



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELL'AQUILA

DIPARTIMENTO DI MEDICINA CLINICA, SANITA' PUBBLICA, SCIENZE DELLA
VITA E DELL'AMBIENTE

Dottorato di Ricerca in

**Scienze della Salute e dell'Ambiente Curriculum Fisiopatologia del
Sistema Stomatognatico XXXVIII ciclo**

Titolo della tesi

**Utilizzo dell'intelligenza artificiale nel monitoraggio del trattamento odontoiatrico nel paziente in
età evolutiva.**

SSD MEDS-16/A

Dottorando

Dott.ssa SARA CARUSO

Coordinatore del corso

Prof.ssa Rita Roncone

Tutor

Prof. Roberto Gatto

a.a. 2023/2024.

INDICE

INTRODUZIONE

CAPITOLO I: ODONTOIATRIA DIGITALE

1.1. Cenni generali

1.2. IA in odontoiatria

1.2.1 1.2.2 1.2.3 Cenni generali di IA, machine learning e deep learning

1.2.4. Intelligenza artificiale

1.2.5. Machine learning

1.2.6. Deep learning e reti neurali

1.2.7. Panoramica sulle applicazioni cliniche dell'IA in odontoiatria

1.2.8. Applicazioni delle reti neurali in odontoiatria

Gestione ed archiviazione dati digitale

1.3 Software gestionali in odontoiatria

1.4. Software di supporto diagnostico (CDSS)

Tecniche radiografiche ed acquisizione immagini 3D

1.5. Immagini radiografiche

1.6. Tomografia computerizzata

1.7. Scanner facciali e ricostruzioni del volto in 3D

Progettazione e simulazione digitale del sorriso

1.8 Digital smile design (DSD)

1.9. Il paziente virtuale

CAPITOLO II: PRINCIPI, TECNOLOGIE E APPLICAZIONI DEL DENTAL MONITORING.

2.1 Origini e sviluppo del Dental Monitoring

2.2 Protocollo Observational Monitoring

2.3 Parametri monitorati dall'IA

2.4 Gestioni clinica e comunicazione

CAPITOLO III: PROTOCOLLO SPERIMENTALE.

3.1 Introduzione

3.2 Materiali e Metodi

3.3 Analisi statistica

3.4 Risultati

3.5 Discussione e Conclusione

CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

ABSTRACT

The research conducted during these two years of doctoral studies has focused on important topics common to the MED/28 Scientific Disciplinary Sector, particularly in reference to Pediatric Dentistry and the use of digital techniques, software, and artificial intelligence in the treatment and monitoring of growing patients.

The problem with the use of AI software and tools is that they are often not validated in the literature and therefore their predictability cannot be scientifically tested.

This is a historic moment, therefore, in which we are introducing several very powerful tools into clinical practice, and it is necessary and important to better understand their capabilities at the diagnostic, therapeutic, monitoring, and, even more so, preventive/observational levels.

Based on this, the second project using artificial intelligence was born: a clinical protocol currently being tested, based on observational data, using a software called Dental Monitoring.

Monitoring provides:

- **Visibility:** Monitor children who are not yet ready to begin treatment and have them come to the office only when they are ready to begin treatment.
- **Support and Compliance:** Help parents monitor their children's oral hygiene and prepare them for orthodontic treatment.
- **Connection:** Two-way in-app messaging for regular contact to strengthen the relationship.
- **Engagement:** Help the doctor manage patient appointments as needed.

The aim of this study was to evaluate pediatric patient compliance (improvement in hygiene) and the dentist's different clinical approach with a completely new and AI-integrated view. Beyond diagnosis, artificial intelligence is also changing the way professionals communicate with patients. AI-based tools allow the generation of personalized educational materials, 3D visualizations, and simplified explanations of diagnoses and treatment plans. The goal is not to replace the clinical-human relationship, but to enhance it, improving patient understanding and promoting more informed consent. In this regard, recent studies have shown that patients who use educational content generated with the help of AI systems show a greater understanding of clinical information, a higher level of trust compared to traditional methods (leaflets or verbal explanations), and a significant reduction in anxiety perceived before dental procedures. A prime example of the concrete application of artificial intelligence in dentistry, particularly in the diagnosis and clinical communication processes, is the Dental Monitoring platform. This system is based on advanced deep learning and computer vision algorithms to enable remote and continuous monitoring of treatments, especially in

orthodontics (Dental Monitoring®, 2023). Within the Dental Monitoring platform, one of the most recent innovations is the Observational Monitoring protocol, introduced as an alternative and complementary modality to traditional active monitoring. This protocol is part of the broader paradigm of artificial intelligence applied to non-invasive clinical surveillance and the personalization of treatment pathways, expanding the potential of AI in dental decision-making support. The aim of the study was to validate the methodology proposed by the Observational Monitoring software by analyzing a group of 20 children and monitoring them both clinically and via the software. The objectives were: to evaluate which clinical oral health conditions the AI detects compared to the observer; to assess whether the AI has a higher diagnostic assessment rate than the observer; and to assess whether monitoring increases the patient's understanding and compliance.

INTRODUZIONE

La scelta di avere come progetto di ricerca principale l'uso dell'intelligenza artificiale in Odontoiatria Pediatrica, nasce dal fatto che negli ultimi anni numerose aziende hanno sviluppato software che comprendono l'intelligenza artificiale a supporto dell'odontoiatria e soprattutto dell'odontoiatria pediatrica. Tutto questo rappresenta un argomento nuovo ed allo stesso tempo complesso e sono tante le sfaccettature da considerare: predicibilità del risultato, effetto sul paziente, effetto cognitivo sull'operatore che inizia ad usare la tecnologia. La sua integrazione nei flussi clinici nasce dalla necessità di migliorare precisione diagnostica, efficienza operativa e capacità di comunicare in modo efficace informazioni cliniche complesse, avendo un impatto importante non solo sul paziente ma anche sul clinico stesso.

Oltre alla diagnosi, infatti, l'intelligenza artificiale sta cambiando anche il modo in cui i professionisti comunicano con i pazienti. Strumenti basati su IA consentono di generare materiali educativi personalizzati, visualizzazioni 3D e spiegazioni semplificate delle diagnosi e dei piani di trattamento. Il fine non è sostituire la relazione clinico-umana, ma potenziarla, migliorando la comprensione del paziente e favorendo un consenso informato più consapevole. [1] A tal proposito, recenti studi hanno evidenziato che i pazienti che fruiscono di contenuti educativi generati con l'ausilio di sistemi IA mostrano una maggiore comprensione delle informazioni cliniche, un livello di fiducia più elevato rispetto ai metodi tradizionali (opuscoli o spiegazioni verbali) e una riduzione significativa dell'ansia percepita prima delle procedure odontoiatriche. [1]

Un esempio emblematico di applicazione concreta dell'intelligenza artificiale in odontoiatria, in particolare nei processi di diagnosi e comunicazione clinica, è

rappresentato dalla piattaforma Dental Monitoring. Questo sistema si basa su algoritmi avanzati di deep learning e computer vision per consentire il monitoraggio remoto e continuo dei trattamenti, soprattutto in ambito ortodontico (Dental Monitoring®, 2023). All'interno della piattaforma Dental Monitoring, una delle innovazioni più recenti è rappresentata dal protocollo di Observational Monitoring, introdotto come modalità alternativa e complementare al monitoraggio attivo tradizionale. Questo protocollo si inserisce nel più ampio paradigma dell'intelligenza artificiale applicata alla sorveglianza clinica non invasiva e alla personalizzazione dei percorsi di cura, ampliando le potenzialità dell'IA nel supporto decisionale odontoiatrico.

Lo scopo del lavoro è stato di validare la metodologia proposta dal software Observational Monitoring analizzando un gruppo di 20 bambini e monitorandoli sia clinicamente sia attraverso il software con i seguenti obiettivi: valutare quali condizioni cliniche di salute orale rileva l'IA rispetto all'osservatore ; valutare se l'IA ha una percentuale di valutazione diagnostica maggiore rispetto all'osservatore e se grazie al monitoraggio aumenta la comprensione e compliance del paziente.

CAPITOLO I: ODONTOIATRIA DIGITALE

1.1 Cenni generali

Il mondo digitale pervade ormai la vita dell'individuo in ogni momento, tutti siamo sempre più immersi in questo ambito e i vantaggi derivanti da questo nuovo approccio sono indiscutibili. L'inserimento del digitale, ormai inevitabile, ha cambiato la prospettiva anche in campo odontoiatrico [2]; il prendersi cura del paziente è diventato sempre più efficace ed accurato ed anche il rapporto medico-paziente ne ha tratto beneficio, in particolare, in ambito pedodontico, l'odontoiatria digitale riveste un ruolo chiave sia dal punto di vista clinico, che comunicativo. Nello specifico, per quanto riguarda la prima visita pedodontica, coesistono due tipi di approcci: quello analogico e quello digitale. Il primo è costituito da un'anamnesi, seguita da un esame obiettivo, da esami strumentali, e da una diagnosi definitiva con successiva creazione di un piano di trattamento personalizzato. Il secondo approccio invece è quello realizzato con l'ausilio del digitale. La visita digitale condivide alcune fasi iniziali con la visita analogica, anche se con qualche differenza procedurale, ma si discosta fondamentalmente dalla prima nel momento in cui a supporto del professionista c'è l'utilizzo di svariati strumenti digitali che, oltre a facilitare e/o rendere più accurato il suo lavoro, vanno a migliorare sensibilmente quella che è l'esperienza complessiva del paziente pediatrico, andando a giovare sul rapporto

di fiducia tra questo, il genitore e l'odontoiatra. Gli strumenti di cui si avvale il secondo approccio, i cosiddetti digital device, si dividono in hardware e software. La componente hardware è rappresentata dallo scanner intraorale, dal Diagnocam e dallo scanner facciale, e da strumenti ideati solo a scopo di intrattenimento del giovane paziente, come ad esempio i dispositivi di realtà virtuale, dove vengono proiettate animazioni che contribuiscono ad un miglior approccio emotivo alla prima visita del paziente; quella software invece dal Digital Smile Design dall'Outcome simulator in grado di simulare un trattamento ancor prima della sua realizzazione. Tanto gli hardware quanto i software forniscono una visione integrata, che consente al professionista di avere un fedele e dettagliato quadro della situazione attuale del giovane paziente e delle sue problematiche.

La maggior parte dei digital device presi in considerazione, funziona attraverso il supporto dell'IA (intelligenza artificiale), che, come vedremo nei successivi paragrafi, è la componente essenziale per il funzionamento di queste tecnologie, le quali grazie ad un vero e proprio meccanismo di apprendimento digitale, il “machine learning“, consentono allo strumento di acquisire nuove informazioni, dando la possibilità al clinico di utilizzare un device in continuo miglioramento. Grazie all'ausilio di questa innovazione assistiamo ad un'evoluzione della modalità di cura, passando così da una configurazione paternalistica, che prevedeva un medico “padre” che agiva nell'interesse del paziente “figlio”, ad un rapporto sostanzialmente equilibrato, dove il paziente, seppur di giovane età, trova un ruolo più attivo [3]. Risulta così essere coprotagonista, partecipe in ogni fase di cura, dalla diagnosi al piano di trattamento, insieme al genitore responsabile della sua salute. Tra i vantaggi dell'approccio digitale, oltre al maggior coinvolgimento del paziente pediatrico, ci sono sia un notevole risparmio di tempo che un indiscutibile guadagno in termini di efficienza. Tra i contro, invece, ci sono senza dubbio i limiti in termini di costi, almeno per quanto riguarda l'ingente investimento iniziale che interessa le apparecchiature, e in termini di resistenza al cambiamento che coinvolge soprattutto i professionisti abituati ad utilizzare i metodi analogici convenzionali; anche se tale passaggio è diventato ormai inevitabile in quanto i vantaggi offerti da questo approccio ne hanno aumentato la concorrenzialità.

1.2 Intelligenza Artificiale In Odontoiatria

L'intelligenza artificiale (IA) sta rivoluzionando molti settori della nostra società, e l'odontoiatria non fa eccezione. Grazie ai rapidi progressi nella tecnologia e nell'apprendimento automatico, l'IA sta aprendo nuove frontiere nella diagnosi, nel trattamento e nella gestione delle patologie dentali [2]. L'utilizzo dell'IA in odontoiatria offre nuove opportunità per migliorare la precisione delle diagnosi, ottimizzare i piani di trattamento e personalizzare le cure per i pazienti. Prima di osservare l'utilizzo di questa tecnologia in ambito odontoiatrico, è indispensabile focalizzarci sui principi base che ne regolano il funzionamento, sulle componenti strutturali e su come si sia evoluta nel corso degli anni [3].

1.2.1 Cenni generali di IA, machine learning e deep learning.

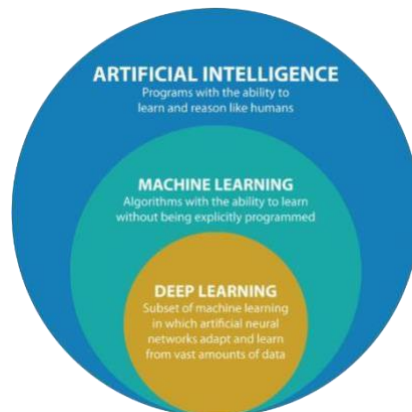


Figura 1.1 diagramma di sviluppo IA

“Artificial Intelligence”, “Machine Learning”, “Deep learning” e “Reti Neurali” sono termini che spesso il pubblico utilizza in modo errato e, nella maggior parte dei casi, in maniera intercambiabile [4,5]. Il modo più semplice ed efficace per spiegare la differenza, ma soprattutto la condizione di interdipendenza che caratterizza gli elementi menzionati, è pensare a loro secondo lo schema indicato in figura [Fig 1.1]. Ciascuno, quindi, è essenzialmente un componente del termine precedente. In dettaglio possiamo affermare che il Machine Learning è un sottocampo dell’Artificial Intelligence. Il Deep Learning è un sottocampo del Machine Learning e le reti neurali costituiscono le unità base degli algoritmi di Deep Learning [6].

1.2.4 Intelligenza Artificiale

Sebbene la nascita dell'Intelligenza Artificiale sia riconducibile a studi informatici, viene ad oggi considerata come una disciplina autonoma. Non manca, tuttavia, una forte influenza da parte di altre discipline come la matematica, la psicologia, la filosofia e le scienze cognitive. Non è un caso che la sua nascita venga collegata al matematico, logico, crittografo, filosofo, nonché uno dei padri fondatori dell'Informatica: l'inglese Alan Mathison Turing, che ne parlò per la prima volta in un articolo comparso nel 1950 sulla rivista Mind [7]. Passato alla storia per la sua famosa frase "Can machines think?", propose quello che sarebbe diventato il primo esperimento mai ideato per la misurazione dell'intelligenza delle macchine: il Test di Turing [8]. I primi lavori di ricerca in ambito IA, con il contributo di Warren McCulloch e Walter Pitt, si focalizzarono sulle reti neurali: modelli matematici ispirati alle reti neurali biologiche. [9,10]

1.2.5. Machine Learning

Il Machine Learning è un campo dell'Informatica, che studia i sistemi e gli algoritmi capaci di apprendere direttamente dai dati senza essere stati preventivamente programmati [11]. Il termine Machine Learning fu utilizzato per la prima volta nel 1959 da Arthur Lee Samuel, scienziato americano e pioniere nel campo dell'Intelligenza Artificiale [12], per riferirsi a quella branca dell'informatica che utilizza algoritmi che dettano le regole per la lettura e l'interpretazione delle informazioni. Gli algoritmi di Machine Learning possono essere categorizzati in base al tipo di addestramento a cui sono sottoposti durante il processo di apprendimento. Si è soliti declinare i paradigmi dell'Apprendimento Automatico come segue [13]:

- 2.1 supervisionato:** si costruisce un modello a partire da dati d'impostazione precedentemente impostati, in quanto l'obiettivo è elaborare un sistema che associ input e output corrispondente; Gli algoritmi che fanno uso di apprendimento supervisionato vengono utilizzati in molti settori, da quello medico a quello di identificazione vocale e hanno la capacità di effettuare ipotesi induttive, ossia ipotesi che possono essere ottenute scansionando una serie di problemi specifici già presenti nel programma ed ottenere una soluzione idonea al quesito da risolvere.
- 2.2 non supervisionato:** L'apprendimento non supervisionato prevede che il sistema da allenare sia in possesso degli input, ma senza una corrispondenza con

gli output.

L'obiettivo, in questo caso, è mettere il computer nella condizione di trovare pattern nascosti o strutture intrinseche nei dati che sono stati forniti. Viene utilizzato quando il problema richiede una quantità considerevole di dati non etichettati.

2.3 con rinforzo: l'obiettivo è costruire un sistema che, attraverso le interazioni con l'ambiente, migliori le proprie performance, perciò, il terzo ed ultimo tipo di apprendimento viene definito “**Reinforcement Machine Learning**”. È una modalità di apprendimento automatico basata sull'analisi dei feedback. La principale differenza tra questa tipologia di machine learning ed il Machine Learning supervisionato e non supervisionato sta nel fatto che l'addestramento della macchina non si basa su una banca dati (i.e. training set), ma, in questo caso, alla macchina viene fornito un obiettivo da raggiungere e una funzione premia le azioni che la avvicinano al raggiungimento dell'obiettivo e punisce quelle che la allontanano [14].

1.2.6 Deep learning e reti neurali

Il Deep Learning o apprendimento profondo è la tipologia di apprendimento automatico che più si avvicina al modo di pensare umano. In questo caso, a differenza delle tecniche di Machine Learning classico, non sono necessari dati già impostati, ma il sistema si basa sulle reti neurali multistrato, che combinano tra loro diversi algoritmi e sono modellate in base alle connessioni dell'encefalo, solamente che le unità fondamentali in questo caso si chiameranno **percettroni** [15]. Questo lo rende adatto a svolgere compiti più complessi rispetto ad altri sistemi di apprendimento automatico, ma allo stesso tempo necessita di una quantità di dati nettamente maggiore. Nonostante sia ancora l'era del Machine Learning tradizionale, nei prossimi anni i sistemi di Deep Learning saranno sicuramente più potenziati e diffusi, attualmente trovano impiego nel settore delle traduzioni, nelle aziende dei social network o in quelle automobilistiche[16]. Le reti neurali artificiali, grazie alle loro interconnessioni, permettono un'analisi predittiva accurata, con algoritmi in grado di migliorarsi continuamente, in cui nulla è lasciato al caso: ogni azione compiuta dalla macchina sarà sempre il frutto di calcoli che, di volta in volta, verificano i parametri e definiscono le incognite che definiscono le funzioni stesse. Tra i vantaggi che presentano: elevato parallelismo, che permette di processare grandi quantità di dati in poco tempo; tolleranza ai guasti ed al rumore, quindi l'abilità di operare anche con input imprecisi o incompleti; evoluzione adattativa, grazie alla quale la macchina può migliorarsi in presenza di modifiche ambientali. Uno dei principali limiti è, invece, il

funzionamento a black box: gli output forniti possono essere corretti, ma non è possibile analizzare i singoli passaggi da cui sono generati. Inoltre il tempo di apprendimento è più o meno lungo, data la complessità del sistema ed il grande numero dei dati, con il rischio che gli output finali non siano la soluzione ideale [11].

1.2.7 Panoramica sulle applicazioni cliniche dell'IA in odontoiatria

Nel corso degli ultimi anni, l'odontoiatria è mutata profondamente: dalla consapevolezza di un numero sempre maggiore di connessioni tra salute orale e sistemica (diabete mellito, aterosclerosi, artrite reumatoide, cancro e malattie cardiovascolari); fino alle richieste sempre più esigenti da parte dei pazienti, che desiderano una qualità elevatissima delle prestazioni [13][14]. Gli strumenti clinici tradizionali usati dai dentisti sono intrinsecamente soggettivi: l'utilizzo della sonda parodontale, dello specchio e delle radiografie periapicali e bitewing, seppur in minima parte, è legato alla sensibilità del professionista, oltre ad essere operatore – dipendente. L'Intelligenza Artificiale può compensare i limiti degli strumenti diagnostici tradizionali. Standardizzare le procedure, ridurre il rischio di sottostimare o sovrastimare la patologia, oltre a diminuire le

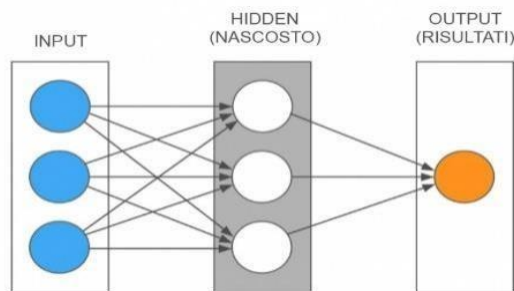


Figura 1. 2 (funzionamento di una rete neurale artificiale)

probabilità di errore iatrogeno. Per questa ragione, l'IA e l'apprendimento automatico stanno rivoluzionando ogni specializzazione odontoiatrica: dalla restaurativa, alla protesi, passando per la parodontologia, la chirurgia orale, l'ortodonzia e la patologia orale. Alcune aree sono migliorate significativamente

con l'adozione delle IA (rilevamento automatico delle malattie e dei tratti orali, miglior risoluzione delle immagini e introduzione della robotica), contribuendo al paradigma emergente dell'odontoiatria digitale. Molti modelli di deep learning, infatti, sono già stati approvati dall'FDA e vengono impiegati quotidianamente nella pratica clinica [17] [18]. L'implementazione dell'apprendimento automatico in odontoiatria è avvenuta grazie al maggior numero di Big Data disponibili ed allo sviluppo di calcolo ad alte prestazioni (HPC), che ha permesso di estrarre informazioni più approfondite. Le RNNs, o reti neurali generali, più utilizzate in odontoiatria sono le ANNs (reti neurali artificiali) e le CNNs (reti neurali ricorrenti). Gli studi su modelli di apprendimento automatico in ambito odontoiatrico si basano proprio sullo sviluppo di sistemi di Deep learning (DL) in grado di supportare l'iter diagnostico – decisionale, grazie al riconoscimento di pattern specifici

in grado di aiutare il professionista nell'esecuzione e pianificazione dei trattamenti. In generale, quindi, tutti i sistemi utilizzati in odontoiatria richiedono, per un corretto funzionamento, importanti dataset con informazioni diagnostiche di elevata qualità, ciò richiede tempo e HPC (sistemi di calcolo ad alta prestazione) potenti. Un metodo per aggirare questo problema è l'utilizzo di reti "pre - addestrate" nell'apprendimento per trasferimento (TL), capaci di cogliere modelli complessi tra le immagini a disposizione del sistema: in questo modo i modelli DL possono essere impiegati in compiti specifici, attingendo da grandi database, ma, in ambito medico, l'individualità del soggetto è l'ostacolo più grande per il riconoscimento di pattern specifici nei pazienti, motivo per il quale, si parla di "ipotesi diagnostica" che necessariamente deve essere confermata dall'operatore.[19][20]

1.2.8 Applicazione delle Reti Neurali in Odontoiatria

Come menzionato nel paragrafo precedente, esistono diverse tipologie di reti neurali all'interno degli algoritmi di Deep learning, le più utilizzate in ambito odontoiatrico sono le CNN (reti neurali ricorrenti) e trovano impiego in molte aree specialistiche:

1) Identificazione delle patologie: le ANN (Reti neurali artificiali) vengono impiegate nella rilevazione della carie dentale da radiografie periapicali e non, da immagini di transilluminazione e dall'esame clinico. L'utilizzo di una CNN (rete neurale ricorrente) per la diagnosi di carie negli elementi dentali posteriori, basata su un database di circa 3000 radiografie periapicali, ha riportato un'accuratezza del 88% nei molari e del 89% nei premolari [21]. Le CNN non sono utilizzate esclusivamente nella rilevazione delle lesioni cariose, ma sono impiegate anche nella diagnosi e nella prognosi dei carcinomi orali, soprattutto del carcinoma squamocellulare: il database di riferimento conteneva più di 40.000 immagini e riportava una precisione del 92.3%[22]. Altre tipologie di CNN, caratterizzate da minor accuratezza, impiegavano, come base dati, CBCT, radiografie e campioni istopatologici. Bisogna comunque sottolineare che il ruolo delle IA nella diagnosi, nella prognosi delle neoplasie orali rimane controverso dovuto alla percentuale d'errore non trascurabile. Gli algoritmi CNN in parodontologia aiutano il clinico a stabilire la prognosi degli elementi compromessi, tramite il supporto di indagini radiografiche e il riconoscimento di pattern specifici per classificare lo stato della malattia parodontale.

2) Segmentazioni di immagini dentali e loro applicazioni (3D e 2D)

Le caratteristiche facciali riscontrabili nelle CBCT sono state convertite in caratteristiche geometriche, le quali, a loro volta, fungono da input nelle segmentazioni 3D. Le CNN (reti neurali ricorrenti) adottate presentano una struttura gerarchica su due differenti livelli, uno per indicare il margine gengivale, l'altro per le superfici interdentali, con una precisione del 99.1%. [20]

3)Correzione di immagini grazie a reti rigenerative avversarie (GAN):

Sono ANN (reti neurali artificiali) in cui coesistono una rete generatrice ed una discriminatrice. La prima si basa sui dati di addestramento, mentre la seconda distingue tra campioni estratti in maniera diretta e quelli prodotti dal generatore. Quindi la rete discriminatrice ha il compito di discernere campioni veri da quelli falsi, nonostante il generatore tenti di ingannarla. In odontoiatria sono impiegate nella correzione di artefatti o per migliorare la risoluzione di immagini TC. L'adozione delle IA nelle tecniche di imaging ha ottimizzato le immagini ottenute, consentendo una più facile individuazione delle strutture di interesse.

a) Classificazione e localizzazione degli impianti dentali: con una precisione del 98%. [19]

b) Punti di riferimento nei trattamenti ortodontici: adozioni di ANN su tracciati cefalometrici con accuratezza del 87.6%

c) Punti di riferimento chirurgici: basandosi su immagini TC l'errore medio era di circa 5,8 mm rispetto al riferimento originale.

1.3 Gestione ed archiviazione dati digitale

1.3 Software gestionali in odontoiatria

Il primo passaggio della visita digitale consiste nel registrare il paziente nel programma e, tramite tablet o altri dispositivi collegati al software, somministrare il questionario anamnestico al giovane paziente, che compilerà con l'ausilio del genitore presente. Successivamente, poi, il software consentirà l'archiviazione nella cartella personale creata appositamente. L'utilizzo di tecnologie informatiche all'interno del settore sanitario ha quindi introdotto dei cambiamenti significativi nella gestione dei dati clinici, delle prestazioni, dei servizi offerti, e della gestione del personale. Nondimeno,

l'impiego di soluzioni informatiche avanzate ha permesso l'introduzione di

sistemi software a supporto della diagnosi [21] [22] e di tutti compartimenti della professione odontoiatrica, ma ne parleremo nel paragrafo successivo. Nonostante l'ormai consolidato panorama di applicazioni esistenti, tuttavia, lo scenario italiano è caratterizzato dall'esistenza di molte strutture sanitarie, tra cui cliniche odontoiatriche, che utilizzano ancora metodi analogici per archiviare e gestire i dati dei pazienti e le liste di attesa[23] . I sistemi software per la gestione automatizzata dei dati, chiamati secondo la terminologia informatica, sistemi informativi, basati su web (o Web Information Systems, WIS) rappresentano delle soluzioni consolidate per la gestione di grandi quantità di informazioni, mediante l'utilizzo di risorse di calcolo distribuite. I WIS permettono, inoltre, l'accesso remoto ai dati stessi, garantendo allo stesso tempo la sicurezza e la cooperazione tra più reparti, costituendo l'infrastruttura di base per meccanismi di business intelligence (ad esempio monitorare l'appropriatezza degli interventi o la lunghezza delle liste di attesa), o per indagini epidemiologiche su larga scala (nel caso di strutture con un elevato numero di pazienti). Il sistema consente sia di gestire flussi di pazienti, che la schedulazione delle visite e la gestione delle prestazioni effettuate, supportati da un sistema di gestione e trasferimento dei dati basato su protocolli standard, nonché un sistema di gestione delle immagini DICOM compatibile. Il fine dei sistemi informativi (oggi ormai sistemi informativi per il web o WIS) [fig1],[24] è la manipolazione dei dati tramite conversione, immagazzinamento, protezione, trasmissione e recupero sicuro delle informazioni, la sicurezza, infatti, è garantita da opportune scelte progettuali (crittazione dei dati memorizzati nel data base, trasmissione di dati cifrati da e verso il server). Tra le sue applicazioni il sistema permette di esportare i dati in maniera confacente agli standard internazionali (ICD-CM e HL7). L'odontoiatra, utilizzando il sistema, può gestire le immagini dei pazienti ed effettuare semplici analisi (per esempio correzione del contrasto) mediante l'uso della modalità "gestione di immagini" (open source) IMAGEJ, incluso nel sistema informatico. Il programma, infine, consente anche la consultazione remota e sicura dei dati anche al genitore del piccolo paziente. che può accedere, quindi, in tutta facilità ai propri referti.

Nel campo medico sanitario, grazie all'uso di sistemi web based, è possibile:

- migliorare la comunicazione tra paziente, medico e struttura sanitaria
- accedere più rapidamente alle informazioni
- aggiornare i dati in maniera automatizzata
- scambiare e trasmettere informazioni tra i vari operatori sanitari
- ridurre lo spostamento di medici e pazienti
- ridurre o eliminare il materiale cartaceo
- ridurre o eliminare il trasferimento manuale delle varie informazioni.



Fig 1.4(Cartella clinica virtuale)

Fino a qualche tempo fa, l'obiettivo di un sistema informatico applicato al settore sanitario era semplicemente quello di contribuire ad un'assistenza efficiente e di alta qualità al paziente[25]. Questo scopo, centrato principalmente verso il paziente, ha supportato il lavoro dei professionisti, poiché tramite un appropriato accesso ai dati di un singolo paziente è possibile prendere decisioni a livello diagnostico e terapeutico. Pertanto, un sistema può essere considerato come un modello che connette concettualmente degli elementi semplici, i dati, in un insieme funzionale. Inoltre, in ambito sanitario i requisiti funzionali devono tener conto che gli obiettivi sono quelli di massimizzare la qualità del servizio e razionalizzare i costi evitando sprechi. Questi software sono in continua evoluzione, infatti, al giorno d'oggi consentono la gestione dei pagamenti, l'invio di messaggi automatici per programmare sedute di controllo, la possibilità di avere cartelle cliniche completamente digitalizzate e la comunicazione con altri professionisti[26].

1.4 Software di supporto diagnostico (CDSS)

Tra i software di supporto, oltre ai programmi ad uso gestionale, sono presenti altri sistemi, che nonostante abbiano funzioni simili, come raccogliere dati ed immagini, aiutano il clinico nell'analisi di questi ultimi, formulando un'ipotesi diagnostica che solamente l'operatore potrà confermare o smentire. I sistemi di supporto decisionale (DSS) sono una classe specifica di sistemi informatici che supportano le attività aziendali e organizzative alle prese con la continua risoluzione ed individuazione di problematiche interne, ma adattabili anche alla diagnosi medica; in questo caso il meccanismo sarà simile, ma lo spettro di azione diverso e prenderanno il nome di CDSS (clinical decision support system) [27]. Guardando alla storia di questi dispositivi, i primi che intuirono la loro funzionalità clinica furono Ledley e Lusted (entrambi odontoiatri). Decisero di modificare i sistemi DSS, che fino a quel momento venivano utilizzati solamente in ambito finanziario per prevedere la salita o la discesa dei titoli borsa, e renderli perfettamente compatibili con l'attività clinica odontoiatrica. Un CDSS correttamente progettato è un sistema basato su un software interattivo destinato sia ad aiutare coloro che sono i responsabili del trattamento, che a stilare dati clinici attraverso l'analisi automatica della cartella clinica, delle scansioni, degli esami di laboratorio e di tutte quelle informazioni che l'operatore inserisce nella cartella di lavoro. L'obiettivo principale di questi software è identificare la condizione da risolvere e formulare un'ipotesi diagnostica collegata ad una proposta di trattamento [fig 1.5].

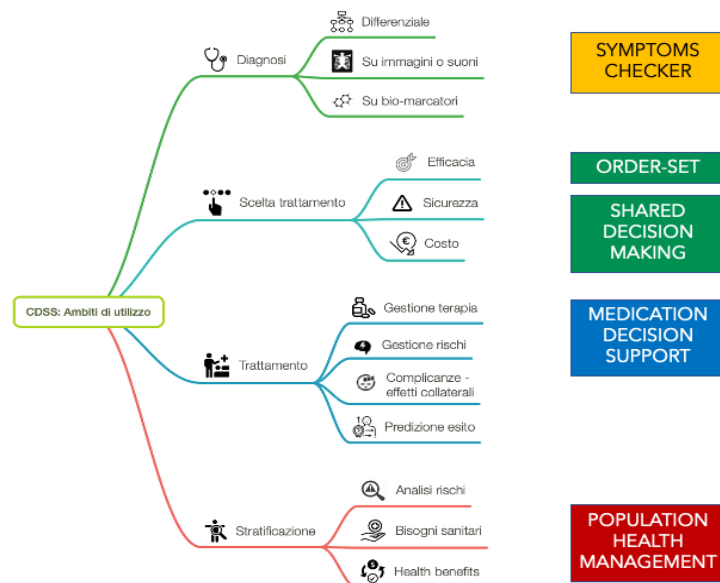


Fig 1.5 (Ambiti di utilizzo di un CDSS)

Da questo ne deriva che tale tipologia di supporto può essere utilizzata per la diagnosi, la prevenzione, il trattamento delle patologie orali e la valutazione futura anche del paziente pediatrico. Al momento, questi programmi agiscono in ogni ambito clinico, e rivestono particolare utilità nella scelta e dosaggio dei farmaci, in base ai dati antropometrici del paziente (età, peso, sesso, altezza), nella valutazione delle lesioni cariose nei denti decidui e permanenti [28], e infine nel proporre letteratura scientifica dietro ad ogni proposta di trattamento.

1.5 Tecniche radiografiche ed acquisizione immagini 3D



Figura 3.6 (sensore RVG)

Dopo aver approcciato ad una prima fase anamnestica del paziente pediatrico, la visita comprende una seconda fase rappresentata da indagini strumentali, come quella radiografica. Anche in questa fase, il digitale sta assumendo sempre più una parte rilevante.

La radiografia digitale, infatti, è diventata una pratica sempre più diffusa negli studi odontoiatrici, grazie all'introduzione del sistema RVG (Radiography Video Graphics) da parte dell'azienda Trophy [29], nel 1982, dopo l'intuizione di uno studente di odontoiatria francese. Un'altra importantissima novità nel campo dell'imaging tridimensionale è stata l'introduzione della TC Cone Beam. Questo tipo di tomografia computerizzata utilizza un fascio conico per acquisire immagini volumetriche dell'intera arcata dentale con una singola scansione. Rispetto alla TC tradizionale, la TC Cone Beam richiede tempi di scansione più brevi e dosi di radiazioni inferiori, offrendo una maggiore convenienza e sicurezza, anche se secondo OPERRA research (Open Project for European Radiation Research Area) [30] l'indicazione a tale esame è indicato nei casi in cui la radiologia convenzionale non fornisca risultati soddisfacenti[31]. Grazie a questa tecnologia, gli odontoiatri possono ottenere una visione tridimensionale dettagliata delle strutture dentali e ossee, consentendo una diagnosi più precisa e una pianificazione ottimizzata dei trattamenti[32].

1.5.1 Immagini radiografiche

Le radiazioni ionizzanti sono una forma di radiazione che possiede abbastanza energia da causare la ionizzazione della materia attraversata. Queste radiazioni sono principalmente

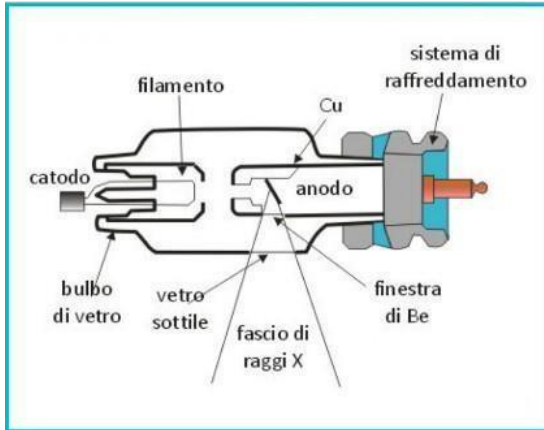


Figura 1.6 (schema di funzionamento tubo radiogeno)

costituite da fotoni, come i raggi X e i raggi gamma [33], che si propagano alla velocità della luce. Possono interagire con particelle cariche elettricamente o con particelle prive di carica elettrica, come i fotoni e i neutroni. Nel contesto delle apparecchiature diagnostiche, come i generatori di raggi X, il tubo radiogeno è un componente fondamentale [34]. Esso è costituito da

un'ampolla di vetro sottovuoto con due elettrodi: l'anodo e il catodo [fig 1.6]. Il filamento del catodo viene riscaldato attraverso una corrente, generando elettroni per effetto termoionico. Questi elettroni vengono accelerati dall'alta tensione verso l'anodo, creando un flusso di elettroni negativamente carichi [35]. L'energia cinetica degli elettroni viene trasformata in calore e, in misura minore, in raggi X quando colpiscono il disco metallico dell'anodo. I raggi X prodotti interagiscono con la materia e, in base allo spessore e alle proprietà chimico-fisiche della zona attraversata, arriva al rivelatore un fascio più o meno attenuato. Questo fascio di raggi X crea un'immagine in negativo, in cui vengono registrati sulla pellicola i fotoni che non vengono assorbiti dal corpo. Per ottenere radiografie di diverse parti del corpo, è possibile regolare la differenza di potenziale all'interno del tubo radiogeno, espressa in kilovolt (kV) [36], per aumentare l'energia dei fotoni e quindi la loro capacità di penetrazione. È anche possibile intervenire sulla durata dell'emissione dei raggi X e sull'intensità della corrente, aumentando quest'ultima per accelerare più elettroni verso l'anodo e quindi aumentare l'esposizione del rivelatore e del paziente. L'intensità della corrente è misurata in milliampere (mA) e determina la quantità di radiazioni emesse dall'apparecchio. Quando i raggi X interagiscono con la materia, soprattutto quelli ad alta energia, non tutti i fotoni vengono completamente assorbiti, ma una parte viene deviata con energia ridotta. Questo dà origine a una radiazione diffusa che può compromettere la qualità dell'immagine finale, causando un possibile effetto nebbia e complicando la radioprotezione. Dopo aver attraversato il corpo del paziente, il fascio di raggi X deve

essere rivelato per ottenere un'immagine visibile. Ci sono due sistemi di rivelazione comuni: la pellicola radiografica e i rivelatori digitali. La pellicola radiografica cattura l'immagine utilizzando sostanze fotosensibili che reagiscono alla radiazione ionizzante, mentre i rivelatori digitali convertono direttamente la radiazione in segnali digitali, che possono essere visualizzati e archiviati in formato digitale [37]. Parleremo ora delle differenze principali tra queste due tipologie di acquisizione delle immagini radiografiche, evidenziandone i vantaggi e le limitazioni di una e dell'altra, e di come hanno cambiato l'indagine strumentale della visita pedodontica.

RADIOGRAFIA TRADIZIONALE

La radiografia tradizionale utilizza la pellicola radiografica [Fig 1.7] come mezzo per catturare l'immagine risultante dalla proiezione dei raggi X attraverso il paziente. Tuttavia, negli ultimi anni si è verificato un progressivo declino nell'uso della pellicola radiografica a causa dell'ampia adozione dei sistemi digitali, che offrono numerosi vantaggi [38]. I sistemi digitali hanno sostituito l'uso dei prodotti chimici necessari per sviluppare e fissare le pellicole, eliminando così l'esigenza di processi di sviluppo chimico. Ciò comporta un notevole risparmio di risorse, oltre a una maggiore praticità nell'archiviazione e nella condivisione delle immagini radiografiche. Un ulteriore vantaggio dei sistemi digitali è il miglioramento dinamico delle immagini grazie all'utilizzo di software specializzati. Questi software consentono di regolare l'immagine, migliorando la nitidezza e il contrasto, nonché di applicare misurazioni precise e strumenti di annotazione direttamente sull'immagine stessa[39]. Uno dei vantaggi più significativi dei sistemi digitali è la riduzione delle dosi di radiazioni. Diversi studi hanno dimostrato che l'uso dei sistemi digitali può ridurre le dosi di radiazioni rispetto alle tecniche tradizionali [26] favorendone l'utilizzo anche nel paziente pediatrico. Ad esempio, uno studio condotto da Visser et al. ha riportato che l'uso di sistemi digitali per le ortopantomografie ha portato a dosi di radiazioni comprese tra 5 e 14 microSv, rispetto ai 16-21 microSv delle tecniche tradizionali. Un altro studio condotto da Kiefer et al. ha evidenziato una riduzione del 47% delle dosi di radiazioni con l'uso di dispositivi digitali per una serie completa di radiografie panoramiche. Nella tecnologia delle pellicole



Figura 1.7 pellicola radiografica tradizionale

radiografiche, si utilizzano cristalli di bromuro di argento (BrAg) [40] all'interno di una gelatina legante applicata sulla pellicola. Quando i cristalli vengono esposti alle radiazioni ionizzanti, la loro struttura si modifica e vengono ridotti a particelle di argento

metallico mediante un agente ossido-riduttore. Questo processo di sviluppo porta alla formazione di aree scure sulla pellicola che corrispondono alle zone in cui i raggi X sono stati assorbiti. Successivamente, la pellicola viene sottoposta a un processo di fissaggio con iposolfito di sodio per rimuovere i cristalli non ridotti e infine viene effettuato un lavaggio per rimuovere eventuali residui chimici [41].

RADIOGRAFIA DIGITALE

La radiografia digitale è un'evoluzione significativa nella diagnostica per immagini, in cui l'acquisizione, la rielaborazione e l'archiviazione delle radiografie vengono effettuate utilizzando tecniche informatiche avanzate. Questo approccio offre numerosi vantaggi rispetto alla radiografia tradizionale, tra cui una migliore qualità delle immagini, una gestione dei dati più efficiente e una riduzione dei tempi diagnostici [42]. Esistono diverse tecniche di acquisizione utilizzate nella radiografia digitale. Una di queste è l'utilizzo di piastre di fosfori a memoria, conosciute anche come imaging plates. Queste piastre sono costituite da un substrato che contiene cristalli di fosforo sensibili alle radiazioni. Durante l'esposizione alle radiazioni, i cristalli assorbono l'energia elettromagnetica e la memorizzano come carica elettrica. Successivamente, le piastre vengono lette da un'apparecchiatura laser che rileva la carica accumulata nei cristalli e la converte in un segnale digitale. Questo segnale viene quindi elaborato da un computer per creare l'immagine radiografica finale. Un'altra tecnica di acquisizione comune è l'utilizzo di sensori a semiconduttore, come i sensori ad accoppiamento di cariche (CCD) o i sensori a semiconduttore a matrice attiva (CMOS). Questi sensori sono costituiti da fotosensori che convertono la luce in segnali elettrici. Durante l'esposizione alle radiazioni, i sensori registrano l'intensità della luce e generano un segnale elettrico corrispondente. Questo segnale viene quindi digitalizzato ed elaborato dal computer per creare l'immagine radiografica. L'utilizzo dei sensori a semiconduttore consente una rapida acquisizione delle immagini, poiché i segnali possono essere trasmessi direttamente al computer attraverso un collegamento via cavo più rapido. Oltre alle tecniche di acquisizione, la radiografia digitale offre anche una serie di vantaggi nel post-elaborazione delle immagini. Utilizzando software specializzati, i medici possono regolare i parametri delle immagini, come luminosità, contrasto e nitidezza, per migliorare la visibilità delle strutture anatomiche e facilitare la diagnosi. Inoltre, le immagini digitali possono essere archiviate e condivise in modo rapido ed efficiente [43], eliminando la necessità di spazio fisico per l'archiviazione delle pellicole tradizionali. Grazie alle tecniche di acquisizione

avanzate e alla maggiore sensibilità dei sensori digitali, è possibile, quindi, ottenere immagini di qualità utilizzando dosi inferiori di radiazioni rispetto alla radiografia convenzionale. Ciò contribuisce a ridurre i potenziali rischi associati all'esposizione alle radiazioni e a migliorare la sicurezza dei pazienti. In ambito pediatrico il passaggio dalla radiografia tradizionale a quella digitale non ha però avuto grosse influenze nella comunicazione col paziente pediatrico, ma in ambito clinico, la riduzione dell'esposizione alle radiazioni rappresenta un notevole vantaggio per esso.

1.6 Tomografia computerizzata

La diagnosi orale e la pianificazione del trattamento sono di fondamentale importanza nell'odontoiatria pediatrica. Dall'avvento dei raggi X, la radiografia odontoiatrica svolge un ruolo chiave sia nella diagnosi e nella pianificazione del trattamento, che nella prognosi delle malattie dentali nei pazienti pediatrici. [43]. I tre principi di base della radioprotezione dovrebbero essere sempre tenuti presenti prima di raccomandare l'uso della CBCT nei bambini, il cui uso dovrebbe essere giustificato solo nei casi in cui la radiografia convenzionale non fornisca informazioni pertinenti. La Cone Beam Computed Tomography (CBCT) o tomografia computerizzata a fascio conico è una moderna metodologia diagnostica, che consente di riprodurre sezioni (tomografia) e/o di generare un'immagine tridimensionale del cranio (o di alcune sue aree) per mezzo di fasci di raggi X a forma di cono acquisite da un sensore digitale ed elaborate da un computer [Fig 1.7]. La CBCT permette una scansione volumetrica che consente quindi l'acquisizione di tutto il volume da indagare composto da voxel con un'unica rotazione congiunta a 360° del complesso tubo radiogeno/detettori. I file acquisiti vengono salvati come file DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). Ciò è reso possibile soprattutto dalla emissione di un fascio radiante a forma conica (non a "ventaglio" come nella CT convenzionale) e da un rivelatore solido che può essere conformato a pannello di ampia superficie (flat panel). Si acquisiscono così un'elevata quantità di dati (fino a 600 immagini distinte), che permettono informazioni bidimensionali successivamente analizzate e ricostruite tramite opportuni software, così da ottenere immagini tridimensionali e facili ricostruzioni multiplanari (MPR) su vari piani di osservazione. Le serie di proiezioni acquisite verranno poi elaborate da un software, il quale produrrà un set tridimensionale che servirà da base per successive rielaborazioni che porteranno alle ricostruzioni nei tre piani ortogonali (assiale, sagittale,

coronale). Il risultato finale è un'immagine tridimensionale, composta da una

serie di voxel la cui dimensione è corrispondente alla risoluzione spaziale ed è intrinsecamente correlata con la dimensione dei pixel del detettore. Solitamente la risoluzione è nell'ordine dei 0,09-0,4 mm e questo determina la dimensione del voxel, che generalmente assume la caratteristica di essere isotropico e questo permette di poter ricostruire l'immagine su ulteriori piani o realizzare modelli grafici tridimensionali. Le immagini sono caratterizzate da elevata risoluzione spaziale e dalla corrispondenza alla realtà anatomica (rapporto 1:1). In ambito odontostomatologico esistono indicazioni multiple: in ortodonzia con studio dei denti inclusi, soprannumerari ed ectopici, e dei loro rapporti con le strutture limitrofe, come le cavità mascellari, le fosse nasali ed il nervo alveolare inferiore specie in caso di disodontiasi degli VIII[^] inferiori. La CBCT trova applicazione anche nello studio delle articolazioni temporo-mandibolari (ATM), con valutazione dell'anatomia o della patologia specie osteo-artritica. Trova indicazione in chirurgia pediatrica nelle anomalie ossee del massiccio facciale, quale la palatoschisi con pianificazione e verifica del trattamento chirurgico. L'esame radiografico con CBCT, in ambito pedodontico, come detto precedentemente, risulta essere però un approccio di secondo livello, con delle specifiche indicazioni tra cui:



Figura 1.7(ricostruzione volumetrica tramite CBCT).

-lesioni cariose: le immagini CBCT mostrano infatti una migliore rilevazione delle carie prossimali rispetto alle tecniche intraorali digitali convenzionali. Tuttavia, la CBCT ha i suoi limiti in quanto non è in grado di rilevare lesioni cariose nelle corone restaurate in metallo e nei denti con restauri radiopachi.

-traumi dentoalveolari: è stato riscontrato che la CBCT può portare a diagnosi più precise per le fratture radicolari di denti non trattati endodonticamente rispetto alle radiografie periapicali convenzionali [44].

1.7 Scanner facciali e ricostruzioni del volto in 3D

Uno dei dispositivi hardware principali dell'odontoiatria digitale è lo scanner facciale 3D. Come suggerisce il nome, è un sistema di scansione tridimensionale, che è in grado di catturare i volti in posizione di riposo, allineandoli poi perfettamente con i modelli dentali del paziente. In questo modo, è possibile ottenere in pochi secondi un modello tridimensionale del viso. Lo scanner utilizza o il sistema della luce strutturata o la

tecnologia laser. La prima tipologia proietta un pattern di luce sul modello, analizzandone la deformazione proiettata sulla superficie dell'oggetto e grazie a questa ne ricava la geometria. Questo modello è inoltre più adatto e preciso, rispetto a quello laser, nella rilevazione dei volti. Lo scanner invece che utilizza la luce emessa da un dispositivo laser possiede una forte intensità ed è molto concentrata, rappresentando una certa pericolosità, in particolar modo per la retina. L'utilizzo di dispositivi a luce strutturata ha una maggiore velocità di esecuzione, accuratezza e sicurezza per il paziente pediatrico evitando potenziali danni alla retina. Utilizzare lo scanner facciale è molto intuitivo e rapido, infatti per eseguire una singola scansione, tale strumento impiega $< 0,3$ secondi. Questo permette di avere una manovra diagnostica in più con un dispendio di tempo minimo. Se si vuole ottenere una ricostruzione completa del volto del soggetto devono essere eseguite 3 scansioni: una centrale e una per ognuno dei due profili. È preferibile eseguire più scansioni così da avere la possibilità di scegliere le migliori. Il software associato allo scanner, attraverso algoritmi matematici, riesce ad unire le 3 scansioni in un unico file .STL/.OBJ, accorpandone due alla volta. Le scansioni possono essere eseguite con il paziente a bocca rilassata, oppure mentre sorride con/senza esposizione dei denti. È infine fondamentale che la posizione della testa del soggetto, durante la scansione, sia in naturale vera (natural head position), quindi né ruotata, né inclinata, con lo sguardo del paziente rivolto verso l'orizzonte. Per quanto riguarda l'applicazione clinica di questa tecnologia, la scansione 3D del volto può essere utilizzata durante la prima visita come strumento di valutazione preliminare del paziente pediatrico con necessità di trattamento ortodontico [45] essendo questa la sua applicazione clinica principale, poiché avendo alti valori di trueness e precision, può essere utile anche nella pianificazione virtuale del trattamento ed è in grado di anticipare in maniera digitale il risultato finale. Per questo tipo di applicazione però è necessaria l'integrazione dei dati acquisiti con scanner intraorale. Il software associato allo scanner permette inoltre di unire la scansione dei modelli delle arcate del soggetto con la scansione facciale con predicibilità e accuratezza, grazie a un dispositivo, simile a una forchetta da articolatore, che viene riconosciuto durante la scansione attraverso dei punti di repere esterni sui lati opposti. La rivalutazione del caso può essere eseguita in qualsiasi momento, avendo questo esame costo biologico pari a zero, oltre che indolore e non invasivo permettendo quindi di comprendere meglio, anche attraverso le sovrapposizioni delle scansioni precedenti, l'andamento del trattamento ortodontico del bambino. Il potenziale svantaggio è rappresentato dal costo dell'apparecchiatura, almeno fino al 2017. Oggi invece con l'introduzione del

riconoscimento biometrico facciale sulla stragrande maggioranza degli smartphone questo ostacolo è stato superato. Il riconoscimento facciale è ottenuto grazie ad uno scanner facciale a luce strutturata inserito nella fotocamera interna dello smartphone. La scansione si ottiene attraverso una tecnica chiamata “lidar”, che è simile al sonar (usato in campo marittimo). In sostanza, i dispositivi di scansione del viso proiettano una sorta di impulso laser, che si riflette sul viso e viene ripreso da una fotocamera IR (InfraRed) presente nel dispositivo. La fotocamera IR del telefono misura quanto tempo ci vuole affinché ogni bit di luce IR rimbalzi dal viso e ritorni sul dispositivo. Naturalmente, la luce che si riflette dal naso avrà un percorso più breve della luce che si riflette dalle orecchie, e la telecamera IR utilizza queste informazioni per creare una mappa di profondità unica dell'intero viso. In letteratura sono state comparate tipologie diverse di scanner facciali con costi diversi e scanner facciali di smartphone con le relative app di scansione ((iPhone Xs con l'app Bellus3D o Capture [46], È emerso che la precisione di uno scanner 3D è influenzata dalla durata della scansione. Probabilmente gli artefatti e imprecisioni sono causati dal movimento involontario dei muscoli facciali e della deviazione da un movimento puramente rotatorio della testa o dal dispositivo manuale attorno al viso. In conclusione, applicazioni per smartphone basate sulla tecnologia TrueDepth, rendono possibile ottenere modelli facciali 3D con un buon livello di accuratezza, da utilizzare per vari scopi nella pratica clinica odontoiatrica, come la previsualizzazione, la simulazione del trattamento, l'antropometria e l'analisi estetica. Risultano quindi portatili e meno costose, offrendo a ogni professionista la possibilità di introdurre i vantaggi della scansione facciale nella propria routine clinica. Per contro richiedono una maggiore precisione da parte dell'operatore e una maggiore compliance da parte del paziente a causa del maggiore tempo di acquisizione. Le nuove applicazioni per smartphone abbinare ai sensori TrueDepth mostrano risultati promettenti. Tuttavia, gli scanner facciali come 3dMDtrio Stereophotogrammetry System (3dMD) [47] rimangono il sistema più accurato e veloce per misurazioni dettagliate e può essere utilizzato in tutte le situazioni cliniche, anche in questo caso con bambini o pazienti non collaborativi nonostante rimangano dispositivi costosi e ingombranti.



Figura 1.8 (Ricostruzione del volto con scanner facciale)

1.8 Progettazione e simulazione digitale del sorriso:

Queste tipologie di software, di cui parleremo nel paragrafo successivo, consentono al clinico di simulare delle prestazioni prima ancora di intervenire sulla bocca del paziente. Nonostante i software di simulazione, al giorno d'oggi siano molteplici e connessi con altre tecnologie, come ad esempio gli ultimissimi software di simulazione con integrazione di realtà virtuale [48], hanno tutti lo scopo di motivare e sensibilizzare il paziente nel trattamento che svolgerà in futuro. È stato dimostrato, infatti, che l'utilizzo di questi software non solo migliora la comunicazione con il paziente, ma sono efficienti nel migliorare la cooperazione tra tutti gli specialisti che seguiranno quel determinato caso [49]. Nei successivi paragrafi prenderemo in considerazione due dei principali software in commercio, il DSD e l'Outcome simulator. Di entrambi descriveremo i principi alla base del loro funzionamento e le implicazioni cliniche che derivano dal loro utilizzo.

1.8.1 Digital smile design (DSD)

Negli ultimi 60 anni gli obiettivi terapeutici e le motivazioni che portano i pazienti dall'odontoiatra sono virate sempre più sull'estetica. Già nel 1969 era ben chiara la crescente attenzione verso l'estetica del sorriso e a ciò che rappresenta socialmente e psicologicamente. Proprio questa consapevolezza, accompagnata dall'assenza di materiale relativo agli atteggiamenti del paziente e ai desideri di trattamento estetico, ha determinato una crescente attenzione verso i principi base dell'estetica dentale. Di conseguenza già nel 1984 sono apparsi i primi studi che andavano ad indagare le caratteristiche di base in grado di rendere un sorriso più attraente. Sono così emersi nel tempo principi universalmente accettati che rendono un sorriso più attraente e armonioso.

Le caratteristiche fondamentali su cui si è posto il focus che determinano l'estetica di un sorriso sono:

- 1- Andamento dei margini incisali degli incisivi centrali mascellari rispetto all'andamento del labbro inferiore;
- 2- Rapporto tra altezza e larghezza degli incisivi centrali mascellari;
- 3- Proporzione tra i denti anterosuperiori;
- 4- Assenza di diastemi;
- 5- Andamento della festonatura gengivale;
- 6- Altezza sorriso ed esposizione gengivale;
- 7- Corridoi labiali;
- 8- Angolazione dei denti e linea mediana;
- 9- Forma e colore degli elementi dentali [50, 51]

Nella pianificazione di un trattamento ortodontico e/o riabilitativo, oltre a fare un'analisi del sorriso e delle sue caratteristiche è fondamentale rapportare queste informazioni alle caratteristiche del volto del paziente oltre che all'età, al sesso, e alla personalità. Per ottenere risultati estetici predicibili è nato il Digital Smile Design (DSD): uno strumento concettuale multiuso che può rafforzare la visione diagnostica, migliorare la comunicazione con il paziente e tra gli operatori e aumentare la predicibilità di un trattamento. Con la nascita di quest'ultimo, i clinici non sono più obbligati a scegliere arbitrariamente parametri estetici, ricercando tra la moltitudine di articoli presenti in letteratura basati sul parere di altri clinici o tecnici. Un paziente che dubita costantemente del risultato finale del trattamento, che è una procedura irreversibile, può essere motivato ed educato attraverso la tecnica del Digital Smile Design (DSD). Il DSD, quindi, è uno strumento che viene utilizzato per progettare e modificare digitalmente il sorriso dei pazienti e aiutarli a visualizzarlo in anticipo creando e presentando un mockup digitale del loro nuovo design del sorriso, prima che il trattamento inizi fisicamente. Aiuta nella comunicazione visiva e nel coinvolgimento dei pazienti nel proprio processo di progettazione del sorriso, aumentando così le percentuali di accettazione del caso. Il DSD permette, attraverso il disegno di linee e forme su foto intra e extra orali con qualsiasi software di presentazione, un'attenta analisi delle caratteristiche facciali e dentali del paziente, insieme a eventuali fattori critici, che potrebbero essere stati tralasciati durante

le procedure di valutazione clinica, fotografica e diagnostiche basate sul gesso. Attraverso questi riferimenti andiamo a rapportare i principi di estetica del sorriso nella bocca e sul

viso del paziente. Inoltre, le precise informazioni ricavate dalla progettazione del sorriso digitale aiutano il clinico a formulare un piano di trattamento ideale ed in più possono essere trasferite su un modello tridimensionale. Da quest'ultimo saranno ricavate delle mascherine con le quali è possibile “stampare” della resina provvisoria, direttamente nella bocca del paziente, il quale potrà indossare il suo nuovo sorriso e pre-visualizzare direttamente nella sua bocca il risultato finale, senza aver ancora iniziato le cure! Sebbene la maggior parte dei principi siano su base scientifica, il protocollo di trattamento non dovrebbe essere applicato universalmente, ma fungere da punto di partenza perché il concetto di bellezza varia in modo significativo. Pertanto, tutti i principi devono essere oggetto di discussione tra medici e pazienti in modo da garantire una pianificazione estetica individualizzata e soddisfacente. Christian Coachman nel 2017 ha proposto questa evoluzione in generazioni:

❖ **Generazione 1. Disegni analogici su foto e nessun collegamento al modello analogico.**

Era il momento in cui il disegno con la penna veniva eseguito su una copia stampata delle fotografie per visualizzare il risultato del trattamento, ma ciò non poteva essere correlato al modello di studio. L'odontoiatria digitale non era ancora stata introdotta.

❖ **Generazione 2: Disegni digitali 2D e collegamento visivo al modello analogico.**

Con l'avvento del mondo digitale, alcuni software come PowerPoint consentivano il disegno digitale. Sebbene non fosse specifico per l'odontoiatria e si limitasse al disegno in due dimensioni, era più accurato e richiedeva meno tempo rispetto al disegno a mano. Il disegno poteva essere collegato visivamente al modello di studio, ma mancava ancora la connessione fisica.

❖ **Generazione 3: Disegni 2D digitali e collegamento analogico al modello.** Questo fu l'inizio della connessione digitale-analogica.

Dopo l'inserimento di questa connessione digitale-analogica, ci furono altre innovazioni nel DSD e per ogni generazione venivano introdotte novità fino ad arrivare alla VI generazione dove per la prima volta è stato introdotto il concetto di 4D con l'aggiunta del movimento. La tecnica DSD viene eseguita da apparecchiature digitali già prevalenti nell'attuale studio dentistico, come un computer con uno dei software DSD, una fotocamera digitale SLR o anche uno smartphone [51]. Un'accurata documentazione fotografica è essenziale in quanto l'analisi facciale e dentale completa si basa su fotografie preliminari su cui vengono formulate modifiche, è necessaria una documentazione video per l'analisi dinamica di denti, gengiva, labbra e viso durante il sorriso, la risata e il parlare al fine di integrare i principi guidati dal viso al design del sorriso.

1.9 Il paziente virtuale

Al giorno d'oggi grazie ad un completo sviluppo ed evoluzione dell'odontoiatria digitale, è possibile creare un vero e proprio paziente virtuale. L'intero piano di trattamento viene ad essere simulato in modo non invasivo, condiviso tramite strumenti di comunicazione mediati dalla rete e adattato in base alle aspettative del paziente. I dati forniti dai nostri strumenti digitali possono essere integrati al fine di avere una visione d'insieme più completa del paziente. Inoltre, questo approccio ci permette di avere innumerevoli vantaggi nella pianificazione del trattamento e quindi nei risultati ottenibili [48]. Nel mondo reale, la combinazione della triade di diverse strutture del tessuto craniofacciale (scheletro facciale, tessuti molli extraorali e dentizione compresi i tessuti molli intraorali circostanti) in una singola entità rimane complessa. Non solo le strutture anatomiche sono uniche in natura; inoltre, i corrispondenti dati 3D digitali ottenuti dalla radiologia e dalle tecniche di scansione differiscono nella tipologia di dati. La replica di un paziente virtuale 3D richiede la fusione di diversi dispositivi di imaging e formati di dati di seguito esposti:

- **CBCT** utilizza file formato DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), un formato standard generale per la manipolazione, l'archiviazione, la stampa e la trasmissione di informazioni;

- **Lo scanner extraorale** cattura i dettagli del viso ed i dati sono solitamente memorizzati come file formato OBJ, un formato di definizione geometrica ampiamente accettato, che rappresenta le informazioni 3D sul colore e sulla trama;
- **Lo scanner intraorale** usa file formato STL (linguaggio di tessellazione superficiale o stereolitografia), che descrivono geometrie superficiali triangolari di oggetti 3D ma memorizzano dati senza informazioni sul colore [50]. La parte più difficile nella creazione del clone digitale è senza dubbio il matching di file diversi. Recentemente, sono stati proposti networks basati sull'intelligenza artificiale per la fusione automatica della scansione intraorale, facciale e delle immagini CBCT senza alcun intervento umano. Tuttavia, sono necessarie ulteriori ricerche per perfezionarne l'accuratezza [51]. Come già detto il paziente pediatrico trarrà profitto da un metodo che non include radiazioni ionizzanti ed è completamente non invasivo, veloce e facilmente allineabile in un modello 3D. Inoltre, la procedura potrebbe essere ripetuta in qualsiasi momento e consentirebbe la documentazione per i follow-up. Fino a poco tempo fa si è parlato di virtualizzazione statica, ossia l'importazione all'interno di un ambiente virtuale di tutte le caratteristiche muscolo-scheletriche dentali dei pazienti. Oggi l'odontoiatria sta raggiungendo un risultato fino ad ora impensabile: la virtualizzazione dinamica. Poter usufruire della virtualizzazione dinamica significa ottenere un vero e proprio "avatar" responsivo del paziente, con il quale i dentisti possono interagire. Con la virtualizzazione dinamica gli odontoiatri potranno avere il paziente sempre in poltrona, e il paziente potrà passare in studio solo il tempo strettamente necessario. Per concludere, l'utilizzo del paziente virtuale come piattaforma consente lo sviluppo di un piano di trattamento digitale, la progettazione su schermo e la simulazione di modelli virtuali per l'istruzione e la comunicazione in ambito odontoiatrico

CAPITOLO II: PRINCIPI, TECNOLOGIE E APPLICAZIONI DEL DENTAL MONITORING.

2.1 Origini e sviluppo del Dental Monitoring

Il Dental Monitoring (DM) rappresenta una delle innovazioni più significative nel campo della digitalizzazione e del monitoraggio digitale, poiché consente al clinico di seguire l'andamento

terapeutico del paziente in tempo reale, migliorando la qualità del trattamento e riducendo la necessità di appuntamenti in presenza.

Dental Monitoring è una piattaforma innovativa basata su intelligenza artificiale (IA) che permette di seguire il trattamento ortodontico a distanza, trasformando lo smartphone del paziente in uno scanner dentale per monitorare l'andamento dei trattamenti (come allineatori trasparenti o apparecchi) tra una visita e l'altra attraverso un'app dedicata e un dispositivo (Scanbox), l'IA analizza foto e video inviati dal paziente, consentendo all'ortodontista di controllare la conformità, l'igiene orale e i progressi, riducendo le visite inutili in studio. [52]

I punti chiave di questa tecnologia sono:

Monitoraggio continuo: Il medico può osservare costantemente l'evoluzione del trattamento, non solo durante gli appuntamenti in studio.

Intelligenza Artificiale (IA): L'IA analizza i dati per rilevare problemi, disagi o mancata conformità, inviando notifiche in tempo reale all'ortodontista.

Vantaggi per il paziente: riduzione numero appuntamenti, maggiore comodità, controllo del progresso e comunicazione diretta col medico.

Efficienza dello Studio: Consente agli odontoiatri di ottimizzare il flusso di lavoro e migliorare la qualità delle cure.

Gli algoritmi di IA vengono generati attraverso database di immagini intraorali per riconoscere pattern specifici di movimento dentale, disallineamenti o problematiche legate alla compliance del paziente. Secondo Levrini et al. (2021) [53], l'IA è in grado di identificare con buona precisione microvariazioni nella posizione dentale — spesso inferiori a 0,2 mm — difficilmente riconoscibili a occhio nudo. In particolare, l'applicazione dell'AI-based Computer Vision consente di:

- rilevare segni precoci di problemi parodontali o carenze di igiene orale (Richert et al., 2020).
- valutare la corretta posizione degli allineatori trasparenti,
- stimare il grado di avanzamento del trattamento rispetto alla pianificazione digitale,

Va sottolineato che, nonostante l'alto livello di automazione, la responsabilità clinica rimane del professionista, che interpreta i risultati dell'algoritmo e decide le azioni correttive da intraprendere. L'intelligenza artificiale non sostituisce il giudizio clinico, ma lo integra come uno strumento di supporto decisionale.

2.2 Protocollo Observational Monitoring

Il protocollo di Observational Monitoring (Monitoraggio Osservazionale) di Dental Monitoring è progettato specificamente per i pazienti in età pediatrica (generalmente dai 6 anni in su) che non sono ancora pronti per un trattamento attivo, ma che necessitano di una supervisione costante durante la crescita.

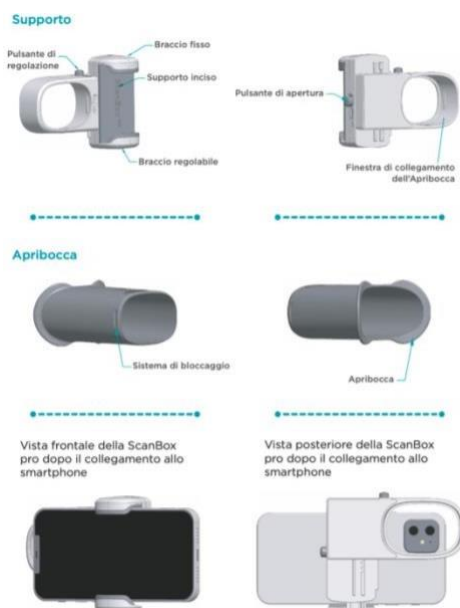
Ecco come funziona tecnicamente questo protocollo:

1. Fase di Osservazione Attiva

Invece di limitarsi a visite semestrali in studio, il bambino entra in un programma di monitoraggio remoto. L'obiettivo è sorvegliare lo sviluppo della dentatura decidua e mista, intercettando il momento esatto ("finestra di opportunità") in cui intervenire con l'odontoiatra pediatrico.

2. Funzionamento del Protocollo

Scansioni Periodiche: fase in cui i genitori effettuano scansioni della bocca del bambino da casa utilizzando lo ScanBox e l'App dedicata. La frequenza è stabilita dal medico (es. ogni 1-3 mesi). Il processo di acquisizione delle immagini rappresenta uno dei momenti cruciali del Dental Monitoring che utilizza algoritmi di elaborazione delle immagini per analizzare le immagini del cavo orale. Le scansioni vengono effettuate utilizzando l'App DM e uno smartphone. Il paziente è istruito a realizzare scansioni intraorali mediante la fotocamera del proprio smartphone, inserita nello strumento di posizionamento ScanBox.



Una volta scaricata l'app sul proprio smartphone il paziente lo inserisce in un apribocca della dimensione adatta del paziente stesso e viene guidato passo dopo passo da segnali guida ad effettuare la scansione, garantendo così la standardizzazione delle immagini.



Una volta caricate nel sistema, le fotografie vengono processate automaticamente per verificare la corretta sovrapposizione con i modelli digitali di riferimento. Gli algoritmi segmentano i denti e la gengiva, calcolando spostamenti tridimensionali e rilevando lo stato di salute orale.

Secondo un recente studio clinico [54], questo processo offre un'elevata affidabilità nella rilevazione del movimento dentale, con un margine di errore medio inferiore a 0,5 mm rispetto alla valutazione clinica diretta.

In caso di variazioni anomale o condizioni cliniche patologiche, il software invia un alert al clinico, che può decidere se anticipare una visita, modificare la sequenza terapeutica o semplicemente monitorare l'evoluzione nel tempo.

2.3 Parametri Monitorati dall'IA:

Nel protocollo Observational Monitoring l'intelligenza artificiale analizza automaticamente l'eruzione dei denti e la crescita del piccolo paziente, segnalando parametri come:

- *Eruzione dei denti permanenti*: Verifica se i denti stanno erompendo correttamente o se ci sono ritardi di permuta.
- *Esfoliazione dei denti decidui*: Monitoraggio della permuta.
- *Spazio in arcata*: Rilevazione precoce di affollamento o mancanza di spazio.
- *Igiene Orale*: Controllo costante della placca e della salute gengivale, fondamentale nei

bambini.

2.4 Gestione Clinica e Comunicazione

L'introduzione di piattaforme digitali come questa, Dental Monitoring (DM), ha determinato un cambiamento sostanziale non solo nel modo in cui vengono gestiti i trattamenti ortodontici, ma anche nel modo in cui si struttura la relazione e la comunicazione tra clinico e paziente. Questa tecnologia consente di combinare l'efficienza della gestione digitale con la continuità del rapporto umano, ridefinendo la dinamica temporale e comunicativa della cura odontoiatrica [54] [55] Attraverso degli "Alert" per il Medico è possibile notare infatti se l'IA rileva un'anomalia (es. un dente permanente che spunta in posizione errata), casi in cui riceve una notifica immediata sulla sua dashboard.

I principali vantaggi saranno inoltre:

Ottimizzazione delle Visite: Il bambino viene chiamato in studio solo quando è effettivamente necessario intervenire, riducendo le visite "di solo controllo" che possono risultare stressanti o inutili.

Coinvolgimento del Bambino: L'uso della tecnologia trasforma il monitoraggio in un'esperienza interattiva, migliorando la collaborazione e l'educazione all'igiene orale fin da piccoli.

Questo sistema permette una prevenzione personalizzata e assicura che il trattamento ortodontico inizi nel momento biologico ideale, evitando spesso terapie più lunghe e complesse in futuro.

Al momento non ci sono studi scientifici che descrivono l'efficacia di questo protocollo, ma solo studi sul monitoraggio del trattamento ortodontico attivo [56] e dimostrano:

- Riduzione delle visite in studio

Una revisione sistematica recente su 11 studi [57] mostra che l'uso di DM associato alla terapia ortodontica può ridurre il numero di visite in presenza (da ~1,7 a ~3,5 appuntamenti in meno) rispetto al follow-up tradizionale. Tuttavia, le evidenze sono eterogenee e molti studi hanno qualità metodologica bassa o moderata.

- Supporto alla gestione del trattamento

Studi pubblicati mostrano che DM può migliorare il controllo dell'igiene orale nel corso del trattamento, con migliore controllo della placca e riduzione dell'insorgenza di carie rispetto a gruppi non monitorati, quando integrato con protocolli di scansione mensile e analisi. [57]

- Accuratezza dell'algoritmo AI

Uno studio clinico recente ha valutato l'accuratezza dell'algoritmo AI di Dental Monitoring nel rilevare placca, gengivite e recessione: l'algoritmo presenta alta specificità ma bassa sensibilità, ovvero è più affidabile nel confermare la normale assenza di condizioni patologiche che nel rilevarle tutte. [58]

La letteratura non fornisce un unico protocollo osservazionale standardizzato, ma evidenzia principalmente due approcci:

- Protocolli di monitoraggio mensile o settimanale

In molti studi, i pazienti sono istruiti a eseguire scansioni intraorali con frequenza prestabilita (p.es. mensile) tramite app e ScanBox, secondo un protocollo:

scansione → caricamento → analisi AI → report per l'ortodontista, follow-up clinico adattato alle osservazioni DM, feedback al paziente per igiene o compliance.

- Protocolli personalizzati clinico-gestionali

Più recentemente, articoli clinici descrivono protocolli sviluppati dal clinico che combinano: condizioni target da monitorare (ad es. fit degli allineatori, progressione dei movimenti), soglie di intervento automatiche o semiautomatiche basate su notifiche, decisioni normative da parte dell'ortodontista basate sui dati DM raccolti. [58]

In Letteratura è presente un'eterogeneità metodologica: molti studi usano design diversi (prospettici, retrospettivi, piccoli campioni), rendendo difficile stabilire un protocollo unico e standardizzato.

Non esiste ancora un protocollo osservazionale universale standardizzato pubblicato nei principali database, ma la letteratura fornisce modelli di monitoraggio strutturati basati sulla frequenza delle scansioni, l'analisi AI e la gestione delle notifiche cliniche.

Il protocollo specifico adottato con Dental Monitoring dipende fortemente dalla pratica clinica e dall'obiettivo terapeutico, e deve essere supervisionato dal professionista

CAPITOLO III: PROTOCOLLO SPERIMENTALE

3.1 INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, l'intelligenza artificiale (IA) ha assunto un ruolo crescente in tutte le aree delle scienze mediche, trasformando radicalmente il modo in cui vengono raccolti, analizzati e interpretati i dati clinici. L'odontoiatria, tradizionalmente fondata sull'esperienza manuale e sull'osservazione diretta, sta progressivamente integrando tecnologie basate sull'IA per migliorare l'accuratezza diagnostica, ottimizzare i processi decisionali clinici e personalizzare l'approccio terapeutico [59]

Una delle frontiere più promettenti è rappresentata dalle piattaforme di monitoraggio remoto e diagnostica continua, come Dental Monitoring, che integrano l'IA con applicazioni mobili per

valutare nel tempo i cambiamenti dentali del paziente, trasformando la diagnostica da evento statico a processo dinamico.

In questo modo, l'intelligenza artificiale non si limita a interpretare immagini o dati clinici, ma partecipa attivamente alla sorveglianza e alla prevenzione delle patologie, consentendo diagnosi più precoci e interventi tempestivi. Un nuovo protocollo che abbiamo valutato nel nostro studio è *Observational Monitoring*, che consiste nel raccogliere dati e osservazioni cliniche riguardanti l'evoluzione di una condizione o di un trattamento, senza modificare attivamente il protocollo terapeutico in corso.

È un approccio "passivo", ma metodologicamente rigoroso, che serve a valutare ciò che accade nella pratica reale (*real-world data*) piuttosto che in condizioni sperimentali controllate, un approccio basato sull'osservazione sistematica e continua del paziente, senza interventi immediati, finalizzato a valutare l'evoluzione naturale della condizione clinica o del trattamento.

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di validare la metodologia proposta dal software *Observational Monitoring* analizzando un gruppo di 20 bambini e monitorandoli sia clinicamente sia attraverso il software con i seguenti obiettivi: valutare quali condizioni cliniche di salute orale rileva l'IA rispetto all'osservatore ; valutare se l'IA ha una percentuale di valutazione diagnostica maggiore rispetto all'osservatore e se grazie al monitoraggio aumenta la comprensione e compliance del paziente.

Materiali e Metodi

Sono stati analizzati 20 pazienti di età media di 10,5 anni, compresa tra 9 e 12 anni, 50% maschi e 50% femmine con i seguenti criteri di inclusioni: dentizione mista, non necessità di trattamento ortodontico nel periodo di monitoraggio e consenso dei genitori firmato; e con i seguenti criteri di esclusione: eventuali patologie sistemiche e necessità di trattamento ortodontico immediato.

I pazienti sono stati osservati in prima visita (T0) - dopo 6 mesi (T1) e dopo un anno (T2).

Per ogni paziente è stata eseguita una visita ambulatoriale dall'osservatore di valutazione generale dello stato di salute orale in cui sono state evidenziate sei condizioni cliniche del paziente:

- 1- Lieve quantità di placca dentale
- 2- Tartaro dentale persistente
- 3- Lieve residuo di cibo
- 4- Gengivite lieve
- 5- Igiene orale soddisfacente
- 6- Macchie sui denti

La stessa valutazione è stata eseguita dall'IA, attraverso le scansioni che il paziente ha effettuato da remoto in autonomia.

Il trattamento dei dati nel Observational Monitoring è conforme al Regolamento Europeo 2016/679 (GDPR) e alle normative HIPAA per la gestione sanitaria digitale.

Le immagini vengono criptate, anonimizzate e archiviate su server certificati ISO 27001.

La responsabilità del clinico rimane centrale: ogni utilizzo della tecnologia richiede il consenso informato specifico del paziente, che deve essere consapevole del trasferimento dei propri dati su una piattaforma esterna [60].

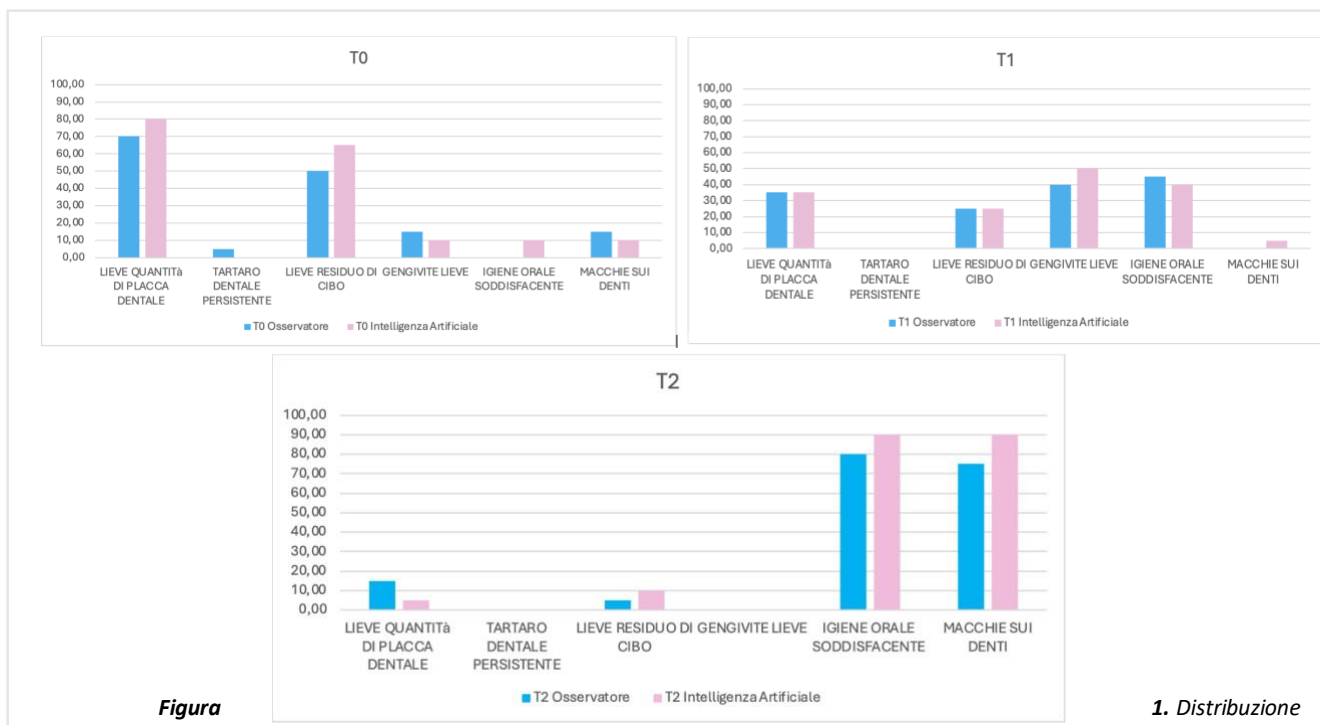
Analisi Statistica

È stata effettuata un'analisi descrittiva di tutte le variabili investigate. Le variabili categoriche sono state espresse come frequenze assolute e percentuali e i confronti tra le stesse sono stati effettuati attraverso il test del chi-quadro (χ^2) o il test esatto di Fisher, come appropriato. Sono stati effettuati i confronti tra le diagnosi formulate dall'osservatore e quelle ottenute mediante intelligenza artificiale al tempo T₀, T₁ e T₂. Il grado di accordo tra osservatore e intelligenza artificiale per le variabili cliniche (quantità di placca, tartaro dentale persistente, lieve residuo di cibo, gengivite lieve, igiene orale soddisfacente e presenza di macchie dentali) è stato valutato mediante il coefficiente kappa di Cohen, riportando le percentuali di accordo.

I dati sono stati elaborati utilizzando il pacchetto statistico **STATA/BE 18.0**. Il livello di significatività statistica è stato fissato a $p < 0,05$.

Risultati

Nel presente studio, per ciascuno dei tre tempi di osservazione (T₀, T₁ e T₂), sono stati valutati 20 pazienti da un operatore sanitario e il sistema di intelligenza artificiale Observational Monitoring. Per ogni paziente sono state registrate le diagnosi relative a tutte le variabili considerate, ovvero quantità di placca, tartaro dentale persistente, lieve residuo di cibo, gengivite lieve, igiene orale soddisfacente e presenza di macchie dentali. Poiché ciascuna variabile è stata valutata dall'operatore e dall'intelligenza artificiale, ogni tempo di osservazione ha prodotto un totale di 40 valutazioni per variabile, consentendo un confronto diretto tra le due modalità di valutazione. Le percentuali relative ai sei indicatori descritti dall'osservatore e dall'intelligenza artificiale, nei tre intervalli di tempo, sono riportati nella figura 1.



L'analisi dei dati raccolti al tempo iniziale T0 mostra un livello di concordanza complessivamente modesto tra le valutazioni dell'osservatore e quelle generate dall'intelligenza artificiale. Le percentuali di accordo oscillano infatti tra il 40% e il 57,5%, con valori di p non significativi (tutti $p > 0,05$). La quantità di placca presenta un accordo del 40% ($p = 0,465$), mentre la gengivite lieve raggiunge il 47,5% ($p = 0,633$). Le performance risultano leggermente migliori per il lieve residuo di cibo, che mostra un accordo del 57,5% ($p = 0,337$). Nel complesso, T0 evidenzia come l'IA tenda a discostarsi maggiormente dall'osservatore nelle condizioni cliniche più sfumate, mentre appare più allineata nelle valutazioni più nette. La kappa di Cohen conferma un'affidabilità compresa tra il 42% e il 55%, coerente con un livello di concordanza scarso-moderato [61] (Tabella 1).

Tabella 1. Analisi descrittiva delle diagnosi ricevute dall'osservatore che dall'intelligenza artificiale al tempo iniziale (T0) e il grado di accordo

T0					
	Total n=40	Osservatore n=20	Intelligenza artificiale n=20	p-value	Grado di accordo
Quantità di placca, n %				0.465*	55%
Presente	30 (75.00)	14 (70.00)	16 (80.00)		
Assente	10 (25.00)	6 (30.00)	4 (20.00)		
Tartaro dentale persistente, n %				0.548*	52.50%
Presente	3 (7.5)	1 (5.00)	2 (10.00)		
Assente	37 (92.5)	19 (95)	18 (90.00)		
Lieve residuo di cibo, n %				0.337	57.50 %
Presente	23 (57.5)	10 (50.00)	13 (65.00)		
Assente	13 (32.5)	10 (50.00)	7 (35.00)		
Gengivite lieve, n %				0.633*	47.50 %
Presente	5 (12.50)	3 (15.00)	2 (10.00)		
Assente	35 (87.50)	17 (85.00)	18 (98.00)		
Igiene orale soddisfacente, n %				0.147*	55.00%
Presente	2 (5.00)	0 (0.00)	2 (10.00)		
Assente	38 (95.00)	20 (100.00)	18 (98.00)		
Macchie sui denti, n%				0.633*	47.50%
Presente	5 (12.50)	3 (15.00)	2 (10.00)		
Assente	35 (87.50)	17 (85.00)	18 (90.00)		

Using χ^2 test

*Using exact test Fisher's

Al tempo T1 si osserva una maggiore stabilità nelle valutazioni, con un accordo che si mantiene intorno al 50–55% nelle diverse variabili. La quantità di placca mostra una perfetta simmetria tra osservatore e IA, con un accordo del 50,6% e un valore di $p=1,00$. Anche il lieve residuo di cibo presenta un accordo del 50% ($p=1,00$), mentre la gengivite lieve raggiunge il 55% ($p=0,521$), migliorando rispetto al tempo iniziale. Le variabili caratterizzate da una distribuzione sbilanciata, come le macchie dentali, mostrano un accordo del 52,5% ($p=0,311$), ma la scarsa variabilità dei dati limita la robustezza dell'analisi. Nel complesso, T1 suggerisce una maggiore coerenza tra i due sistemi di valutazione, pur senza evidenziare un incremento sostanziale della concordanza (Tabella 2).

Tabella 2. Analisi descrittiva delle diagnosi ricevute dall'osservatore che dall'intelligenza artificiale al tempo uno (T1) e il grado di accordo.

T1					
	Total (n)	Osservatore n (%)	Intelligenza artificiale n (%)	p-value	Grado di accordo*
Quantità di placca, n %				1.00	50.60
Presente	14 (35.00)	7 (35.00)	7 (35.00)		
Assente	26 (65.00)	13 (65.00)	13 (65.00)		
Tartaro dentale persistente, n %				-	50.00
Presente	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)		
Assente	20 (50.00)	20 (100.00)	20 (100.00)		
Lieve residuo di cibo, n %				1.00	50.00
Presente	10 (25.00)	5 (25.00)	5 (25.00)		
Assente	30 (75.00)	15 (75.00)	15 (75.00)		
Gengivite lieve, n %				0.521	55.00
Presente	18 (45.00)	8 (40.00)	10 (50.00)		
Assente	22 (55.00)	12 (60.00)	10 (50.00)		
Igiene orale soddisfacente, n %				0.749	47.50
Presente	17 (42.50)	9 (45.00)	8 (40.00)		
Assente	23 (57.50)	11 (55.00)	12 (60.00)		
Macchie sui denti, n%				0.500*	52.50
Presente	1 (2.50)	0 (0.00)	1 (5.00)		
Assente	39 (97.50)	20 (100.00)	19 (95.00)		

Using χ^2 test

*Using exact test Fisher's

Al tempo finale T2 l'accordo rimane sovrapponibile a quello osservato nei tempi precedenti, con valori compresi tra il 40% e il 55% e p-value nuovamente non significativi. La quantità di placca torna a mostrare un accordo del 40% ($p=0,465$), mentre il tartaro dentale persistente raggiunge il 52,5% ($p=0,548$). Per il lieve residuo di cibo non è possibile effettuare una valutazione dell'accordo, poiché la condizione risulta assente in tutti i soggetti. La gengivite lieve mantiene un accordo del 55% ($p=0,525$), confermando la stabilità del dato rispetto a T1. Anche in questo caso, la variabile "macchie sui denti" presenta una distribuzione sbilanciata che limita l'interpretazione (accordo 52,5%, $p=0,311$). Nel complesso, T2 conferma un livello di concordanza costante e moderato, senza evidenziare miglioramenti nel tempo (Tabella 3).

Tabella 3. A descriptive analysis of the diagnosis received by the observer and by artificial intelligence at the final time (T2) and the degree of agreement.

T2					
	Total (n)	Osservatore n (%)	Intelligenza artificiale n (%)	p-value	Grado di accordo
Quantità di placca, n %				0.465*	40.00%
Presente	4 (10.00)	3 (15.00)	1 (5.00)		
Assente	36 (90.00)	17 (85.00)	19 (95.00)		
Tartaro dentale persistente, n %				-	50.00%
Presente	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)		
Assente	40 (100)	20 (100)	20 (100)		
Lieve residuo di cibo, n %				0.548*	52.50%
Presente	3 (7.50)	1 (5.00)	2 (10.00)		
Assente	37 (92.50)	19 (95.00)	18 (90.00)		
Gengivite lieve, n %				-	50.00 %
Presente	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)		
Assente	40 (100)	20 (100)	20 (100)		
Igiene orale soddisfacente, n %				0.376*	55.00 %
Presente	34 (85.00)	16 (80.00)	18 (90.00)		
Assente	6 (15.00)	4 (20.00)	2 (10.00)		
Macchie sui denti, n%				0.212*	42.50 %
Presente	33 (2.50)	15 (75.00)	18 (90.00)		
Assente	7 (97.50)	5 (25.00)	2 (10.00)		

Using χ^2 test

*Using exact test Fisher's

Confrontando complessivamente tutti i dati nei tre tempi di osservazione e riportandoli nella tabella riassuntiva (Tabella 4), emerge un quadro coerente con quanto osservato nelle singole analisi: l'accordo tra osservatore e intelligenza artificiale rimane costantemente modesto, senza variazioni significative nel tempo e con valori di concordanza che si collocano stabilmente nella fascia bassa-moderata.

Tabella 4. Confronto complessivo tra osservatore e IA nei tre tempi osservati (T0, T1 e T2)

	Osservatore n (%)	Intelligenza artificiale n (%)	P-value*
Quantità di placca presente, n %			
T0	14 (70.00)	16 (80.00)	0.358
T1	7 (35.00)	7 (35.00)	0.629
T2	3 (15.00)	1 (5.00)	0.302*
Tartaro dentale persistente presente, n %			
T0	1 (5.00)	2 (10.00)	0.500*
T1	0 (0.00)	0 (0.00)	-
T2	0 (0.00)	0 (0.00)	-
Lieve residuo di cibo presente, n %			
T0	10 (50.00)	13 (65.0)	0.262
T1	5 (25.00)	5 (25.00)	0.642
T2	1 (5.00)	2 (10.00)	0.500*
Gengivite lieve presente, n %			
T0	3 (15.00)	2 (10.00)	0.500*
T1	8 (40.00)	10 (50.00)	0.376
T2	0 (0.00)	0 (0.00)	-
Igiene orale soddisfacente presente, n %			
T0	0 (0.00)	2 (10.00)	0.244*
T1	9 (45.00)	8 (40.00)	0.500
T2	16 (40.00)	18 (40.00)	0.331
Macchie sui denti presente, n%			
T0	3 (15.00)	2 (10.00)	0.500*
T1	0 (0.00)	1 (5.00)	0.500*
T2	15 (75.00)	18 (90.00)	0.204

Using χ^2 test

*Using exact test Fisher's

DISCUSSIONE

L'IA si basa su algoritmi in grado di imitare i processi cognitivi umani -apprendimento, ragionamento e riconoscimento di pattern — mediante l'elaborazione automatica di grandi quantità di dati. In ambito odontoiatrico, queste tecnologie vengono applicate in diverse fasi del percorso diagnostico: dall'analisi radiografica e tridimensionale delle strutture dento-facciali, al rilevamento automatizzato di lesioni cariose, anomalie ossee e patologie parodontali, fino alla previsione dei risultati terapeutici [63]

Dall'analisi dei dati emerge una buona concordanza complessiva tra le valutazioni dell'osservatore umano e quelle restituite dal sistema di intelligenza artificiale, con valori di indice Kappa di Cohen e Gwet's AC1 compresi nella fascia di "substantial" o "almost perfect agreement" secondo la scala di Landis e Koch (1977).

Tali risultati suggeriscono che l'algoritmo impiegato nel Dental Monitoring è in grado di riprodurre con elevata affidabilità il giudizio clinico esperto, riducendo la variabilità inter-osservatore e ottimizzando la standardizzazione delle valutazioni [53] [54]

In particolare, la concordanza risulta più elevata nei casi in cui i parametri analizzati sono morfometrici e oggettivi (come l'allineamento dentale, la distanza intercanina, la posizione dei punti di contatto), mentre tende a diminuire leggermente nelle valutazioni più soggettive, come la qualità dell'igiene orale o l'aspetto dei tessuti gengivali.

Questo riflette i limiti attuali dei sistemi di AI nel riconoscere pattern complessi contestualizzati all'interno di variabilità anatomiche individuali [63].

Nel presente studio, i valori ottenuti superiori a 0.75 (indicativi di "accordo sostanziale") dimostrano che le decisioni diagnostiche o le classificazioni automatiche del sistema AI risultano sovrapponibili a quelle del clinico, con una differenza minima e statisticamente non significativa.

Il calcolo della varianza di Gwet AC1 (Gwet, 2021) conferma la stabilità della misura di concordanza, evidenziando che la percentuale di disaccordo tra l'AI e l'osservatore umano è circoscritta e attribuibile più a variazioni marginali di soglia interpretativa che a errori sistematici.

Ciò è particolarmente importante in ortodonzia, dove la ripetibilità della misurazione è essenziale per valutare la progressione del trattamento.

I risultati mostrano che l'IA può funzionare come strumento diagnostico ausiliario altamente affidabile, capace di supportare il clinico nella valutazione di grandi quantità di immagini, riducendo il tempo di analisi e la soggettività.

L'elevata concordanza evidenzia come la tecnologia possa essere utile sia nella diagnosi iniziale che nel monitoraggio dinamico dei cambiamenti clinici (Dental Monitoring, 2023).

Nonostante gli ottimi risultati di coerenza, in alcune variabili è stato osservato un abbassamento della concordanza tra osservatore e AI.

Tali discrepanze possono avere diverse spiegazioni:

Differenze nelle condizioni di acquisizione delle immagini, che influenzano la qualità del dataset elaborato dall'AI;

Soggettività dell'interpretazione clinica, che può introdurre variazioni individuali difficili da riprodurre in modo algoritmico;

Limitazioni intrinseche dell'AI nell'analisi di pattern complessi, soprattutto nelle fasi in cui la morfologia dentale è alterata da movimenti in corso o da artefatti visivi.

Questi limiti sono coerenti con quanto riportato da Al-Moghrabi et al. (2020)[58] e Fleming et al. (2022), che segnalano come la performance dell'intelligenza artificiale sia eccellente in contesti standardizzati ma ancora migliorabile nell'adattamento ai casi clinici complessi.

Dal punto di vista pratico, il livello di concordanza ottenuto indica che i sistemi di IA come Dental Monitoring possono essere utilizzati con affidabilità come strumenti di supporto diagnostico, in grado di velocizzare l'analisi dei dati e migliorare la presa di decisioni cliniche.

Ciò consente di implementare modelli di observational monitoring a distanza con una sicurezza comparabile all'osservazione diretta, offrendo notevoli vantaggi in termini di efficienza, accessibilità e continuità terapeutica.

Tuttavia, i dati sottolineano anche l'importanza di un controllo umano costante, indispensabile per interpretare criticamente i risultati prodotti dall'AI e per gestire le situazioni che richiedono un giudizio clinico esperienziale.

L'equilibrio tra automazione e supervisione resta quindi la chiave per un'integrazione efficace e sicura di queste tecnologie nella pratica odontoiatrica.

3.5 Conclusioni della discussione

In sintesi, i risultati confermano che la concordanza tra AI e osservatore umano è elevata e clinicamente significativa, supportando l'uso dell'intelligenza artificiale come strumento diagnostico complementare.

La tecnologia risulta particolarmente efficace nel rilevare variazioni oggettive e ripetibili, mentre richiede ulteriori sviluppi per la valutazione di aspetti più soggettivi o qualitativi.

Nel complesso, il Dental Monitoring e i sistemi analoghi di analisi AI rappresentano un'evoluzione concreta verso una odontoiatria predittiva, digitale e basata su dati oggettivi che facilitano la comprensione e la compliance del paziente durante le cure.

CONCLUSIONE

I risultati ottenuti dimostrano un'elevata concordanza tra l'osservatore umano e il sistema di intelligenza artificiale, confermando l'affidabilità dell'AI come strumento di supporto nella valutazione diagnostica odontoiatrica.

L'analisi evidenzia come l'algoritmo sia in grado di riprodurre con coerenza il giudizio clinico esperto, garantendo standardizzazione, ripetibilità e riduzione dell'errore soggettivo.

Pur richiedendo ancora la supervisione del professionista per le valutazioni più complesse, l'intelligenza artificiale rappresenta oggi una risorsa concreta per migliorare l'efficienza clinica, la precisione diagnostica e la qualità complessiva della gestione odontoiatrica digitale.

BIBLIOGRAFIA

- 1- (Infodent (2025), Intelligenza artificiale nella rilevazione della carie.)
- 2- Mendonça EA. Clinical decision support systems: Perspectives in dentistry. *J Dent Educ.* 2004;68(6):589–597.
- 3- Wirtschafter D, Carpenter JT, Mesel E. A consultant-extender system for breast cancer adjuvant chemotherapy. *Ann Intern Med.* 1979;90(3): 396–401
- 4- Rudin JL. DART (Diagnostic Aid and Resource Tool): A computerized clinical decision support system for oral pathology. Part 2. *Compendium.* 1995;16(1):8,10,12 passim; quiz 17.
- 5- Rudin JL. DART (Diagnostic Aid and Resource Tool): A computerized clinical decision support system for oral pathology. *Compendium.* 1994;15(10):1316,1318,1320 passim.
- 6- McKnight LK, Stetson PD, Chen ES, Cimino JJ. Improving clinical communication with a virtual whiteboard. *Proceedings/AMIA Annual Fall Symposium*, 2002.
- 7- Cross SS, Harrison RF, Kennedy RL. Introduction to neural networks. *Lancet.* 1995;346(8982):1075–1079.
- 8- Rennels GD, Shortliffe EH. Advanced computing for medicine. *Sci Am.* 1987;257:154–161.
- 9- Shortliffe EH. Computer programs to support clinical decision making. *JAMA.* 1987;258(1):61–66.
- 10- Walton JD, Musen MA, Combs DM, Lane CD, Shortliffe EH, Fagan LM. Graphical access to medical expert systems. III: Design of a knowledge acquisition environment. *Methods Inf Med.* 1987;26(3):78–88.
- 11- Rennels GD, Shortliffe EH, Stockdale FE, Miller PL. A computational model of reasoning from the clinical literature. *Comput Methods Programs Biomed.* 1987;24(2):139–149.
- 12- Heckerman DE, Horvitz EJ, Nathwani BN. Toward normative expert systems. Part I: The Pathfinder Project. *Methods Inf Med.* 1992;31(2):90–105.
- 13- Speight PM, Elliott AE, Jullien JA, Downer MC, Zakrzewska JM. The use of artificial intelligence to identify people at risk of oral cancer and precancer. *Br Dent J.* 1995;179(10):382–387.

- 14- Brickley MR, Shepherd JP. Performance of a neural network trained to make third-molar treatment-planning decisions. *Med Decis Making*. 1996;16(2):153–160. White SC. Computer-aided differential diagnosis of oral radiographic lesions.
- 15- White SC. Computer-aided differential diagnosis of oral radiographic lesions. *Dentomaxillofac Radiol*. 1989;18(2):53–59.
- 16- Hyman JJ, Doblecki W. Computerized endodontic diagnosis. *J Am Dent Assoc*. 1983;107:755–758.
- 17- Matsumura Y. RHINOS: A consultation system for diagnosis of headache and facial pain. *Comput Methods Programs Biomed*. 1986;23(1): 65–71.
- 18- Miller PL, Black HR. HT-ATTENDING: Critiquing the pharmacologic management of essential hypertension. *J Med Syst*. 1984;8(3):181–187.
- 19- Van der Lei J, Musen MA. A model for critiquing based on automated medical records. *Comput Biomed Res*. 1991;24(4):344–378.
- 20- Davenport JC, Hammond P, Hazlehurst P. Knowledge-based systems, removable partial denture design and the development of RaPiD. *Dent Update*. 1997;24(6):227–233.
- 21- Seok Ki J, Tae-Woo K. New approach for the diagnosis of extractions with neural network machine learning. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2016;149(1):127–133.
doi:10.1016/j.ajodo.2015.07.030
- 22- Takada K, Yagi M, Horiguchi E. Computational formulation of orthodontic tooth-extraction decisions. Part I: To extract or not to extract. *Angle Orthod*. 2009;79(5):885–891.
- 23- Gopal, G.; Suter-Crazzolara, C.; Toldo, L. Digital transformation in healthcare Architectures of present and future information technologies. *Clin. Chem. Lab. Med*. 2019, 57, 328–335. [CrossRef]
- 24- Ben-Sira, Z. Affective and instrumental components of the physician-patient relationship: An additional dimension of interaction theory. *Journal of Health and Social Behavior*, 1980; 21:170-180
- 25- Carrà M, Magrone G. *Gli standard in sanità*. 2007.
- 26- Di Resta F. *La sicurezza nei sistemi informativi sanitari*. 2010
- 27- Allan G. Farman Applying DICOM to Dentistry. *Journal of Digital Imaging* 2005 Mar;18(1):23-7.
- 28- Dolin RH, Alschuler L, Beebe C, Biron PV, Boyer SL, Essin D, Kimber E, Lincoln T, Mattison JE. *The HL7 Clinical Document Architecture*, 2001.

- 29- Francesconi M. Innovazione organizzativa e tecnologica in sanità. Il ruolo dell'Health Technology Assessment. Milano:
- 30- Sutton RT, Pincock D, Baumgart DC, Sadowski DC, Fedorak RN, Kroeker KI. An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success. *NPJ Digit Med.* 2020 Feb 6;3:17. doi: 10.1038/s41746-020-0221-y. PMID: 32047862; PMCID: PMC7005290.
- 31- Lo Giudice R, Famà F. Health Care and Health Service Digital Revolution. *Int J Environ Res Public Health.* 2020 Jul 8;17(14):4913. doi: 10.3390/ijerph17144913. PMID: 32650364; PMCID: PMC7400025.
- 32- Coachman C, Blatz MB, Bohner L, Sesma N. Dental software classification and dento-facial interdisciplinary planning platform. *J Esthet Restor Dent.* 2021 Jan;33(1):99- 106. doi: 10.1111/jerd.12713. Epub 2021 Jan 20. PMID: 33470496.
- 33- Ilić DV, Stojanović L. Application of digital radiography for measuring in clinical dental practice. *Srp Arh Celok Lek.* 2015 Jan-Feb;143(1-2):16-22. doi: 10.2298/sarh1502016i. PMID: 25845247.
- 34- O'Brien RT, Biller DS. Dental imaging. *Vet Clin North Am Equine Pract.* 1998 Aug;14(2):259-71. doi: 10.1016/s0749-0739(17)30197-9. PMID: 9742663.
- 35- Tucunduva RMA, Lopes IA, Shinohara AL, Lauris JRP, Rubira-Bullen IRF. Usefulness of Cone-Beam Computed Tomography Exams to Detect Foramen of Huschke in Diverse Age Group. *J Craniofac Surg.* 2019 Mar/Apr;30(2):e138-e141. doi: 10.1097/SCS.0000000000005069. PMID: 30570591.
- 36- Oenning AC, Jacobs R, Pauwels R, Stratis A, Hedesiú M, Salmon B; DIMITRA Research Group, <http://www.dimitra.be>. Cone-beam CT in paediatric dentistry: DIMITRA project position statement. *Pediatr Radiol.* 2018 Mar;48(3):308-316. doi: 10.1007/s00247-017-4012-9. Epub 2017 Nov 15. PMID: 29143199.
- 37- Mehta V, Ahmad N. Cone beamed computed tomography in pediatric dentistry: Concepts revisited. *J Oral Biol Craniofac Res.* 2020 Apr-Jun;10(2):210-211. doi:10.1016/j.jobcr.2020.03.013. Epub 2020 Apr 11. PMID: 32420015; PMCID: PMC7214934.
- 38- Akdeniz BG, Grondahl HG, Magnusson B. Precisione delle misurazioni della profondità della carie prossimale: confronto tra CBCT limitato, fosforo di stoccaggio e radiografia del film. *Carie Res.* 2006; 40 :202–207.
- 39- Saliniero FCS, Kobayashi-Velasco S., Braga MM, Cavalcanti MGP Diagnosi radiografica delle fratture radicolari: revisione sistemica, meta-analisi e fonti di eterogeneità. *Radiol Dentomaxillo-facciale.* 2017; 46

- 40- Al-Saleh MA, Alsufyani NA, Lagravere M. MRI da solo contro immagini registrate MRI-CBCT per valutare lo squilibrio interno dell'articolazione temporo-mandibolare. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 2016; 122 :638–645.
- 41- Beretta M, Federici Canova F, Zaffarano L, Gianolio A. Face Scan for Ceph 3D: a green way for diagnosis in children. *Eur J Paediatr Dent.* 2022 Sep;23(3):201-203. doi: 10.23804/ejpd.2022.23.03.06. PMID: 36172909.
- 42- Rudy HL, Wake N, Yee J, Garfein ES, Tepper OM. Three-Dimensional Facial Scanning at the Fingertips of Patients and Surgeons: Accuracy and Precision Testing of iPhone X Three-Dimensional Scanner. *Plast Reconstr Surg.* 2020 Dec;146(6):1407-1417. doi: 10.1097/PRS.00000000000007387.PMID: 33234980.
- 43- Levrini L, Tieghi G, Bini V. Invisalign ClinCheck and the Aesthetic Digital Smile Design Protocol. *J Clin Orthod.* 2015 Aug;49(8):518-24. PMID: 26332265. 25 Huang TK, Yang CH, Hsieh YH, Wang JC, Hung CC. Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) applied in dentistry. *Kaohsiung J Med Sci.* 2018 Apr;34(4):243-248. doi: 10.1016/j.kjms.2018.01.009. PMID: 29655414.
- 44- DiasNS, TsingeneF. SAEF Smile's aesthetic evaluation form: a useful tool to improve communication between clinicians and patients during multidisciplinary treatment. *Eur J Esthetic Dent.* 2011;6(2):160–176
- 45- Daher R, Ardu S, Vjero O, Krejci I. 3D digital smile design with a mobile phone and intraoral optical scanner. *Comp Cont Educ Dent.* 2018;39(6):e5–8.
- 46- Pan F, Yang Z, Wang J, Cai R, Liu J, Zhang C, Liao W. Influence of orthodontic treatment with premolar extraction on the spatial position of maxillary third molars in adult patients: a retrospective cohort cone-beam computed tomography study. *BMC Oral Health.* 2020 Nov 11;20(1):321. doi: 10.1186/s12903-020-01314-0. PMID: 33176777; PMCID: PMC7661228.
- 47- Hatabu H, Madore B. Dark-Field Chest X-ray Imaging: An Evolving Technique in the Century-Old History of Chest X-ray Imaging. *Radiology.* 2021 Nov;301(2):396- 397. doi: 10.1148/radiol.2021211603. Epub 2021 Aug 24. PMID: 34427468.
- 48- Gassert FT, Urban T, Frank M, Willer K, Noichl W, Buchberger P, Schick R, Koehler T, von Berg J, Fingerle AA, Sauter AP, Makowski MR, Pfeiffer D, Pfeiffer F. X- ray Dark-Field Chest Imaging: Qualitative and Quantitative Results in Healthy Humans. *Radiology.* 2021 Nov;301(2):389-395. doi: 10.1148/radiol.2021210963. Epub 2021 Aug 24. Erratum in: *Radiology.* 2023 Feb;306(2):e229037. PMID: 34427464.
- 49- Taylor JH. Uses of X-Ray Diagnosis, or Radiography in Dentistry. *Dent Regist.* 1922 Nov;76(11):505-508. PMID: 33703627; PMCID: PMC7861680.

- 50- Gassert FT, Urban T, Frank M, Willer K, Noichl W, Buchberger P, Schick R, Koehler T, von Berg J, Fingerle AA, Sauter AP, Makowski MR, Pfeiffer D, Pfeiffer F. X- ray Dark-Field Chest Imaging: Qualitative and Quantitative Results in Healthy Humans. *Radiology*. 2021 Nov;301(2):389-395. doi: 10.1148/radiol.2021210963. Epub 2021 Aug 24. Erratum in: *Radiology*. 2023 Feb;306(2):e229037. PMID: 34427464.
- 51- Taylor JH. Uses of X-Ray Diagnosis, or Radiography in Dentistry. *Dent Regist*. 1922 Nov;76(11):505-508. PMID: 33703627; PMCID: PMC7861680.
- 52- Al-Moghrabi, D., Salazar, F. C., Pandis, N., & Fleming, P. S. (2020). Remote monitoring of orthodontic patients: A comprehensive review of existing AI-based applications and their clinical relevance. *Journal of Orthodontics*, 47(3), 205–213. <https://doi.org/10.1177/1465312520947926>
- 53- Levrini, L., Mangano, A., Montemurro, N., & Caprioglio, A. (2021). Artificial intelligence in orthodontics: A new era of dental monitoring and digital treatment. *Dentistry Journal*, 9(9), 102. doi.org
- 54- Hansa, I., Semaan, S. J., Vaid, N. R., Ferguson, D. J., & Vaid, N. (2020). Clinical efficacy of remote orthodontic monitoring with Dental Monitoring technology: A prospective cohort study. *European Journal of Orthodontics*, 42(5), 559–564. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjaa042>
- 55- Borda, A. F., Garino, F., Rongo, R., & Dalle Carbonare, D. (2021). Patient satisfaction and clinical outcomes of orthodontic treatment monitored with a mobile application (Dental Monitoring®): A prospective study. *Progress in Orthodontics*, 22(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s40510-021-00359-7>
- 56- Castroflorio, T., Garino, F., Cugliari, G., & Deregibus, A. (2021). Effects of remote digital monitoring on oral hygiene of orthodontic patients: A prospective study. *Progress in Orthodontics*, 22(1), 46. <https://doi.org/10.1186/s40510-021-00374-8>
- 57- Sangalli L, Alessandri-Bonetti A, Dalessandri D. Effectiveness of dental monitoring system in orthodontics: A systematic review. *J Orthod*. 2024 Mar;51(1):28-40. doi: 10.1177/14653125231178040. Epub 2023 Jun 5. PMID: 37278017.
- 58- Al-Moghrabi, D., Garino, F., Faccio, F., Cugliari, G., & Castroflorio, T. (2021). Effectiveness of AI-driven remote monitoring technology in improving oral hygiene during orthodontic treatment. *Journal of Clinical Medicine*, 10(12), 2765. <https://doi.org/10.3390/jcm10122765>
- 59- Schwendicke, F., Krois, J., & Gomez, J. (2020). Artificial intelligence in dentistry: Chances and challenges. *Journal of Dental Research*, 99(7), 769–774. <https://doi.org/10.1177/0022034520915714>
- 60- Papandrea, A., Marino, G., Lombardo, L., & Siciliani, G. (2022). Data protection and privacy in teleorthodontics: Ethical and legal implications of digital monitoring systems. *Journal of Digital Dentistry*, 13(3), 157–164.

61- Gwet KL. Large-Sample Variance of Fleiss Generalized Kappa. *Educ Psychol Meas.* 2021 Aug;81(4):781-790. doi: 10.1177/0013164420973080. Epub 2021 Feb 15. PMID: 34267400; PMCID: PMC8243202.)

62- Park, W. J., & Park, J. B. (2021). Applications of artificial intelligence in dentistry: Current trends and future perspectives. *Journal of Dental Sciences*, 16(3), 1184–1191. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2020.10.011>

63- Richert, R., Goujat, A., Venet, L., Viguie, G., Viennot, S., Robinson, P., Farges, J. C., & Ducret, M. (2020). Artificial intelligence in dentistry: Current applications and future perspectives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), 9050. <https://doi.org/10.3390/ijerph17239050>