

L'intelligenza artificiale in cardiologia: il nostro HAL 9000?

Marco Bernardi^{1,2}, Luigi Spadafora^{1,2}, Laura Adelaide Dalla Vecchia³, Roberto Franco Enrico Pedretti^{4,5},
Sabrina Cenciarelli⁶, Giuseppe Biondi Zoccai^{1,7}, Francesco Versaci²

¹Dipartimento di Scienze e Biotecnologie Medico-Chirurgiche, Sapienza Università di Roma, Latina

²UOC UTIC-Emodinamica-Cardiologia, Ospedale Santa Maria Goretti, Latina

³IRCCS Istituti Clinici Scientifici Maugeri, Milano

⁴Dipartimento di Medicina e Chirurgia, Università degli Studi di Milano-Bicocca, Milano

⁵U.O. Cardiologia, Ospedale di Erba, Erba (CO)

⁶ASL Latina, Latina

⁷Maria Cecilia Hospital, GVM Care & Research, Cotignola (RA)

Artificial intelligence (AI) is rapidly transforming the world, and medicine is at the forefront of this revolution. In cardiology, AI is increasingly providing innovative tools for diagnosis, risk stratification, interventional planning, and personalized care. From automated interpretation of ECGs and cardiovascular imaging to integration into interventional workflows and predictive models, AI is emerging as a powerful ally for both clinicians and researchers. However, its implementation also raises critical ethical, legal, and regulatory challenges that require transparency, independent validation, and multidisciplinary governance. This review explores the potential and limitations of AI in cardiovascular medicine, with a focus on emerging technologies, their clinical implications, and the growing role of generative tools such as ChatGPT in scientific research. Much like HAL 9000, AI can enhance human capabilities – but only under vigilant oversight to prevent uncontrolled drifts. The future of cardiology will undoubtedly be more digital, but must remain fundamentally human.

Key words. Artificial intelligence; Digital ethics; Machine learning.

G Ital Cardiol 2026;27(3):159-167

"I'm sorry, Dave, I'm afraid I can't do that..."
Stanley Kubrick. 2001: A Space Odyssey, 1968.

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, l'intelligenza artificiale (IA) ha iniziato a trasformare profondamente il panorama della medicina moderna, con impatti significativi in tutte le specialità cliniche. In particolare, la cardiologia rappresenta uno degli ambiti più promettenti e dinamici per l'applicazione di tecnologie basate sull'IA, con il potenziale di rivoluzionare le modalità di diagnosi, gestione terapeutica, prognosi e personalizzazione della cura dei pazienti affetti da patologie cardiovascolari¹⁻³ (Tabella 1). La crescente disponibilità di grandi quantità

di dati clinici, genetici e di imaging, unita alla capacità degli algoritmi avanzati di machine learning e deep learning di identificare pattern e relazioni complesse, offre strumenti potenti e inediti al clinico e al ricercatore del presente e del futuro. Tuttavia, questa rivoluzione tecnologica porta con sé interrogativi profondi, non solo di natura clinica e tecnologica, ma anche etica e filosofica. Come HAL 9000, la celebre IA del film di Stanley Kubrick "2001 Odissea nello Spazio" anche l'IA medica oggi potrebbe giungere a decisioni critiche, aumentando potenzialmente la precisione e la standardizzazione delle cure, sollevando però questioni riguardo al livello di controllo umano necessario e al rischio di affidarsi ciecamente a una tecnologia che, per sua natura, può risultare nebulosa nella sua logica interna. Oltre alle enormi potenzialità, bisogna conoscere e riflettere anche sui rischi associati a sistemi dotati di crescente autonomia decisionale⁴. Dai primi passi compiuti nell'interpretazione automatizzata dell'ECG, fino agli algoritmi sofisticati per la valutazione delle immagini di ecocardiografia, tomografia computerizzata (TC) e risonanza magnetica cardiaca (RMC), l'IA ha mostrato la capacità di migliorare sensibilmente l'accuratezza diagnostica e predittiva in molteplici contesti clinici⁵⁻⁷. Affinché l'integrazione dell'IA nella pratica cardiologica sia efficace e sostenibile, è cruciale garantire elevati standard qualitativi nella raccolta e gestione dei dati, assicurare la trasparenza e interpretabilità degli algoritmi e sottoporre le soluzioni sviluppate a rigorosi processi di validazione clinica indipendente.

© 2026 Il Pensiero Scientifico Editore

Ricevuto 12.06.2025; nuova stesura 18.12.2025; accettato 19.12.2025.

G.B.Z. ha svolto attività di consulenza/docenza e/o ha ricoperto il ruolo di membro di advisory board e/o consulente tecnico di parte per Abiomed, Advanced Nanotherapies, Amarin, AstraZeneca, Balmed, Cardionovum, Cepton, Cranmedical, Endocore Lab, Eukon, Guidotti, Innova HTS, Innovheart, Menarini, Microport, Opsens Medical, Otsuka Medical Devices Europe, Recor, Servier, Synthesa, Terumo e Traslumina. Gli altri autori dichiarano nessun conflitto di interessi.

Per la corrispondenza:

Dr. Marco Bernardi UOC UTIC-Emodinamica-Cardiologia,
Ospedale Santa Maria Goretti, Via Lucia Scaravelli, 04100 Latina
e-mail: marco.bernardi23@gmail.com

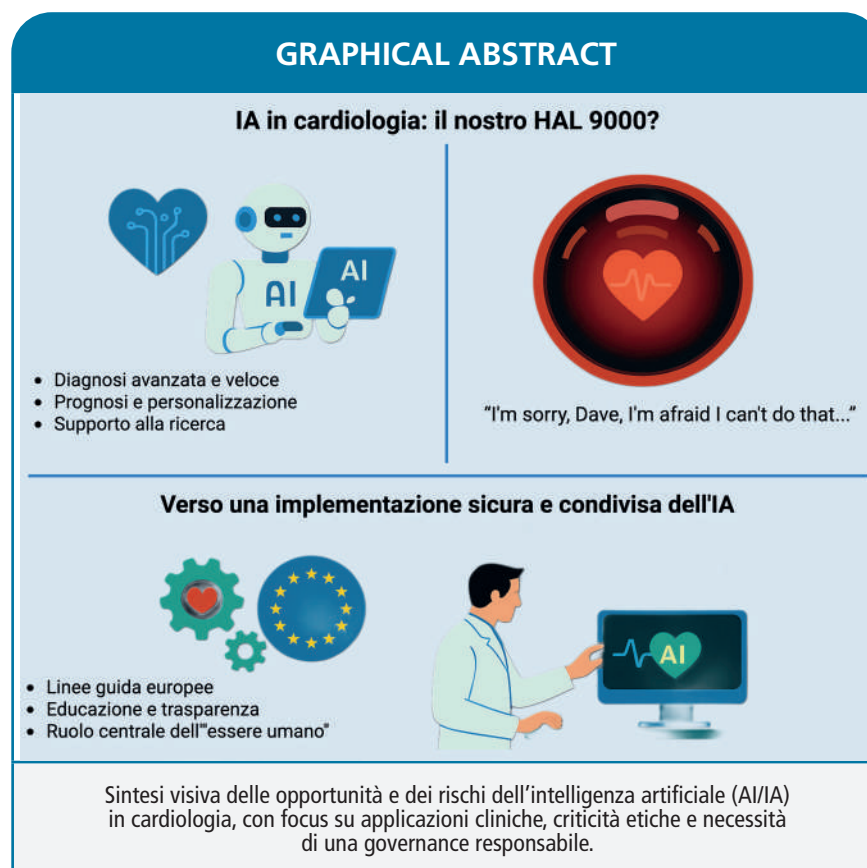


Tabella 1. Principali applicazioni cliniche dell'intelligenza artificiale in cardiologia.

Ambito	Obiettivo principale	Tecnologie IA impiegate	Benefici documentati	Esempi
Elettrocardiografia	Diagnosi precoce, stratificazione del rischio	Reti neurali profonde (CNN), NLP	Identificazione di disfunzione ventricolare, FA occulta, stenosi aortica	AI-ECG (Mayo Clinic)
Ecocardiografia	Quantificazione automatica di funzione e morfologia cardiaca	Imaging AI, ML supervisionato	Riduzione variabilità, tempo di refertazione, accuratezza simile a esperti	EchoNet-Dynamic, Philips AutoEF
TC coronarica	Identificazione placche vulnerabili, valutazione FFR non invasiva	Deep learning, radiomica	Valutazione infiammazione, rischio residuo, FFR-TC	CRISP-CT, FAI score
RM cardiaca	Segmentazione automatica, identificazione fibrosi/edema	CNN 3D, AI-based segmentation	Analisi rapida e riproducibile, diagnosi più standardizzata	ScarNet, CMR-AI
Cardiologia interventistica	Ottimizzazione procedurale e robot-assistenza	AI real-time, robotica (CorPath)	Riduzione tempi, miglior scelta dispositivo, riduzione dose radiante	OCT-AI, CorPath GRX
Stratificazione prognostica	Previsione eventi cardiovascolari, ospedalizzazione, mortalità	ML supervisionato (XGBoost, random forest)	Superamento degli score tradizionali, personalizzazione terapie	GRACE 3.0, PRAISE
Valvulopatie	Previsione complicanze post-procedurali	ML su big data clinici e imaging	Identificazione candidati a rischio, ottimizzazione risorse	TAVI Risk Machine
Scompenso cardiaco	Predizione ospedalizzazione e mortalità	IA su ECG + clinica + imaging	Riconoscimento fenotipi ad alto rischio precoce	HFpEF-AI, PredictHF
Scrittura e ricerca scientifica	Supporto alla redazione, analisi dati, ipotesi	IA generativa, NLP	Aumento produttività, semplificazione testi, sviluppo protocollo/metodologie	ChatGPT, Gemini

AI/IA, intelligenza artificiale; CNN, reti neurali convoluzionali; FA, fibrillazione atriale; FAI, fat attenuation index; FFR, riserva frazionale di flusso; HFpEF, scompenso cardiaco con frazione di eiezione preservata; ML, machine learning; NLP, natural language processing; OCT, tomografia a coerenza ottica; RM, risonanza magnetica; TAVI, impianto transcateretere di valvola aortica; TC, tomografia computerizzata.

INTELLIGENZA ARTIFICIALE E SUE APPLICAZIONI NELLA CARDIOLOGIA MODERNA

Le applicazioni dell'IA in cardiologia si basano principalmente su modelli di apprendimento supervisionato e non supervisionato. I modelli supervisionati vengono addestrati attraverso dataset "etichettati" che utilizzano esempi clinici per i quali l'esito o la diagnosi sono già noti, con l'obiettivo di riconoscere o prevedere eventi specifici, come la presenza di aritmie, la disfunzione ventricolare o il rischio di eventi cardiovascolari. Al contrario, nei modelli non supervisionati, l'algoritmo analizza grandi quantità di dati senza un obiettivo clinico predefinito, allo scopo di individuare pattern ricorrenti o sottogruppi di pazienti con caratteristiche simili. Questo approccio è particolarmente utile per il phenomapping delle malattie cardiovascolari e per l'identificazione di profili di rischio non immediatamente evidenti con le classificazioni tradizionali (Tabella 2).

Elettrocardiogramma

L'ECG rappresenta una delle prime aree della cardiologia ad aver beneficiato in modo significativo dell'integrazione con tecnologie di IA (Tabella 3). Gli algoritmi basati su deep learning, in particolare le reti neurali convoluzionali, sono stati applicati con successo per analizzare i tracciati ECG, spesso con performance diagnostiche superiori rispetto all'interpretazione umana tradizionale⁸⁻¹⁰. Tra le applicazioni più rilevanti si annoverano quelle per il rilevamento della disfunzione ven-

Tabella 2. Concetti fondamentali di intelligenza artificiale (IA).

Termine	Definizione
Machine learning (ML)	Sottocampo dell'IA focalizzato sull'apprendimento dai dati. Gli algoritmi di ML identificano pattern e correlazioni in dataset complessi e migliorano progressivamente le proprie prestazioni con l'aumentare della quantità e varietà dei dati disponibili.
Apprendimento supervisionato	Approccio di ML in cui l'algoritmo viene addestrato utilizzando dati clinici associati a un esito noto. Consente di gestire relazioni multidimensionali e non lineari, trovando ampia applicazione nella predizione del rischio, nella diagnosi automatizzata e nella valutazione prognostica.
Apprendimento non supervisionato	Approccio di ML finalizzato a identificare la struttura sottostante di un dataset privo di esiti predefiniti. È utilizzato per individuare cluster o fenotipi clinici con caratteristiche e prognosi differenti, risultando particolarmente utile nella sub-fenotipizzazione delle malattie cardiovascolari e nella medicina di precisione.
Deep learning (DL)	Classe avanzata di algoritmi di ML basata su reti neurali multilivello, capace di apprendere rappresentazioni gerarchiche complesse a partire da dati grezzi, come segnali ECG o immagini cardiovascolari. È alla base di molte applicazioni di IA in ECG, ecocardiografia e imaging cardiaco avanzato.
Explainable artificial intelligence (XAI)	Insieme di approcci volti a migliorare la trasparenza e l'interpretabilità dei modelli di IA, consentendo di comprendere come e perché un algoritmo giunga a una determinata decisione. La XAI è considerata un elemento chiave per la validazione clinica, l'accettazione da parte del medico e l'implementazione responsabile dell'IA in cardiologia.

Tabella 3. Timeline dello sviluppo dell'intelligenza artificiale in medicina e cardiologia.

Anno	Evento chiave
1956	Nasce il termine "artificial intelligence" alla conferenza di Dartmouth (McCarthy et al.)
1970s	Sviluppo dei primi expert system clinici (es. MYCIN per le infezioni batteriche)
1980s	Prime applicazioni di AI rule-based in elettrocardiografia
1990s	Inizio dell'uso di database elettronici e apprendimento automatico su dati clinici
2007	Diffusione su larga scala dell'ECG digitale e perfezionamento degli algoritmi di pattern recognition per la diagnosi automatica delle aritmie
2016	DeepMind Health (Google) collabora con NHS UK per progetti di IA diagnostica
2018	Lancio dei primi algoritmi di IA approvati dalla FDA per l'imaging cardiaco (es. FEVS automatica)
2019	Mayo Clinic sviluppa AI-ECG per la predizione di disfunzione ventricolare asintomatica
2020	Applicazione dell'IA per il calcolo del FFR-TC, FAI e valutazione del rischio coronarico
2021	Introduzione del modello GRACE 3.0 basato su machine learning
2023	Adozione crescente di ChatGPT e IA generativa nella scrittura scientifica
2024	L'ESC istituisce il Comitato "Digital Cardiology and AI" e pubblica la roadmap
2025	Prime linee guida europee in sviluppo sull'uso etico e clinico dell'IA in cardiologia

AI/IA, intelligenza artificiale; ESC, Società Europea di Cardiologia; FAI, fat attenuation index; FDA, Food and Drug Administration; FEVS, frazione di eiezione ventricolare sinistra; FFR-TC, riserva frazionale di flusso alla tomografia computerizzata; GRACE, Global Registry of Acute Coronary Events; NHS UK, National Health Service United Kingdom.

tricolare sinistra, con capacità predittiva per una frazione di eiezione $\leq 35\%$ a partire da un semplice ECG a 12 derivazioni, anche in assenza di sintomi evidenti. Studi della Mayo Clinic hanno mostrato come l'algoritmo IA-ECG abbia raggiunto un'area sotto la curva di 0.93 nella popolazione di validazione, con implicazioni cliniche rilevanti anche per la previsione di future disfunzioni ventricolari in pazienti inizialmente normali¹¹. Un altro ambito di grande interesse riguarda l'identificazione precoce di stenosi aortica moderata-severa e di episodi di fibrillazione atriale, anche in soggetti in ritmo sinusale al momento della registrazione. In quest'ultimo contesto, gli algoritmi IA dimostrano non solo elevate sensibilità e specificità, ma anche la capacità di fornire una stratificazione del rischio predittiva di eventi futuri, come ictus o scompenso^{9,12}. L'interpretazione "invisibile" dell'ECG, cioè la capacità degli algoritmi di rilevare informazioni cliniche non direttamente osservabili dall'occhio umano, rappresenta una delle frontiere più affascinanti di questa evoluzione tecnologica. In tal senso, l'ECG digitale, potenziato dall'IA, si configura non più solo come un semplice tracciato, ma come uno strumento predittivo dinamico, in grado di fornire indicazioni prognostiche e diagnostiche personalizzate. Tuttavia, le performance dei modelli IA-ECG possono variare significativamente in funzione delle caratteristiche della popolazione studiata. Algoritmi addestrati su coorti selezionate possono mostrare una ridotta

accuratezza in pazienti appartenenti a diverse etnie o con comorbidità multiple, aumentando il rischio di risultati falsi positivi o falsi negativi. Ciò sottolinea la necessità di validazioni esterne su popolazioni eterogenee prima di un'adozione diffusa nella pratica clinica¹³.

Imaging cardiaco avanzato

L'imaging cardiovascolare è uno dei settori in cui l'IA sta esprimendo con maggior evidenza il proprio potenziale. Tecniche come l'ecocardiografia, la TC cardiaca e la RMC sono oggi affiancate da strumenti di IA in grado di automatizzare analisi complesse, ridurre la variabilità interoperatore e aumentare la sensibilità diagnostica.

Nell'ambito dell'ecocardiografia, l'IA è già integrata in molte piattaforme commerciali, consentendo la misurazione automatica della frazione di eiezione e di altri parametri strutturali con accuratezza paragonabile a quella di un operatore esperto. Studi recenti hanno dimostrato una correlazione molto elevata tra i valori ottenuti con IA e quelli eseguiti da cardiologi per la stima della frazione di eiezione ventricolare sinistra¹⁴⁻¹⁶.

Nella TC cardiaca, l'introduzione di metriche come il fat attenuation index (FAI) ha aperto nuovi orizzonti nella valutazione dell'infiammazione coronarica. Il FAI, calcolato automaticamente da algoritmi di deep learning, è in grado di identificare i segni di infiammazione nelle arterie coronarie a partire dalle caratteristiche del tessuto adiposo perivascolare, offrendo una valutazione prognostica aggiuntiva anche nei pazienti con malattia coronarica apparentemente non significativa¹⁷⁻¹⁹.

La RMC, infine, beneficia dell'integrazione con IA per la segmentazione automatica dei volumi cardiaci, l'analisi della funzione ventricolare e l'identificazione di pattern di fibrosi o edema miocardico. Algoritmi sviluppati su migliaia di immagini permettono oggi analisi rapide, riproducibili e standardizzate, migliorando l'efficienza e la qualità delle diagnosi nei centri clinici^{20,21}.

Queste innovazioni stanno trasformando l'imaging cardiovascolare da strumento descrittivo e operatore-dipendente a piattaforma predittiva, capace di fornire informazioni sempre più personalizzate e contestualizzate sul rischio cardiovascolare e sulla fisiopatologia individuale del paziente. Tuttavia, se da un lato l'automazione può ridurre la variabilità interoperatore, dall'altro richiede un aggiornamento delle competenze professionali, affinché gli operatori mantengano la capacità critica di validare i risultati forniti dagli algoritmi ed evitare una dipendenza acritica dagli output automatici.

Intelligenza artificiale nella cardiologia interventistica e predittiva

L'IA sta trovando un terreno particolarmente fertile anche nella cardiologia interventistica, dove contribuisce a ottimizzare l'intero processo decisionale: dalla pianificazione procedurale fino al follow-up.

Uno degli ambiti più avanzati riguarda l'utilizzo dell'IA nella valutazione delle immagini coronariche, attraverso tecniche come la TC coronarica integrata con algoritmi predittivi. Questi strumenti permettono di stimare parametri funzionali come la riserva frazionale di flusso e di identificare in modo non invasivo placche vulnerabili o infiammate, potenzialmente a rischio di eventi cardiovascolari acuti²²⁻²⁴. Inoltre, metriche derivate dall'analisi automatica del grasso perivascolare, come il FAI, si sono rivelate predittori indipendenti di eventi

futuri, cambiando l'approccio alla stratificazione del rischio e alla prevenzione primaria e secondaria¹⁷.

Durante le procedure di cateterismo, l'IA può integrare in tempo reale dati provenienti da angiografia, tomografia a coerenza ottica o ecografia intravascolare, supportando il cardiologo interventista nella scelta della strategia ottimale (tipo e lunghezza dello stent, necessità di imaging intravascolare aggiuntivo, ecc.)²⁵. Inoltre, l'IA è impiegata nei sistemi di robotica interventistica (es. CorPath GRX) per migliorare la precisione dei movimenti e ridurre l'esposizione radiologica degli operatori²⁶. Sul piano predittivo, algoritmi di machine learning sono stati sviluppati per stimare il rischio di complicanze intra- e post-procedurali in pazienti sottoposti a interventi percutanei. Questi modelli, allenati su grandi registri clinici, sono in grado di superare le performance dei tradizionali score clinici grazie alla loro capacità di cogliere relazioni non lineari e interazioni complesse tra le variabili²⁷⁻²⁹. Infine, IA e big data permettono di creare modelli predittivi altamente personalizzati anche per i pazienti sottoposti ad impianto transcateretere di valvola aortica, stimando mortalità, rischio di ictus e necessità di pacemaker post-procedura^{30,31}. Ciò consente un'allocazione più razionale delle risorse e una medicina interventistica sempre più modellata sul paziente. La cardiologia interventistica, da branca operativa, sta così evolvendo verso una disciplina predittiva, integrata e assistita, in cui l'IA non è solo uno strumento di supporto, ma un vero e proprio alleato nella definizione delle scelte cliniche. È tuttavia importante sottolineare che, nonostante i risultati promettenti, le evidenze derivanti da trial randomizzati restano ancora limitate. Pertanto, l'implementazione routinaria di questi sistemi richiede ulteriori studi dedicati.

STRATIFICAZIONE DEL RISCHIO E PREDIZIONE DEGLI OUTCOME

Una delle applicazioni più promettenti dell'IA in ambito cardiovascolare riguarda la stratificazione del rischio e la predizione degli outcome clinici, sia in fase acuta che cronica. Grazie all'analisi di grandi dataset provenienti da registri clinici, studi osservazionali e trial randomizzati, gli algoritmi di machine learning sono in grado di identificare pattern complessi e correlazioni non lineari che sfuggono alle metodologie statistiche tradizionali.

Un esempio emblematico è rappresentato dal punteggio GRACE 3.0, evoluzione del noto score prognostico per pazienti con sindrome coronarica acuta. Questo nuovo modello, sviluppato mediante machine learning e validato su ampie coorti di pazienti, ha dimostrato una capacità discriminativa superiore rispetto alla versione classica, specialmente nelle donne e in sottogruppi tradizionalmente sottorappresentati. L'adozione di GRACE 3.0 nella pratica clinica permette una migliore stratificazione dei pazienti, con impatto diretto sulla scelta del timing e dell'intensità del trattamento invasivo³².

Anche il modello PRAISE, nato da un ampio sforzo collaborativo internazionale, utilizza tecniche di apprendimento automatico per prevedere eventi avversi dopo una sindrome coronarica acuta, integrando informazioni cliniche, laboratoristiche, angiografiche e farmacologiche^{33,34}. L'approccio multidimensionale e "data-driven" di questi algoritmi consente una medicina realmente personalizzata, in grado di adattare le strategie terapeutiche alle caratteristiche individuali del paziente.

Oltre alle sindromi coronariche, l'IA viene oggi impiegata anche per la predizione di eventi in pazienti con scompenso cardiaco, valvulopatie, aritmie e cardiomiopatie. L'integrazione di variabili cliniche, biomarcatori, segnali ECG e dati di imaging in modelli predittivi consente di identificare precocemente i soggetti a maggior rischio di ospedalizzazione o morte, orientando così interventi mirati di prevenzione secondaria^{11,12,35,36}.

Questi strumenti, tuttavia, devono ancora superare sfide importanti: dalla necessità di validazione esterna su popolazioni eterogenee, alla "spiegabilità" dei modelli (*explainable artificial intelligence*, XAI), fino all'integrazione nei flussi di lavoro clinico quotidiano³⁷. Solo così sarà possibile garantire un'adozione diffusa e responsabile dell'IA nella stratificazione prognostica e nella presa di decisioni cliniche. Un'ulteriore criticità riguarda l'integrazione dei modelli predittivi basati su IA nei software clinici ospedalieri esistenti. In assenza di un'interoperabilità fluida con le cartelle cliniche elettroniche e di interfacce intuitive, anche algoritmi accurati rischiano di non essere utilizzati nella pratica quotidiana.

L'IMPORTANZA DEI DATI: QUALITÀ, INTEGRAZIONE E GOVERNANCE

Il cuore pulsante dell'IA è il dato. La qualità, la coerenza e l'interoperabilità delle informazioni cliniche rappresentano condizioni imprescindibili per lo sviluppo di modelli predittivi robusti e affidabili. Tuttavia, l'eterogeneità delle fonti e dei formati, unita all'assenza di standard comuni per la definizione dei fenotipi clinici e degli outcome, costituisce ancora oggi un ostacolo rilevante all'adozione diffusa di sistemi di IA nella pratica cardiologica.

Un primo elemento critico riguarda la necessità di standardizzare le definizioni cliniche: senza un linguaggio universalmente interpretabile e condiviso, diventa difficile allenare algoritmi su dataset ampi e rappresentativi, nonché confrontare i risultati tra studi e coorti diverse. In risposta a questa esi-

genza, la Società Europea di Cardiologia (ESC) ha promosso iniziative come la creazione di librerie fenotipiche e strutture dati condivise, fondamentali per la costruzione di modelli generalizzabili³⁸.

Un secondo aspetto chiave è rappresentato dalla governance dei dati. L'uso di big data in sanità solleva questioni complesse in merito alla privacy, alla sicurezza informatica e alla proprietà dei dati. È indispensabile adottare modelli di gestione trasparenti e regolamentati, che tutelino i pazienti e favoriscano allo stesso tempo la ricerca scientifica. In questo senso, il framework CODE-EHR e le raccomandazioni dell'ESC sul trattamento dei dati elettronici sanitari rappresentano strumenti di riferimento preziosi³⁹.

Infine, il tema dell'interoperabilità è centrale per abilitare l'IA in contesti reali. Sistemi informatici ospedalieri e territoriali devono poter comunicare tra loro, condividendo dati strutturati in tempo reale, per consentire all'IA di operare su informazioni complete, aggiornate e affidabili. L'adozione di formati standard (es. HL7 FHIR) e l'integrazione dei dati clinici con quelli amministrativi, laboratoristici e strumentali sono passaggi obbligati verso una sanità realmente intelligente^{39,40}.

In sintesi, senza dati di qualità, integrati e condivisi, anche il miglior algoritmo rimane sterile. L'investimento in infrastrutture digitali e nella cultura del dato è pertanto un prerequisito essenziale per realizzare il potenziale trasformativo dell'IA in cardiologia.

ETICA, REGOLAMENTAZIONE E IMPLEMENTAZIONE RESPONSABILE DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

L'adozione dell'IA in ambito cardiologico comporta una serie di sfide etiche e regolatorie che non possono essere trascurate. Il potenziale dell'IA deve necessariamente essere bilanciato da meccanismi di tutela per pazienti, operatori sanitari e istituzioni. Al centro di questo dibattito si collocano la trasparenza degli algoritmi, la responsabilità medico-legale e la protezione dei dati personali (Tabella 4).

Tabella 4. Sfide applicative dell'intelligenza artificiale in cardiologia.

Area di criticità	Descrizione del problema	Strategie o soluzioni proposte
Etica e responsabilità	Rischio di perdita di controllo umano, scelte algoritmiche non spiegabili, difficoltà nell'attribuzione della responsabilità medico-legale.	Sviluppo di IA spiegabile (XAI), regolamentazione chiara, coinvolgimento multidisciplinare nei processi decisionali.
Privacy e confidenzialità dei dati	Utilizzo di dati sensibili con rischio di violazione della privacy e uso non autorizzato.	Crittografia, anonimizzazione, adozione di framework etici (es. CODE-EHR) e rispetto delle normative GDPR.
Qualità e standardizzazione dei dati	Dati eterogenei, incompleti o non strutturati compromettono la validità dei modelli predittivi.	Creazione di librerie fenotipiche condivise, uso di formati interoperabili (es. HL7 FHIR), data governance robusta.
Bias algoritmico	Rischio di discriminazione verso specifici gruppi (es. donne, minoranze etniche) se i dati di training sono non rappresentativi.	Validazione esterna su popolazioni diverse, audit algoritmici, correzione e bilanciamento dei dataset.
Integrazione nei flussi clinici	Difficoltà a inserire l'IA nella routine clinica senza aumentare il carico di lavoro o generare confusione.	Progettazione user-friendly, interoperabilità con EHR, formazione mirata degli operatori.
Accettazione da parte degli operatori	Diffidenza o resistenza all'adozione per timore di sostituzione o incomprensione del funzionamento dell'IA.	Educazione continua, trasparenza delle raccomandazioni algoritmiche, coinvolgimento attivo del personale sanitario.

CODE-EHR, Collaboration On the Definition of EHR-based Research (framework etico per l'uso dei dati sanitari elettronici); EHR, electronic health record (cartella clinica elettronica); GDPR, General Data Protection Regulation (Regolamento Generale sulla Protezione dei Dati); HL7 FHIR, Health Level Seven Fast Healthcare Interoperability Resources (Standard per l'interoperabilità dei dati sanitari); IA, intelligenza artificiale.

Uno dei principali problemi è rappresentato dall'opacità degli algoritmi ("black box"), che rende difficile per i clinici comprendere le logiche decisionali delle IA più complesse. Da qui nasce l'esigenza di sviluppare modelli di XAI, in grado di rendere interpretabili e verificabili i processi di calcolo alla base delle raccomandazioni cliniche. Ciò è essenziale non solo per garantire la fiducia degli operatori sanitari, ma anche per permettere una reale condivisione della decisione con il paziente^{39,41}.

Diverse tecniche di XAI sono già applicabili in contesti clinici concreti. Esistono infatti metodi come Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME) e Shapley Additive Explanations (SHAP), che consentono di quantificare il contributo delle singole variabili cliniche o strumentali alla predizione di un outcome, facilitando l'interpretazione di modelli di rischio basati su machine learning. Nell'analisi di segnali e immagini cardiovascolari, come ECG ed ecocardiografia, strumenti come le "attention maps" e le tecniche di "saliency" permettono di visualizzare le porzioni del segnale o dell'immagine maggiormente responsabili della decisione algoritmica, aumentando la trasparenza diagnostica e la fiducia del clinico⁴².

Un ulteriore pilastro dell'integrazione affidabile dell'IA nella pratica quotidiana è rappresentato dalla validazione indipendente e dalla certificazione da parte di enti terzi. Come avviene per farmaci e dispositivi medici, anche gli algoritmi clinici dovrebbero essere sottoposti a studi di validazione esterna, idealmente in forma di trial clinici pragmatici e multicentrici, inseriti nei normali flussi assistenziali. Solo in questo modo si potranno verificare efficacia, sicurezza, impatto organizzativo e sostenibilità economica^{43,44}.

Un aspetto emergente riguarda lo sviluppo di algoritmi di IA con potenziale interesse commerciale e possibilità di brevetto industriale, come nel caso di sistemi di fenotipizzazione avanzata dei pazienti sottoposti a procedure interventistiche o di analisi non invasiva di dati procedurali. Studi recenti hanno dimostrato come approcci di machine learning non supervisionato possano identificare fenotipi clinici prognosticamente rilevanti in contesti interventistici complessi, aprendo la strada a strumenti decisionali potenzialmente trasferibili in ambito industriale⁴⁵. Questo scenario solleva interrogativi etici e commerciali sul valore generato a partire da dati clinici raccolti nella pratica assistenziale e sul grado di consapevolezza dei pazienti rispetto a tali utilizzi. In questo contesto è sempre più rilevante discutere l'opportunità di modelli di consenso informato specifici e standardizzati per la raccolta e l'utilizzo dei dati a fini di sviluppo e validazione di modelli di IA, in un'ottica di trasparenza, equità e fiducia nel rapporto medico-paziente.

Dal punto di vista regolatorio, l'ESC, attraverso il Comitato per la Digital Cardiology and Artificial Intelligence (DCAI), ha delineato una roadmap per un'implementazione affidabile e verificabile delle soluzioni IA in cardiologia. Tra le priorità figurano: la definizione di standard di qualità, la conduzione di studi clinici randomizzati sull'efficacia degli algoritmi e l'adozione di strumenti di valutazione indipendenti prima dell'integrazione nei percorsi assistenziali.

Fondamentale, inoltre, è la creazione di centri di eccellenza dedicati alla valutazione e validazione incrociata degli algoritmi, in grado di condividere buone pratiche e armonizzare i criteri di inclusione nei trial, i parametri di outcome e le modalità di monitoraggio continuo dei modelli implementati. Questa rete, promossa dall'ESC, ha l'obiettivo di rendere l'adozione dell'IA un processo trasparente, sicuro e guidato da evidenze robuste^{46,47}.

Dal punto di vista giuridico e medico-legale, resta aperto il tema della responsabilità in caso di errori o malfunzionamenti: a chi spetta la colpa? Al medico che ha seguito una raccomandazione automatizzata? All'ente che ha autorizzato il software? Al produttore dell'algoritmo? In questo contesto, il Regolamento (UE) 2024/1689 (noto come Artificial Intelligence [AI] Act) si inserisce come il primo quadro giuridico completo dell'Unione Europea sull'IA. L'AI Act introduce un approccio basato sul rischio che determina requisiti specifici per i sistemi di IA utilizzati in ambito sanitario. I sistemi classificati come "ad alto rischio" (inclusi software diagnostici, sistemi di supporto decisionale clinico e dispositivi medici integranti IA) devono soddisfare obblighi rigorosi in termini di gestione del rischio, qualità dei dati, trasparenza delle decisioni e supervisione umana; tali obblighi si aggiungono e si integrano agli oneri regolatori già esistenti per i dispositivi medici. Inoltre, l'AI Act richiede documentazione tecnica aggiornata, informazioni chiare per gli utilizzatori e sistemi di monitoraggio continuo per garantire sicurezza e affidabilità. Questo quadro normativo uniforme ha implicazioni dirette non solo sulla responsabilità dei fornitori e dei professionisti sanitari, ma anche sulle modalità di progettazione, validazione e sorveglianza post-commercializzazione dei sistemi di IA in cardiologia e più in generale in medicina⁴⁸.

Un'implementazione etica dell'IA richiede educazione e formazione continua dei professionisti sanitari. Solo un personale medico e tecnico adeguatamente preparato può comprendere le potenzialità e i limiti degli strumenti basati sull'IA, garantendone un uso appropriato e consapevole.

Affinché l'IA possa realmente migliorare la cardiologia senza comprometterne i principi fondamentali, è necessaria una governance multidisciplinare, che coinvolga clinici, data scientist, giuristi, pazienti e istituzioni in un dialogo costante e trasparente.

ChatGPT E L'USO DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE NELLA SCRITTURA E NELLA RICERCA SCIENTIFICA

Tra gli strumenti di IA generativa, ChatGPT ha guadagnato una rapida popolarità nel contesto della ricerca biomedica. In ambito cardiovascolare, il suo utilizzo è stato documentato in numerose fasi del processo scientifico: dalla generazione di ipotesi e revisione della letteratura, fino alla redazione e formattazione di manoscritti, presentazioni e grant.

ChatGPT può contribuire in modo significativo all'efficienza e alla produttività dei ricercatori, soprattutto nelle prime fasi di ideazione e nella scrittura di draft preliminari. Le sue capacità di elaborazione del linguaggio naturale lo rendono particolarmente utile nella semplificazione di testi complessi, nella riformulazione di frasi e nella traduzione scientifica multilingue.

Tuttavia, come per altri ambiti dell'IA, anche qui si pongono problemi di accuratezza, affidabilità e integrità scientifica. ChatGPT può generare contenuti plausibili ma imprecisi o inventare riferimenti bibliografici ("hallucinations"), fenomeno ben documentato in letteratura. Per questo motivo, è essenziale che l'output prodotto venga sempre sottoposto a verifica critica da parte degli autori umani. Inoltre, l'uso dell'IA nella scrittura scientifica solleva questioni di paternità, trasparenza e responsabilità. Le riviste stanno progressivamente aggiornando le loro linee guida per regolamentare l'impiego di strumenti

come ChatGPT, imponendo in molti casi la dichiarazione esplicita del loro utilizzo e vietandone l'attribuzione come autore. Al di là della mera scrittura, ChatGPT può essere impiegato anche per l'assistenza nella creazione di codici per analisi statistiche, per la preparazione di abstract per conferenze o per la costruzione di piani di studio e flowchart sperimentali. La sua integrazione nei flussi di lavoro accademici sta già modificando il ruolo del ricercatore, che da autore diventa sempre più un supervisore e curatore dell'output generato dall'IA⁴⁹⁻⁵¹.

EDUCAZIONE, FORMAZIONE E SENSIBILIZZAZIONE DEGLI OPERATORI SANITARI

L'integrazione dell'IA nella pratica cardiologica non può prescindere da un cambiamento culturale profondo. L'adozione consapevole e critica degli strumenti basati su IA richiede che medici, infermieri, tecnici e amministratori sanitari siano adeguatamente formati e aggiornati.

L'ESC ha sottolineato, nel contesto della roadmap per l'implementazione dell'IA, l'importanza di attivare programmi educativi specifici, rivolti a tutte le figure coinvolte. Questi includono workshop tematici, moduli didattici integrati nei curricula universitari, corsi ECM e percorsi di aggiornamento continuo. Un elemento chiave è la comprensione dei fondamenti teorici e pratici dell'IA, affinché il personale sanitario non si limiti a "subire" le decisioni algoritmiche, ma possa valutarle criticamente, comprenderne i limiti, verificarne le fonti e contribuire attivamente al loro miglioramento. La formazione deve quindi abbracciare sia aspetti tecnici (modelli, metriche, interpretabilità), sia aspetti clinici, etici e comunicativi. L'IA deve essere percepita non come una minaccia, ma come uno strumento complementare, che amplifica le capacità umane senza sostituirle. In quest'ottica, la comunicazione e la trasparenza diventano elementi centrali del processo formativo. Infine, è opportuno che le istituzioni sanitarie favoriscano contesti di sperimentazione controllata, dove l'uso dell'IA possa essere testato in ambienti protetti e accompagnato da tutoraggio esperto. Tali ambienti rappresentano un passaggio cruciale per superare la diffidenza iniziale e garantire un'adozione progressiva e sostenibile delle tecnologie emergenti. Educare all'IA significa non solo trasmettere conoscenze, ma anche formare una nuova mentalità professionale, capace di integrare innovazione e umanità, rigore scientifico e apertura al cambiamento⁵².

LINEE GUIDA E REGOLAMENTAZIONE EUROPEA PER L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE IN CARDIOLOGIA

L'evoluzione dell'IA in ambito cardiovascolare ha reso evidente la necessità di una regolamentazione solida, condivisa e dinamica (Tabella 4). In risposta a questa esigenza, l'ESC ha istituito il Comitato DCAI con l'obiettivo di guidare un'implementazione clinica responsabile e fondata su evidenze⁴⁶.

Tra i pilastri della roadmap tracciata dall'ESC figura la definizione di linee guida dedicate all'IA in cardiologia, capaci di integrare standard tecnici, requisiti di qualità, criteri di validazione e considerazioni etiche. Tali linee guida mirano a promuovere l'adozione dell'IA non solo come tecnologia di supporto, ma come parte integrante e regolamentata dei percorsi assistenziali. Uno dei principali obiettivi è garantire che

gli algoritmi utilizzati nei contesti clinici rispondano a criteri rigorosi di sicurezza, trasparenza ed efficacia.

Il documento strategico dell'ESC propone inoltre lo sviluppo di un framework europeo per la valutazione clinica dell'IA, che includa studi prospettici, registri di sorveglianza post-marketing e criteri di aggiornamento periodico degli algoritmi. Particolare attenzione è riservata al tema dell'IA basata sull'evidenza, con la proposta di definire livelli di evidenza e forza delle raccomandazioni analoghi a quelli delle linee guida cliniche convenzionali.

Infine, il successo dell'integrazione dell'IA passa anche attraverso l'attuazione di iniziative di armonizzazione normativa tra i paesi membri dell'Unione Europea, al fine di evitare disuguaglianze di accesso, standard disomogenei e difficoltà nella condivisione di "best practices".

In questo contesto, la cardiologia può svolgere un ruolo pionieristico, guidando l'intero panorama medico verso un utilizzo dell'IA che sia al contempo innovativo, sicuro, etico e sostenibile.

LIMITI TECNICI E SFIDE IMPLEMENTATIVE DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE IN CARDIOLOGIA

Nonostante le promettenti applicazioni cliniche, l'adozione dell'IA in cardiologia è accompagnata da importanti limiti tecnici e sfide pratiche che ne condizionano l'affidabilità e la diffusione. Uno dei principali problemi riguarda il bias algoritmico, spesso derivante dall'addestramento dei modelli su dataset non rappresentativi della popolazione reale. Algoritmi sviluppati su coorti monocentriche o su popolazioni selezionate possono mostrare performance inferiori quando applicati a pazienti con differenti caratteristiche demografiche, etniche o cliniche, con il rischio di amplificare disuguaglianze già esistenti nell'assistenza sanitaria.

Un ulteriore limite metodologico è rappresentato dall'"overfitting", ovvero l'eccessiva ottimizzazione del modello sui dati di training, che compromette la capacità di generalizzazione su nuove coorti. Questo aspetto è particolarmente rilevante in ambito cardiovascolare, dove la complessità fenotipica dei pazienti e la variabilità dei contesti clinici rendono essenziale una validazione esterna rigorosa e multicentrica degli algoritmi prima della loro implementazione routinaria. Oltre ai limiti tecnici, esistono significativi ostacoli pratici all'implementazione clinica dell'IA³⁷. La resistenza culturale da parte degli operatori sanitari, legata alla scarsa familiarità con i modelli algoritmici e al timore di una perdita di autonomia decisionale, rappresenta una barriera rilevante all'adozione. Inoltre, l'integrazione degli strumenti di IA nei flussi di lavoro ospedalieri e nei sistemi di cartella clinica elettronica è spesso complessa, richiedendo interoperabilità, interfacce user-friendly e un'attenta valutazione dell'impatto sul carico di lavoro del clinico³⁷.

In assenza di una progettazione centrata sull'utente e di un adeguato supporto organizzativo, il rischio è che anche algoritmi altamente performanti rimangano confinati a contesti sperimentali, senza tradursi in un reale beneficio per la pratica clinica quotidiana.

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

L'IA sta già modificando in modo concreto la pratica cardiologica, in particolare nei campi dell'elettrocardiografia, dell'ima-

ging cardiovascolare, della stratificazione prognostica e della cardiologia interventistica. In questi ambiti, l'IA ha dimostrato di poter migliorare l'accuratezza diagnostica, ridurre la variabilità interoperatore e supportare decisioni cliniche sempre più personalizzate. Tuttavia, il suo impatto attuale deve essere interpretato con realismo: la maggior parte delle applicazioni oggi disponibili rimane uno strumento di supporto decisionale, non un sostituto del giudizio clinico. I limiti dell'IA sono altrettanto rilevanti quanto le sue potenzialità. Bias nei dati di addestramento, problemi di generalizzabilità, opacità dei modelli e difficoltà di integrazione nei flussi di lavoro clinici rappresentano ostacoli concreti alla sua adozione su larga scala. Senza un'adeguata validazione esterna, senza trasparenza nei processi decisionali e senza una chiara attribuzione delle responsabilità medico-legali, il rischio è quello di introdurre strumenti tecnologicamente avanzati ma clinicamente fragili. Perché l'IA possa diventare un reale valore aggiunto in cardiologia è necessario che la sua implementazione avvenga all'interno di un framework rigoroso e condiviso. Qualità e governance dei dati, XAI, studi di validazione indipendenti, formazione degli operatori sanitari e una regolamentazione chiara a livello europeo rappresentano condizioni imprescindibili per un'adozione sicura, efficace ed equa. In questo percorso, le società scientifiche hanno un ruolo centrale nel definire standard, priorità e modelli di integrazione clinica. Strumenti di IA generativa come ChatGPT amplificano ulteriormente queste riflessioni, mostrando come l'IA possa potenziare la ricerca e la scrittura scientifica, ma solo se utilizzata in modo trasparente e sotto una supervisione umana costante. Come

HAL 9000, l'IA in cardiologia è capace di elaborare informazioni oltre le capacità umane, ma non può – e non deve – essere lasciata senza controllo. Il futuro della cardiologia sarà inevitabilmente più digitale. La sua credibilità, tuttavia, dipenderà dalla capacità di mantenere l'essere umano al centro del processo decisionale (Graphical Abstract).

RIASSUNTO

L'intelligenza artificiale (IA) sta rapidamente trasformando il mondo e la medicina in particolare è travolta da innovazioni continue. In cardiologia, l'IA offre ogni giorno strumenti innovativi per la diagnosi, la stratificazione prognostica, la pianificazione interventistica e la personalizzazione delle cure. Dall'interpretazione automatizzata dell'ECG e dell'imaging cardiovascolare, fino all'integrazione nei flussi procedurali e predittivi della cardiologia interventistica, l'IA si sta affermando come alleato potente del clinico e del ricercatore. Tuttavia, le sue applicazioni sollevano importanti sfide etiche, legali e regolatorie, che impongono trasparenza, validazione indipendente e una governance multidisciplinare. In questa rassegna esploriamo il potenziale e i limiti dell'IA in ambito cardiovascolare, con un focus sulle tecnologie emergenti, le implicazioni per la pratica clinica quotidiana e il ruolo crescente di strumenti generativi come ChatGPT nella ricerca scientifica. Come HAL 9000, l'IA può amplificare le capacità umane ma richiede una supervisione attenta per evitare derive incontrollate. La cardiologia del futuro sarà sempre più digitale, ma dovrà restare saldamente umana.

Parole chiave. Etica digitale; Intelligenza artificiale; Machine learning.

BIBLIOGRAFIA

1. Lüscher TF, Wenzl FA, D'Ascenzo F, Friedman PA, Antoniadou C. Artificial intelligence in cardiovascular medicine: clinical applications. *Eur Heart J* 2024;45:4291-304. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehae465>
2. Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nat Med* 2019;25:44-56. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7>
3. Shameer K, Johnson KW, Glicksberg BS, Dudley JT, Sengupta PP. Machine learning in cardiovascular medicine: are we there yet? *Heart* 2018;104:1156-64. <https://doi.org/10.1136/heartjnl-2017-311198>
4. Haug CJ, Drzen JM. Artificial intelligence and machine learning in clinical medicine, 2023. *N Engl J Med* 2023;388:1201-8. <https://doi.org/10.1056/NEJMra2302038>
5. Siontis KC, Noseworthy PA, Attia ZI, Friedman PA. Artificial intelligence-enhanced electrocardiography in cardiovascular disease management. *Nat Rev Cardiol* 2021;18:465-78. <https://doi.org/10.1038/s41569-020-00503-2>
6. Asch FM, Poilvert N, Abraham T, et al. Automated echocardiographic quantification of left ventricular ejection fraction without volume measurements using a machine learning algorithm mimicking a human expert. *Circ Cardiovasc Imaging* 2019;12:e009303. <https://doi.org/10.1161/circimaging.119.009303>
7. Dey D, Slomka PJ, Leeson P, et al. Artificial intelligence in cardiovascular imaging: JACC state-of-the-art review. *J Am Coll Cardiol* 2019;73:1317-35. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.12.054>
8. Hannun AY, Rajpurkar P, Haghighpanahi

- M, et al. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network. *Nat Med* 2019;25:65-9. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0268-3>
9. Attia ZI, Noseworthy PA, Lopez-Jimenez F, et al. An artificial intelligence-enabled ECG algorithm for the identification of patients with atrial fibrillation during sinus rhythm: a retrospective analysis of outcome prediction. *Lancet* 2019;394:861-7. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(19\)31721-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(19)31721-0)
10. Raghunath S, Pfeifer JM, Ulloa-Cerna AE, et al. Deep neural networks can predict new-onset atrial fibrillation from the 12-lead ECG and help identify those at risk of atrial fibrillation-related stroke. *Circulation* 2021;143:1287-98. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.120.047829>
11. Attia ZI, Kapa S, Lopez-Jimenez F, et al. Screening for cardiac contractile dysfunction using an artificial intelligence-enabled electrocardiogram. *Nat Med* 2019;25:70-4. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0240-2>
12. Kwon JM, Lee SY, Jeon KH, et al. Deep learning-based algorithm for detecting aortic stenosis using electrocardiography. *J Am Heart Assoc* 2020;9:e014717. <https://doi.org/10.1161/jaha.119.014717>
13. Chustek M. Benefits and risks of AI in health care: narrative review. *Interact J Med Res* 2024;13:e53616. <https://doi.org/10.2196/53616>
14. Zhang J, Gajjala S, Agrawal P, et al. Fully automated echocardiogram interpretation in clinical practice. *Circulation*

- 2018;138:1623-35. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.118.034338>
15. Ouyang D, He B, Ghorbani A, et al. Video-based AI for beat-to-beat assessment of cardiac function. *Nature* 2020;580:252-6. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2145-8>
16. Olaisen S, Smistad E, Espeland T, et al. Automatic measurements of left ventricular volumes and ejection fraction by artificial intelligence: clinical validation in real time and large databases. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2024;25:383-95. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jead280>
17. Oikonomou EK, Marwan M, Desai MY, et al. Non-invasive detection of coronary inflammation using computed tomography and prediction of residual cardiovascular risk (the CRISP CT study): a post-hoc analysis of prospective outcome data. *Lancet* 2018;392:929-39. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(18\)31114-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(18)31114-0)
18. Antonopoulos AS, Sanna F, Sabharwal N, et al. Detecting human coronary inflammation by imaging perivascular fat. *Sci Transl Med* 2017;9:eal2658. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aal2658>
19. Coerkamp CF, Verpalen VA, Kuipers RS, et al. Perivascular fat attenuation index (FAI) on computed tomography coronary angiography reclassifies individual cardiovascular risk estimation. *Int J Cardiol Cardiovasc Risk Prev* 2025;24:200360. <https://doi.org/10.1016/j.ijcrp.2024.200360>
20. Bai W, Sinclair M, Tarroni G, et al. Automated cardiovascular magnetic resonance image analysis with fully convolutional networks. *J Cardiovasc Magn Reson* 2018;20:65. <https://doi.org/10.1186/s12968-018-0471-x>

21. Fahmy AS, Neisius U, Chan RH, et al. Three-dimensional deep convolutional neural networks for automated myocardial scar quantification in hypertrophic cardiomyopathy: a multicenter multivendor study. *Radiology* 2020;294:52-60. <https://doi.org/10.1148/radiol.201910737>
22. Nørgaard BL, Terkelsen CJ, Mathiasen ON, et al. Coronary CT angiographic and flow reserve-guided management of patients with stable ischemic heart disease. *J Am Coll Cardiol* 2018;72:2123-34. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.07.043>
23. Ohashi H, Bouisset F, Buytaert D, et al. Coronary CT angiography in the cath lab: leveraging artificial intelligence to plan and guide percutaneous coronary intervention. *Interv Cardiol* 2023;18:e26. <https://doi.org/10.15420/icr.2023.12>
24. Itu L, Rapaka S, Passerini T, et al. A machine-learning approach for computation of fractional flow reserve from coronary computed tomography. *J Appl Physiol* (1985) 2016;121:42-52. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00752.2015>
25. Niioka H, Kume T, Kubo T, et al. Automated diagnosis of optical coherence tomography imaging on plaque vulnerability and its relation to clinical outcomes in coronary artery disease. *Sci Rep* 2022;12:14067. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18473-5>
26. Mahmud E, Naghi J, Ang L, et al. Demonstration of the safety and feasibility of robotically assisted percutaneous coronary intervention in complex coronary lesions: results of the CORA-PCI study (Complex Robotically Assisted Percutaneous Coronary Intervention). *JACC Cardiovasc Interv* 2017;10:1320-7. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2017.03.050>
27. Moroni A, Mascaretti A, Dens J, et al. Machine learning-based algorithm to predict procedural success in a large European cohort of hybrid chronic total occlusion percutaneous coronary interventions. *Am J Cardiol* 2025;248:50-7. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2025.04.001>
28. A X, Li K, Yan LL, et al. Machine learning-based prediction of infarct size in patients with ST-segment elevation myocardial infarction: a multi-center study. *Int J Cardiol* 2023;375:131-41. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2022.12.037>
29. Niimi N, Shiraishi Y, Sawano M, et al. Machine learning models for prediction of adverse events after percutaneous coronary intervention. *Sci Rep* 2022;12:6262. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10346-1>
30. Leha A, Huber C, Friede T, et al. Development and validation of explainable machine learning models for risk of mortality in transcatheter aortic valve implantation: TAVI risk machine scores. *Eur Heart J Digit Health* 2023;4:225-35. <https://doi.org/10.1093/ehjdh/ztd021>
31. Lertsanguansinchai P, Chokesuwattanasakul R, Petchlorlian A, Suttirut P, Buddhari W. Machine learning-based predictive risk models for 30-day and 1-year mortality in severe aortic stenosis patients undergoing transcatheter aortic valve implantation. *Int J Cardiol* 2023;374:20-6. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2022.12.023>
32. Wenzl FA, Kraler S, Ambler G, et al. Sex-specific evaluation and redevelopment of the GRACE score in non-ST-segment elevation acute coronary syndromes in populations from the UK and Switzerland: a multinational analysis with external cohort validation. *Lancet* 2022;400:744-56. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)01483-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01483-0)
33. D'Ascenzo F, De Filippo O, Gallone G, et al. Machine learning-based prediction of adverse events following an acute coronary syndrome (PRAISE): a modelling study of pooled datasets. *Lancet* 2021;397:199-207. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(20\)32519-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(20)32519-8)
34. Mohammadi T, D'Ascenzo F, Pepe M, et al. Unsupervised machine learning with cluster analysis in patients discharged after an acute coronary syndrome: insights from a 23,270-patient study. *Am J Cardiol* 2023;193:44-51. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2023.01.048>
35. Angraal S, Mortazavi BJ, Gupta A, et al. Machine learning prediction of mortality and hospitalization in heart failure with preserved ejection fraction. *JACC Heart Fail* 2020;8:12-21. <https://doi.org/10.1016/j.jchf.2019.06.013>
36. Cohen-Shelly M, Attia ZI, Friedman PA, et al. Electrocardiogram screening for aortic valve stenosis using artificial intelligence. *Eur Heart J* 2021;42:2885-96. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehab153>
37. Ghassemi M, Oakden-Rayner L, Beam AL. The false hope of current approaches to explainable artificial intelligence in health care. *Lancet Digit Health* 2021;3:e745-50. [https://doi.org/10.1016/s2589-7500\(21\)00208-9](https://doi.org/10.1016/s2589-7500(21)00208-9)
38. Asselbergs FW, Lüscher TF. Trustworthy implementation of artificial intelligence in cardiology: a roadmap of the European Society of Cardiology. *Eur Heart J* 2024;46:677-9. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehae748>
39. Kotecha D, Asselbergs FW, Achenbach S, et al. CODE-EHR best-practice framework for the use of structured electronic health-care records in clinical research. *Lancet Digit Health* 2022;4:e757-64. [https://doi.org/10.1016/s2589-7500\(22\)00151-0](https://doi.org/10.1016/s2589-7500(22)00151-0)
40. Mandel JC, Kreda DA, Mandl KD, Kohane IS, Ramoni RB. SMART on FHIR: a standards-based, interoperable apps platform for electronic health records. *J Am Med Inform Assoc* 2016;23:899-908. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocv189>
41. Lewin S, Chetty R, Ildayhid AR, Dwivedi G. Ethical challenges and opportunities in applying artificial intelligence to cardiovascular medicine. *Can J Cardiol* 2024;40:1897-906. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2024.06.029>
42. Wu Y, Lin C. Unveiling the black box: imperative for explainable AI in cardiovascular disease prevention. *Lancet Reg Health West Pac* 2024;48:101145. <https://doi.org/10.1016/j.lanwpc.2024.101145>
43. Reddy S. Explainability and artificial intelligence in medicine. *Lancet Digit Health* 2022;4:e214-5. [https://doi.org/10.1016/s2589-7500\(22\)00029-2](https://doi.org/10.1016/s2589-7500(22)00029-2)
44. Nagendran M, Chen Y, Lovejoy CA, et al. Artificial intelligence versus clinicians: systematic review of design, reporting standards, and claims of deep learning studies. *BMJ* 2020;368:m689. <https://doi.org/10.1136/bmj.m689>
45. D'Ascenzo F, Angelini F, Pancotti C, et al. Machine-learning phenotyping of patients with functional mitral regurgitation undergoing transcatheter edge-to-edge repair: the MITRA-AI study. *Eur Heart J Digit Health* 2025;6:340-9. <https://doi.org/10.1093/ehjdh/ztaf006>
46. European Society of Cardiology. Digital Cardiology and Artificial Intelligence Committee. <https://www.escardio.org/The-ESC/Governance/ESC-Committees/digital-cardiology-artificial-intelligence-committee> [ultimo accesso 12 maggio 2025].
47. European Society of Cardiology. ESC Digital & AI Summit 2025. <https://www.escardio.org/Congresses-Events/ESC-Digital-AI-Summit> [ultimo accesso 12 maggio 2025].
48. European Union. Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj/eng> [ultimo accesso 12 maggio 2025].
49. Biondi-Zoccai G. ChatGPT for Medical Research. Torino: Edizioni Minerva Medica; 2024.
50. Biondi-Zoccai G, Cazzaro A, Cobalchin E et al. Artificial intelligence tools for scientific writing: the good, the bad and the ugly. *Top Italian Scientists Journal* 2025;2:1-19. <https://doi.org/10.62684/BXVS8359>
51. Teperikidis L, Boulmpou A, Papadopoulos C, Biondi-Zoccai G. Using ChatGPT to perform a systematic review: a tutorial. *Minerva Cardiol Angiol* 2024;72:547-67. <https://doi.org/10.23736/s2724-5683.24.06568-2>
52. Tromp J, Jindal D, Redfern J, et al. World Heart Federation roadmap for digital health in cardiology. *Glob Heart* 2022;17:61. <https://doi.org/10.5334/gh.1141>