Carlo Sansotta

Dalla radiologia tradizionale alla radiologia digitale

Il materiale presentato in questo testo è coperto da diritti d'autore ai sensi della vigente normativa italiana ed internazionale ed è stato rilasciato secondo i termini della ***Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.5 Italy License*** (Licenza Creative Commons Attribuzione - Condividi allo stesso modo 2.5 Italia [CC BY-SA 2.5]); per leggere una copia della licenza si può spedire una lettera a Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California, 94105, USA, oppure consultare il seguente sito web

http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/it/

Ogni violazione alle presenti condizioni sarà considerato un reato a norma di quanto previsto in merito dalla Normativa vigente, e come tale sarà perseguito.

Dalla radiologia tradizionale alla radiologia digitale

di Carlo Sansotta

ISBN: 978-0-244-18317-2

© 2019- Carlo Sansotta

I edizione maggio 2019

Indice

1. Introduzione.....1
1.1 Radiologia diagnostica.....2
1.2 Radiologia terapeutica.....3
1.3 Radiologia tradizionale.....4
1.4 Campi di applicazione.....4
1.5 I mezzi di contrasto.....5
1.6 Recenti sviluppi e prospettive future.....5
2. I raggi X.....7
2.1 Proprietà fondamentali dei raggi x e le Immagini in radiologia tradizionale.....7
2.2 La pellicola radiografica.....9
2.3 Interazione raggi X – materia biologica.....12
3. Immagini analogiche e digitali.....15
3.1 "Continuo" e "discreto" in roentgendiagnostica.....15
3.2 Parametri delle immagini digitali.....17
3.3 Il pixel.....17
3.4 La radiologia digitale.....18
3.5 Sistemi radiologici "diretti".....20
3.6 Digitalizzazione del radiogramma convenzionale.....22
3.7 Radioscopia digitale.....22
3.8 Radiografia digitale.....23
3.9 Sistemi di informatizzazione diagnostica e gestionale.....24
4. Conclusioni.....27

5. Bibliografia & Sitografia.....29

1. Introduzione

La Radiologia è la branca della medicina che si occupa dell'uso dell'energia radiante, emessa sotto forma di raggi X o di altri tipi di radiazioni, finalizzata alla diagnosi e alla terapia delle malattie. La sua nascita viene storicamente fatta risalire a qualche anno dopo la scoperta dei Raggi X, nel 1895, ad opera del fisico tedesco Wilhelm Conrad Röntgen, scoperta che gli valse il premio Nobel per la fisica. Fino alla seconda metà del XX secolo, la radiologia restava l'unico metodo di esplorazione indiretto dell'interno del paziente; sul finire del Novecento vennero inventate ed assorbite nella branca radiologica altre tecniche di esplorazione non basate sull'utilizzo di radiazioni ionizzanti. Per questo motivo, pur restando il nome “radiologia” come indicativo delle indagini interne, talvolta oggi si preferisce la terminologia “diagnostica per immagini”.

Sul finire del secolo scorso, con la diffusione ed il costante progresso dei computer, soprattutto in termini di potenza di calcolo e di miniaturizzazione, si sono affermate nuove tecnologie nelle quali era fondamentale l’apporto di queste macchine. Nella Radiologia, la Tomografia Computerizzata è stata la prima tecnologia basata sui calcoli di un computer e rappresentata da immagini cosiddette “digitali”, perché costituite esclusivamente da numeri, a loro volta derivanti dalle informazioni di tipo binario su cui poggiano tutti i processi di calcolo degli elaboratori elettronici.

Intorno alla metà degli anni ‘80 del secolo scorso, la Fuji introduceva sul mercato una nuova tecnologia, la Radiografia Computerizzata (*Computerized Radiography* – CR), basata sui fosfori fotostimolabili (*Photo Stimulable Phosphors* – PSP), in grado di dare immagini radiografiche digitali. Nasceva così una nuova branca della Radiologia, la “Radiologia Digitale”, e per questo le tecniche tradizionali basate sul sistema “pellicola + schermi di rinforzo” (Radiografia) e su “schermo + monitor analogico” (Radioscopia) venivano da

quel momento in poi comprese nella cosiddetta “Radiologia Convenzionale” o “Tradizionale”.

Una prima distinzione, dunque, può essere fatta tra:

- radiologia tradizionale, che utilizza i raggi X per ottenere esclusivamente immagini radiografiche del corpo umano
- radiologia digitale (come la Tomografia Computerizzata -TC-, la Risonanza Magnetica -RM- ed altre) che è in grado di mostrare sia la componente scheletrica sia il contenuto di essa.

Si noti che in questa dissertazione tratteremo solo dell’utilizzo della radiologia in campo medico e sanitario, escludendo tutti gli altri usi che, nel tempo, si sono affermati come valida metodica d’indagine, quali ad esempio la radiografia industriale, edilizia etc.

Sostanzialmente i raggi X e altri tipi di radiazioni furono utilizzati per produrre immagini utili alle diagnosi cliniche (radiologia diagnostica) e per effettuare particolari tipi di trattamenti (radiologia terapeutica).

1.1 Radiologia diagnostica

La radiologia diagnostica consiste nell’esplorazione al fine di valutare, tramite immagini dette radiografie, la presenza di eventuali patologie presenti nel corpo umano.

Alla classica tecnica radiografica, sono andate affiancandosi metodiche come:

- la TC, che permette di ottenere sezioni trasversali del corpo;
- la RM;
- la tomografia ad emissione di positroni (PET);
- la tomografia ad emissione di singolo fotone (SPECT);
- la scintigrafia

Ciascuna di esse ha caratteristiche particolari che, nelle diverse condizioni, rendono più facilmente accessibile la parte da esaminare. Molti organi e sistemi che non sono visibili con le tecniche radiografiche di routine lo diventano tramite ingestione, iniezione o inalazione di sostanze radio-opache (cioè che non lasciano passare i raggi X), dette agenti o mezzi di contrasto, quali il bario, lo iodio, il gadolinio, etc.

Alcuni esami ordinariamente eseguiti con mezzi di contrasto sono, ad esempio:

- il clisma opaco (che permette di visualizzare il colon);
- l'artrogramma (per la valutazione delle condizioni delle articolazioni);
- il mielogramma (che prevede l'iniezione del mezzo di contrasto nel canale vertebrale);
- l'arteriografia.

Molti di questi esami vengono eseguiti dal radiologo osservando, tramite fluoroscopia, la diffusione od il deposito del mezzo di contrasto all'interno dell'organo o del sistema.

Le immagini dinamiche, che registrano i movimenti degli organi o degli apparati o il flusso del materiale di contrasto attraverso i vasi sanguigni o il canale vertebrale, si ottengono registrando l'immagine radiografica su uno schermo mobile e sensibile alle radiazioni (fluoroscopia), oppure registrandola su una pellicola fotografica (cineradiografia) o su una videocassetta.

Sia le pellicole che le videocassette sono mezzi di registrazione permanente; l'immagine fluoroscopica è, invece, transitoria, anche se è possibile registrarne immagini radiografiche permanenti su pellicola.

Nonostante il fatto indubbio che l'esposizione a dosi di radiazioni diagnostiche (ionizzanti) abbia in sé un potenziale rischio, seppure minimo, se queste vengono prescritte e condotte correttamente non esistono prove obiettive che dimostrino effetti collaterali individuabili, legati alle radiazioni emesse dagli esami radiografici diagnostici, tali per cui il rapporto "rischio / beneficio" sia svantaggioso in termini importanti.

1.2 Radiologia terapeutica

La radiologia terapeutica si occupa di determinare quale tipo di radiazione e quali dosi debbano essere applicati a un paziente per la cura di patologie che, in genere, sono di tipo tumorale. Il trattamento che il radiologo prescrive in questo caso prende il nome di "radioterapia" e, spesso, può affiancarsi ad altri tipi di cure, come la chemioterapia, oppure essere conseguente o precedente a queste.

Rientra in questa categoria, inoltre, la "radiologia interventistica", che comprende tutte le procedure invasive o mini-invasive terapeutiche effettuate mediante la guida e il controllo delle metodiche radiologiche. L'obbiettivo è di ottenere risultati e mortalità uguali o migliori rispetto ai corrispondenti interventi chirurgici.

1.3 Radiologia tradizionale

La radiologia tradizionale rimane tutt'oggi uno dei metodi diagnostici più frequentemente utilizzati nella pratica clinica.

Schematicamente, essa utilizza i raggi X che vengono assorbiti in maniera diversa (selettiva) dai diversi tessuti del corpo, in funzione della loro densità. Vengono così prodotte, ad esempio, le classiche radiografie del torace o delle ossa.

Per alcuni tipi di esami, come per esempio l'urografia, è invece necessario iniettare un mezzo di contrasto in vena prima dell'esecuzione delle radiografie.

Il potere diagnostico della radiologia tradizionale è limitato alle patologie primitivamente ossee e a tutte quelle patologie che si manifestano indirettamente determinando delle modificazioni delle ossa. Tuttavia, essendo una metodica di facile esecuzione e di basso costo, permette di dare importanti indicazioni di base su molte patologie che potranno essere successivamente approfondite tramite esami più specifici e sofisticati. Questo è l'esame più semplice, rapido e, ragionevolmente, con la minor dose al paziente di raggi X. Per questo motivo viene ancora utilizzata molto spesso in prima istanza (o, addirittura, in esclusiva) per effettuare una diagnosi.

I metodi per ottenere le immagini ("imaging") più innovativi e tecnologicamente avanzati, quali la TC, la RM, la Scintigrafia, la PET, etc, non hanno affatto soppiantato la radiologia tradizionale, il cui ruolo resta sempre rilevante e, come detto, che spesso viene utilizzata in prima battuta per effettuare una diagnosi.

La radiologia tradizionale viene anche definita "convenzionale", per differenziare gli esami radiologici propriamente detti dalla TC, dalla RM, dall'ecografia e da tutte le altre indagini diagnostiche più o meno sofisticate che vengono oggi impiegate.

1.4 Campi di applicazione

La radiologia tradizionale si rivela ancora utile in quanto esistono dei campi di applicazione che non sono stati superati dalle tecnologie più moderne. Principalmente viene utilizzata nell'ambito dello studio del torace e quindi dei polmoni, poiché resta l'esame più semplice, rapido e con il minor dosaggio di raggi X, anche se poi si possono rendere necessari ulteriori approfondimenti, ad esempio la TC. Ma per uno studio di prima istanza, ad esempio per

una diagnosi di broncopolmonite piuttosto che di pneumotorace, la radiografia può essere completamente sufficiente ed esauriente.

In determinati casi, quindi, non è affatto necessario ricorrere subito a una TAC ed è anzi meglio evitare di sottoporre inutilmente il paziente a una dose significativa di raggi X e a un esame costoso, impiegando una macchina di elevata tecnologia, quando si può ricorrere, con il miglior rapporto costo/beneficio, a una semplice radiografia.

L'apparato scheletrico viene ancora indagato abitualmente con la radiologia tradizionale, in caso ad esempio di traumi e fratture o di artrosi o artrite, magari come primo accertamento, che può spesso essere sufficiente ma sempre suscettibile, eventualmente, di ulteriore approfondimento.

1.5 I mezzi di contrasto

Nel caso di radiografie al torace e all'apparato scheletrico non sono necessari mezzi di contrasto, ma la radiologia tradizionale può avvalersene in caso di accertamenti all'apparato digerente, dando da bere al paziente un preparato a base di solfato di bario, per lo studio di esofago, stomaco e duodeno. Questo esame si pone, in determinati casi che sarà lo specialista a identificare, come alternativa alla gastroscopia.

Anche il clisma opaco è un esame radiologico che si avvale di un mezzo di contrasto baritato, somministrato attraverso una sonda introdotta nel retto e anch'esso, sempre in casi determinati, può costituire un'alternativa alla colonscopia. Questi ultimi esami radiologici infatti sono stati ridotti nel tempo dall'avvento e dalla diffusione della gastroscopia e della colonscopia, ma probabilmente non saranno mai del tutto soppiantati, perché sono molto semplici da eseguire e meno invasivi, fondamentalmente meno fastidiosi.

Il contrasto iodato per via venosa viene invece utilizzato per l'urografia, un esame dell'apparato urinario in cui si radio-opacizzano reni, ureteri e vescica per il sospetto, ad esempio, di calcoli renali. Esistono poi altri esami radiologici con contrasto in campi più specifici, sempre in ambito urologico (cistografia, uretrografia) o in campo gastrointestinale (clisma del tenue).

1.6 Recenti sviluppi e prospettive future

Oggi la radiologia tradizionale è diventata digitale!

Non si usano quasi più le pellicole radiografiche che si impiegavano in passato, ma, utilizzando sempre lo stesso sistema di produzione di raggi X che attraversano il corpo del paziente, ci si avvale di rivelatori elettronici che trasferiscono l'immagine a un computer.

Questa evoluzione della radiografia convenzionale presenta il vantaggio di poter archiviare le immagini, la cui stampa su pellicola o su carta può essere consegnata al paziente, ma che rimangono fissate su sistemi di memoria elettronica, a disposizione del medico, che le può consultare in qualunque momento, ad esempio in occasione di un esame successivo per effettuare un confronto. Un altro vantaggio consiste nella notevole diminuzione della dose di raggi X somministrata al paziente. Le immagini digitali, infatti, sono meno soggette a possibili errori di esposizione (radiografie “troppo chiare” o “troppo scure”), come invece può accadere con le pellicole radiografiche tradizionali”.

2. I raggi X

I raggi X sono una radiazione elettromagnetica caratterizzata da una lunghezza d'onda minore di quella della luce visibile, compresa tra circa 1 nm e 0,001 nm. Viene prodotta nelle transizioni tra i livelli energetici più profondi dell'atomo, o in seguito alla decelerazione subita da un fascio di particelle che penetra nella materia.

I raggi X furono scoperti accidentalmente nel 1895 dal fisico tedesco Wilhelm Conrad Röntgen nel corso delle sue ricerche sui raggi catodici: malgrado il tubo a vuoto in cui produceva la scarica elettrica fosse coperto da un pesante manto nero, uno schermo di platinocianuro di bario, posto casualmente in prossimità dell'apparato, emetteva luce fluorescente a ogni scarica. Röntgen ipotizzò e verificò che la fluorescenza era dovuta a una radiazione invisibile, ancora più penetrante della radiazione ultravioletta, che chiamò "raggi X", alludendo alla sua natura ignota.

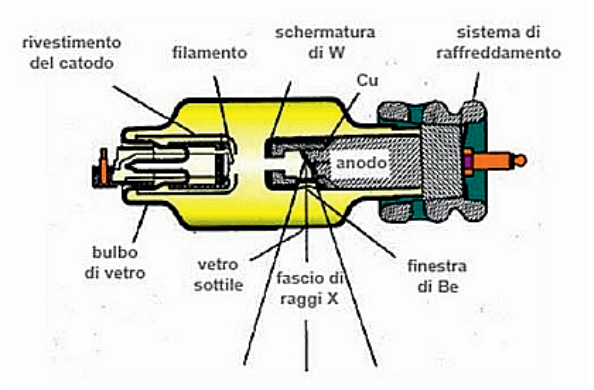
L'energia e la capacità di penetrazione della radiazione sono inversamente proporzionali alla lunghezza d'onda: così, i raggi X caratterizzati dalle lunghezze d'onda maggiori, ossia più vicini alla banda ultravioletta dello spettro elettromagnetico, vengono detti molli, in quanto relativamente poco penetranti; quelli di lunghezza d'onda minore, e dunque più vicini, o addirittura sovrapposti, alla regione dei raggi gamma, sono chiamati duri, in quanto molto penetranti.

2.1 Proprietà fondamentali dei raggi x e le Immagini in radiologia tradizionale

Sono invisibili e si propagano nello spazio in tutte le direzioni con decorso rettilineo, alla velocità di circa 300.000 km/s. Attraversano la materia subendo un'attenuazione tanto maggiore quanto più elevati sono lo spessore, la densità ed il numero atomico della materia attraversata. Hanno anche la capacità di impressionare le pellicole radiografiche e provocano la fluorescenza

di alcune sostanze (platinocianuro di bario). Nell’attraversamento della materia provocano fenomeni di eccitazione e di ionizzazione.

Il fascio di raggi x viene generato da un’ampolla di vetro sotto vuoto spinto, che contiene un catodo e un anodo ad alta tensione, detto “tubo radiogeno”.

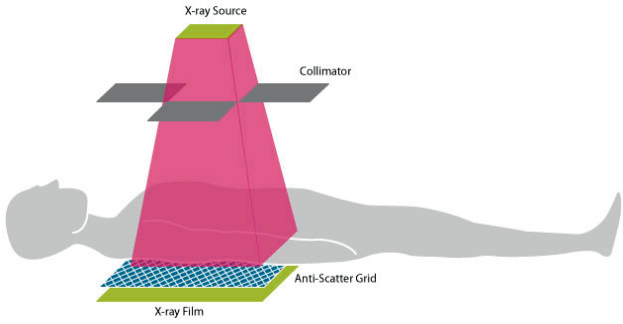


Il catodo (o polo negativo), come nelle normali valvole termoioniche, è composto dal filamento riscaldatore (formato in genere da lega, in rame oppure altri metalli a basso numero atomico, è alimentato a bassa tensione) e dal catodo vero e proprio collegato al circuito ad alta tensione. L'anodo (polo positivo) invece, situato al polo opposto dell'ampolla, è costituito da un disco (piattello) di metallo pesante (ad elevato numero atomico, come le leghe di tungsteno e molibdeno per i tubi diagnostici tradizionali, molibdeno o rodio per i tubi usati in diagnostica senologica), che può essere fisso oppure rotante (quest'ultimo tipo permette di disperdere meglio le temperature che si formano su di esso, che sono sull'ordine dei 2000 °C).

Il tubo radiogeno è contenuto a sua volta in una guaina metallica (generalmente di alluminio, con schermature di piombo) riempita di olio dielettrico: l'olio consente sia di dissipare il calore generato dal tubo in funzione, che di garantire l'isolamento elettrico tra i contatti esterni di anodo e catodo. L'olio viene poi raffreddato, a seconda della potenza del tubo, con aria o un circuito d'acqua. Scopo della guaina è di protezione meccanica e conduzione di calore. La parte del tubo da dove escono i raggi X è detta finestra e non è schermata dalla guaina metallica: vi sono invece dei filtri in rame o in alluminio di spessore adatto a filtrare i raggi X in modo che le energie più basse (inutili alla formazione dell'immagine diagnostica) vengano filtrate secondo le norme di legge.

I tubi radiogeni emettono una radiazione X di molte lunghezze d'onda diverse, cioè è policromatica. Tali lunghezze d'onda dipendono sia dal tipo di metallo del disco anodico sia, soprattutto, dalla tensione di funzionamento: quanto più la tensione è alta, tanto più breve è la lunghezza d'onda dei raggi X (radiazione più “dura”, più penetrante), mentre operando a tensione più bassa si avranno raggi X “molli” meno penetranti. Inoltre, aumentando la corrente aumenta proporzionalmente l'intensità della radiazione emessa e il numero di elettroni attratti verso l'anodo. L'operatore deve quindi regolare questi parametri a seconda delle necessità.

L’intero sistema di produzione del fascio di raggi X ed utilizzato ai fini diagnostici può essere schematicamente rappresentato come un cono con apice puntiforme (fuoco) in corrispondenza dell’anodo e con la base in corrispondenza dell’oggetto in esame o della pellicola radiografica.



Per ottenere e visualizzare correttamente le immagini finali, la radiografia sfrutta contemporaneamente due delle proprietà fondamentali dei raggi x:

- quella di impressionare le pellicole radiografiche
- quella di attraversare la materia (nel nostro caso: biologica)

2.2 La pellicola radiografica

Il fascio di fotoni “emergente” da una regione corporea esposta ai raggi X possiede la proprietà di impressionare una pellicola fotografica, trasferendo su questa, punto a punto, il proprio contenuto di informazione sotto forma di immagine latente.

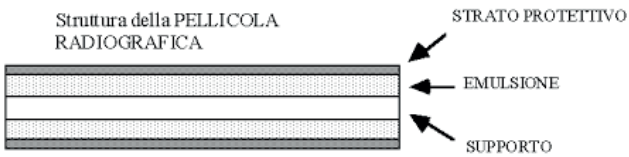
La pellicola “impressionata” contiene l’immagine latente di interesse diagnostico, che può essere successivamente trasformata in immagine reale con procedimenti analoghi a quelli di una comune pellicola radiografica.

Vediamolo meglio: la pellicola è composta da un supporto, normalmente un foglio di poliestere dello spessore di 0,2 mm, sul quale viene spalmata un’emulsione contenente cristalli di bromuro di argento (AgBr). A seguito dell’esposizione avviene la reazione:

$$Ag^{+}Br^{-} + hv \Rightarrow Ag^{+} + Br^{-} + e^{-} \Rightarrow Ag + Br$$

Ora, se si formano contemporaneamente almeno 5 atomi d’argento metallici, si ottiene l’*immagine latente*; successivamente occorre procedere allo sviluppo della pellicola, che consiste nell’immersione della pellicola stessa in una soluzione riducente: gli ioni d’argento del cristallo si accumulano attorno agli atomi metallici di Ag dando luogo a piccoli punti neri. Ma l’immagine non è stabile, occorre quindi procedere al suo fissaggio, ovvero all’immersione in una soluzione acquosa di tiosolfato di sodio ($Na_2S_2O_3$) o di ammonio ($(NH_4)_2S_2O_3$), secondo la reazione:

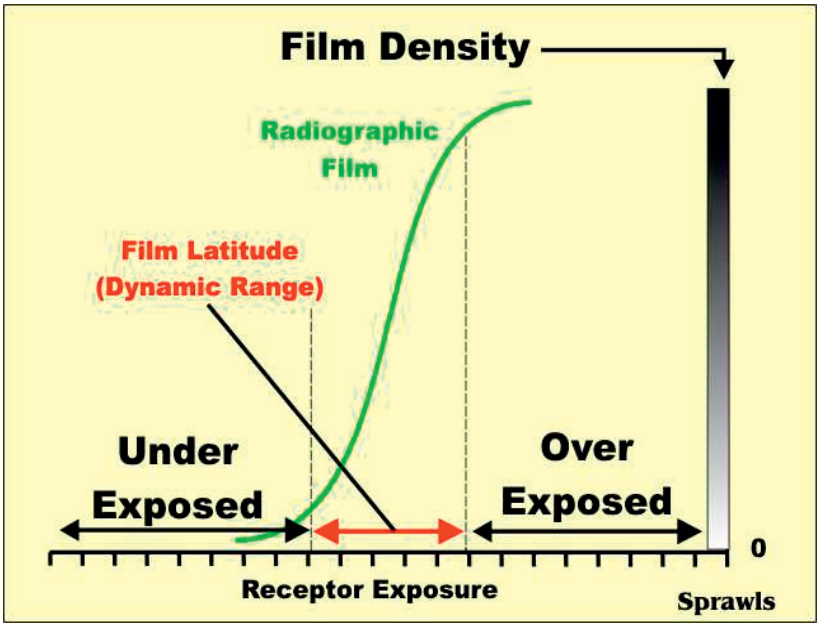
$$AgBr_{(solido)} + 2S_2O_3^{2-} \Leftrightarrow [Ag(S_2O_3)_2]^{3-}_{acquosa} + Br^{-}_{acquosa}$$



La caratterizzazione della pellicola avviene usando la curva sensitometrica, detta anche “curva di Hurter e Driffield” o curva H–D, curva HD, curva H & D, curva D–logE, o curva D–logH. Tale grafico riporta sostanzialmente l’andamento della densità rispetto alla quantità di luce ricevuta ed ha, genericamente, l’andamento di una S variamente stirata ed inclinata.

La curva mostra che su livelli intermedi di luminosità, la risposta delle emulsioni è approssimativamente lineare (ovvero si avvicina a una linea retta, ottimale quando inclinata di 45 gradi); la pendenza di questa linea in questa zona viene chiamata “gamma”. Agli estremi sinistro e destro la pendenza si riduce, cosa che indica che la risposta dell'emulsione alla luce cessa di essere proporzionale e lineare (variazioni di quantità di luce incidono in misura minore sulla variazione di densità, risultando in un inferiore contrasto e in una minore capacità di conservare i dettagli dell'immagine). L'estremo de-

stro della curva viene tecnicamente chiamata “spalla”, quello sinistro “piede”.



Nella zona della sottoesposizione è presente il “fog level”, dovuto alla densità ottica della base (fondo) ed all’annerimento della pellicola dovuto alla radiazione di fondo dell’ambiente (velo).

La scarsa attenuazione del fascio di raggi x (per attraversamento ad esempio dei tessuti polmonari) si traduce in un forte annerimento del radiogramma. Viceversa la marcata attenuazione del fascio radiogeno (dovuta ad esempio all’attraversamento di strutture scheletriche) determina un ridotto (o assente) annerimento del radiogramma.

Nel linguaggio radiologico, il nero viene chiamato “radiotrasparente” ed il bianco “radio-opaco”.

Nella loro propagazione i raggi x obbediscono alla legge della dispersione quadratica delle radiazioni, ovvero l’entità del flusso fotonico diminuisce in misura direttamente proporzionale al quadrato della distanza percorsa.

Ai fini della qualità dell'immagine radiografica sono di fondamentale importanza i rapporti di reciproca distanza fra i tre elementi del sistema e cioè tra la sorgente del fascio di raggi x, l'oggetto da esaminare e la pellicola radiografica.

I rapporti di ingrandimento delle diverse strutture anatomiche e delle loro lesioni dipendono da:

- Posizione rispetto al piano della immagine
- Posizione rispetto alla sorgente della radiazione
- Posizione relativa e rapporto con la proiezione

I fattori che influenzano la qualità dell'immagine sono:

- La dimensione della macchia focale
- L'aumento della distanza focale
- Un tempo di esposizione breve
- La diaframmatura del fascio incidente
- La griglia antidiffusione

Le radiazioni diffuse provenienti dallo stesso segmento corporeo esaminato e responsabili dell' "effetto grigio" sulla pellicola, possono essere ridotte dall'impiego di particolari dispositivi di filtro, detti "griglie" (fisse o mobili)

2.3 Interazione raggi X – materia biologica

Il risultato immediato dell'interazione di ogni radiazione con la materia e' la cessione di energia che causa ionizzazione ed eccitazione di atomi e molecole.

Quattro tipi di radiazione sono rilevanti per i sistemi biologici:

- **Particelle cariche pesanti** (protoni, particelle α,ioni pesanti)
- **Elettroni** Gli elettroni perdono energia per scattering con gli elettroni atomici, ma essendo leggeri sono *scatterati* anche a grande angoli per cui il loro cammino non e' diritto nel tessuto
- **Neutroni** I neutroni non causano ionizzazione diretta ma interagiscono direttamente con i nuclei
- **Fotoni** I fotoni trasferiscono energia via effetto Compton, effetto fotoelettrico e produzione di coppie.

I processi di interazione della radiazione con il tessuto danno luogo ad una scia di atomi e molecole ionizzati ed eccitati. Alcune delle interazioni cedono

energia direttamente a materiale biologico sensibile con danni biologici irreversibili, nei casi più frequenti invece si ha la ionizzazione di molecole più semplici con la creazione di radicali liberi chimicamente attivi. Un *radicale libero* è un atomo o molecola elettricamente neutro che ha un elettrone spaiato. Questi sono chimicamente molto reattivi e possono essere o accettori (agenti ossidanti) o donori (reagenti). I radicali liberi sono importanti perchè essi possono diffondere abbastanza da raggiungere zone biologicamente critiche e quindi indurre reazioni. Sono questi effetti secondari, “danni chimici”, che sono i più dannosi dal punto di vista biologico.

La trattazione completa dell’interazione radiazione-materia è argomento molto vasto e complesso, ampiamente dibattuto. In questa sede non si ritiene opportuno una loro trattazione avanzata, per cui, per questo argomento, si rimanda ad altri testi specialistici.

3. Immagini analogiche e digitali

3.1 “Continuo” e “discreto” in roentgendiagnostica

Che cos'è un'immagine analogica?

Che cosa la differenzia da un'immagine digitale?

Ecco due quesiti di grande importanza e nel contempo l'anello di congiunzione tra la radiologia di ieri e quella di domani (per non dire già di oggi!).

È certamente noto a tutti il paradosso di Zenone: Achille e la tartaruga si muovono nella stessa direzione: la tartaruga avanza a passi infinitesimi e si trova quindi successivamente in ogni punto del tragitto; Achille, invece, avanza di un valore finito a ogni passo e non può mai trovarsi nei punti intermedi del tragitto. In termini matematici, la posizione spaziale della tartaruga è una variabile *analogica* perché può assumere valori numerici “continui” infinitamente vicini tra loro; la posizione spaziale di Achille è invece una variabile *digitale* perché può assumere solo un insieme di valori “discreti” che differiscono l'uno dall'altro di una quantità finita.

Perché possa parlarsi di immagine analogica è necessario siano verificate due condizioni:

1) la variabile in essa rappresentata deve essere analogica
2) l’immagine deve essere spazialmente “continua”: in altri termini la misura delle sue unità elementari deve essere infinitesima.

Dunque un'immagine radiografica “tradizionale” è per forza di cose analogica perché:

- l’entità dell'annerimento può assumere punto a punto qualunque valore (numerico) nell'intervallo compreso tra la trasparenza assoluta e l'opacità assoluta;

- le misure delle unità elementari (i granuli di AgBr),il cui diametro è di circa 2 micron (0,002 mm), possono considerarsi infinitesime in riferimento al potere di risoluzione dell'occhio umano (che è di circa 0,1 mm).

In un'immagine digitale:

- la variabile rappresentata è digitale
- la misura delle unità elementari è finita

Con una certa efficacia espressiva è possibile dire che l'immagine digitale è “discretizzata” spazialmente e nella profondità di valori che la variabile rappresentata può assumere.

Un'immagine analogica può essere trasformata in un'immagine digitale. Supponiamo, ad esempio, di suddividere artificialmente l'immagine radiografica in un insieme di quadratini di lato finito e di determinare in ciascuno di essi l'entità di annerimento per classi di valori.

La memorizzazione delle coordinate spaziali dei singoli quadratini (numero di riga, x, e numero di colonna, y) e dei relativi valori di annerimento consente di “possedere” in forma completa e stabile nel tempo l'informazione necessaria per “ricostruire”, ogni qual volta ritenuto necessario, l'immagine in forma direttamente fruibile dall'occhio umano e tanto più corrispondente a quella di partenza quanto più piccola è la superficie dei quadratini (e quindi quanto maggiore il loro numero) e quanto più “analogica” la rappresentazione dei valori di densità ottica.

Un'immagine digitale non può essere trasformata in un'immagine analogica a maggior risoluzione dei dati di partenza: non è infatti possibile aggiungere l'informazione mancante spaziale e di dinamica della variabile rappresentata!

Pregio importante dell'immagine digitale è la notevole flessibilità che la rende passibile di molteplici elaborazioni.

Un esempio molto importante, in proposito, è quello dell'angiografia digitale: l’immagine radioscopica analogica dell'intensificatore di luminosità è digitalizzata punto a punto sì da poter compiere sui valori numerici, con l'aiuto del computer, una serie di elaborazioni “in tempo reale”: in particolare, la sottrazione dei valori di luminosità dopo e prima dell'opacizzazione artificiale dell'albero vasale consente di ottenere immagini “isolate” delle arterie e delle vene.

3.2 Parametri delle immagini digitali

Le immagini digitali di interesse radiologico sono rappresentazioni “visive” della distribuzione spaziale di una definita proprietà tessutale misurata in volumi corporei unitari predefiniti dall'operatore, i voxel.

Sono “sintetiche”, o di sommazione, se l'altezza del voxel coincide con uno dei diametri corporei, “analitiche” se è di pochi millimetri così da coincidere con lo spessore di uno strato corporeo.

L’acquisizione e la ricostruzione di un'immagine digitale richiedono una serie di atti sequenziali nei quali il computer gioca un ruolo del tutto fondamentale.

A differenza delle immagini radiografiche convenzionali, nelle quali l'occhio vede “direttamente” i rivelatori (i granuli di AgBr) modificati irreversibilmente dal fascio di raggi X emergente e dal procedimento di sviluppo dell'immagine latente, le immagini digitali sono per lo più prodotte con un numero limitato di rivelatori modificati solo temporaneamente dall'assorbimento di energia radiante, ricostruite con l'aiuto del computer e presentate su monitor.

È fondamentale la sussistenza di un rapporto preciso tra volume corporeo sul quale è effettuata la misura e superficie dell'immagine sulla quale è rappresentato “visivamente” il risultato, il pixel.

3.3 Il pixel

Probabilmente già sappiamo che il pixel è l'elemento unitario dell'immagine digitale e assume la forma di un piccolo quadrato (meno comunemente di altre figure geometriche) nel contesto del quale la gradazione di grigio o la tonalità di colore riprodotta è uniforme.

Una volta compiuto il procedimento di acquisizione e ricostruzione, l'immagine digitale è rappresentata da una matrice numerica nella quale gli indici delle righe e delle colonne identificano il pixel e il valore di ciascun elemento della matrice rappresenta il suo livello,cioè il valore del parametro tessutale oggetto di misura. La matrice interviene in tutte le operazioni di calcolo. L'immagine angiografica digitale, ad esempio,risulta da un'effettiva operazione di sottrazione di matrici.

La risoluzione spaziale di un'immagine digitale è in rapporto inverso alla misura del pixel: quanto più piccolo è questo, tanto maggiore è la risoluzione. La misura del pixel è uguale al rapporto tra il campo di vista, cioè la superficie corporea proiettivamente rappresentata nell'immagine, e il numero di pi-

xel presenti nell'area totale dell'immagine (o, il che è equivalente, il numero di voxel in cui è suddiviso il volume corporeo) e quindi la misura della matrice di visualizzazione. Se questa è costituita da 256 righe e 256 colonne (matrice 256x256 o 256^2), i pixel sono 65.536; se la matrice è 512x512, i pixel sono 262.144.

Di ogni pixel devono essere codificati nel supporto fisico di memorizzazione (disco magnetico, disco ottico, nastro ottico, etc.) le coordinate spaziali e il valore assunto dalla variabile oggetto di misura. Queste codifiche richiedono un certo numero di bit. I computer, come è noto, solitamente gestiscono i bit in gruppi di 8, detti byte, o nei suoi multipli.

Si definisce **profondità del pixel** il numero di bit utilizzati per rappresentare i possibili valori della variabile oggetto di misura. In radiologia digitale, per lo più, la variabile può assumere 1.024 (cioè 2^{10}) diversi valori, quindi 1.024 diverse gradazioni di grigio. La profondità del pixel è quindi, in questo caso, di 10 bit.

È molto istruttivo un semplice calcolo. Nei supporti fisici di memorizzazione dei dati, ogni pixel è rappresentato da un record informatico costituito da 2 byte. Se i pixel dell'immagine sono 65.536 (matrice 256^2), saranno necessari 131.072 byte, cioè 128 KB (1 KB è uguale a 1.024 byte), per rappresentare l'intera immagine.

Se il supporto di memorizzazione dispone, ad esempio, di 2 GB, esso potrà memorizzare 16.384 immagini di questo tipo (a prescindere dal ricorso a tecniche "di compressione"). Nella pratica, tuttavia, il numero reale è minore perché una parte dei record è utilizzata per informazioni sulla ubicazione dei dati. La tecnologia delle memorie di massa è oggi in continua evoluzione ed è verosimile che il numero di immagini memorizzabili in un'unica entità fisica sia destinato ad aumentare in futuro non troppo lontano.

3.4 La radiologia digitale

L'interesse a disporre dell'immagine radioscopica in forma digitale proviene fondamentalmente da due motivazioni:

- la possibilità di elaborazione dell'immagine secondo diverse e differenti obiettivi eidologici, spesso importante dal punto di vista diagnostico;
- la digitalizzazione è il punto di partenza per la realizzazione di sistemi di informatizzazione completa in un Dipartimento di Diagnostica per Immagini.

Gli ostacoli principali che il processo di digitalizzazione incontra sono, dovuti principalmente :

- alla difficoltà di uguagliare la risoluzione spaziale dell'immagine radiografica convenzionale;
- alla necessità dì memorie di massa di enorme capacità per l'archiviazione dei dati

L'avvento delle tecniche digitali radioscopiche e radiografiche non ha modificato in maniera radicale le possibilità diagnostiche della radiologia, a differenza di quanto verificatosi con l'avvento della TC, ma ha consentito di conseguire importanti vantaggi sul piano tecnico, biologico, organizzativo ed economico.

Un'immagine digitale è rappresentabile matematicamente mediante una funzione bidimensionale, f(x,y), nella quale x e y rappresentano le coordinate spaziali. In alcuni contesti, tale funzione assume una terza coordinata, il tempo, diventando f(x,y,t). Il valore della funzione è espressivo, in ogni punto, del parametro fisico oggetto di misura e di rappresentazione sotto forma di immagine. In roentgendiagnostica questo parametro è costituito dall'entità di attenuazione del fascio di raggi X lungo ciascuna traiettoria attraverso la regione corporea in studio. Nelle immagini radioscopiche e radiografiche il volume unitario corporeo sul quale è effettuata la misura, il voxel, assume la forma di un parallelepipedo di altezza uguale allo spessore della regione corporea attraversata.

Pregio importante di un'immagine digitale, come già detto, è di essere passibile di molteplici elaborazioni. Nella pratica queste hanno specificamente la finalità:

- di accentuazione, o "enhancement", del contrasto e dei contorni per migliorare la leggibilità dell'immagine;
- di restaurazione di un'immagine degradata, ad esempio per sovra- o sottoesposizione;
- di analisi delle relazioni intercorrenti fra zone dell'immagine ritenute significative;
- di codificazione, cioè diminuzione fisica conservativa dei dati da memorizzare, archiviazione, trasmissione a distanza.

La diminuzione fisica dei dati è comunemente indicata con il termine di "compressione" e può essere più o meno conservativa (può, cioè, mantenere

più o meno intatta la struttura originale dell'immagine che verrà ripristinata al momento della “decompressione”, che è condizione preliminare per il suo uso concreto). Esistono numerosi programmi e formati di compressione, spesso non del tutto compatibili l’uno con l’altro. La trasmissione a distanza in tempo pressoché “reale” apre nuovi orizzonti allo sviluppo della teleradiologia, sia a fini di telediagnosi che di teleconsulto.

3.5 Sistemi radiologici “diretti”

Tutti i sistemi digitali che utilizzano i raggi X per formare immagini corporee sono costituiti da:

- un tubo da raggi X;
- un sistema dì rivelazione che converte i raggi X in una forma di energia più facilmente gestibile;
- un sistema di registrazione che immagazzina l’informazione rilevata;
- un computer che costruisce l'immagine dai dati registrati;
- un sistema di visualizzazione che presenta l'immagine per l'interpretazione diagnostica;
- un sistema di archiviazione che consente di conservare le immagini.

In radiografia convenzionale la pellicola svolge simultaneamente la funzione di rivelatore e di sistema di visualizzazione e riunisce quindi forzatamente le caratteristiche tipiche di entrambi.

In radiografia digitale le due funzioni vengono separate consentendo di “specializzare” sia il rivelatore sia il sistema di visualizzazione; è inoltre possibile sfruttare l'efficacia di una fase intermedia, di “trattamento”, in cui i metodi di elaborazione numerica consentono di migliorare l'evidenza di particolari di interesse diagnostico.

L’immagine digitale è primitivamente visualizzata su monitor; la documentazione permanente è realizzata in un secondo tempo su supporti quali pellicola fotografica, termosensibile, o su altri supporti.

L’ottenimento della documentazione permanente ha luogo in formati diversi ed eventualmente insieme ad altre immagini della stessa indagine, previo trasferimento della matrice dell'immagine nella memoria di una stampante (per lo più di tipo laser, raramente ink-jet ed ancor più raramente a sublimazione) nella quale avrà poi luogo la riproduzione sul supporto prescelto.

Il procedimento di sviluppo fotografico può aver luogo in forma usuale mediante l'impiego di bagni chimici o anche con sofisticate modalità a secco, utilizzando pellicole fototermografiche sensibili agli infrarossi. Le moderne

stampanti laser possono essere collegate simultaneamente a più apparecchiature diagnostiche con conseguente risparmio economico e maggiore uniformità dei risultati iconografici.

In linea generale è possibile distinguere tra:

- sistemi digitali a scansione lineare
- sistemi digitali ad ampia superficie attivi o passivi.

Il più semplice sistema digitale a scansione lineare è costituito da un singolo rilevatore (per lo più di germanato di bismuto, $Bi_4Ge_3O_{12}$) che converte l'energia dei raggi X in energia luminosa, associato ad un fotodiodo che converte la luce in segnale elettrico.

L'insieme rilevatore-fotodiodo è meccanicamente accoppiato a un fascio di raggi x "a pennello" che esegue una scansione bidimensionale completa della regione corporea in studio punto per punto e linea per linea in tempi di alcuni secondi.

La risoluzione spaziale del sistema è condizionata dalle misure del rilevatore (che possono essere anche di 0,25 mm^2). Il sistema può essere reso più efficiente utilizzando un fascio di raggi x "a ventaglio" e una serie di rivelatori contigui accoppiati a fotodiodi.

La regione in studio è scansionata mediante traslazione lineare del paziente o del sistema tubo-rivelatori. Se il numero di rivelatori è di almeno 1.000 e le loro misure sono piccole, la risoluzione spaziale è buona ed è possibile scansionare in tempi di qualche secondo superfici ampie.

Questo sistema è utilizzato in TC per l'assunzione dello scanogramma e, con opportune varianti, anche in radiologia toracica. I sistemi attivi ad ampia superficie sono costituiti da un intensificatore elettronico di luminosità e da una telecamera ad alta risoluzione. Sono in grado di fornire immagini in tempo reale e quindi una vera e propria fluoroscopia digitale particolarmente utile per la registrazione di fenomeni dinamici. I sistemi passivi ad ampia superficie offrono il vantaggio di poter effettuare tecnicamente l'indagine esattamente come in radiologia convenzionale. Il rilevatore dell'immagine può essere elettrostatico o fotoemittente.

I sistemi a rilevatori elettrostatici utilizzano il principio della xeroradiografia. L'immagine latente formatasi sulla piastra di selenio dopo esposizione al fascio di raggi x viene rivelata mediante scansione punto a punto con microelettromeri contigui che generano segnali passibili di digitalizzazione. I sistemi a rilevatori fotoemittenti, sono al momento attuale molto evoluti, tali da pro-

porsi come sostitutivi del sistema convenzionale schermo-pellicola nell'esecuzione di indagini radiografiche .

3.6 Digitalizzazione del radiogramma convenzionale

Questo procedimento trasforma il radiogramma convenzionale in un prodotto trattabile tramite le tecniche numeriche. Diviene cosi possibile elaborare l'immagine e usufruire della flessibilità intrinseca dei dati digitali, sia pure in forma parziale. I sistemi di digitalizzazione sono costituiti nella pratica o da comuni scanner capaci di fornire risoluzioni spaziali e profondità del pixel molto elevate, o da sistemi televisivi "dedicati". Questi ultimi consistono in un diafanoscopio, una telecamera ad alta risoluzione, un computer, un monitor ad alta definizione dotato di uscita video per il dispositivo fotografico, un'unità di controllo. La ricostruzione dell'immagine e la successiva presentazione su monitor sono guidate dal computer e l'intero processo ha luogo in tempo reale, mentre la documentazione fotografica è realizzata mediante stampante laser.

I vantaggi diagnostici più rilevanti risultano dall'applicazione in campo mammografico, soprattutto nella valutazione delle microcalcificazioni.

3.7 Radioscopia digitale

Utilizza un'intensificatore elettronico di luminosità e una telecamera ad alta risoluzione.

Nel tubo analizzatore della telecamera un pennello elettronico scansiona una superficie fotosensibile sulla quale è proiettata da un sistema ottico l'immagine fluoroscopica dell'intensificatore. I segnali elettrici in uscita esprimono l'intensità luminosa nei diversi punti della superficie. Campionamento del segnale, digitalizzazione ed elaborazione, eseguita con l'aiuto di un computer ad elevate prestazioni, consentono di produrre immagini digitali con matrice di 1.024^2, le quali sono visualizzate in tempo reale sul monitor. La risoluzione spaziale del sistema varia inversamente al campo di vista dell'intensificatore di luminosità (se questo è di 33 cm, la risoluzione è di circa 1,5 coppie di linee/mm; se è di 57 cm, la risoluzione scende a circa una coppia di linee/mm). Le immagini,transitoriamente memorizzate su disco magnetico di grande capacità, possono poi essere trasferite su un'unità collaterale a nastro magnetico o a disco ottico per poterle memorizzare in forma permanente. Questo sistema consente una riduzione della dose di raggi x somministrata al paziente di circa il 60%.

Le caratteristiche tecniche del procedimento sono particolarmente idonee allo studio del tubo digerente. Nei fenomeni a rapida dinamica (fase orofarin-

gea della deglutizione, transito esofageo, passaggio del bolo baritato attraverso il giunto esofagogastrico, cinetica duodenale), ad esempio, è possibile acquisire continuativamente e ad alta cadenza un grande numero dì immagini nelle diverse proiezioni e, successivamente, in fase di valutazione, analizzarle in forma rallentata (effetto moviola) scegliendo attentamente le immagini che verranno fotografate su pellicola. Ciò riduce la durata dell'esame e i consumi di materiale fotografico. Nel complesso viene drasticamente modificato l'approccio operativo alle indagini radiologiche dell'apparato digerente

3.8 Radiografia digitale

Con questa tecnica l'immagine radiografica è ricostruita o acquisita primitivamente in forma digitale. Sono utilizzati sistemi a cassette mobili e sistemi a griglia fissa.

I sistemi a cassette mobili utilizzano una piastra di poliestere ricoperta da un sottile strato di fosforo fotosensibile (per lo più fluorobromuro di bario attivato con europio, BaFBr:Eu), che sostituisce il sistema schermo-pellicola dei sistemi convenzionali.

La piastra è posta in una cassetta di alluminio di forma e misure analoghe a quelle convenzionali. L’esposizione ai raggi X induce nel reticolo cristallino del fosforo transizioni elettroniche; l'energia di eccitazione rimane “intrappolata” producendo un'immagine latente elettronica analogica (di qui la dizione “fosfori a memoria”). Quando la cassetta è inserita nel lettore di immagini la piastra viene prelevata e trasferita all'unità di lettura ove viene esposta a un fascio laser. La radiazione di luminescenza prodotta nelle singole unità di superficie è convogliata otticamente su un fotomoltiplicatore che la converte in segnali elettrici analogici. Un convertitore analogico-digitale provvede alla digitalizzazione. I dati sono memorizzati e elaborati dal computer, per poter ricostruire l'immagine. La piastra viene quindi liberata della luminescenza residua mediante esposizione a luce al sodio di alta intensità e trasferita in un magazzino ove è pronta per una nuova esposizione. Il numero di esposizioni possibili è di alcune migliaia.

L’immagine digitale è immediatamente visibile sul monitor di una consolle predisposta all’archiviazione temporanea e può essere stampata mediante sistema laser.

Dall'archivio temporaneo le immagini possono essere richiamate,visualizzate, rielaborate, repertate e infine inviate all’archivio permanente a dischi ottici attraverso il sistema a ciò deputato.

Il sistema è efficacemente sostitutivo della radiografia convenzionale. Suo pregio fondamentale è il fatto che esso non richiede modifiche delle apparecchiature radiografiche

I sistemi a griglia fissa utilizzano una griglia di di dischi magnetici opportunamente interconnessi. La griglia è costituita da un insieme di alcuni milioni di transistori a strato sottile utilizzanti la tecnologia TFT (ThinFilm Transistor), che costituiscono la vera e propria matrice (2.560x3.072 in alcuni sistemi).

Ciascun transistor, del diametro di 0,139 mm, è ricoperto di selenio amorfo semiconduttore (quindi dello stesso materiale costituente la piastra xeroradiografica). Dopo esposizione al fascio di raggi X, la carica elettrica prodotta nel selenio e accumulatasi nel singolo transistor è determinata mediante un opportuno procedimento di trasmissione. Il calcolatore provvederà quindi alla visualizzazione dell'immagine su monitor. L'Immagine radiografica è ottenuta, con tali sistemi, in forma diretta digitale e può essere assoggettata a tutte le elaborazioni di cui è passibile un'immagine digitale, e infine riprodotta mediante stampante laser.

3.9 Sistemi di informatizzazione diagnostica e gestionale

La disponibilità in forma digitale delle immagini radioscopiche e radiografiche apre concrete prospettive per l'informatizzazione totale (non più quindi limitata alle immagini angiografiche, ecografiche, TC, RM e mediconucleari) del Dipartimento di Diagnostica per Immagini. In questo contesto si vanno di giorno in giorno imponendo sistemi informatici "dedicati" con finalità di gestione più funzionale delle potenzialità del reparto.

Del tutto fondamentale è il PACS (Picture Archiving and Communication System), il quale riceve le immagini e i dati testuali associati generati dalle apparecchiature diagnostiche presenti all'interno dell'ospedale e ne consente l'archiviazione e la comunicazione estensiva su stazioni di lavoro opportunamente ubicate.

Il PACS rende possibile disporre estemporaneamente di precedenti indagini del paziente nel momento in cui è sottoposto a una nuova indagine. Programmi sofisticati rendono possibile generare nel suo contesto un prezioso ordine utile per l'accesso a specifiche immagini, per la loro visualizzazione nella stazione di lavoro in formato e sequenza logica, e forniscono aiuto nella stesura del referto con blocchi di testo predisposti allo scopo.

Al momento attuale può dirsi soddisfacentemente risolto, grazie alla definizione degli standard e dei protocolli, il problema dell'interfacciamento di apparecchiature diverse e della loro connessione attraverso reti locali, che ha

costituito in passato la principale remora alla diffusione dei PACS. Problema a tutt’oggi sentito, peraltro, è la necessità di reti più veloci per la trasmissione rapida delle immagini dalle apparecchiature con le quali sono acquisite all'archivio a breve termine e da questo alle stazioni di lavoro.

Il PACS può sussistere in forma isolata, ma è convenientemente integrato nel Sistema Informativo Radiologico (RIS, Radiological Information System), situatogli a monte, il quale offre un prezioso aiuto alle diverse fasi della gestione del singolo paziente e della procedura diagnostica: prenotazione delle indagini, compilazione della lista del giorno registrazione delle modalità tecniche di esecuzione della singola indagine, refertazione, aspetti contabili, amministrativi, archiviazione, valutazione dei consumi di materiali, analisi statistiche. Dal punto di vista funzionale è da attendersi una piena integrazione di entrambi nel contesto del più ampio Sistema Informativo Ospedaliero (HIS, Hospital Information System).

4. Conclusioni

Il progresso tecnologico di quest'ultimi decenni ha rappresentato anche per la Radiologia un'evoluzione senza precedenti. Il concetto e il termine stesso di "Radiologia" ormai si è modificato in "Diagnostica per Immagini" ed l'immagine radiologica tradizionale si è evoluta in "Immagine Digitale".

Angiografia Digitale, TC e RM rappresentano gli esempi di metodiche già entrate pienamente nell'uso clinico, ma il futuro ci riserva la sostituzione completa delle metodiche classiche analogiche da parte di quelle digitali.

I sistemi tradizionali, costituiti da pellicole e sviluppi fotografici, verranno prima o poi abbandonati e sostituiti del tutto dall'impiego della diagnostica su video assistita dal computer. Tuttavia per adesso, il ruolo della radiologia tradizionale resta sempre rilevante e spesso viene ancora utilizzata in un primo momento, ancorchè l'unico, per effettuare una diagnosi.

L'Imaging digitale negli ultimi anni ha subito una continua evoluzione che ha portato ad ottenere immagini sempre migliori e in grado di competere con quelle tradizionali analogiche. Il medico radiologo, il Tecnico di Radiologia e le altre unità di personale coinvolte nella gestione di un Dipartimento di Immagini Radiologiche non parleranno più di fissaggio, sviluppo, schermi di rinforzo, camera oscura, etc, ma, e soprattutto, di telecamere, convertitori analogico-digitale, computer, memorie, matrici di ricostruzioni, etc. ed il loro lavoro sarà orientato verso la ricostruzione delle immagini. C'è da aspettarsi a breve una nuova figura professionale: il tecnico dell'imaging.

Il passaggio dalla Radiologia Tradizionale alla Radiologia Digitale mantiene la fonte di esposizione (i raggi X) e il risultato finale (l'immagine) come elementi fissi; ciò che si rinnova è il Processo Intermedio (Acquisizione, Elaborazione e Riproduzione). Proprio questo processo caratterizza l'evoluzione.

5. Bibliografia & Sitografia

- Giorgio Cittadini:“Diagnostica per immagini e radioterapia”. ECIG, 2003.
- Gianni Erriu, Luigi Nitti, Giuseppe Vermiglio: “Elementi di Fisica (con applicazione alle scienze biomediche)”. Monduzzi editore,1998.
- http://www.Humanitasalute.it , varie voci, gennaio 2006
- http://www.Akisrx.com, varie voci, gennaio 2006
- http://www.federica.unina.it/medicina-veterinaria/radiologia-veterinaria-e-medicina-nucleare/radiologia-digitale/ , maggio 2019
- https://it.wikipedia.org/ , varie voci, maggio 2019

Tutte le immagini riportate sono reperibili nel Pubblico Dominio.