbica (definita anche come microbiota, popolazione di microrganismi che colonizza un determinato luogo) appartenente ad un determinato distretto corporeo o ad uno specifico ambiente, tramite il sequenziamento di geni specifici (gene 16s del rRNA per quanto riguarda i batteri, e geni ITS1 e ITS2 per quanto riguarda i funghi) con alto potere discriminante tra organismi di specie diverse, sfruttando la tecnologia del *Next Generation Sequencing* (Sequenziamento di Nuova Generazione). Tale tecnologia consente di individuare le specie microbiche presenti nel campione, senza necessità di coltivare i batteri o i funghi su piastre di coltura e di valutarne le abbondanze relative in ogni campione. È ormai appurato come lo studio del microbioma (totalità del patrimonio genetico posseduto dal microbiota), possa costituire una sorta di "orologio microbico" per la predizione del PMI in diversi stadi di decomposizione; e gli studi pubblicati in questa direzione sia su modelli animali che su cadaveri umani sono ormai sempre più numerosi³¹, così come i gruppi di ricerca

³⁰ Wood PL, Shirley NR. Lipidomics analysis of postmortem interval: Preliminary evaluation of huMetcalf JL. Estimating the postmortem interval using microbes: Knowledge gaps and a path to technology adoption. *Forensic Sci Int Genet.* 2019; 38: 211 - 218. doi:10.1016/J.FSIGEN.2018.11.004:

³¹ Metcalf JL, Parfrey LW, Gonzalez A, et al. A microbial clock provides an accurate estimate of the postmortem interval in a mouse model system. *Elife.* 2013; 2:e01104.;

specializzati in microbiologia forense, facendo quindi ben sperare, previa identificazione di linee guida, di *standard* e di *database* di riferimento condivise ed approvate dalla comunità scientifica, in una futura applicazione di queste analisi anche nelle aule del tribunale.

In aggiunta al PMI, una delle altre domande da sempre molto dibattute in antropologia forense è la stima dell'età cronologica di un individuo, in particolare per i soggetti adulti. Infatti, esistono svariate tecniche basate sull'osservazione e sulla misurazione di specifiche particolarità scheletriche, tra cui l'estremità sternale delle coste³², la faccia pubica sinfisaria³³, la superficie auricolare dell'ileo³⁴ e la fusione delle suture craniche³⁵, ma tutti questi metodi permettono di ottenere un intervallo di età possibile per l'individuo e non una stima accurata (peraltro, questi intervalli sono particolarmente estesi in caso di individui adulti e/o anziani) e sono suscettibili di incertezza in base al grado di variabilità individuale durante il processo di invecchiamento a seconda dello stile di vita e abitudini del singolo e a fattori ambientali³⁶; e sono, peraltro, prони a diverse interpretazioni a seconda dell'esperienza dell'antropologo. Risulta chiaro, quindi, come questa incertezza nella stima dell'età, partendo da resti scheletrici, provochi notevoli problemi medico-legali, soprattutto per quanto riguarda l'identificazione personale di individui sconosciuti rinvenuti in stadi di avanzata decomposizione. Tali situazioni accadono purtroppo frequentemente: basti pensare alle vittime causate dalle migrazioni e dalla tratta di esseri umani, che solo nel 2020 sono state 3.525 e hanno raggiunto un picco di 8.074 nel 2016³⁷; o a cadaveri rinvenuti in fosse comuni; od ancora

Procopio N, Ghignone S, Williams A, Chamberlain A, Mello A, Buckley M. Metabarcoding to Investigate Changes in Soil Microbial Communities within Forensic Burial Contexts. *Forensic Sci Int Genet.* 2018; 0 (0). doi:10.1016/j.fsigen.2018.12.002
 Procopio N, Ghignone S, Voyron S, et al. Soil Fungal Communities Investigated by Metabarcoding within Simulated Forensic Burial Contexts. 2020. doi:10.21203/rs.2.22871/vman skeletal muscle. *Metabolomics.* 2013; 3 (3) : 1.

³² Işcan MY, Loth SR, Wright RK. Metamorphosis at the sternal rib end: a new method to estimate age at death in white males. *Am J Phys Anthropol.* 1984;65 (2): 147 - 156.

³³ Sinha A, Gupta V. A study on estimation of age from pubic symphysis. *Forensic Sci Int.* 1995;75(1):73-78.

³⁴ Buckberry JL, Chamberlain AT. Age estimation from the auricular surface of the ilium: a revised method. *Am J Phys Anthro*

³⁵ Key CA, Aiello LC, Molleson T. Cranial suture closure and its implications for age estimation. *Int J Osteoarchaeol.* 1994;4(3):193-207.
pol. 2002; 119 (3): 231-239.

³⁶ Priya E. Methods of skeletal age estimation used by forensic anthropologists in adults: a review. *Forensic Res Criminol Int J.* 2017;4(2):104.

³⁷ Missing Migrants. <https://missingmigrants.iom.int>. Published 2021. Accessed January 24, 2021.

alle vittime di disastri naturali e, tema particolarmente attuale in questo periodo storico, di eventi pandemici, particolarmente nelle zone più svantaggiate del mondo, dove non sempre è scontata la presenza di familiari e parenti in grado di confermare l'identità della salma.

Per questo motivo, è fondamentale sviluppare metodi più accurati per la stima dell'età cronologica dell'adulto, in grado di fornire stime oggettive, indipendenti dall'osservatore, ulteriormente avvalorate da calcoli riguardanti la precisione e l'associato errore predittivo.

Tra i metodi molecolari più innovativi e promettenti, è necessario, altresì, menzionare lo studio della metilazione del DNA (nota anche come analisi metilomica). La metilazione del DNA è una modificazione chimica che consiste nell'aggiunta di un gruppo metile su una delle basi azotate del DNA, in particolare sulla citosina, i cui livelli di metilazione in regioni specifiche del genoma (cosiddette isole CpG) sono direttamente correlati al processo di invecchiamento biologico. È nota ormai da anni l'accurata connessione tra l'età cronologica/biologica di un individuo e la "firma metilomica" associata a specifici geni, a seconda del tessuto biologico considerato³⁸. Diversi studi scientifici hanno dimostrato l'efficacia e l'accuratezza dello studio del metiloma come predittore dell'età, sia su tracce ematiche³⁹ (con un discostamento dall'età reale inferiore a cinque anni) che su tracce salivari⁴⁰ (con una precisione di circa tre anni) e su liquido seminale⁴¹ (con un'accuratezza di circa cinque anni).

Tutte queste tipologie di fluido biologico sono facilmente reperibili sulla scena del crimine; e, pertanto, la stima dell'età, a partire da suddette tracce, risulta estremamente preziosa per l'individuazione delle persone che hanno depositato le loro tracce sulla scena.

Lo stesso tipo di analisi può anche essere applicata a resti ossei, e gli unici due studi disponibili al momento hanno dimostrato un discostamento

³⁸ Horvath S. DNA methylation age of human tissues and cell types. *Genome Biol.* 2013; 14 (10): R115. doi:10.1186/gb-2013-14-10-r115

³⁹ Bekaert B, Kamalandua A, Zapico SC, Van de Voorde W, Decorte R. Improved age determination of blood and teeth samples using a selected set of DNA methylation markers. *Epigenetics.* 2015; 10 (10): 922 - 930. doi:10.1080/15592294.2015.1080413

⁴⁰ Hong S, Jung S-E, Lee E, Park MJ, Yang W-I, Lee HY. DNA methylation-based age prediction from saliva: High age predictability by combination of 7 CpG markers. *Forensic Sci Int Genet.* 2017; 29. doi:10.1016/j.fsigen.2017.04.006

⁴¹ Lee HY, Jung S-E, Oh YN, Choi A, Yang WI, Shin K-J. Epigenetic age signatures in the forensically relevant body fluid of semen: a preliminary study. *Forensic Sci Int Genet.* 2015; 19: 28 - 34. doi:10.1016/j.fsigen.2015.05.014

dall'età reale inferiore a tre anni⁴² e sei anni⁴³ rispettivamente. È chiaro che un ulteriore miglioramento di questi modelli predittivi potrà condurre a risultati finora mai raggiunti nel settore forense, e, data la robustezza della metodologia applicata, l'analisi metilomica potrebbe essere adottata, in un futuro anche piuttosto prossimo, a scopo investigativo e processuale.

Un altro approccio da poter usare, eventualmente in combinazione alle analisi metilomiche dell'osso per la valutazione molecolare dell'età cronologica/biologica, è la precedentemente menzionata analisi proteomica, che in maniera simile a quanto già spiegato per l'identificazione di potenziali *biomarker* utili per la stima del PMI, può anche fornire informazioni circa la stima dell'età individuale. Sebbene studi preliminari siano stati condotti a tale scopo esclusivamente a fini di ricerca e su diverse specie animali⁴⁴, non bisogna escludere la loro futura applicazione a resti umani, previa validazione della metodologia e stima dell'accuratezza predittiva di tale modello.

In aggiunta alle tematiche ampiamente trattate finora in questo *paper* circa la stima cronologica *in vivo* e *post mortem*, risulta, infine, opportuno accennare alle analisi del microbioma, non solo quanto mezzo utile per la stima del PMI, ma anche a scopi più diffusi quali la definizione delle cause della morte (come ad esempio l'*overdose* da medicinali e l'annegamento) e l'identificazione personale⁴⁵. È ormai nota, infatti, l'importante funzione che svolgono i microrganismi nella fisiologia dell'individuo; e come stili di vita, abitudini alimentari, patologie, trattamento con farmaci o uso di droghe a scopo ricreativo, abitudine al fumo, all'alcool, livello di sedentarietà e provenienza geografica possano influenzare il microbiota, e quindi, il microbioma.

Tenendo conto del fatto che il corpo umano ospita tra cinquecento e mille specie di batteri diversi, e che la variabilità del microbioma osservabile in due individui è maggiore della variabilità di diversi distretti cutanei appartenenti

⁴² Correia Dias H, Corte-Real F, Cunha E, Manco L. DNA methylation age estimation from human bone and teeth. *Aust J Forensic Sci.* August 2020:1-14. doi:10.1080/00450618.2020.1805011

⁴³ Gopalan S, Gaige J, Henn BM. DNA methylation-based forensic age estimation in human bone. *bioRxiv.* January 2019:801647. doi:10.1101/801647

⁴⁴ Procopio N, Chamberlain AT, Buckley M. Exploring biological and geological age-related changes through variations in intra- and inter-tooth proteomes of ancient dentine. *J Proteome Res.* 2018; 17. doi:10.1021/acs.jproteome.7b00648; Procopio N, Chamberlain AT, Buckley M. Intra- and Interskeletal Proteome Variations in Fresh and Buried Bones. *J Proteome Res.* 2017; 16 (5): 2016 - 2029.

⁴⁵ Oliveira M, Amorim A. Microbial forensics: new breakthroughs and future prospects. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2018; 102 (24): 10377 - 10391.

allo stesso individuo⁴⁶, risulta evidente la potenzialità che l'analisi delle comunità microbiche possa avere in campo forense, quale mezzo per stabilire, o escludere, eventi di *transfer* accaduti a seguito di contatto tra due soggetti, o tra un soggetto ed un oggetto: e, quindi, per chiarire situazioni quali ad esempio violenze sessuali, presenza/assenza di un individuo sulla scena del crimine, contatto con l'arma del delitto o con la vittima di un atto delittuoso.

Data la sua facilità di trasferimento con cui può essere rilasciato su una superficie in seguito ad un contatto, l'analisi del microbioma della cute è indubbiamente una tematica di ricerca molto attuale, il cui obiettivo è quello di complementare le analisi classiche volte all'identificazione personale, quali studio delle impronte digitali e studio del "*Touch DNA*" tramite tipizzazione degli STR (*short tandem repeats*) normalmente impiegati in genetica forense, particolarmente laddove questi approcci falliscono a causa della presenza di impronte digitali molto sbavate o di campioni di DNA parzialmente degradati o scarsi in quantità. In aggiunta a quello cutaneo, il microbioma originato da altri distretti corporei, quali bocca o organi genitali, può essere altrettanto utile per un impiego nell'identificazione personale, con risvolti vantaggiosi in anche in ambito investigativo. Infatti, nonostante l'individuazione di specifiche specie microbiche quali "*signatures*" univoche per l'identificazione personale possa essere una visione ancora idealista, a causa delle principali limitazioni riguardanti la scarsa conoscenza della sopravvivenza e della variabilità della popolazione microbica sull'ospite e su eventuali superfici nel corso del tempo, è indubbia l'utilità che queste possano avere per il conseguimento di informazioni valevoli riguardanti caratteristiche di un potenziale sospettato per un atto illecito.

Similmente a quanto appena illustrato, altrettanto opportune a fini investigativi possono essere le informazioni conseguibili tramite l'esecuzione di analisi genomiche dei polimorfismi genetici umani (quali ad esempio gli SNP, *single nucleotide polymorphism*). Tali analisi sono in grado di rivelare, ad esempio, l'origine biogeografica di un soggetto (*ancestry informative SNPs*) così come i tratti fenotipici (*phenotype informative SNPs*) quali colore di carnagione, di capelli e di occhi. È evidente che questo genere di dato possa essere estremamente utile per aprire piste investigative per identificare, ad esempio, il colpevole di un crimine o per identificare resti ossei provenienti da cadaveri sconosciuti.

Nonostante la maggior parte delle indagini in questa direzione si siano concentrati finora principalmente sullo studio dell'ereditarietà della

⁴⁶ Williams DW, Gibson G. Classification of individuals and the potential to detect sexual contact using the microbiome of the pubic region. *Forensic Sci Int Genet* 2019;41:177-187

pigmentazione cutanea, di pelle e di occhi, non è da escludersi in futuro un'espansione di tali ricerche anche ad altri tratti ereditabili utili in campo forense, quali l'altezza di un soggetto e lo studio della morfologia facciale⁴⁷, permettendo così di arricchire ulteriormente l'assortimento delle tecniche a disposizione di investigatori, forze dell'ordine e scienziati, per caratterizzare, nel miglior modo possibile, le prove biologiche e per identificare i soggetti in maniera sempre più mirata, precisa e rigorosa.

4. Conclusioni

Come si è potuto notare, negli ultimi anni si è avuta una accelerazione in alcune branche delle scienze forensi – e, più in generale, nello studio dell'essere umano – con scoperte che, inevitabilmente, hanno inciso (e incideranno) anche nelle nostre aule processuali: partendo dai progressi nella identificazione/accertamento del colpevole di un reato, sino alla identificazione della vittima dello stesso, evitando, forse, potenziali errori giudiziari.

Certamente il prossimo *step* sarà l'uso più massiccio, da un lato delle neuroscienze e, dall'altro, delle tecnologie omiche, anche attraverso l'applicazione dello studio – come visto – delle biomolecole presenti in osso e delle popolazioni microbiche associate ai fenomeni di decomposizione cadaverica.

Ma quello che sicuramente avrà una prossima ed immediata applicazione – parallela alla classica dattiloscopia (così come sono state le neuroscienze con la 'classica' consulenza psichiatrica) – sarà l'analisi del microbioma della cute, al fine di giungere ad una più corretta – e sicura – identificazione personale dell'individuo in combinazione con le tecniche attualmente accettate per la tipizzazione genetica, particolarmente laddove la presenza di impronte digitali siano molto sbavate o i campioni di DNA siano parzialmente degradati o scarsi in quantità.

Il contributo che tali metodologie possono apportare è notevole soprattutto nelle circostanze in cui le indagini genetiche tradizionali non conducano al riconoscimento della persona, come nei casi in cui il profilo genetico ritrovato sulla scena del crimine non generi un *match* nei database nazionali del DNA, come ad esempio il CODIS, il NDNAD o la più recentemente introdotta Banca Dati Nazionale del DNA italiana; o, come quando, durante le fasi preliminari di un'indagine, non si abbiano potenziali sospettati con cui confrontare la traccia genetica rinvenuta sulla scena.

⁴⁷ Tozzo P, D'Angiolella G, Brun P, Castagliuolo I, Gino S, Caenazzo L. Skin Microbiome Analysis for Forensic Human Identification: What Do We Know So Far? *Microorganisms*. 2020; 8 (6) .doi:10.3390/microorganisms8060873



Dunque, se forse non si è riusciti a rispondere, in modo esaustivo, al quesito circa la scelta sulla scienza (forense) da utilizzare, si è potuto però vedere come vi siano sul piatto, come si suole dire, più opzioni a disposizione delle forze dell'ordine in seno alle loro investigazioni, alle parti (P.M., Difesa e Parte Civile) ed al giudice nel delicato momento decisionale.