

REVISIONE

Stato dell'arte della risonanza magnetica polmonare nel follow-up delle patologie polmonari croniche pediatriche

State of the art of lung magnetic resonance imaging in the follow-up of chronic pediatric lung diseases

Teresa Pia **Santangelo**^{1,*}, Davide **Curione**¹, Fabio **Majo**², Federica **Porcaro**², Renato **Cutrerà**², Aurelio **Secinaro**¹

* CORRISPONDENZA

teresapia.santangelo@opbg.net

RIASSUNTO

La risonanza magnetica (RM) polmonare si è affermata come metodica avanzata nel follow-up delle patologie polmonari croniche in età pediatrica. L'assenza di radiazioni ionizzanti, la possibilità di acquisizioni a respiro libero e l'introduzione di sequenze dedicate e di tecniche funzionali consentono oggi una valutazione integrata morfologica e funzionale, ripetibile nel tempo. Questa revisione mostra che i dati attualmente disponibili supportano la RM come metodica di secondo livello in grado di ridurre l'esposizione radiologica, migliorare la fenotipizzazione di malattia e supportare decisioni cliniche (intensità del follow-up, valutazione della risposta terapeutica, selezione dei pazienti per TC mirata).

Implicazioni per la pratica clinica: nei bambini con necessità di indagini radiologiche ripetute nel tempo, la RM può essere integrata in percorsi di follow-up senza radiazioni ionizzanti, riservando la TC a quesiti specifici (dettaglio parenchimale fine, calcificazioni) o a criticità cliniche.

ABSTRACT

Pulmonary magnetic resonance imaging (MRI) has become established as an advanced modality in the follow-up of chronic lung diseases in the pediatric population. The absence of ionizing radiation, the possibility of free-breathing acquisitions, and the introduction of dedicated sequences as well as functional techniques now allow for an integrated morphological and functional assessment that can be repeated over time. This review shows that the currently available data support MRI as a second-level imaging modality capable of reducing radiation exposure, improving disease phenotyping, and supporting clinical decision-making (intensity of follow-up, evaluation of therapeutic response, selection of patients for targeted CT). Implications for clinical practice: children requiring repeated imaging studies over time, MRI can be integrated into radiation-free follow-up pathways, reserving CT for specific diagnostic questions (fine parenchymal detail, calcifications) or clinical criticalities.

DOI

10.63304/PneumolPediatri.2026.04

¹ U.O.C. Imaging Avanzato
Cardioracovascolare e Fetale,
Ospedale Pediatrico Bambino Gesù,
Roma, Italia

² U.O.C. Pneumologia e Fibrosi
Cistica, Ospedale Pediatrico
Bambino Gesù, Roma, Italia

PAROLE CHIAVE

*Risonanza magnetica
polmonare; pediatria; follow-up;
patologie polmonari croniche;
imaging funzionale.*

KEY WORDS

*Lung magnetic resonance
imaging; pediatrics; follow-
up; chronic lung diseases;
functional imaging.*

INTRODUZIONE

Le patologie polmonari croniche in età pediatrica rappresentano una delle principali sfide cliniche e assistenziali della pneumologia moderna in relazione alla necessità di un monitoraggio clinico-radiologico protratto nel tempo, spesso a partire dai primi mesi di vita. In questo contesto, la scelta dell'*imaging* assume un ruolo strategico, poiché deve garantire un'elevata accuratezza diagnostica e una buona riproducibilità nel tempo, riducendo al contempo i rischi a lungo termine della radioesposizione. La tomografia computerizzata (TC) rimane il gold standard per lo studio del parenchima polmonare e delle vie aeree, grazie alla sua eccellente risoluzione spaziale e alla capacità di identificare alterazioni fini e di dettaglio quali ispessimenti settali, aree di ground-glass, bronchiectasie iniziali e air trapping. Tuttavia, nei pazienti pediatrici, l'esposizione a radiazioni ionizzanti rappresenta un limite rilevante, soprattutto nei percorsi di follow-up con valutazioni ripetute negli anni.

La risonanza magnetica (RM) polmonare, storicamente considerata inadatta allo studio del polmone per motivi fisici e tecnici, ha conosciuto negli ultimi anni un'evoluzione sostanziale. Il progresso tecnologico, lo sviluppo di sequenze dedicate (ultrashort echo time – UTE, zero echo time – ZTE), l'introduzione di strategie di compensazione del movimento e la diffusione di protocolli rapidi a respiro libero hanno ampliato la fattibilità e l'accuratezza diagnostica della RM toracica. Tali innovazioni hanno progressivamente trasformato la RM in una reale opzione "radiation-free" per il follow-up delle patologie polmonari croniche pediatriche, con un potenziale rilevante impatto sulla pratica clinica quotidiana (Figura 1).

OBIETTIVO DELLA REVISIONE

Fornire una sintesi aggiornata dello stato dell'arte sull'impiego della RM polmonare nel follow-up delle patologie polmonari croniche pediatriche, con focus su: (i) punti

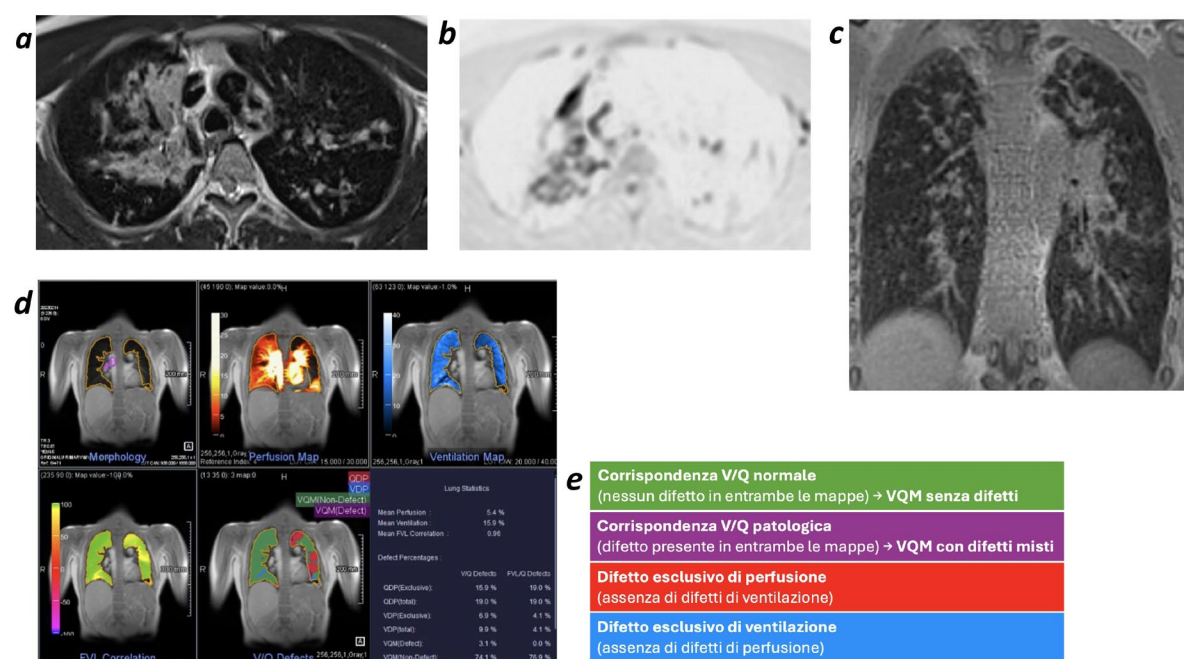


Figura 1. RM polmonari in età pediatrica. Le immagini (a) e (b) mostrano sequenze sul piano assiale rispettivamente BLADE T2-pesate e DWI in paziente affetto da fibrosi cistica, con atelettasia cronica del lobo superiore destro in corso di riaccutizzazione flogistica. In particolare, la sequenza DWI evidenzia fenomeni di restrizione della diffusione, indicativi di attività infiammatoria sovrapposta. L'immagine (c) mostra sequenza UTE sul piano coronale, in paziente con bronchiolite obliterante; sono evidenti alterazioni interstiziali dei lobi superiori associate a ispessimento scissurale a destra compatibili con fenomeni fibrotici polmonari. Le immagini (d) ed (e) illustrano le informazioni ottenibili mediante studio funzionale polmonare RM (PREFUL): in questo caso, per paziente affetto da alterazioni della vascolarizzazione polmonare ad origine cardiogena, la mappa di ventilazione regionale evidenzia aree di ridotta ventilazione, mentre la mappa di perfusione mostra disomogeneità del flusso ematico polmonare, consentendo una valutazione integrata morfo-funzionale del parenchima polmonare senza impiego di mezzo di contrasto né radiazioni ionizzanti.

tecniche essenziali per l'esecuzione; (ii) capacità e limiti rispetto alla TC; (iii) indicazioni cliniche e ripercussioni sulla pratica pediatrica.

DATI SALIENTI EMERSI DAGLI STUDI CONSIDERATI

RM vs TC: vantaggi e svantaggi

La letteratura più recente concorda nel riconoscere alla TC una superiore risoluzione spaziale per la valutazione del dettaglio parenchimale fine e delle calcificazioni. Tuttavia, studi comparativi e revisioni di esperti evidenziano come la RM polmonare, quando eseguita con protocolli dedicati, sia in grado di identificare con buona accuratezza la maggior parte delle alterazioni clinicamente rilevanti nel follow-up di patologie broncopolmonari pediatriche, incluse bronchiectasie, consolidamenti parenchimali, tappi mucosi, aree di iperinflazione e difetti di perfusione. In particolare, Hirsch *et al.* e Liszewski *et al.* sottolineano come l'impatto clinico dell'*imaging* non sia limitato alla sensibilità assoluta della metodica, ma al suo utilizzo in situazioni cliniche necessitanti di valutazioni ripetute riducendo l'esposizione cumulativa a radiazioni (1, 2). In questo contesto, la RM emerge come metodica complementare e non sostitutiva della TC, da inserire in percorsi di follow-up personalizzati e dedicati. Il concetto di equivalenza sul piano clinico rispetto alla TC, più che di equivalenza diagnostica assoluta, risulta particolarmente rilevante in ambito pediatrico: la RM è infatti in grado di fornire informazioni sufficienti per guidare decisioni cliniche lungo il decorso della malattia nella maggior parte delle situazioni di follow-up, pur riconoscendo il ruolo insostituibile della TC per specifici quesiti di dettaglio strutturale (Tabella 1).

Protocolli RM polmonari: approccio pratico

Il protocollo di risonanza magnetica polmonare pediatrica deve essere modulato in funzione dell'età e della capacità collaborativa del paziente. Nei bambini di età inferiore ai 5 anni, l'acquisizione viene generalmente eseguita a respiro libero **con tecniche di trigger respiratorio**, spesso con necessità di sedazione o anestesia. In questa fascia d'età, le singole sequenze possono richiedere tempi più lunghi, mediamente compresi tra 5 e 10 minuti ciascuna, con conseguente incremento della durata complessiva dell'esame.

Nei bambini tra 6 e 12 anni, qualora sia possibile ottenere una collaborazione adeguata, si preferiscono acquisizioni in **breath-hold di breve durata (6–10 secondi)**. Questo approccio consente una significativa riduzione del tempo totale di esame, mantenendo una buona qualità diagnostica (5). Nella pratica clinica, le sequenze T2-TSE respiratorie, bidimensionali, rappresentano tuttora lo standard di base per la RM polmonare pediatrica, offrendo un buon compromesso tra risoluzione spaziale, contrasto e robustezza rispetto agli artefatti (5, 6). Le sequenze UTE e ZTE, che permettono oggi di ottenere immagini tridimensionali ad alta risoluzione, con una qualità diagnostica paragonabile alla TC nella visualizzazione delle bronchiectasie e delle alterazioni parenchimali, devono essere tuttavia considerate come un'integrazione di elevato valore aggiunto, particolarmente utile nel follow-up delle patologie croniche, piuttosto che come un'alternativa equivalente alle sequenze convenzionali. Le tecniche di *imaging* funzionale (Fourier decomposition e PREFUL) permettono una valutazione di ventilazione e perfusione senza l'utilizzo di mezzo di contrasto ampliando il ruolo della RM oltre l'analisi morfologica, mentre la real-time RM (RT-MRI)

Tabella 1. Confronto TC vs RM polmonare – Modello decisionale.

Scenario	TC – quando preferirla	RM – quando preferirla
Fibrosi Cistica	Definizione morfologica di dettaglio iniziale	Follow-up seriale; monitoraggio funzionale (ventilazione/perfusione); valutazione risposta ai modulatori CFTR
Prematurità / BPD	Necessità di dettaglio strutturale submillimetrico	Follow-up longitudinale radiation-sparing; valutazione disomogeneità regionale
Bronchiolite obliterante	Diagnosi iniziale; air trapping lieve (HRCT insp/esp)	Follow-up; monitoraggio funzionale regionale
chILD	Definizione iniziale pattern interstiziali	Follow-up longitudinale; integrazione morfo-funzionale; valutazione coinvolgimento vascolare
Sorveglianza oncologica	Stadiazione iniziale; ricerca micronoduli (<4–5 mm)	Sorveglianza ripetuta; studio masse mediastiniche/parete; caratterizzazione multiparametrica
Parete toracica / Diaframma	Pianificazione chirurgica; dettaglio osseo	Studio dinamico funzionale (RT-MRI); follow-up problematiche neuromuscolari

permette lo studio dinamico della meccanica respiratoria e delle vie aeree centrali (3-5, 9).

Applicazioni cliniche nel follow-up delle patologie polmonari croniche

Le evidenze disponibili supportano l'impiego della RM polmonare in numerosi contesti clinici pediatrici (2, 6-12, 14-16). In tali ambiti, la RM consente un monitoraggio con valutazioni ripetute privo di radiazioni ionizzanti, integrando informazioni strutturali e funzionali di rilevanza clinica.

Fibrosi cistica. In questo contesto, ed in considerazione della necessità di *imaging* ripetuto dall'età pediatrica all'età adulta, la RM polmonare si è progressivamente affermata come alternativa priva di radiazioni, capace di fornire informazioni morfologiche e funzionali clinicamente rilevanti e comparabili alla TC, in particolare attraverso l'utilizzo delle sequenze UTE e a TE ultrabreve di tipo PETRA/ZTE (6, 7). Studi di confronto diretto hanno infatti dimostrato un'eccellente concordanza tra RM e TC nella valutazione degli score strutturali (con coefficienti di correlazione intraclasse molto elevati) e hanno documentato la capacità della RM di identificare già nei primi anni di vita ispessimento delle pareti bronchiali, bronchiectasie, tappi mucosi e difetti di perfusione, nonché di monitorare la progressione di malattia in relazione a tosse, riacutizzazioni e colonizzazione batterica (15). Le tecniche di *imaging* funzionale consentono inoltre di visualizzare alterazioni regionali di perfusione, ventilazione e della circolazione polmonare e bronchiale tipiche della FC. Le sequenze T2-pesate risultano sensibili agli stati infiammatori attivi, distinguendoli dal tessuto fibrotico. Parametri RM funzionali hanno inoltre mostrato potenziale valore predittivo rispetto al rischio di future riacutizzazioni polmonari permettendo il monitoraggio della risposta terapeutica. Tali caratteristiche assumono particolare rilevanza nell'attuale era dei modulatori del CFTR, in cui è fondamentale disporre di strumenti sensibili per valutare precocemente l'efficacia delle nuove terapie e personalizzare i percorsi di follow-up (14).

Esiti di prematurità e displasia broncopolmonare (BPD). Nei soggetti nati pretermine, e in particolare nei pazienti con displasia broncopolmonare (BPD), l'*imaging* ha un ruolo cruciale nel descrivere l'evoluzione delle alterazioni strutturali e nel cogliere l'impatto funzionale a lungo termine su parenchima e circolo polmonare, aspetto particolarmente importante nei percorsi di follow-up longitudinali che possono estendersi dall'età neonatale all'adolescenza. Il lavoro di Katz *et al.* si inserisce in questa prospettiva, dimostrando come la RM,

strumento di follow up radiation sparing, sia applicabile nei bambini ex-pretermine, consentendo di caratterizzare differenze tra soggetti con e senza BPD e di evidenziare un profilo di malattia spesso eterogeneo (8). La RM consente di passare da una valutazione "media" della funzione polmonare a una valutazione regionale, più sensibile nel rilevare disomogeneità ventilatorie e perfusionali e nel supportare una fenotipizzazione più precisa dei pazienti. Come discusso nella review di Walkup *et al.*, le acquisizioni a respiro libero e le sequenze a eco ultrabreve (UTE e affini, dove disponibili) migliorano la capacità di descrivere pattern parenchimali residui e alterazioni delle vie aeree, pur riconoscendo che la TC mantiene un vantaggio per il dettaglio submillimetrico e per specifici quesiti. Sul versante funzionale, tecniche RM non invasive possono fornire mappe di ventilazione e perfusione regionali, contribuendo a intercettare precocemente anomalie funzionali anche quando la spirometria o altri parametri globali risultano conservati.

Bronchiolite obliterante. La bronchiolite obliterante rappresenta una patologia delle piccole vie aeree caratterizzata da sindrome ostruttiva fissa, air trapping ed eterogeneità regionale della ventilazione e della perfusione. In questo scenario, la TC, in particolare con acquisizioni inspiratorie ed espiratorie, rimane il riferimento diagnostico per la dimostrazione del pattern di attenuazione a mosaico e dell'intrappolamento aereo anche in forma lieve. Tuttavia, come discusso da Walkup *et al.* (10), i recenti sviluppi della RM polmonare – sequenze UTE e tecniche funzionali – hanno ampliato significativamente le potenzialità della RM nelle malattie ostruttive pediatriche. Le acquisizioni UTE consentono una migliore visualizzazione del parenchima rispetto alle sequenze convenzionali e risultano più robuste al movimento respiratorio, permettendo esami in respiro libero, caratteristica particolarmente rilevante nei bambini non collaboranti. Tuttavia, la risoluzione spaziale della RM, non raggiunge il dettaglio submillimetrico della TC nella valutazione fine delle piccole vie aeree, tale metodica mantiene quindi una maggiore sensibilità nella dimostrazione dell'air trapping lieve o iniziale e nella caratterizzazione morfologica dettagliata. La RM può essere pertanto considerata metodica complementare e particolarmente indicata nel follow-up pediatrico a medio-lungo termine, dove l'obiettivo è monitorare l'impatto regionale e funzionale della malattia riducendo l'esposizione radiologica cumulativa.

Malattie interstiziali polmonari dell'infanzia (chILD). Le chILD rappresentano un gruppo eterogeneo di condizioni rare nelle quali l'*imaging* svolge un ruolo centrale

sia nella fase diagnostica sia nel monitoraggio evolutivo. Come evidenziato da Spielberg *et al.* (11), la TC rimane la metodica di riferimento per la caratterizzazione iniziale dei pattern interstiziali grazie alla sua elevata risoluzione spaziale e alla capacità di identificare alterazioni di dettaglio quali reticolazione fine, ispessimenti settali, aree di ground-glass e cisti submillimetriche. Gli autori sottolineano come l'utilizzo di sequenze UTE e di acquisizioni tridimensionali ad alta risoluzione abbia migliorato significativamente la capacità della RM di valutare il parenchima polmonare, consentendo una descrizione morfologica sempre più affidabile anche in presenza di bassa densità protonica e brevi tempi di rilassamento del tessuto polmonare. Inoltre, la RM offre un valore aggiunto potenziale attraverso l'integrazione di informazioni funzionali – incluse valutazioni regionali di ventilazione e perfusione – che possono contribuire a una caratterizzazione più globale del coinvolgimento parenchimale e vascolare, aspetto particolarmente rilevante nelle chILD associate a ipertensione polmonare o a disfunzione vascolare. Pertanto, secondo l'approccio delineato dagli autori, la RM può essere considerata una metodica complementare e particolarmente utile nel follow-up longitudinale, nell'integrazione morfo-funzionale e nei percorsi di sorveglianza a lungo termine nei pazienti pediatrici.

Sorveglianza oncologica toracica. Nella sorveglianza oncologica toracica, la RM si configura come metodica multiparametrica complementare alla TC, in grado di integrare informazioni morfologiche e funzionali mediante l'impiego combinato di sequenze UTE/ZTE, diffusione (DWI) e acquisizioni dinamiche con mezzo di contrasto. Tale approccio risulta particolarmente vantaggioso nella valutazione delle masse mediastiniche, dell'infiltrazione della parete toracica e del coinvolgimento vascolare, contesti nei quali il contrasto tissutale intrinseco e le informazioni funzionali della RM offrono un valore aggiunto rispetto alla sola valutazione densitometrica della TC (13). Permangono tuttavia limiti strutturali della RM nello studio del parenchima polmonare fine: la TC mantiene una sensibilità superiore nella rilevazione di noduli polmonari di piccole dimensioni (<4–5 mm) e nel dettaglio submillimetrico. In questo quadro, la RM non sostituisce la TC nella stadiazione iniziale e nella ricerca di micrometastasi polmonari, ma rappresenta uno strumento complementare ad alto valore aggiunto nel follow-up oncologico, in particolare nei pazienti pediatrici o in quelli sottoposti a monitoraggi ripetuti, nei quali la riduzione della dose cumulativa di radiazioni costituisce un obiettivo prioritario.

Patologia della parete toracica e del diaframma. L'introduzione della RT-MRI toracica costituisce un rilevante avanzamento nello studio dinamico della parete toracica e del diaframma in età pediatrica, consentendo, mediante sequenze ultrarapide, la visualizzazione continua del ciclo respiratorio. La RT-MRI permette una valutazione qualitativa e quantitativa della cinetica diaframmatica e della deformabilità della parete toracica, risultando utile nelle deformità toraciche e nelle patologie neuromuscolari (9). Tuttavia, la TC mantiene una superiore risoluzione spaziale per la definizione anatomica delle componenti ossee e per la pianificazione chirurgica. In un approccio integrato, la RT-MRI si configura pertanto come metodica di riferimento per la valutazione funzionale nel follow-up pediatrico, mentre la TC conserva un ruolo centrale nella caratterizzazione anatomica dettagliata e pre-operatoria.

LIMITI E CRITICITÀ ATTUALI DELL'IMPIEGO CLINICO DELLA RM POLMONARE

Nonostante i rilevanti progressi tecnologici e il crescente supporto della letteratura, l'impiego della RM polmonare in ambito pediatrico è ancora limitato dai costi elevati, dalla necessità di apparecchiature e software dedicati non uniformemente disponibili e, nei pazienti non collaboranti, dal frequente ricorso a sedazione o anestesia generale, con conseguenti implicazioni organizzative e di sicurezza. Ulteriori criticità derivano dalla mancanza di protocolli standardizzati a livello internazionale e dalla variabilità inter-sistema nella qualità delle immagini e nelle sequenze disponibili, fattori che ostacolano una diffusione più ampia della metodica e sottolineano la necessità di interventi strutturati di standardizzazione e formazione.

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE CON INDICAZIONI PER LA PRATICA CLINICA

La RM polmonare è una metodica in rapida progressione per il follow-up delle patologie polmonari croniche pediatriche. Pur non sostituendo completamente la TC per quesiti di dettaglio, essa consente un monitoraggio ripetibile e privo di radiazioni ionizzanti, integrando morfologia e funzione. La recente integrazione di algoritmi di intelligenza artificiale e deep learning rappresenta una prospettiva promettente per la riduzione dei tempi di acquisizione, la segmentazione automatica e la quantificazione oggettiva della malattia, favorendo una maggiore standardizzazione, una migliore riproducibilità inter-osservatore e l'adozione di

metriche quantitative nei protocolli di follow-up clinico e di ricerca.

Nella pratica pediatrica, l'adozione di percorsi condivisi (pediatra–pneumologo–radiologo) consente di strutturare il follow-up in modo più razionale e sicuro:

1. **Riservare la TC** a indicazioni mirate o a fasi di cambiamento clinico significativo, quando è necessario il massimo dettaglio parenchimale o la valutazione di calcificazioni.
2. **Utilizzare la RM** (con sequenze T2-TSE integrate da UTE/ZTE e, quando disponibile, *imaging* funzionale) come metodica di riferimento per il monitoraggio nel tempo anche a lungo termine senza impiego di radiazioni ionizzanti.
3. **Personalizzare la sorveglianza** nei pazienti con necessità di ripetute indagini diagnostiche radiologiche, integrando dati morfologici e funzionali per supportare decisioni cliniche e terapeutiche individualizzate.

In prospettiva, l'integrazione strutturata della RM polmonare nei percorsi di follow-up delle patologie croniche pediatriche rappresenta non solo una scelta tecnologica, ma un cambiamento di paradigma orientato alla sostenibilità, alla sicurezza a lungo termine e alla qualità complessiva della cura del paziente pediatrico.

Take-home messages per la pratica clinica

- La RM polmonare non sostituisce la TC, ma ne riduce significativamente l'utilizzo nel follow-up pediatrico, consentendo un monitoraggio longitudinale efficace e privo di radiazioni.
- Le sequenze T2-TSE respiratorie e le sequenze UTE/ZTE rappresentano oggi i pilastri del protocollo RM polmonare pediatrico: le prime come base robusta e riproducibile, le seconde per la valutazione avanzata del parenchima e delle vie aeree periferiche;

l'*imaging* funzionale aggiunge un ulteriore livello di informazioni nelle patologie croniche.

- L'integrazione RM–clinica–valutazione funzionale permette una sorveglianza personalizzata nei bambini con necessità di numerose indagini diagnostiche radiologiche, supportando decisioni terapeutiche e timing degli esami TC mirati.

CONFORMITÀ ALLE NORME ETICHE

Conflitti di interessi

Gli Autori dichiarano l'assenza di conflitti di interessi.

Finanziamenti

Nessun finanziamento è stato ricevuto.

Disponibilità dei dati

Non applicabile.

Conformità etica nella sperimentazione su soggetti umani e animali

Non sono stati condotti esperimenti su esseri umani o animali nell'ambito di questo lavoro.

Dichiarazione di originalità e integrità scientifica

Il manoscritto è originale e scientificamente integro, e non sussistono elementi di plagio.

Contributo degli autori

Tutti gli Autori hanno partecipato alla stesura e revisione del manoscritto. TS ha scritto il manoscritto e revisionato la letteratura scientifica. I restanti Autori hanno discusso la traccia dell'articolo, valutato la bibliografia e contribuito alla revisione critica della versione finale dell'articolo.

BIBLIOGRAFIA

1. Hirsch FW, Sorge I, Vogel-Claussen J, Roth C, Gräfe D, Päs A, et al. The current status and further prospects for lung magnetic resonance imaging in pediatric radiology. *Pediatr Radiol.* 2020;50(5):734-49. doi: 10.1007/s00247-019-04594-z.
2. Liszewski MC, Ciet P, Winant AJ, Lee EY. Lung and large airway imaging: magnetic resonance imaging versus computed tomography. *Pediatr Radiol.* 2022 Sep;52(10):1814-25. doi: 10.1007/s00247-022-05386-8.
3. Geiger J, Zeimpekis KG, Jung A, Moeller A, Kellenberger CJ. Clinical application of ultrashort echo-time MRI for lung pathologies in children. *Clin Radiol.* 2021;76(9):708.e9-708.e17. doi: 10.1016/j.crad.2021.05.015.
4. Drummond D, Marquant F, Zanelli E, Lozach C, Boddart N, Taam RA, et al. Radiation-free and injection-free imaging of the paediatric chest using a magnetic resonance imaging protocol including zero time echo sequence (3D-ZTE). *Eur J Pediatr.* 2024;183(10):4297-308. doi: 10.1007/s00431-024-05678-1.
5. Sodhi KS, Ciet P, Vasanawala S, Biederer J. Practical protocol for lung magnetic resonance imaging and common clinical indications. *Pediatr Radiol.* 2022;52(2):295-311. doi: 10.1007/s00247-021-05090-z.

6. Stahl M, Steinke E, Graeber SY, Joachim C, Seitz C, Kauczor HU. Magnetic Resonance Imaging Detects Progression of Lung Disease and Impact of Newborn Screening in Preschool Children with Cystic Fibrosis. *Am J Respir Crit Care Med*. 2021;204(8):943-53. doi: 10.1164/rccm.202102-0278OC.
7. Wielpütz MO, Stahl M, Triphan SMF, Wucherpfennig L, Leutz-Schmidt P, Gestewitz S, et al. Longitudinal Magnetic Resonance Imaging of Changes in Lung Morphology and Perfusion in Children with Cystic Fibrosis from Infancy through Adolescence. *Ann Am Thorac Soc*. 2025;22(1):93-103. doi: 10.1513/AnnalsATS.202404-396OC.
8. Katz SL, Parraga G, Luu TM, Santyr G, Abdeen N, Deschenes S, et al. Pulmonary Magnetic Resonance Imaging of Ex-Preterm Children with and without Bronchopulmonary Dysplasia. *Ann Am Thorac Soc*. 2022;19(7):1149-57. doi: 10.1513/AnnalsATS.202106-691OC.
9. Hirsch FW, Sorge I, Voit D, Frahm J, Prenzel F, Wachowiak R, et al. Chest examinations in children with real-time magnetic resonance imaging: first clinical experience. *Pediatr Radiol*. 2023;53(1):12-20. doi: 10.1007/s00247-022-05421-8.
10. Walkup LL, Higano NS, Woods JC. Structural and Functional Pulmonary Magnetic Resonance Imaging in Pediatrics-From the Neonate to the Young Adult. *Acad Radiol*. 2019;26(3):424-30. doi: 10.1016/j.acra.2018.08.006.
11. Spielberg DR, Weinman J, DeBoer EM. Advancements in imaging in ChILD. *Pediatr Pulmonol*. 2024;59(9):2276-85. doi: 10.1002/ppul.26487.
12. Mairhörmann B, Castelblanco A, Häfner F, Koliogiannis V, Haist L, Winter D, et al. Automated MRI Lung Segmentation and 3D Morphologic Features for Quantification of Neonatal Lung Disease. *Radiol Artif Intell*. 2023;5(6):e220239. doi: 10.1148/ryai.220239.
13. Azour L, Ohno Y, Biederer J, Hochegger B, Bauman G, Hatabu H, et al. Lung MRI: Indications, Capabilities, and Techniques-AJR Expert Panel Narrative Review. *AJR Am J Roentgenol*. 2025;225(4):e2532637. doi: 10.2214/AJR.25.32637.
14. Ciet P, Bertolo S, Ros M, Casciaro R, Cipolli M, Colagrande S, et al. State-of-the-art review of lung imaging in cystic fibrosis with recommendations for pulmonologists and radiologists from the "iMaging managEment of cystic fibROsis" (MAESTRO) consortium. *Eur Respir Rev*. 2022;31(163):210173. doi: 10.1183/16000617.0173-2021.
15. Dournes G, Walkup LL, Benlala I, Willmering MM, Macey J, Bui S, et al. The Clinical Use of Lung MRI in Cystic Fibrosis: What, Now, How? *Chest*. 2021;159(6):2205-2217. doi: 10.1016/j.chest.2020.12.008.
16. Woods JC, Wild JM, Wielpütz MO, Clancy JP, Hatabu H, Kauczor HU, et al. Current state of the art MRI for the longitudinal assessment of cystic fibrosis. *J Magn Reson Imaging*. 2020;52(5):1306-1320. doi: 10.1002/jmri.27030.