



World Health Organization

ILO – ICNIRP – WHO¹ Environmental Health Criteria 232

CAMPI STATICI

PREAMBOLO

Il programma *Criteri di sanità ambientale* dell'OMS

Nel 1973 è stato avviato il programma *Criteri di sanità ambientale* dell'OMS con i seguenti obiettivi:

1. mettere a punto informazioni sulle relazioni tra esposizione a inquinanti ambientali e salute umana, e fornire linee guida per la definizione di limiti di esposizione;
2. identificare inquinanti nuovi o potenziali;
3. identificare le lacune esistenti nella conoscenza sugli effetti sanitari degli inquinanti;
4. promuovere l'armonizzazione delle metodologie tossicologiche ed epidemiologiche, al fine di avere risultati confrontabili internazionalmente.

La prima monografia dei *Criteri di sanità ambientale* (Environmental Health Criteria, EMC), sul mercurio, è stata pubblicata nel 1976. Da allora, è stato prodotto un numero sempre crescente di valutazioni relative ad agenti chimici e fisici. Inoltre, molte monografie sono state dedicate alla valutazione di metodologie tossicologiche, ad esempio per quanto riguarda agenti genotossici, neurotossici, tetratogeni e neurotossici. Altre pubblicazioni hanno riguardato linee guida per l'epidemiologia, valutazioni di test a breve termine per la cancerogenesi, marcatori biologici, effetti sugli anziani eccetera.

La spinta iniziale al programma è venuta dalle risoluzioni dell'Assemblea Mondiale della Sanità e dalle raccomandazioni formulate nella conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente umano del 1972. Il lavoro è successivamente diventato parte integrante del *Programma internazionale per la sicurezza chimica* (IPCS, International Programme on Chemical Safety), svolto in cooperazione da UNEP, ILO e OMS. Grazie al forte sostegno dei nuovi partecipanti, si è giunti a riconoscere pienamente l'importanza degli effetti delle esposizioni professionali e ambientali sulla salute. Le monografie EHC sono diventate uno strumento consolidato, usato e riconosciuto in tutto il mondo.

Campi elettromagnetici

Tre monografie sui campi elettromagnetici (CEM) hanno trattato i possibili effetti sulla salute rispettivamente dei campi a frequenza estremamente bassa (ELF, Extremely Low Frequencies), dei campi statici e dei campi a radiofrequenza (RF). (WHO, 1984; WHO, 1987; WHO, 1993). Queste monografie sono state prodotte in collaborazione con il *Programma per l'ambiente delle Nazioni*

¹ ILO: International Labour Office (Ufficio internazionale del lavoro); ICNIRP: International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (Commissione internazionale per la protezione della radiazioni non ionizzanti); WHO: World Health Organization (Organizzazione mondiale della sanità)

Unite (UNEP, United Nations Environment Programme), *l'Ufficio internazionale del lavoro* (ILO, International Labour Office) e il *Comitato internazionale per le radiazioni non ionizzanti* (INIRC, International Non-Ionizing Radiation Committee) dell'*Associazione internazionale per la protezione dalle radiazioni* (IRPA, International Radiation Protection Association) diventato nel 1992 la *Commissione internazionale per la protezione dalle radiazioni non ionizzanti* (ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection).

Le monografie EHC vengono abitualmente riviste se sono disponibili nuovi dati che cambiano sostanzialmente la precedente valutazione, se in conseguenza di un aumento delle esposizioni si manifestano nel pubblico preoccupazioni per gli effetti dell'agente in questione sulla salute e sull'ambiente, o se è trascorso un periodo di tempo apprezzabile dell'ultima valutazione.

Le monografie sui campi elettromagnetici sono in corso di revisione e saranno pubblicate come tre documenti che, nel loro insieme, copriranno l'intero intervallo di frequenza (0 - 300 GHz) dei campi elettromagnetici significativo per l'esposizione umana: campi statici (questo volume), campi ELF (fino a 100 kHz) e campi a radiofrequenza (100 kHz - 300 GHz).

La valutazione di tutti i rischi sanitari connessi alle tecnologie basate su campi elettromagnetici costituisce uno dei compiti del *Progetto internazionale CEM*. Il progetto è stato lanciato dall'OMS nel 1996, in risposta alle preoccupazioni del pubblico per i possibili effetti sulla salute dell'esposizione a campi elettromagnetici ed è gestito dall'unità *Radiazioni e sanità ambientale* (RAD), che ha coordinato anche la preparazione di questa monografia sui campi statici.

Il processo di valutazione del rischio include la creazione di un'ampia base di dati, che comprenda tutte le pubblicazioni scientifiche più significative. L'interpretazione di questi studi può essere controversa ed esiste, dentro e fuori la comunità scientifica, una varietà di opinioni. Per raggiungere il più ampio grado di consenso possibile, la valutazione dei rischi sanitari si basa anche su rassegne già portate a termine da altri organismi nazionali e internazionali. Per quanto riguarda i campi statici in particolare, queste rassegne comprendono:

- la monografia della IARC sui campi statici e a frequenza estremamente bassa (ELF). Nel giugno 2001 la IARC ha formalmente valutato i dati relativi alla cancerogenesi da esposizione a campi statici e ELF. La revisione critica ha portato a concludere che i campi statici non erano classificabili per quanto riguarda la loro cancerogenicità per l'uomo, perché vi erano dati inadeguati sull'uomo e non erano disponibili dati significativi negli animali da laboratorio;
- le rassegne dei dati di carattere fisico/ingegneristico, biologico ed epidemiologico, affidate dall'OMS alla Commissione internazionale per la protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ICNIRP), un'organizzazione non governativa formalmente collegata all'OMS (ICNIRP, 2003);
- il seminario OMS su "*Effetti dei campi magnetici statici significativi per la salute umana*", organizzato congiuntamente all'ICNIRP e all'Ente britannico per la protezione dalle radiazioni (NRPB, National Radiological Protection Board), che si è svolto presso il NRPB il 26-27 aprile 2004 (Noble et al, 2005).

Scopo della monografia

Lo scopo delle monografie EHC è di fornire delle rassegne critiche sugli effetti di agenti fisici, chimici e biologici sulla salute umana e sull'ambiente. Queste rassegne prendono in considerazione e analizzano gli studi che sono di diretto interesse ai fini della valutazione, ma non descrivono ogni singolo studio effettuato. Per l'analisi vengono utilizzati, e citati, i dati forniti da studi originali condotti in tutto il mondo, ma non i dati riportati in riassunti o articoli di rassegna. Si prendono in esame rapporti sia pubblicati che non, ma viene sempre data la preferenza ai primi. I dati non pubblicati vengono usati solo quando non ne esistano di significativi pubblicati o quando i dati sono cruciali per la valutazione del rischio. E' disponibile un documento che descrive come trattare i dati

non pubblicati, che sono di proprietà degli autori, in modo tale che le relative informazioni possano essere usate nella valutazione senza comprometterne la riservatezza (WHO, 1990).

Nella valutazione dei rischi per la salute umana i dati relativi all'uomo, quando disponibili, sono generalmente più informativi di quelli su animali.

Gli studi su animali e quelli *in vitro* sono di supporto e servono soprattutto per fornire informazioni mancanti negli studi sull'uomo. La ricerca su soggetti umani deve obbligatoriamente essere condotta seguendo dei principi etici, tra cui quelli enunciati nella dichiarazione di Helsinki.

Tutti gli studi, sia che indichino effetti positivi sia negativi, devono essere prima giudicati singolarmente, in base alla loro specifica qualità, per poi essere valutati globalmente e giudicati in base a un criterio di bilancio delle evidenze. E' infatti importante determinare in quale misura un certo insieme di dati modifichi la probabilità che l'esposizione provochi un effetto sanitario.

In generale, gli studi debbono essere replicati, o risultare in accordo con altri studi simili. L'indicazione di un effetto risulta inoltre rafforzata se i risultati di studi di tipo diverso (ad es. epidemiologici o di laboratorio) puntano alla stessa conclusione.

Le monografie EHC hanno lo scopo di aiutare le autorità nazionali e internazionali nelle loro valutazioni di rischio e nelle conseguenti decisioni in tema di gestione del rischio. Le monografie presentano un'accurata valutazione dei rischi, ma non costituiscono in alcun modo delle raccomandazioni per la formulazione di normative o standard. Le monografie EHC sui campi elettromagnetici forniscono però a istituzioni come l'ICNIRP la base scientifica per le revisioni delle loro linee guida.

Procedure

Sono qui di seguito descritte le procedure generali per la pubblicazione di questa monografia (per maggiori dettagli, si veda van Deventer et al, 2005).

Una prima bozza, preparata da consulenti e da esperti di un Centro che collabora con il RAD, viene inizialmente redatta basandosi sui dati forniti da basi di dati di riferimento, quali Medline e PubMed.

Una volta ricevuta dal RAD, la bozza può richiedere una prima revisione da parte di un piccolo gruppo di esperti, che ne giudichino la qualità e l'obiettività.

Dopo essere stato accettato come prima bozza, il documento viene distribuito, in forma grezza, a oltre 150 contatti in tutto il mondo, ai quali viene richiesto di giudicarne la completezza e l'accuratezza. Se necessario, si chiede anche di fornire materiale aggiuntivo.

I contatti, abitualmente designati dai governi, possono essere Centri di collaborazione o singoli scienziati di riconosciuta esperienza. Generalmente occorrono alcuni mesi affinché tutti i commenti ricevuti siano presi in esame dagli autori. Una seconda bozza, redatta tenendo conto di questi commenti, viene quindi distribuita dopo l'approvazione del Coordinatore (RAD) ai membri di un gruppo di lavoro che ne effettua un esame critico (peer review) almeno sei mesi prima di una sua riunione.

I membri del gruppo di lavoro svolgono il loro compito come singoli scienziati e non rappresentano le istituzioni di appartenenza. Il loro compito è valutare l'accuratezza, la significatività e l'importanza delle informazioni contenute nel documento e di determinare i rischi sanitari e ambientali delle esposizioni ai campi elettromagnetici, per la particolare regione spettrale in esame. Al gruppo viene richiesto di fornire anche un riassunto e delle raccomandazioni per l'avanzamento della ricerca e della protezione nel settore.

La composizione del gruppo di lavoro dipende dalle competenze richieste dalla problematica (epidemiologia, scienze biologiche e fisiche, medicina e sanità pubblica) e da esigenze di equilibrio, sia nella distribuzione per sesso e per area geografica, sia tra le diverse opinioni scientifiche.

La composizione dei gruppi di lavoro dell'OMS è approvata dal Vicedirettore generale del Settore sviluppo sostenibile e ambienti salubri. Questi gruppi di lavoro costituiscono, all'interno dell'OMS, i comitati di massimo livello per la definizione dei rischi. Essi sono simili a quelli costituiti dall'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC, International Agency for Research on Cancer), i quali effettuano una "identificazione e classificazione in base alla cancerogenesi" di vari agenti fisici, chimici e biologici.

I gruppi di lavoro svolgono un'accurata revisione critica di tutta la letteratura scientifica, valutano i rischi sanitari dell'esposizione a campi statici sia elettrici sia magnetici, raggiungono un accordo in base al consenso e formulano delle conclusioni e raccomandazioni finali che non possono essere alterate dopo la riunione del gruppo.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità riconosce l'importante ruolo svolto dalle organizzazioni non governative (ONG). Rappresentanti di organizzazioni significative a livello nazionale e internazionale possono essere invitati a unirsi al gruppo di lavoro come osservatori. Gli osservatori possono fornire un contributo importante al processo, ma sono autorizzati a parlare solo se invitati dal Presidente e non partecipano alla valutazione finale, perché questa è responsabilità esclusiva dei membri del gruppo di lavoro. Quando lo ritenga opportuno, il gruppo di lavoro può riunirsi a porte chiuse.

Tutti coloro che partecipano come autori o consulenti alla preparazione della monografia EHC, oltre a fornire il loro servizio in base alle personali capacità scientifiche, informano in qualsiasi momento l'OMS di conflitti di interesse, effettivi o potenziali che si possano intravedere nel loro compito. A tutti viene chiesto di firmare una formale dichiarazione in merito. Questa procedura assicura la trasparenza e la correttezza del processo.

Quando il gruppo di lavoro ha completato il suo lavoro e il Coordinatore (RAD) è soddisfatto della qualità scientifica e della completezza del documento, questo viene presentato all'Ufficio Pubblicazioni dell'OMS per la stampa. Una copia della bozza finale viene inviata al Presidente e al relatore del gruppo di lavoro per la correzione.

La monografia EHC sui campi statici

La presente monografia EHC tratta i possibili effetti sanitari dell'esposizione a campi statici, sia elettrici che magnetici. Tuttavia, solo pochi studi di laboratorio su animali e esseri umani hanno indagato gli effetti dei campi elettrici statici. La maggior parte degli studi qui esaminati riguardano gli effetti dell'esposizione a campi magnetici statici.

Per completezza, sono stati esaminati anche gli effetti dei campi generati dai sistemi di diagnostica per immagini con risonanza magnetica (MRI, Magnetic Resonance Imaging). In questo caso, però, gli effetti dei campi magnetici statici possono facilmente confondersi con i possibili effetti dei gradienti di campo impulsivo e con quelli dei campi elettromagnetici a radiofrequenza (RF). E' anche possibile che in molti esperimenti non siano stati adeguatamente controllati fattori potenziali di confondimento, come rumore e vibrazioni. Questi studi contribuiscono quindi poco alla valutazione dei rischi sanitari dei campi magnetici statici.

La prima bozza della monografia è stata redatta dal gruppo di lavoro che si è incontrato a Vlaardingen, in Olanda (18-19 novembre 2002). In questa riunione, ospitata dal Consiglio Sanitario dei Paesi Bassi, si decise che gli articoli, identificati attraverso ricerche in PubMed e in altre fonti di dati tra cui liste di riferimenti bibliografici e raccolte di articoli curate personalmente da membri del gruppo, fossero esaminati da due revisori e giudicati informativi o meno nel contesto della monografia, in base a criteri predefiniti. Tra questi criteri figurano la pubblicazione in una rivista con

vaglio critico (peer review), un'adeguata descrizione dell'esposizione, un'esauriente descrizione dei test effettuati, del sistema biologico e dei materiali usati, un'appropriata analisi statistica dei dati e la scelta di controlli adeguati.

Gli articoli in lingua diversa dall'inglese sono stati inclusi se potevano essere letti da almeno uno dei revisori. Tutti gli articoli analizzati sono stati inseriti in tabelle riassuntive che riportano i commenti dei revisori sugli articoli considerati informativi per una valutazione dei rischi sanitari. Questi commenti sono anche dettagliati nel testo e costituiscono la base per la valutazione dei rischi e per le raccomandazioni.

Alla fine di ogni tabella sono elencati anche tutti i lavori considerati inadeguati per la valutazione.

La bozza finale è stata successivamente distribuita per una revisione esterna. I commenti ricevuti sono stati presi in esame dal Dr. Colin Roy (ARPANSA, Australia), dal Dr. Rick Saunders (OMS, Svizzera) e dal Dr. Eric van Rongen (Consiglio Sanitario dei Paesi Bassi). La bozza modificata è stata quindi inviata ai membri del gruppo di esperti ad hoc.

Quest'ultimo si è incontrato dal 6 al 10 dicembre nella sede centrale dell'OMS a Ginevra, in Svizzera. In questa sede è stata condotta una revisione totale della monografia e sono state apportate modifiche al testo. Il gruppo di esperti ha effettuato una valutazione dei rischi sanitari dei campi statici; ha riassunto la monografia e ha formulato raccomandazioni per le ricerche future.

Partecipanti alle riunioni del Gruppo di lavoro e del Gruppo ad hoc sui campi elettrici e magnetici statici

Membri

Dr. Igor Y. Belyaev, Department of Genetics Microbiology, and Toxicology, Stockholm University, Stockholm, Sweden^c

Prof. Donald Chakeres, College of Medicine and Public Health, The Ohio State University Medical Center, Columbus, Ohio, USA^c

Prof. Stuart Crozier, The School of Information Technology and Electrical Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia^c

Dr. Stefan Engstrom, Vanderbilt University Medical Center, Neurology Department, USA^a

Dr. Maria Feychting, Institute of Environmental Medicine, Division of Epidemiology, Karolinska Institute, Stockholm, Sweden^{a,c}

Dr. Lawrence Goldstein, consulente privato, California, USA^a

Prof. Leeka Kheifets, Department of Epidemiology, UCLA School of Public Health, Los Angeles, California, USA^{a,c}

Dr. Isabelle Lagroye, Laboratoire de Bioélectromagnétisme EPHE, Bordeaux, France^c

Mr. Rüdiger Matthes, Federal Office for Radiation Protection, Bundesamt für Strahlenschutz, Oberschleissheim, Germany^c

Dr. Alastair McKinlay, National Radiological Protection Board, Chilton, Didcot, Oxfordshire, United Kingdom^c

Dr. Chiyoji Ohkubo, National Institute of Public Health, Department of Environmental Health, Tokyo, Japan^{a,c}

Dr. Eric van Rongen, Health Council of the Netherlands, The Hague, The Netherlands^{a,b,c}

Dr. Martin Röösli, Department of Social and Preventive Medicine, University of Bern, Switzerland^{a,c}

Dr. Colin Roy, Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, Victoria, Australia ^{a,b,c}

Dr. Paolo Vecchia, Dipartimento Tecnologie e Salute, Istituto Superiore di Sanità, Roma, Italia ^c

Prof. Barney de Villiers, University of Stellenbosch, Faculty of Health Sciences, Cape Town, South Africa ^c

Dr Jakub Wiskirchen, University Hospital Tübingen, Germany ^a

Prof. Zhengping Xu, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou, People's Republic of China ^c

Osservatori

Dr. Hans Engels, Philips Medical Systems, The Netherlands ^a

Dr. Daniel J. (Joe) Schaefer, GE Healthcare, Milwaukee, Wisconsin, USA ^c

Segreteria

Dr. Michael Repacholi, Radiation and Environmental Health, World Health Organization, Geneva, Switzerland ^c

Dr. Rick Saunders, Radiation and Environmental Health, World Health Organization, Geneva, Switzerland ^{b,c}

Dr. Emilie van Deventer, Radiation and Environmental Health, World Health Organization, Geneva, Switzerland ^c

Dr. Elisabeth Cardis, International Agency for Research on Cancer (IARC), Lyon, France ^c

^a Ha partecipato all'incontro del gruppo di lavoro per la bozza iniziale della monografia EHC sui campi statici (Vlaardingen, Paesi Bassi, novembre 2002).

^b Ha partecipato all'incontro a Ginevra, nel settembre 2004, per la revisione della bozza di monografia in preparazione della riunione del Gruppo di esperti ad hoc.

^c Ha partecipato alla riunione del Gruppo di esperti ad hoc sui campi statici (Organizzazione Mondiale della Sanità, Ginevra, Svizzera, 6 - 10 dicembre 2004).

Ringraziamenti

Questa monografia rappresenta la più accurata valutazione dei rischi sanitari mai effettuata per i campi magnetici statici, che sono utilizzati in misura crescente in campo medico, industriale e commerciale. L'OMS ringrazia tutti coloro che hanno contribuito a questa importante monografia. Un ringraziamento particolare va al dr. Eric van Rongen, al dr. Colin Roy e al dr. Rick Saunders per il continuo impegno nello sviluppo di questa monografia. L'OMS ringrazia anche il Consiglio Sanitario dei Paesi Bassi per il generoso contributo offerto sia con il tempo dedicato dal dr. Van Rongen, sia con la revisione scientifica e linguistica del testo.

Dr. Michael Repacholi
 Coordinatore, Radiazione e Sanità Ambientale
 Organizzazione Mondiale della Sanità
 23 agosto 2005

CAP 1 - RIASSUNTO E RACCOMANDAZIONI PER ULTERIORI STUDI

1.1 Riassunto

1.1.1 Sorgenti naturali e artificiali

Campi elettrici statici sono presenti naturalmente nell'atmosfera. Valori fino a 3 kV/m possono presentarsi sotto le nuvole temporalesche, ma altrimenti, con tempo sereno, i livelli sono dell'ordine di 100 V/m. Dopo questa, la causa più comune di esposizione per l'uomo è dovuta ad una separazione di cariche per effetto dell'attrito. Ad esempio, camminando su un tappeto isolante si possono accumulare potenziali di carica di diversi kilovolt, che generano campi elettrici locali fino a 500 kV/m. Le linee elettriche in corrente continua possono produrre campi elettrici statici fino a 20 kV/m, i sistemi ferroviari in corrente continua campi fino a 300 kV/m all'interno dei treni ed i videoterminali campi di circa 20-30 kV/m a una distanza di 30 cm.

Il campo geomagnetico varia sulla superficie terrestre tra 35 e 70 μ T ed è implicato nell'orientamento e nella migrazione di certe specie animali. Campi magnetici statici artificiali sono generati ovunque si utilizzino correnti continue, come ad esempio in alcuni sistemi di trasporto a trazione elettrica ed in processi industriali quali la produzione di alluminio e la saldatura a gas. Induzioni magnetiche fino a 2 mT sono state misurate all'interno di treni elettrici e in prototipi di sistemi a levitazione magnetica (Maglev). Nei processi di riduzione dell'allumina i lavoratori sono esposti a livelli più alti, fino a circa 60 mT, mentre la saldatura elettrica ad arco produce induzioni magnetiche di circa 5 mT a 1 cm dai cavi di saldatura.

L'avvento dei superconduttori negli anni '70 e '80 ha facilitato l'impiego di campi magnetici molto più elevati nella diagnosi medica, con lo sviluppo delle tecniche di diagnostica per immagini con risonanza magnetica (MRI, Magnetic Resonance Imaging) e di spettroscopia con risonanza magnetica (MRS, Magnetic Resonance Spectroscopy), e nel campo della ricerca con la risonanza magnetica nucleare (MNR, Magnetic Nuclear Resonance). Si stima che nel mondo siano stati effettuati circa 200 milioni di esami MRI. Nei tomografi MRI utilizzati normalmente nella pratica clinica campi magnetici statici di intensità tra 0,2 e 8 T vengono generati da magneti permanenti, o superconduttori, o combinazioni di questi. Nelle applicazioni di ricerca, si usano per la scansione del corpo intero campi magnetici più alti, fino a 9,4 T. I campi dispersi intorno ai magneti sono ben definiti e possono essere minimizzati nei sistemi a magneti schermati. In termini di esposizione, l'induzione magnetica in corrispondenza della console dell'operatore è tipicamente attorno a 0,5 mT, ma può essere anche superiore. Comunque, esposizioni professionali fino a 1 T ed oltre possono verificarsi durante la costruzione e le prove di queste apparecchiature, o durante le procedure di intervento medico assistito dalla risonanza magnetica. Anche in varie ricerche di fisica delle alte energie e nelle relative tecnologie si utilizzano magneti superconduttori ed i lavoratori possono essere esposti, regolarmente e per tempi prolungati, a campi di intensità fino a 1,5 T.

1.1.2 Meccanismi di interazione

Le seguenti tre categorie di interazioni fisiche tra campi magnetici statici e sistemi biologici sono ben accertate sulla base dei dati sperimentali:

1) Interazioni elettrodinamiche con correnti di conduzione ionica. Le correnti ioniche interagiscono con i campi magnetici statici per effetto delle forze di Lorentz che si esercitano sulle cariche in movimento. Questi effetti portano all'induzione di potenziali e di correnti elettriche (di flusso). I potenziali di flusso sono generalmente associati, negli animali e nell'uomo, alla contrazione ventricolare e al pompaggio di sangue nell'aorta.

2) Effetto magnetomeccanici, tra cui l'orientamento di strutture magneticamente anisotrope all'interno di campi uniformi e la traslazione di materiali paramagnetici e ferromagnetici in presenza di gradienti di campo magnetico. I meccanismi più preoccupanti sono costituiti da forze e da momenti di torsione su oggetti metallici, sia impiantati sia esterni al corpo.

3) Effetti sugli stati di spin di reazioni chimiche intermedie. Le reazioni tra coppie di radicali collegate ai loro stati di spin sono da tempo studiate in relazione agli effetti chimici e biologici dei campi magnetici. Diverse categorie di reazioni chimiche organiche possono essere influenzate da campi magnetici statici di intensità compresa tra 10 e 100 mT, attraverso effetti sugli stati di spin elettronico. Una coppia di radicali, con i propri spin, può ricombinarsi ed impedire la formazione di un prodotto di reazione se si verificano due condizioni: (a) la coppia, formata in uno stato di tripletto, deve convertirsi attraverso qualche meccanismo in uno stato di singoletto; (b) i radicali devono fisicamente rincontrarsi per potersi ricombinare. Il primo passo può risentire dei campi magnetici.

La maggior parte delle ricerche riguarda un possibile uso degli effetti dei campi magnetici sulle coppie di radicali, nell'ambito delle reazioni enzimatiche. Comunque, non sembrano possibili né effetti fisiologici sulle funzioni cellulari, né effetti mutagenici a lungo termine, dovuti a cambiamenti nella concentrazione o nel flusso di radicali liberi per effetto dei campi magnetici.

Dosimetria

Per comprendere gli effetti biologici dei campi elettrici e magnetici è importante considerare come i campi influenzano le cellule nelle diverse parti del corpo e nei tessuti. Si può quindi definire una dose come un'opportuna funzione dei campi elettrici e magnetici nel punto di interazione. Stabilire una relazione tra i campi esterni imperturbati e i campi interni è il principale obiettivo della dosimetria. Elementi importanti della dosimetria sono gli studi numerici basati su modelli a celle (voxel) dell'uomo e di animali e gli studi sperimentali di esposizione.

Le interazioni dei tessuti con i campi magnetici statici dipendono verosimilmente dalle proprietà fisiche di questi ultimi, compresi il vettore campo magnetico, il gradiente di campo elettromagnetico e/o il prodotto di queste due quantità, spesso indicato come "prodotto di forza". Alcune delle interazioni più forti sono caratteristiche di movimenti all'interno dei campi, come uno spostamento del corpo o il flusso del sangue.

La definizione dei parametri dosimetrici più appropriati dipende da quali meccanismi fisici siano rilevanti per la sicurezza. Chiaramente, gli oggetti metallici devono essere esclusi in vicinanza dei magneti. E' imperativo quindi accertare la presenza di tali oggetti o di dispositivi impiantati che possano muoversi per effetto delle forze di trazione o di torsione. Sono opportune misure dei valori di picco dell'induzione magnetica e del prodotto di forza. Si possono utilizzare delle mappe di campo, per stimarne il valore nei diversi punti vicino al magnete in cui si potrebbe verificare un'esposizione dei lavoratori, ma una dosimetria personale può essere più utile.

Dei movimenti dell'intero corpo o di sue parti, come ad esempio gli occhi e la testa, in un gradiente di campo magnetico possono indurre, per la durata dello spostamento, un campo elettrico e una corrente elettrica. I calcoli dosimetrici suggeriscono che questi campi elettrici indotti possano raggiungere valori significativi durante un normale movimento in campi magnetici di 2-3 T; tali campi indotti possono rendere conto dei numerosi casi di vertigine e di quelli occasionali di fosfeni riportati da pazienti, volontari e lavoratori durante i loro movimenti nel campo.

Esistono molte sorgenti di esposizione e tra le più significative vi sono gli impianti MRI. Negli ultimi anni, si sono fatti sforzi congiunti per consentire a questi sistemi di funzionare a intensità di campo molto elevate. Il sistema più comunemente usato nella normale pratica clinica ha un campo centrale di 1,5 T. Tuttavia, apparati a 3,0 T sono oggi accettati nella pratica corrente e nel 2004 erano in funzione nel mondo oltre 100 sistemi del genere. Impianti di ricerca, da 4 a 9,4 T, sono ora in corso di sviluppo per imaging in campo chimico. All'aumento dell'intensità di campo dei sistemi a

risonanza magnetica corrisponde una crescente potenzialità di interazioni di vario tipo tra campi e tessuti. Con questa spinta verso campi di alta intensità diventi sempre più importante comprendere le interazioni tra campi elettromagnetici generati dai sistemi a risonanza magnetica e il corpo umano.

1.1.3 Studi in vitro

I risultati degli studi *in vitro* sono utili per chiarire i meccanismi di interazione e per individuare i diversi tipi di effetti che possono essere indagati *in vivo*. Tuttavia, essi non sono sufficienti per l'identificazione di effetti sulla salute se non sono corroborati da dati forniti dagli studi *in vivo*.

Diversi effetti biologici dei campi magnetici statici sono stati studiati *in vitro*. Si sono indagati diversi livelli di organizzazione, tra cui sistemi "cell free" (usando membrane isolate, enzimi o reazioni biochimiche) e vari modelli cellulari (usando sia batteri sia cellule di mammiferi). Tra le varie caratteristiche studiate figurano l'orientamento delle cellule, la loro attività metabolica, la fisiologia di membrana, l'espressione di geni, la crescita cellulare e la genotossicità.

Per tutte queste analisi morfologiche e funzionali sono stati riportati sia dati positivi, sia negativi. Tuttavia, i risultati non sono stati, per la maggior parte, riprodotti negli studi di replicazione. Gli effetti notati sono alquanto diversi e sono stati osservati esponendo a livelli di induzione magnetica molto variabili. Vi sono indicazioni che i campi magnetici statici possono modificare diverse caratteristiche a intensità inferiori a 1 T, anche dell'ordine dei millitesla. Per alcuni di questi effetti sono state indicate delle soglie, mentre altri studi hanno indicato risposte non lineari senza chiari valori di soglia.

Al di sopra di 1 T sono stati trovati in modo coerente effetti sull'orientamento delle cellule, ma la loro rilevanza *in vivo* è dubbia. Secondo quanto suggerito da alcuni studi, l'azione combinata dei campi magnetici statici con altri agenti, come sostanze chimiche genotossiche, sembra produrre effetti sinergici, sia nel senso di una protezione sia in quello di una stimolazione. I dati attuali sono però inadeguati e debbono essere confermati prima di poter trarre qualsiasi solida conclusione per la salute umana.

Inoltre, sembra importante la possibilità che gli effetti dei campi magnetici statici dipendano in modo complicato da diversi parametri fisici come l'intensità, la durata, la ricorrenza delle esposizioni, i gradienti di campo e le variabili biologiche. Gli studi hanno mostrato che alcune variabili come il tipo di cellule, la loro attivazione e altre condizioni fisiologiche ed ambientali durante l'esposizione influenzano i risultati degli esperimenti. I meccanismi alla base di questi effetti non sono noti, ma potrebbero esservi coinvolte azioni su radicali liberi e ioni. Gli studi *in vitro* forniscono alcune indicazioni in questo senso.

I pochissimi studi che hanno utilizzato segnali MRI o altre combinazioni di campi hanno mostrato qualche effetto, ma nessuno che fosse diverso da quelli prodotti dai soli campi magnetici statici.

Considerati nel loro complesso, gli esperimenti *in vitro* non presentano un quadro chiaro di effetti che siano specifici dei campi magnetici statici e di conseguenza non indicano neppure possibili effetti nocivi per la salute.

1.1.4 Studi su animali

Sono stati condotti pochi studi sugli effetti dei campi elettrici statici su animali. Non si è trovata alcuna evidenza di effetti nocivi per la salute, eccetto quelli associati alla percezione di cariche elettriche superficiali.

Molte ricerche su animali sono state invece condotte per studiare gli effetti dei campi magnetici statici. La maggior parte degli studi considerati rilevanti per la salute umana ha esaminato

gli effetti di campi che erano molto più intensi del campo geomagnetico naturale. Diversi studi sono stati effettuati con campi dell'ordine dei millitesla, confrontabili con esposizioni lavorative relativamente elevate. Più recentemente, con l'avvento dei magneti superconduttori e delle tecniche MRI si sono compiute ricerche su effetti comportamentali, fisiologici e riproduttivi con livelli di induzione magnetica dell'ordine di 1 T ed oltre. Pochi studi hanno però esaminato la possibilità di effetti cronici dell'esposizione, specialmente in rapporto alle cancerogenesi.

Le risposte osservate in modo più coerente negli studi neurocomportamentali suggeriscono che il movimento di roditori da laboratorio in campi magnetici statici pari a 4 T o superiori possa dare sensazioni sgradevoli e indurre delle reazioni di rifiuto o un istinto condizionato a evitare l'esposizione. Si pensa che queste risposte siano coerenti con effetti magnetoidrodinamici sull'endolinfa dell'apparato vestibolare. I dati sono comunque contrastanti.

Vi sono valide indicazioni che l'esposizione a campi superiori a circa 1 T (0,1 T negli animali più grandi) induca potenziali di flusso attorno al cuore e ai principali vasi sanguigni, ma le relative conseguenze fisiologiche non sono chiare. Diverse ore di esposizione a livelli di induzione magnetica molto alti, fino a 8 T, non hanno prodotto alcun effetto cardiovascolare nel cuore di maiali. Nei conigli, è stato riportato che esposizioni sia brevi sia prolungate a campi di intensità variabile, da quella del campo geomagnetico fino a valori dell'ordine dei millitesla, abbiano un effetto sul sistema cardiovascolare, anche se le indicazioni non sono forti.

I risultati di un gruppo di ricerca suggeriscono che campi magnetici statici di intensità dell'ordine del millitesla possono sopprimere un innalzamento precoce della pressione sanguigna agendo sul sistema di regolazione ormonale. Lo stesso gruppo ha segnalato che campi magnetici statici di bassa intensità, fino a 0,2 T, possono indurre sul flusso sanguigno, degli effetti locali, che a loro volta potrebbero portare a un miglioramento della microcircolazione. Inoltre, un altro gruppo ha riportato che induzioni magnetiche elevate, fino a 10 T, possono causare una riduzione del flusso sanguigno nella pelle e un abbassamento della temperatura cutanea. In tutti questi casi però, le caratteristiche analizzate erano piuttosto labili e la situazione potrebbe essere stata complicata dalle manipolazioni farmacologiche tra cui, in alcuni casi, l'anestesia e l'immobilizzazione. In generale, è difficile arrivare a una qualsiasi solida conclusione senza qualche replicazione indipendente delle ricerche.

Diversi studi hanno descritto possibili effetti dell'esposizione a campi magnetici su cellule del sangue e sul sistema emopoietico. Tuttavia, i risultati sono equivoci e ciò limita la possibilità di trarre delle conclusioni. I dati disponibili sugli effetti dell'esposizione a campi magnetici statici sui costituenti enzimatici e ionici del siero provengono principalmente da un solo laboratorio. Questi risultati devono essere confermati da laboratori indipendenti prima di poterne trarre delle conclusioni.

Per quanto riguarda gli effetti sul sistema endocrino, diversi studi condotti in un laboratorio suggeriscono che l'esposizione a campi magnetici statici possa influenzare la sintesi di melatonina da parte della ghiandola pineale. Tuttavia, alcune ricerche condotte in altri laboratori non sono riuscite a dimostrare alcun effetto. La scoperta di una soppressione della produzione di melatonina per effetto di un campo magnetico statico deve quindi essere confermata da ulteriori ricerche prima di trarre solide conclusioni. Complessivamente, pochi studi hanno indagato gli effetti dei campi magnetici statici su sistemi endocrini diversi dalla ghiandola pineale e nessun effetto è emerso in modo coerente.

Possibili effetti sulla produzione e sullo sviluppo sono importanti in relazione all'esposizione di pazienti e personale medico dovuta a apparecchiature MRI. A questo riguardo, sono disponibili solo pochi studi che usino campi magnetici statici di intensità superiore a 1 T. Gli studi relativi alla MRI di per sé non sono informativi sugli effetti dei campi statici, perché questi non possano essere distinti dai possibili effetti generali dei campi a radiofrequenza e dei gradienti di campo impulsivi. Vi è urgente bisogno di ulteriori studi per definire i rischi sanitari.

In generale, il numero di studi su animali relativi alla genotossicità e al cancro è così scarso che non è possibile trarne alcuna solida conclusione.

1.1.5 Studi di laboratorio sull'uomo

I campi elettrici statici non penetrano all'interno di oggetti elettricamente conduttori, come il corpo umano; il campo induce una carica elettrica superficiale ed è sempre perpendicolare alla superficie del corpo. Una densità di carica superficiale sufficientemente grande può essere percepita grazie alla sua azione sui peli cutanei e ad altri effetti come scariche elettriche (microscosse). La soglia di percezione nei diversi individui dipende da vari fattori e può variare tra 10 e 45 kV/m. Le soglie per sensazioni di disturbo sono probabilmente altrettanto variabili, ma non sono state studiate in modo sistematico. Si possono prevedere microscosse pericolose quando una persona ben isolata da terra tocchi un oggetto messo a terra, o quando una persona collegata a terra tocchi un oggetto metallico ben isolato dal suolo. Comunque i relativi valori di soglia del campo elettrico statico variano secondo il grado di isolamento ed altri fattori.

Le funzioni che sono state esaminate negli studi di laboratorio su soggetti umani comprendono quelle del sistema nervoso periferico, attività cerebrali, funzioni neurocomportamentali e cognitive, percezione sensoriale, funzioni cardiache, pressione sanguigna, ritmo cardiaco, proteine del siero e livelli ormonali, temperatura corporea e cutanea ed effetti terapeutici. Si sono effettuate indagini con livelli di esposizione fino a 8 T e si sono studiati sia campi statici puri, sia campi tipici dei sistemi MRI. La durata delle esposizioni variava da pochi secondi fino a nove ore, ma di solito era inferiore a un'ora. I dati disponibili sono limitati per diverse ragioni, tra cui il fatto che generalmente si sono studiati campioni convenienti di pazienti oppure volontari sani, e il fatto che il numero di soggetti era di solito piccolo.

I risultati non indicano che l'esposizione a campi magnetici statici produca effetti sulle risposte neurofisiologiche e sulle funzioni cognitive in volontari fermi, ma non permettono nemmeno di escludere questi effetti. Sono state riscontrate sensazioni di vertigine e nausea, dipendenti dalla dose, indotte in lavoratori, volontari e pazienti quando questi si muovevano entro campi statici superiori a 2 T. Uno studio ha suggerito che la coordinazione occhio-mani e la sensibilità al contrasto visivo siano ridotte quando ci si trovi attorno a un apparato MRI da 1,5 T. E' verosimile che questi effetti dipendano dal gradiente del campo e dal movimento del soggetto. In alcuni studi si è osservato un piccolo cambiamento della pressione sanguigna e del ritmo cardiaco, ma questi rientravano negli intervalli di normale variabilità fisiologica. Non vi è alcuna evidenza di effetti dei campi magnetici statici su altri aspetti della fisiologia cardiovascolare, o su proteine del siero e ormoni. L'esposizione a campi di intensità fino a 8 T non sembra indurre variazioni di temperatura nell'uomo.

Si deve comunque notare che per la maggior parte gli studi erano molto piccoli, basati su campioni di convenienza e spesso con gruppi non confrontabili. Non è quindi possibile trarre alcuna conclusione per quanto riguarda le numerose osservazioni esaminate in questo rapporto.

1.1.6 Studi epidemiologici

Studi epidemiologici sono stati effettuati quasi esclusivamente su lavoratori esposti a campi magnetici statici generati da apparati che utilizzavano alte correnti continue. La maggior parte dei lavoratori era esposta a campi di moderata intensità, fino a qualche decina di millitesla; questi lavoratori erano addetti alla saldatura, alla fusione dell'alluminio o a vari impianti industriali che utilizzavano grandi celle elettrolitiche per processi di separazione chimica. Questi tipi di lavori comportavano però, probabilmente, l'esposizione a diversi fumi e aerosol potenzialmente pericolosi, e ciò confonde l'interpretazione dei dati. Le osservazioni di rilevanza sanitaria in questi lavoratori comprendevano tumori, variazioni ematologiche ed effetti a queste associati, frequenza di aberrazioni cromosomiche, effetti sulla riproduzione, alterazioni muscoloscheletriche. Inoltre, un

piccolo numero di studi ha esaminato gli effetti sulla fertilità e sulla gravidanza in operatrici di sistemi MRI, che potevano essere state esposte a campi statici relativamente intensi, fino a circa 1 T. Due studi hanno indagato l'esito della gravidanza in volontarie sane sottoposte a esami a risonanza magnetica durante la gravidanza stessa.

Sono stati segnalati aumenti di rischio per varie forme di tumori, ad esempio del polmone, del pancreas e del sistema emopoietico, ma i risultati dei diversi studi non sono coerenti. I pochi studi epidemiologici pubblicati fino ad oggi lasciano irrisolti diversi problemi relativamente a un possibile aumento di tumori per effetto dei campi magnetici statici. La valutazione delle esposizioni era insoddisfacente, il numero di partecipanti ad alcuni degli studi era molto piccolo e gli studi erano quindi in grado di rivelare soltanto rischi molto grandi per malattie così rare. L'incapacità, da parte di questi studi, di fornire informazioni utili è confermata dalla mancanza di chiare evidenze dell'effetto di altri fattori cancerogeni, meglio accertati, che erano presenti in alcuni degli ambienti di lavoro. Altri effetti diversi dal cancro sono stati analizzati in modo ancora più sporadico. La maggior parte di questi studi si basa su numeri molto piccoli e presenta numerose limitazioni metodologiche. Altri ambienti dove potenzialmente esistono campi elevati, come nel caso degli operatori di risonanza magnetica, non sono stati considerati. Al momento, i dati sono inadeguati per una valutazione di carattere sanitario.

1.1.7 Valutazione del rischio sanitario

Campi elettrici statici

Non vi sono studi sull'esposizione a campi elettrici statici dai quali si possa trarre una qualsiasi conclusione su effetti cronici o ritardati. L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC, 2002) ha osservato che non vi erano dati sufficienti per determinare la cancerogenicità di questi campi.

Sono stati effettuati pochi studi sugli effetti acuti dei campi elettrici statici. Nel complesso i risultati suggeriscono che gli unici effetti acuti nocivi per la salute sono associati alla percezione fisica dei campi e ai fastidi conseguenti alle microscosse.

Campi magnetici statici

I dati epidemiologici e degli studi di laboratorio ad oggi disponibili non sono sufficienti per poter trarre delle conclusioni in merito a effetti cronici o ritardati. La IARC ha concluso che, per quanto riguarda la cancerogenicità dei campi magnetici statici, vi erano dati inadeguati per l'uomo, mentre non vi erano dati rilevanti per gli animali da laboratorio. La cancerogenicità di questi campi non è perciò, al momento, classificabile.

L'esposizione a breve termine a campi magnetici statici dell'ordine del tesla e ai gradienti di campo a questi associati induce diversi effetti acuti.

Risposte cardiovascolari, come variazioni della pressione sanguigna e del ritmo cardiaco, sono state occasionalmente osservate in studi su volontari e su animali. Comunque, per esposizioni a campi magnetici statici fino a 8 T, queste variazioni rientravano nei normali intervalli fisiologici.

Sebbene non sia stato sperimentalmente verificato, è importante notare che i calcoli suggeriscono tre possibili effetti dovuti a potenziali di flusso indotti. Questi sono: piccole variazioni del battito cardiaco (che si può ritenere non abbiano conseguenze per la salute), induzione di battiti cardiaci ectopici (che possono essere più significativi dal punto di vista fisiologico) e maggiore probabilità di aritmia rientrante (che potrebbe portare alla fibrillazione ventricolare). Si pensa che i primi due effetti presentino soglie superiori a 8 T, mentre i livelli di soglia per il terzo sono attualmente difficili da stabilire per la complessità del modello. Da 5 a 10 persone su 10.000 sono particolarmente suscettibili all'aritmia rientrante e il loro rischio potrebbe aumentare in caso di esposizione a campi magnetici statici e a campi gradienti.

Le limitazioni dei dati disponibili sono comunque tali che non è possibile raccogliarli per poter trarre dal loro insieme conclusioni solide in merito agli effetti dei campi magnetici statici sui diversi metodi di analisi ed osservazione sopra considerati.

Il movimento fisico all'interno di un gradiente di campo statico induce, nel caso di campi statici superiori a 2-4 T, sensazioni di vertigine, nausea e talvolta fosfeni e sapore metallico in bocca. Sebbene siano solo transitori, questi effetti possono essere negativi per le persone. Oltre a possibili effetti sulla coordinazione occhi-mani, potrebbe verificarsi una riduzione della capacità in lavoratori impegnati in procedure delicate (ad esempio i chirurghi), con un conseguente impatto sanitario.

Sono stati riportati anche effetti su altre funzioni fisiologiche, ma è difficile giungere a conclusioni solide senza replicazioni indipendenti dei risultati.

1.1.8 Raccomandazioni per le autorità nazionali

Si raccomanda alle autorità nazionali di mettere in atto dei programmi per proteggere il pubblico e i lavoratori da ogni effetto dei campi statici. Dato che il principale effetto dei campi elettrici statici è il fastidio causato da microscosse elettriche nei tessuti corporei, il programma di protezione potrebbe consistere semplicemente in una informazione sulle possibili situazioni di esposizione a campi elettrici elevati e sul modo di evitarle. Occorre un programma di protezione dagli effetti acuti, accertati, dei campi magnetici statici. Poiché non sono ad oggi disponibili informazioni sufficienti su possibili effetti a lungo termine o ritardati, per limitare l'esposizione del pubblico e dei lavoratori potrebbero servire misure precauzionali efficaci in rapporto ai costi, come quelle sviluppate dall'OMS (www.who.int/emf).

Le autorità nazionali dovrebbero adottare norme per la limitazione dell'esposizione ai campi magnetici statici basate su valide conoscenze scientifiche. L'adozione di norme sanitarie costituisce la misura fondamentale di protezione per i lavoratori e per il pubblico. Esistono degli standard internazionali per i campi magnetici statici (ICNIRP, 1994). L'OMS raccomanda comunque che questi vengano rivisti alla luce dei più recenti dati della letteratura scientifica.

Le autorità nazionali dovrebbero stabilire dei programmi per la protezione dai possibili effetti dell'esposizione a campi magnetici statici, o integrare i programmi esistenti. Le misure di protezione per l'uso industriale e scientifico dei campi magnetici possono essere classificate in: controlli in fase di progetto, introduzione di distanze di separazione e controlli amministrativi. Le misure di protezione contro i pericoli collaterali dovuti all'interferenza magnetica con apparati elettronici di emergenza o medicali, o con dispositivi impiantati chirurgici e dentali, meritano particolare attenzione per i possibili danni alla salute. Si devono prendere precauzioni nei confronti delle forze meccaniche esercitate su materiali ferromagnetici impiantati e su oggetti metallici liberi all'interno che si trovino in ambienti con campi magnetici elevati.

Le autorità nazionali dovrebbero prendere in considerazione procedure autorizzative per i sistemi MRI, che assicurino l'adozione di misure protettive. Queste procedure consentirebbero prescrizioni aggiuntive per unità i cui campi superassero il limite nazionale locale di 2 T. Queste prescrizioni dovrebbero prevedere l'informazione ai pazienti e ai lavoratori su incidenti o lesioni che potrebbero verificarsi per effetto degli alti campi magnetici.

Le autorità nazionali dovrebbero finanziare ricerche scientifiche per colmare le notevoli lacune nella conoscenza di dati importanti per la sicurezza delle persone esposte ai campi magnetici statici. Alcune raccomandazioni per le ricerche future fanno parte di questo documento e sono disponibili al sito dell'OMS (www.who.int/emf). Si dovrebbero finanziare gruppi di ricerca per condurre gli studi raccomandati in questa agenda dell'OMS.

Le autorità nazionali dovrebbero finanziare la raccolta di informazioni sull'esposizione dei lavoratori e dei pazienti ai campi magnetici statici da parte delle strutture MRI. Queste informazioni dovrebbero essere disponibili per futuri studi epidemiologici. Le autorità dovrebbero anche

finanziare la creazione di banche dati per la raccolta di informazioni sui casi di esposizioni di lungo termine, come quelle che si presentano nella produzione di sistemi MRI o di magneti di intensità altrettanto elevata, nonché in nuove tecnologie come i treni a levitazione magnetica.

1.2 Raccomandazioni per ulteriori studi

L'identificazione delle lacune nelle nostre conoscenze sui possibili effetti sanitari dell'esposizione a campi statici è parte essenziale di questa valutazione del rischio sanitario. Per le ricerche future, si formulano le seguenti raccomandazioni.

1.2.1 Campi elettrici statici

Sembrano esservi ben pochi vantaggi nel proseguimento di ricerche sugli effetti sanitari dei campi elettrici statici sulla salute. Nessuno degli studi condotti fino ad oggi suggerisce alcun effetto sulla salute, eccetto un possibile stress dovuto all'esposizione prolungata a microscosse elettriche. Quindi, non si raccomandano ulteriori ricerche sugli effetti biologici dei campi elettrici statici. Inoltre, esistono solo poche occasioni di esposizione significativa a questi campi in ambienti di lavoro e di vita e non è quindi giustificato nessuno studio epidemiologico.

1.2.2 Campi magnetici statici

In termini generali, le ricerche sono state condotte fino ad oggi in modo non sistematico, senza un'appropriata metodologia e senza adeguate informazioni sull'esposizione. Si raccomandano programmi di ricerca coordinati, che favoriscano un approccio più sistematico. Occorre anche studiare quanto siano importanti, ai fini dell'esito biologico, i diversi parametri fisici come l'intensità del campo, la durata dell'esposizione e il gradiente di campo.

Considerate le limitazioni degli studi attuali, si raccomanda che le ricerche future coprano le seguenti aree: epidemiologia, studi su volontari, studi biologici su animali e in vitro, studi sui meccanismi di interazione, ricerche teoriche e modelli di calcolo. Queste raccomandazioni sono riassunte nella Tabella 1.

1.2.2.1 Studi teorici e modelli di calcolo

La dosimetria numerica stabilisce un legame tra un campo magnetico statico esterno ed i campi elettrici e le correnti che vengono indotti nel corpo a causa del movimento dei tessuti entro il campo. Queste tecniche teoriche permettono di caratterizzare i campi in tessuti e organi specifici. Sono oggi disponibili quattro fantocci numerici di maschi adulti, ad alta risoluzione, che sono ampiamente utilizzati negli studi relativi a campi elettromagnetici variabili nel tempo. Ben poca ricerca è stata però condotta con campi statici e si ritengono necessari ulteriori studi che usino questi modelli. In particolare, si considera importante usare fantocci di taglie diverse, maschili, femminili e di donne incinte con feti a diverso stadio di sviluppo. Si potrebbero effettuare studi analoghi con fantocci di animali in gravidanza, per facilitare l'interpretazione dei risultati degli studi sperimentali sullo sviluppo. **(Media priorità)**

Si dovrebbe sviluppare un modello numerico della testa e del collo a risoluzione molto fine e utilizzarlo per studiare i campi elettrici e le correnti associati a fosfeni e vertigini. Questo stesso modello potrebbe essere utilizzato per studiare i campi elettrici e le correnti che vengono generati da movimenti della testa e degli occhi in un campo magnetico statico. Questi dati sono considerati di particolare importanza per le procedure di intervento medico assistito da MRI, nel corso delle quali il movimento limitato della testa dei chirurghi e del personale clinico potrebbe richiedere un maggior movimento degli occhi. Si dovrebbero anche simulare grossi movimenti dell'intero corpo di persone attorno alla macchina. **(Alta priorità)**

Si considerano importanti calcoli che utilizzino un modello dettagliato del cuore e delle comuni patologie cardiache. Questo modello dovrebbe comprendere la micro-architettura del cuore e dei piccoli vasi sanguigni interni ad esso, suscettibili di produrre campi e correnti che potrebbero avere qualche influenza sulla generazione del ritmo cardiaco e sulla propagazione della depolarizzazione. I calcoli sono anche necessari per stimare l'intensità e la distribuzione spaziale delle correnti indotte nel cuore per effetto dell'esposizione al campo e al gradiente di campo. Si dovrebbero studiare diversi orientamenti rispetto al campo. Ciò consentirebbe un confronto con le correnti che, in base ai calcoli, inducono effetti sulle funzioni cardiache. A supporto di queste ricerche, si raccomandano studi sperimentali e di laboratorio. **(Alta priorità)**

Sebbene si sia attualmente riluttanti a usare sistemi MRI ad alto campo su donne in gravidanza, si riconosce che la situazione potrebbe cambiare. Sarebbe dunque consigliabile effettuare degli studi su modelli, analizzando le correnti che vengono indotte in un feto per effetto del movimento della madre, o di quello intrinseco del feto stesso, in un campo intenso. Questi calcoli (e studi simili sui gradienti di campo e sui campi a radiofrequenza) permetterebbero di stimare quanto sino verosimili effetti sul feto. **(Alta priorità)**

1.2.2.2 Studi in vitro

I campi magnetici statici possono interagire con i sistemi biologici in diversi modi; i modi più comuni di provocare effetti sanitari sono attraverso effetti su molecole cariche e alterazioni nella velocità delle reazioni biochimiche.

Occorrono ulteriori studi sui possibili meccanismi e sui possibili bersagli degli effetti biologici dei campi magnetici statici. Si raccomanda di indagare gli effetti di campi di intensità fra 0,01 e 10 T sugli ioni (ad es. Ca^{2+} o Mg^{2+}) e sulla formazione di radicali liberi. Anche se è considerata difficile, è meritevole una ricerca su reazioni enzimatiche che si sviluppano attraverso meccanismi di radicali liberi, in modelli che siano rilevanti per la salute umana. Un'altro suggerimento è di concentrarsi su radicali tossici, come il superossido, che sono notoriamente nocivi e che sono prodotti da meccanismi di radicali liberi. **(Media priorità)**

Le segnalazioni di effetti co-mutagenici in varie cellule sono particolarmente interessanti per il potenziale ruolo cancerogeno dei campi magnetici statici. Studi di questo tipo devono essere effettuati usando cellule primarie umane e dovrebbero essere ampliati fino a includere la trasformazione cellulare e sistemi geneticamente modificati. **(Alta priorità)**

I campi magnetici statici possono influenzare, in specifiche condizioni di esposizione, l'espressione di geni e altre importanti funzioni delle cellule umane e di mammiferi, ma solo poche informazioni sono disponibili a questo riguardo. Si dovrebbero effettuare studi su cellule primarie umane con tecniche come la proteomica e la genomica, alla ricerca di possibili marcatori biologici di effetti che siano rilevanti per la salute umana. **(Bassa priorità)**

1.2.2.3 Studi sperimentali su animali

Gli effetti dell'esposizione a lungo termine dei campi magnetici statici possono essere analizzati usando modelli animali. In assenza di informazioni specifiche riguardo al potenziale cancerogeno dei campi magnetici statici, si raccomandano studi a lungo termine (compresi studi sull'arco dell'intera vita). Si possono utilizzare allo scopo animali sia normali, sia geneticamente modificati. Per esempio, se si assume che una possibile via attraverso la quale può aumentare il rischio di cancro sia costituita dall'amplificazione di radicali liberi, si può usare un modello di topo con cancellazione del gene della superossido-dismutasi. In questo modello, è molto accentuata la suscettibilità ai tumori e ad altre malattie legate ai radicali liberi. L'uso di tecniche di "microarray" permette di definire e quantificare facilmente gli effetti di molti parametri di esposizione sul genoma e sul proteoma. **(Alta priorità)**

Occorre analizzare in modo sistematico la possibilità di un aumento del rischio di anormalità nello sviluppo e di effetti teratogeni. Il cervello in via di sviluppo può essere particolarmente suscettibile agli effetti delle correnti elettriche indotte dal movimento, perché gli effetti di orientamento sono molto importanti per guidare la normale crescita dei dendriti neuronali. E' anche possibile che esposizioni relativamente brevi inducano cambiamenti di lunga durata. Lo studio di parametri neurocomportamentali può fornire un saggio rapido e sensibile per esplorare gli effetti dell'esposizione sulle funzioni del cervello in via di sviluppo, e quindi si raccomanda questo tipo di studi. Sono anche validi degli studi per mappare i sottili cambiamenti morfologici che si verificano durante lo sviluppo di specifiche regioni del cervello, come la corteccia o l'ippocampo. A questo scopo si dovrebbe prendere in considerazione l'uso di appropriati modelli transgenici. **(Alta priorità)**

Anche se esistono dati che indicano che l'esposizione di animali (e dell'uomo) a campi di circa 2 T non provocano effetti elettrofisiologici, sarebbe utile conoscere gli effetti di campi più elevati. Si potrebbero quindi esplorare gli effetti di esposizioni fino a 10 T ed oltre. **(Media priorità)**

Sono state studiate diverse altre caratteristiche in animali, ma le ricerche hanno fornito scarse informazioni. Mentre una serie di singoli studi per ciascuna di queste caratteristiche potrebbe non essere efficace in rapporto ai costi, potrebbe invece essere opportuno un ampio studio che coprisse diversi tipi di analisi. **(Bassa priorità)**

1.2.2.4 Studi sperimentali sull'uomo

Si dovrebbero indagare ulteriormente gli effetti dei campi magnetici statici sulle funzioni cognitive e sul comportamento. I dati disponibili non suggeriscono particolari rischi per specifici aspetti della cognizione, né suggeriscono quali parametri dovrebbero essere analizzati in laboratorio. In assenza di indicazioni precise, un possibile approccio potrebbe consistere nello studio degli effetti dell'esposizione sulle prestazioni in una serie di prove cognitive, tra cui test di attenzione, di tempo di reazione e di memoria; questo studio potrebbe servire almeno come screening preliminare in vista di ricerche più mirate. Le indagini iniziali potrebbero essere effettuate su volontari, come parte di studi sperimentali. **(Media priorità)**

Di fronte al crescente uso di indagini MRI, nelle quali il personale addetto è molto vicino al paziente che si trova nel magnete, come nel caso di interventi clinici assistiti da MRI, si rendono necessari ulteriori studi sulla coordinazione della testa e degli occhi, sulle funzioni cognitive e sul comportamento in gradienti di campo. Si considerano di particolare interesse maggiori indagini sui meccanismi, e sull'entità, di disfunzioni vestibolari indotte dal campo, come le vertigini. L'interesse è motivato dalla crescente possibilità che il personale medico effettui interventi complicati, e per tempi prolungati, all'interno del campo. **(Alta priorità)**

Analogamente, sarebbero utili ulteriori studi sulla funzione cardiaca, che potrebbero analizzare gli effetti sul sistema cardiovascolare. Studi di questo genere si dovrebbero effettuare anche al di sopra di 3 T, per valutare i potenziali rischi anche al di là di quelli che si incontrano nella normale pratica clinica. **(Bassa priorità)**

1.2.2.5 Studi epidemiologici

Esistono diverse categorie di lavoratori esposti ad alti campi magnetici statici, tra cui i tecnici di risonanza magnetica, gli addetti a impianti per la fusione dell'alluminio e alcuni lavoratori nel settore dei trasporti (metropolitane, treni a levitazione magnetica, treni ad alta frequentazione). Per quanto riguarda malattie croniche rare, come il cancro, sono richiesti degli studi di fattibilità per identificare i gruppi ad alta esposizione che potrebbero essere selezionati per gli studi epidemiologici. Gli studi di fattibilità servono anche a stabilire quali altre esposizioni sono presenti in questi gruppi professionali. Se si può identificare un numero sufficiente di lavoratori, uno studio caso-controllo è probabilmente il più appropriato, perché si devono ottenere informazioni dettagliate

sull'esposizione e su importanti variabili di confondimento, come le radiazioni ionizzanti. Per raggiungere un numero sufficiente di soggetti sono probabilmente necessarie collaborazioni internazionali. **(Alta priorità)**

Per altre patologie più comuni con periodi di latenza più brevi, si possono identificare e seguire nel tempo specifici gruppi professionali ad alta esposizione (ad esempio lavoratori di industrie dove si producono sistemi di risonanza magnetica). Informazioni relative alle diverse patologie sono forse già disponibili grazie ai controlli medici effettuati regolarmente su questi lavoratori, ma possono essere usate solo se sono disponibili informazioni simili anche per un gruppo confrontabile di soggetti non esposti. Una campagna di rilevazione sullo stato di salute di chirurghi, infermieri e altri lavoratori addetti sistemi MRI potrebbe fornire informazioni utili riguardo ai livelli, alla durata e alla frequenza delle esposizioni dei lavoratori ai campi statici prodotti da tali sistemi. Analogamente possono esistere in alcuni ospedali cartelle cliniche dei pazienti dalle quali si potrebbero ottenere dati su persone che erano state esposte, ma le cui condizioni si erano in seguito rivelate benigne. **(Alta priorità)**

E' giustificato anche uno studio prospettico sui rischi per la gravidanza, dovuti a un'esposizione lavorativa a campi magnetici statici, come anche un monitoraggio dell'esito della gravidanza in donne incinte che si siano sottoposte ad esami a risonanza magnetica. **(Alta priorità)**

L'esperienza relativa ad altre frequenze ha mostrato che può essere molto difficile ottenere stime affidabili dell'esposizione a campi elettromagnetici ai fini delle indagini epidemiologiche e che le misure di surrogati dell'esposizione, come la mansione lavorativa o la distanza da una particolare sorgente, non sempre forniscono valutazioni sufficientemente accurate. Per misurare l'esposizione si richiede quindi l'uso di strumenti specifici. Dosimetri personali relativamente piccoli si sono rivelati molto utili nelle ricerche sui campi a frequenza estremamente bassa (ELF). I dosimetri personali migliorerebbero quindi la valutazione delle esposizioni negli studi epidemiologici; se ne dovrebbero però convalidare le prestazioni attraverso prove numeriche e sperimentali. I dosimetri dovrebbero registrare l'intensità del campo magnetico, i gradienti di campo, la durata delle esposizioni e, idealmente, la velocità di variazione dell'induzione magnetica a seguito dei movimenti. **(Alta priorità)**

Traduzione a cura del progetto "Salute e campi elettromagnetici" del Ministero della Salute/CCM