

## Proceedings Article

### **Verifiche dosimetriche su piani di trattamento per tomoterapia: un anno di esperienza**

A. DASSIE, A. DRIGO, M. AVANZO, I. SALVADOR, S. REN KAISER, G. SARTOR, E. CAPRA

*Struttura Operativa Complessa di Fisica Medica, Centro di Riferimento Oncologico (CRO), Aviano (Pordenone)*

**RIASSUNTO:** Viene qui presentata l'esperienza maturata presso il nostro Centro nelle verifiche dosimetriche su fantoccio per ciascun piano di trattamento realizzato con tomoterapia elicoidale. Le misure sono state effettuate sia con camere a ionizzazione sia con film per dosimetria. L'analisi dei dati è servita sia come approfondimento delle conoscenze su questa nuova metodica di trattamento sia ad individuare quali parametri dosimetrici e geometrici condizionano l'accordo tra distribuzioni di dose progettate e distribuzioni misurate. In prospettiva vengono identificati quali sono gli aspetti tecnici che intendiamo perfezionare sia per migliorare l'accuratezza delle misure, in particolare di quelle effettuate con film, sia per ridurre l'impiego di risorse richiesto da questo tipo di verifiche. Viene inoltre valutata la ricaduta dei controlli dosimetrici sulla scelta dei piani di trattamento da attuare nella pratica clinica.

**PAROLE CHIAVE:** Analisi dosimetrica, Dosimetria a film, Verifica di piani di trattamento IMRT, Tomoterapia elicoidale.

### **One year experience in dose verifications for tomotherapy plans**

**SUMMARY:** The experience built in our Department in dose verification with phantom for each helical tomotherapy treatment plan will be presented. Measurements were made both with ion chambers and film dosimetry. From data analysis we gained confidence with this new treatment technique; moreover it has been possible to identify which dosimetric and geometric parameters influence the agreement between planned and measured dose distributions. Perspective considerations will be made on the improvement we would like to get in some aspects of film dosimetry and on the overall efficiency of the verification procedure. It will be shown also the circumstances where dosimetric checks can lead to the change of the treatment plan with an improvement on dose sparing of organs at risk.

**KEYWORDS:** Dosimetric analysis, Film dosimetry, IMRT treatment plan verification, Helical tomotherapy.

### **INTRODUZIONE**

L'utilizzo di tecniche di radioterapia a intensità modulata (Intensity Modulated Radiation Therapy: IMRT) comporta l'introduzione di specifici program-

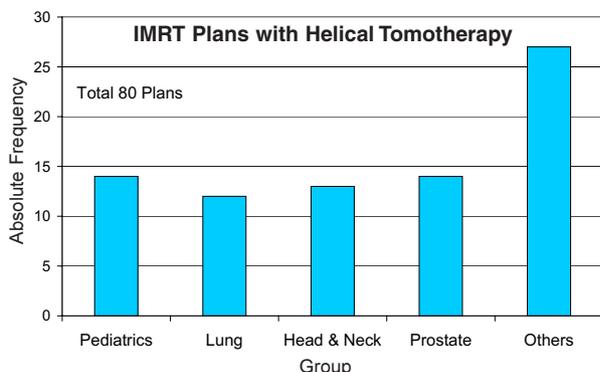
mi di controllo della qualità che consentano di stabilire la coerenza tra la distribuzione di dose pianificata e quella effettivamente impartita al paziente<sup>(3)</sup>. Nel caso della tomoterapia elicoidale la questione è ancora di maggiore rilievo, trattandosi di una tecnica di re-

Correspondence: Dr. Andrea Dassie, S.O.C. di Fisica Medica, Centro di Riferimento Oncologico, via Franco Gallini 2, 33081 Aviano (PN), tel 0434-659175, fax: 0434-659524, adassie@cro.it

Rivista Medica 2007; 13 (3): 49-56.

ISSN: 1127-6339. Fascicolo monografico: ISBN: 978-88-8041-075-1.

Comunicazione presentata al "1° Convegno Nazionale di TomoTerapia", 25 maggio 2007, Aviano (Pordenone). Copyright © 2007 by new Magazine edizioni s.r.l., via dei Mille 69, 38100 Trento, Italia. Tutti i diritti riservati. Indexed in EMBASE/Excerpta Medica. [www.rivistamedica.it](http://www.rivistamedica.it)



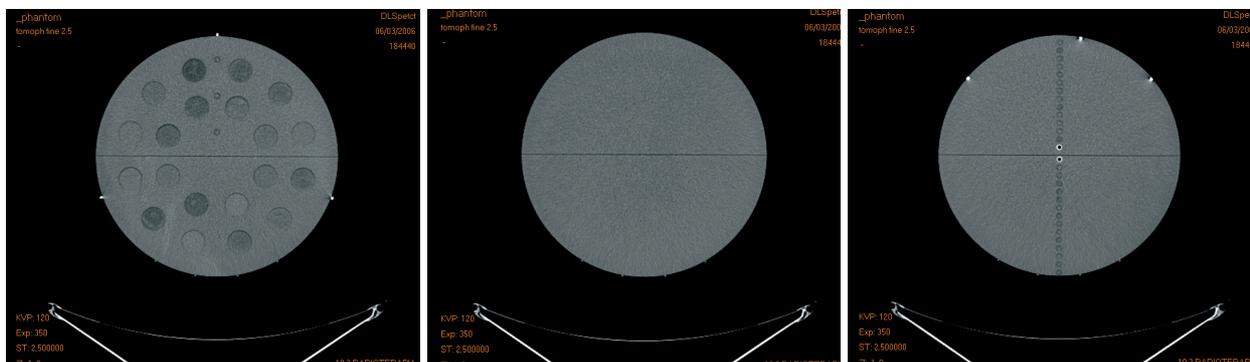
**Figura 1.** Distribuzione per categorie con problematiche omogenee dei piani di trattamento realizzati con tomoterapia da maggio 2006 ad aprile 2007 presso il CRO di Aviano.

cente implementazione e quindi con conseguente minore esperienza disponibile. Il metodo al momento più utilizzato per la comparazione della dose impartita dalla macchina di trattamento con la dose calcolata dal computer dedicato alla pianificazione del trattamento (Treatment Planning System: TPS) consiste nell'irradiare, utilizzando lo stesso piano di cura che verrà utilizzato per il paziente, un fantoccio di materiale plastico acqua equivalente nel quale possano essere inseriti rivelatori di radiazione. La dose rilevata da questi ultimi viene poi comparata con la dose prevista dal TPS determinando in questo modo l'accordo cercato. Questa procedura, nel seguito di questo testo, prende il nome di Delivery Quality Assurance (DQA). Qualora le discrepanze tra previsione e misura di dose risultino non accettabili o comunque insolite si procede, dopo avere accertato la correttezza della procedura, ad una revisione del piano di

trattamento agendo sulla forma e dimensione delle strutture di controllo, nonché sui limiti imposti (constraints) all'istogramma dose volume (DVH) nel corso dell'ottimizzazione. Si ottiene così un nuovo piano che verrà a sua volta sottoposto ad un nuovo DQA. Uno dei problemi evidenti in questo metodo di verifica è la quantità di risorse richieste. A distanza di un anno dall'inizio dell'attività con la tomoterapia si impone quindi una analisi dei dati fin qui accumulati per valutare da un lato l'efficacia dei DQA e dall'altro se e in che modo possa essere ridotto l'impegno profuso per la loro realizzazione.

## □ MATERIALI E METODI

Il primo trattamento con tomoterapia elicoidale Hi-ART (Tomotherapy Inc., Madison, WI) presso il CRO di Aviano è stato eseguito nel mese di maggio 2006. I piani di trattamento realizzati fino ad aprile 2007 risultano 80, distribuiti secondo le categorie illustrate nella Figura 1. Quando un piano di trattamento è stato accettato dal radioterapista si procede, con il software dedicato alla pianificazione (Planning Station: PS), a trasferire lo stesso piano su un set di immagini relative al fantoccio utilizzato per la verifica del trattamento (Figura 2). Il fantoccio (abituale denominato "cheese phantom" a causa della sua forma) è costituito da un cilindro di 30 cm di diametro con una lunghezza di 18 cm. Il cilindro è divisibile in due parti (Figura 2) in modo da poter inserire un film per la verifica dosimetrica ed è dotato di un cospicuo numero di fori che consentono di alloggiare, in posizioni note, le camere a ionizzazione. La geometria di



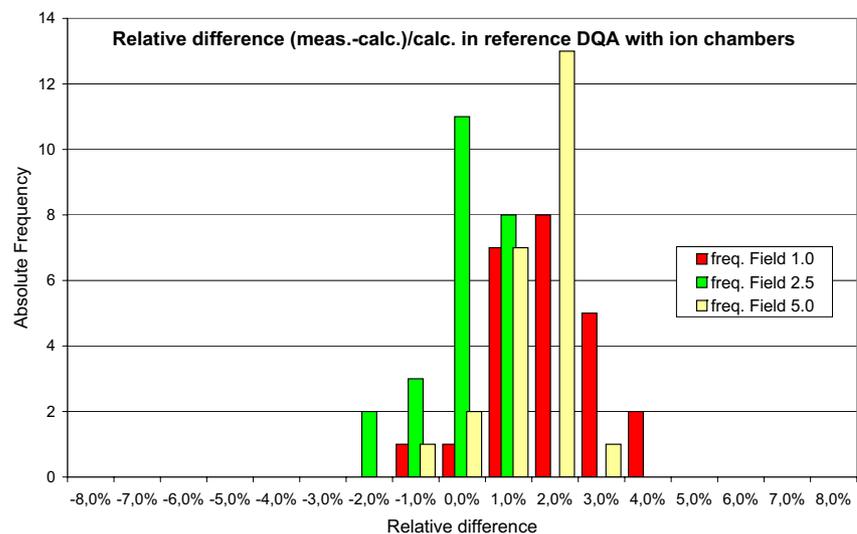
**Figura 2.** Immagini CT del fantoccio in Solid Water® utilizzato per le verifiche dosimetriche del piano di trattamento: si possono vedere gli alloggiamenti per gli inserti di densità variabile, la suddivisione a metà del fantoccio per l'inserimento del film, gli alloggiamenti per le camere e i markers radio-opachi per il posizionamento.

trattamento è esattamente quella del piano progettato per il paziente; il software consente di scegliere la posizione più adeguata per il fantoccio; il criterio da noi utilizzato prevede che il film sia disposto su un piano significativo per il trattamento: tipicamente tale piano interseca ampiamente il volume del target (PTV). Quando possibile si sceglie di intersecare anche alcuni organi a rischio (OAR), in caso contrario si può decidere di progettare ed eseguire un secondo piano di trattamento (DQA) nel quale il piano del film intercetti zone significative di OAR

particolarmente rilevanti. In ogni DQA vengono sempre utilizzate due camere a ionizzazione di regola posizionate in corrispondenza al PTV, mentre altre camere vengono posizionate in corrispondenza a punti inclusi in OAR. Le camere impiegate a questo scopo sono del tipo AISL ed il loro segnale viene letto con un elettrometro dedicato con otto canali d'ingresso (*Standard Imaging, Middleton, WI*).

Una volta decisa la posizione del fantoccio rispetto alla geometria di irradiazione viene calcolata la distribuzione di dose attesa nel fantoccio stesso. In particolare vengono rese disponibili la matrice della distribuzione di dose nella posizione corrispondente al film e i valori di dose nei punti corrispondenti alle camere di ionizzazione. Questi dati vengono quindi comparati con i risultati delle misure.

Per quanto riguarda le misure sul film si acquisisce in primo luogo una curva di calibrazione relativa al lotto di films che vengono utilizzati. I films impiegati attualmente sono del tipo EDR2 (*Kodak, Rochester, NY*), ma è in corso anche uno studio relativo a films Gafchromic EBT (*ISP, Wayne, NJ*). Il fantoccio viene quindi posizionato e irradiato con il piano di trattamento in esame. I valori di carica raccolti dalle camere vengono registrati, corretti per gli effetti della pressione e della temperatura e convertiti in valori di dose tramite i fattori di calibrazione. Poiché normalmente le irradiazioni vengono effettuate nel tardo pomeriggio i film di tipo EDR2 vengono sviluppati e analizzati il giorno successivo, quindi non meno di 12



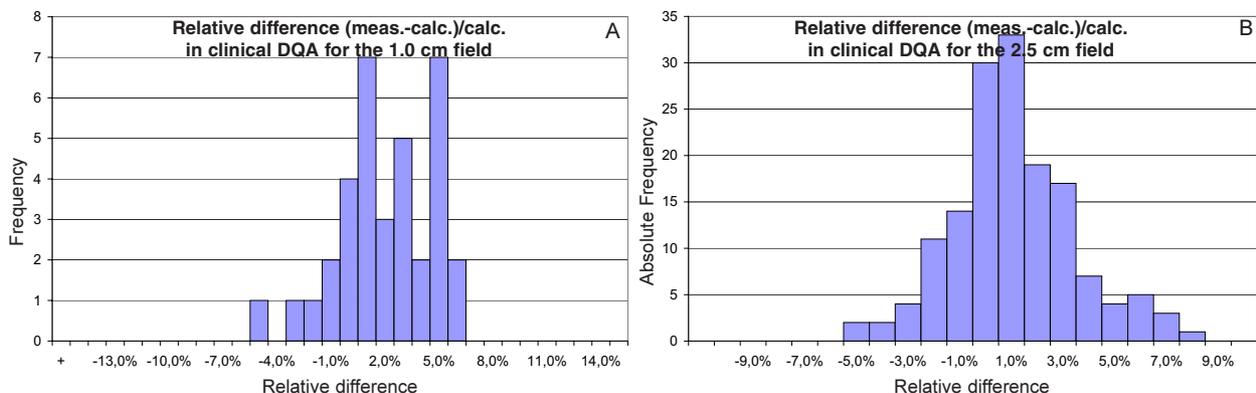
**Figura 3.** Differenza relativa tra valori misurati e valori attesi (calcolati) rilevati con camera di ionizzazione per piani di trattamento di riferimento. L'accordo è migliore per il campo da 2,5 cm e le deviazioni più ampie si registrano con il campo da 1,0 cm.

ore dopo l'esposizione; analoga tempistica vale per i film di tipo EBT, per i quali non è però necessario alcun sviluppo. Le immagini dei film, sia quelli di calibrazione che quelli relativi al piano erogato, vengono acquisite tramite un densitometro Vidar Dosimetry PRO Advantage (*Vidar Systems Corporation, Haddon, VA*) nel caso dei film EDR2, mentre si fa uso di uno scanner EPSON Expression 1680 PRO per il film EBT. Le immagini acquisite vengono elaborate in modo da ricavare la correlazione tra annerimento (densità ottica o pixel value: PV) e la dose ricevuta<sup>(1)</sup>. Al termine di questo processo si dispone della matrice di dose misurata su un piano all'interno del cheese phantom e della dose misurata nei punti rilevanti tramite le camere a ionizzazione. Il confronto tra la distribuzione di dose rilevata con i film e la matrice di dose calcolata dal TPS viene effettuato con il software incluso nella Planning Station di Tomotherapy; in alcuni casi, sia per ragioni di verifica che di studio, è stato utilizzato un software indipendente denominato FilmQA.

## □ RISULTATI

### □ MISURE CON CAMERE A IONIZZAZIONE

Per poter valutare il livello di accordo tra la dose misurata con le camere a ionizzazione e la dose calcolata per mezzo del PS sono stati preparati su cheese

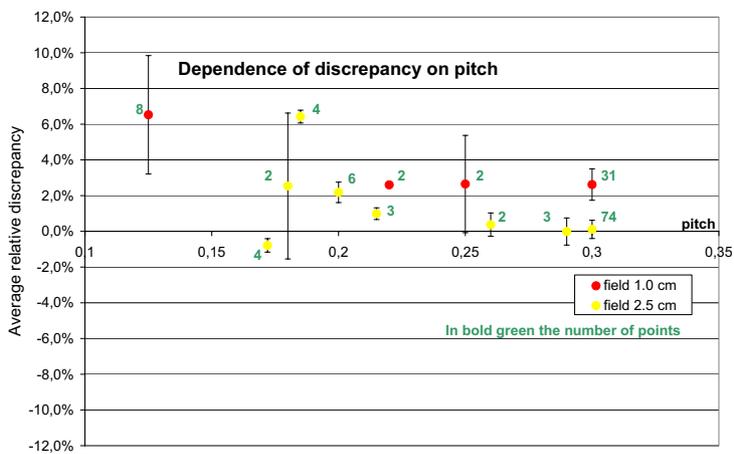


**Figura 4.** Differenza relativa tra misure e calcolo con camera di ionizzazione. A. Distribuzione in frequenza delle differenze per il campo di irradiazione da 1,0 cm. B. Distribuzione per il campo da 2,5 cm.

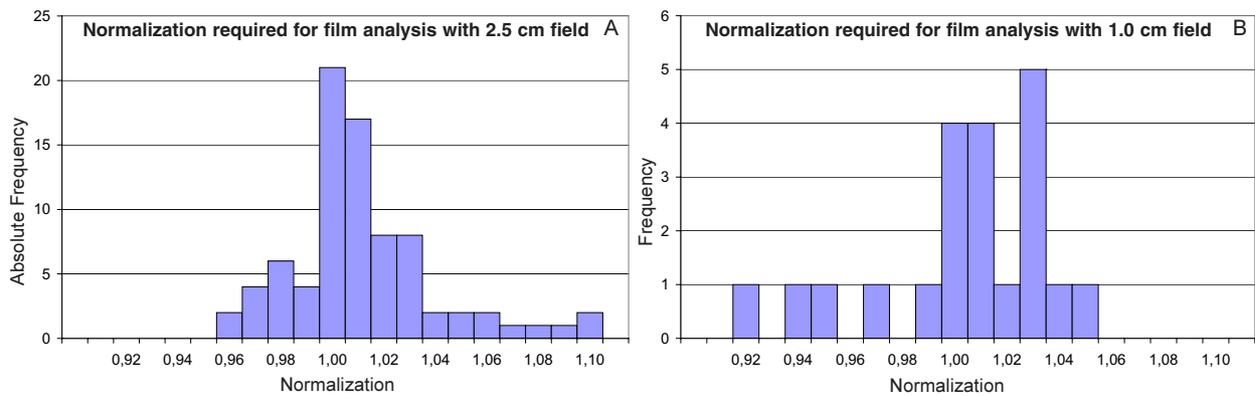
phantom alcuni piani di trattamento di riferimento nei quali vengono irradiati omogeneamente con dosi differenti (2 Gy e 1 Gy rispettivamente) due PTV cilindrici con diametro 4 cm e altezza 5 cm. Al centro di ciascun PTV viene posizionata una camera a ionizzazione. I piani sono stati differenziati per quanto riguarda la dimensione del fascio di irradiazione: 1,0 cm, 2,5 cm e 5,0 cm. Le discrepanze rilevate tra la dose attesa all'interno del volume della camera e la dose calcolata sono riassunte in Figura 3. Le deviazioni riportate risentono sia della discrepanza tra quanto determinato nel calcolo e quanto effettivamente realizzabile, sia delle oscillazioni dell'output della macchina. Da questa analisi, a nostro avviso, risulta che si possono senz'altro considerare in buon accordo misure che si discostano dal valore calcolato fino a  $\pm 1\div 1,5\%$ , mentre vanno valutate attentamente

misure che abbiano discrepanze superiori al 4%; va tenuto presente che questo risultato riguarda una condizione di geometria semplificata. Si può inoltre osservare una dipendenza delle distribuzioni in funzione della larghezza del campo di irradiazione: i campi da 1 cm e da 5 cm producono risultati che si discostano di più dal valore atteso rispetto a quanto accade con il campo da 2,5 cm. I risultati ottenuti per i casi clinici sono stati raggruppati nella Figura 4 in funzione dello spessore del campo di irradiazione: non risulta presente il campo da 5,0 cm in quanto fino a questo momento un solo paziente è stato trattato con tale modalità. Pur tenendo conto della diversa consistenza statistica dei due campioni (35 punti per il campo da 1 cm e 152 punti per il campo da 2,5 cm), si può osservare che viene confermato un accordo meno stringente per i trattamenti che usano il campo

da 1 cm: non solo le discrepanze sono in generale più elevate, ma anche la dispersione dei risultati è maggiore. Se confrontiamo i dati di Figura 4 con quelli di Figura 3 si vede come la complessità dei trattamenti clinici porti a maggiori difficoltà nel realizzare effettivamente quanto pianificato. Nella Figura 5 le differenze tra calcolo e misura sono state raggruppate in funzione di un altro parametro di trattamento: il pitch. Si può osservare che, pure con qualche difficoltà di ordine statistico legata alla scarsità e alla dispersione delle misure per singoli valori di pitch impiegati, i piani con pitch più bassi tendono ad avere disaccordi maggiori. Anche dall'andamento in funzione del



**Figura 5.** Andamento delle differenze tra misurato e atteso per le camere di ionizzazione in funzione del pitch utilizzato.



**Figura 6.** A. Frequenza assoluta della normalizzazione applicata al film per poter effettuare una comparazione con i dati calcolati nel caso del campo 2,5 cm. B. Gli stessi dati relativi al campo 1,0 cm.

pitch risultano evidenti le maggiori discrepanze ottenute con i piani che fanno uso del campo da 1 cm rispetto a quelle dei piani che usano il campo da 2,5 cm.

**MISURE TRAMITE FILM EDR2**

Quasi tutti i film radiografici sono stati posizionati in modo che almeno in un punto la dose da essi ricevuta potesse essere calcolata come interpolazione della dose misurata da due camere di ionizzazione.

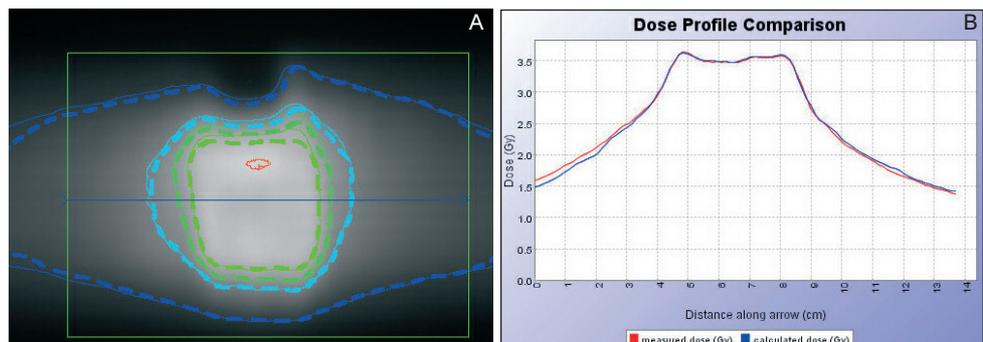
Il punto è stato scelto, salvo rare eccezioni, in una regione interna al PTV e quindi in dose piena. Il risultato auspicabile è che il valore di dose ottenuto con le camere sia compatibile con quello rilevato in quel punto tramite il film.

In base alla nostra esperienza non sempre questo si verifica. In ogni caso il film è utilizzabile per una valutazione della distribuzione relativa della dose sul piano da esso individuato. La bontà dell'accordo tra film e camere è stata comunque registrata sotto forma del fattore di normalizzazione richiesto per riportare la dose letta con il film nel punto corrispondente a

quella valutata per mezzo delle camere a ionizzazione. Nella Figura 6 è stata riportata la frequenza dei valori di normalizzazione utilizzati. Si noti che la statistica disponibile risulta inferiore rispetto a quella delle misure con le camere di ionizzazione: ciò è legato al fatto che per ogni valutazione effettuata con il film sono state effettuate, per ragioni tecniche, almeno due valutazioni con le camere. I risultati ottenuti con i film EDR2 evidenziano un'ampia dispersione dei dati e una discrepanza tra film e camere comparabile a quella tra camere e calcolo. Per la dose assoluta non ci sembra ancora possibile fare affidamento solamente sul risultato della film dosimetria con EDR2.

Una volta stabilito se la normalizzazione sia necessaria ed eventualmente quanto debba essere ampia si procede all'analisi dell'intero film. Tramite il software dedicato è, ad esempio, possibile (Figura 7) sovrapporre all'immagine del film curve di isodose attese e misurate per ottenere una prima valutazione visiva della bontà complessiva dell'accordo tra calcolo e misura. Nella seconda parte della Figura 7 è invece rappresentato il confronto tra il profilo atteso e quel-

**Figura 7.** Esempio di analisi del film in un DQA. In A, l'immagine del film con rappresentate le curve di isodose misurate e attese e la traccia del segmento lungo il quale sono stati estratti i due profili rappresentati in B.



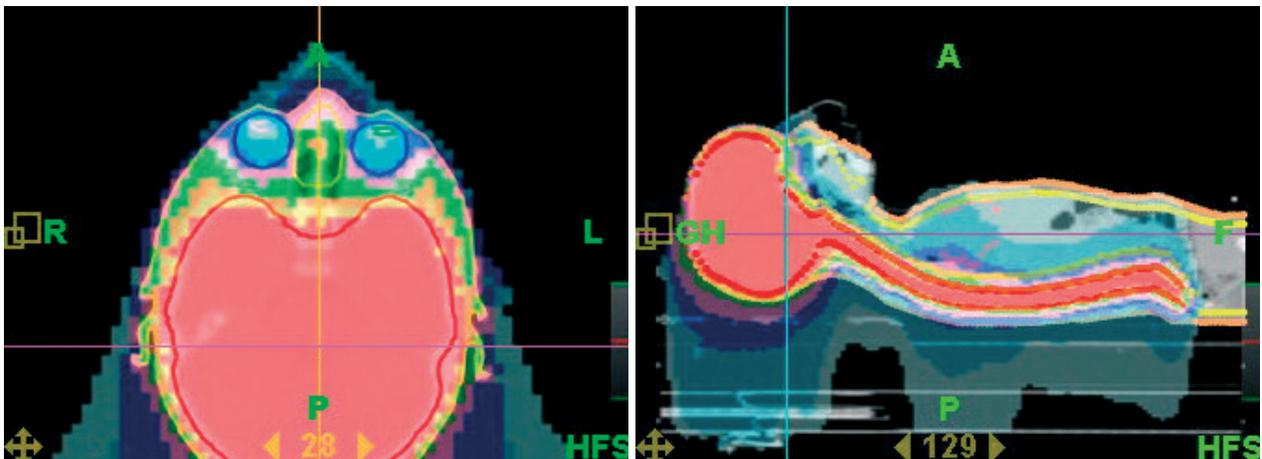


Figura 8. Rappresentazione di PTV e OAR nel caso di una irradiazione cranio-spinale.

lo rilevato con il film lungo un percorso indicato sul film tramite una freccia blu.

La valutazione complessiva dell'accordo tra film e calcolo viene effettuata tramite la funzione  $\gamma^2$  che, come noto, è in grado di definire la differenza tra due distribuzioni di dose tenendo conto, punto per punto, del gradiente della distribuzione stessa.

#### □ MISURE TRAMITE FILM EBT

L'esposizione dei film EBT e la valutazione del risultato ottenuto viene effettuata con le stesse modalità descritte in precedenza per i film EDR2. Attualmente il numero dei casi da noi testati è piuttosto limitato: 6 trattamenti relativi a diverse patologie (prostata, capo-collo, polmone, encefalo, tumore del midollo). Dopo la registrazione, la distribuzione di dose misu-

rata viene confrontata con la distribuzione di dose calcolata dal Treatment Planning utilizzando la funzione  $\gamma^2$  con una tolleranza di 3 mm sulla distanza e 3% rispetto alla dose massima calcolata. I risultati ottenuti con EBT e EDR2 sono stati confrontati tra loro. In Tabella 1 sono riportate le percentuali dei punti, interni alla ROI scelta, con valori di  $\gamma$  inferiori a 1 e in Tabella 2 sono invece confrontate le letture in valore assoluto in punti interni al fantoccio corrispondenti al PTV. Per entrambi i tipi di film, la media dei punti che soddisfa il  $\gamma$  test supera il 90%. I film radiocromici mostrano, in 5 casi su 6 (Tabella 1), un miglior accordo in termini di dose assoluta misurata. I test sono stati ripetuti anche dopo aver normalizzato la dose misurata con i film rispetto alla dose misurata con le camere a ionizzazione in un punto comune: i risultati confermano quanto già ottenuto. Come detto, attualmente la nostra statistica è ancora limita-

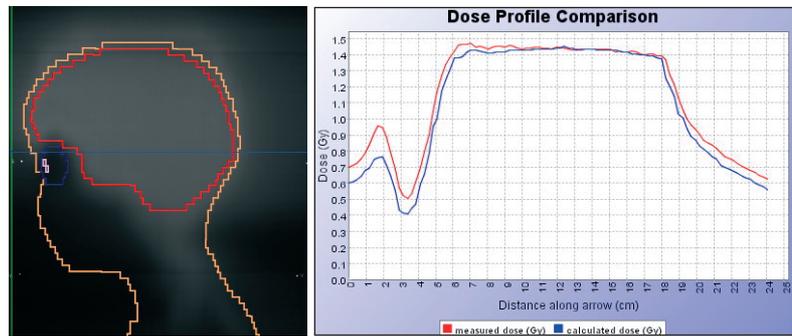
Trattamento	$\gamma\% < 1$ , dose assoluta		$\gamma\% < 1$ , dose relativa	
	EDR2	EBT	EDR2	EBT
• Polmone	93,76	96,2	87,56	89,56
• Capo-collo	98,43	99,22	98,56	98,85
• Capo-collo	90,01	96,81	92,3	91,55
• Encefalo	100,00	98,9	99,66	98,6
• Midollo	76,34	81,14	76,48	82,3
• Prostata	88,98	96,39	92,33	95,36
<b>Media</b>	<b>91,25</b>	<b>94,78</b>	<b>91,15</b>	<b>92,7</b>

Tabella 1. Confronto della distribuzione del parametro utilizzando film EDR2 e film EBT.

ta per poter affermare quale tipologia di film sia più adatta: nel caso della EBT la corrispondenza con la dose assoluta sembra essere migliore, anche nelle aree a bassa dose (se d'interesse) dove le EDR2 non sono utilizzabili.

**RICADUTA CLINICA:  
UN ESEMPIO**

La verifica dosimetrica di ciascun piano di trattamento richiede un notevole impiego di risorse: tempo uomo, materiale di consumo (film), un impegno preliminare per definire il metodo di lavoro. A distanza di un anno dall'inizio del lavoro diventa essenziale chiedersi quali siano stati i vantaggi ottenuti. Come esempio riportiamo il caso di un trattamento di un paziente pediatrico per il quale il PTV comprendeva l'encefalo ed il midollo spinale. Uno dei problemi affrontati nella realizzazione del piano era la vicinanza tra il PTV e gli occhi, sui quali erano richiesti vincoli stringenti (Figura 8). Il primo piano accettato è stato sottoposto a DQA ottenendo il risultato sintetizzato nella Figura 9. Si può osservare una differenza importante tra la dose pianificata e quella misurata a livello degli occhi. Dato che la dose pianificata risultava al limite di quanto accettato dal medico si è deciso di progettare un nuovo piano di trattamento introducendo una opportuna struttura di controllo della dose nella regione retro-oculare. Il risultato finale non ha sostanzialmente migliorato l'accordo tra calcolo e misura, ma ha consentito una decisa riduzione della dose (circa il 25% localmente)



**Figura 9.** Risultato dell'analisi del DQA per il caso rappresentato nella Figura 8. La regione a bassa dose, in corrispondenza all'area occupata dall'occhio destro, presenta una importante discrepanza tra calcolo e misura. Ciò ha portato alla progettazione di un nuovo piano.

consentendo di rientrare nel valore di dose accettata per l'organo a rischio. Questa decisione è stata presa unicamente in funzione del risultato del DQA. Situazioni analoghe si sono presentate in altri due casi.

**CONCLUSIONI**

L'aver effettuato almeno un DQA per tutti i pazienti trattati finora con tomoterapia ci ha consentito di acquisire confidenza con la procedura individuando quali possono essere i parametri di pianificazione più critici per l'accordo calcolato-misurato.

Tra gli strumenti impiegati le camere a ionizzazione hanno sostanzialmente mostrato un discreto accordo con le dosi previste mentre i film radiografici EDR2 hanno in alcuni casi mostrato discrepanze, per quanto riguarda la dose assoluta, sia rispetto al calcolo sia rispetto alle camere a ionizzazione. Il loro impiego è

Trattamento	Dose al PTV (Gy)			Differenza misurato/calcolato (%)	
	EDR2	EBT	calcolato	EDR2	EBT
• Polmone	4,64	4,46	4,45	4,39	0,36
• Capo-collo	1,895	1,9	1,888	0,37	0,64
• Capo-collo	1,647	1,68	1,626	1,29	3,32
• Encefalo	1,421	1,382	1,346	5,57	2,67
• Midollo	1,414	1,393	1,386	2,02	0,51
• Prostata	2,793	2,797	2,761	1,16	1,3
<b>Media</b>				<b>2,47</b>	<b>1,47</b>

**Tabella 2.** Misure di dose assoluta effettuate con film EDR2 e EBT.

comunque essenziale per la valutazione di dose relativa. In alcuni casi risultati non ottimali del DQA hanno portato alla progettazione di un nuovo piano migliorato nelle zone ove la verifica dosimetrica aveva evidenziato discrepanze di rilievo.

Per quanto riguarda le prospettive si sta lavorando sulla procedura di calibrazione dei films: infatti se da un lato riteniamo ancora necessario effettuare la calibrazione ad ogni DQA, dall'altro diventa plausibile l'impiego di tecniche di calibrazione veloce<sup>(4)</sup> che richiedono comunque una valutazione approfondita in particolare per quanto riguarda le dosi elevate. I primi risultati ottenuti con i film radiocromici EBT fanno sperare nel raggiungimento di risultati migliori anche per quanto riguarda la dose assoluta su un range molto ampio di valori. Rimangono comunque aperti i problemi posti dai films EBT: costi economici elevati e onerosità di elaborazione. Per il miglioramento generale dell'efficienza si potrebbero definire alcuni trattamenti standardizzati (con valori predefiniti dei parametri di ottimizzazione) per i quali, dopo una statistica iniziale, i DQA potrebbero essere eliminati o effettuati a campione. Per trattamenti non standard o

comunque in presenza di richieste specifiche riteniamo comunque difficile evitare il controllo dosimetrico personalizzato.

#### □ BIBLIOGRAFIA

1. Avanzo M., Cappelletto C., Capra E., Dassie A., Drigo A., Ren Kaiser S., Sartor G.: A comparison of EBT radiochromic and EDR2 radiographic films for tomotherapy treatments dose verification. Proc AAPM 49th Annual Meeting, Minneapolis 2007, July 22-26 (*in press*).
2. Low D., Harms W., Mutic, Purdy J.: A technique for the quantitative evaluation of dose distributions. *Med Phys* 1993; 20: 1709-1719.
3. Thomas S.D., Mackenzie M., Field G.C., Syme A.M., Fallone B.G.: Patient specific treatment verifications for helical tomotherapy treatment plans. *Med Phys* 2005; 32 (12): 3793-3800.
4. Yan Y., Papanikolaou N., Weng X., Penagaricano J., Ratanatharathorn V.: Fast radiographic film calibration procedure for helical tomotherapy intensity modulated radiation therapy dose verification. *Med Phys* 2005; 32 (6): 1566-1570.