

José María Yturralde. Sèrie *Postludi*, 2006. Acrílic sobre llenç, 41x41 cm.

FENT VISIBLE L'INVISIBLE

TÈCNiques DE DIAGNÒSTIC PER IMATGE

Magdalena Rafecas López, Martín Roos i Maximiliano Lloret Llorens

Making the Invisible Visible. Diagnostic Imaging Techniques.

In Medicine, images play a decisive role, especially in Diagnostics. Several properties of the inner body can be visualized and measured by means of so-called Medical Imaging techniques. Most of these techniques are based on detection by electromagnetic radiation with radiation energy depending on the properties of the image. If the goal is to obtain a three-dimensional image, complex mathematical algorithms combined with powerful computers must be used in addition to suitable detector devices. Therefore, progress in Medical Imaging is the result of a combined effort by physicians and physicists, as well as chemists, biologists, engineers, mathematicians and computer scientists.

«Una imatge val més que mil paraules.» Si aplicàrem aquesta frase al món de les radiacions, podríem assegurar que, en molts casos, «una imatge val més que mil exploracions». En l'entorn mèdic fins i tot podríem anar més lluny i asseverar que certes imatges mèdiques «valen més que mil intervencions quirúrgiques». La detecció de la radiació per a posteriorment visualitzar-la en forma d'imatge s'aplica en nombrosos camps, per exemple en la indústria del motor per a controls de qualitat, o en astrofísica, per a realitzar mapes del firmament. Però és en la medicina on la ciència i la tecnologia de la imatge han trobat més ressò i aplicació.

■ EL VALOR AFEGIT DE LES IMATGES EN MEDICINA

El valor de les imatges mèdiques és múltiple: permeten al metge reconèixer les alteracions associades a certes malalties com l'Alzheimer, molt abans que les exploracions convencionals oferisquen proves concloents. També possibiliten que el diagnòstic emès siga més precís, i que el pacient s'estalvie un altre tipus d'exploracions més molestes o fins i tot una operació.

Les imatges que s'obtenen mitjançant mètodes de diagnòstic per imatge són, avui dia, una eina molt apreciada en la rutina clínica. Amb una radiografia a la mà, a l'expert en diagnòstic li és fàcil determinar si un os

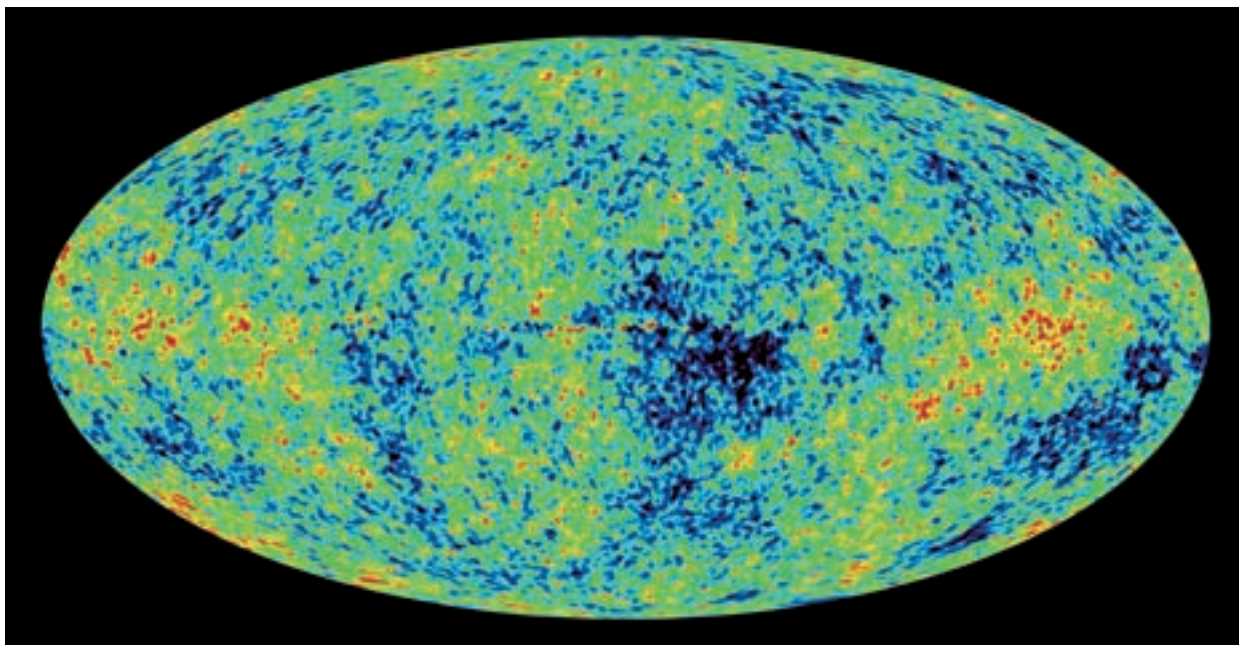
està trencat, i per on i com ho està. El diagnòstic seria molt més imprecís si aquesta informació haguera d'obtenir-se a través de palpacions, i més dolorosa i perillosa si haguera d'intervenir el pacient per veure la fractura. Les imatges permeten, a més, realitzar una planificació terapèutica prèvia.

Encara que avui dia hi ha moltes tècniques de diagnòstic per imatge, la radiografia és la tècnica veterana i una de les més assequibles. Gràcies al descobriment dels raigs X, per primera vegada l'interior del cos humà es va fer accessible als ulls dels metges sense necessitat d'usar el bisturí.

La utilitat dels raigs X per al diagnòstic es va fer patent de seguida, ja que aquesta radiació invisible, després de travessar el cos humà i arribar a una placa fotogràfica, retratava l'estructura òssia de la zona travessada. Amb la radiografia es referma el matrimoni entre la medicina i la física, aliança a què s'han anat unint altres ciències i tecnologies per a donar lloc al camp multidisciplinari del diagnòstic mèdic per la imatge.

Nous descobriments i un major coneixement de la física han donat pas al desenvolupament de tècniques més complexes i espectaculars, com ara la ressonància magnètica (RM) o la tomografia per emissió de positrons (PET en les seues sigles en anglès). Els principis físics d'aquestes dues tècniques són molt distints: mentre que

**«LES IMATGES MÈDIQUES
POSSIBILITEN QUE EL
DIAGNÒSTIC EMÈS SIGA MÉS
PRECÍS I QUE EL PACIENT
S'ESTALVIE ALTRE TIPUS
D'EXPLORACIONS MÉS
MOLESTES»**



Mapa de la radiació de fons de microones de l'univers (dades procedents dels satèl·lits COBE i MAP, Universitat de Princeton, EUA).

la ressonància magnètica es basa en l'efecte de camps electromagnètics variables en els àtoms d'hidrogen de l'organisme, la tomografia per emissió de positrons utilitza la radiació procedent de l'anihilació d'un electró del cos humà amb la seua antipartícula, el positró.

Una característica comuna a quasi totes les tècniques de diagnòstic per imatge és que la informació en què estem interessats ens arriba a través de «missatgers imperceptibles»: no els veiem, ni els escoltem, ni els sentim. Per a poder «atrapar-los», necessitem sistemes especialment concebuts per a fer-ho. Depenent del tipus de «missatger» (ones sonores, radiació electromagnètica, etc.), el dispositiu serà diferent, com també el tipus d'informació que en podem extraure.

Aquesta informació és selectiva, és a dir, posa de manifest determinades propietats de l'organisme. En el cas de la radiografia, la propietat en qüestió és l'«opacitat» del cos a la radiació o, dit d'una altra manera, la seua capacitat de «frenar» els raigs X. Aquesta propietat, al seu torn, ens informa sobre la densitat dels diferents òrgans que aquests raigs X han travessat. La imatge de raigs X és, per tant, un «mapa de densitats» que reflecteix l'anatomia del pacient. Si es tracta d'ecografia, els missatgers són ultrasons, ones sonores imperceptibles a l'orella humana. Aquests ultrasons són emesos per un petit al-

taveu; després de «rebotar» a les superfícies exteriors dels òrgans o allà on l'estructura d'aquests canvia, igual com fa l'eco a les parets d'un penya-segat, els ultrasons són recollits per un receptor.

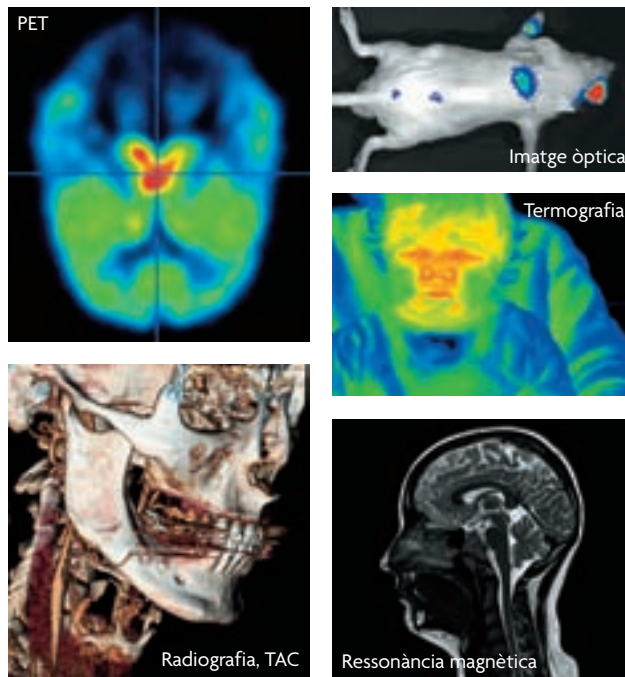
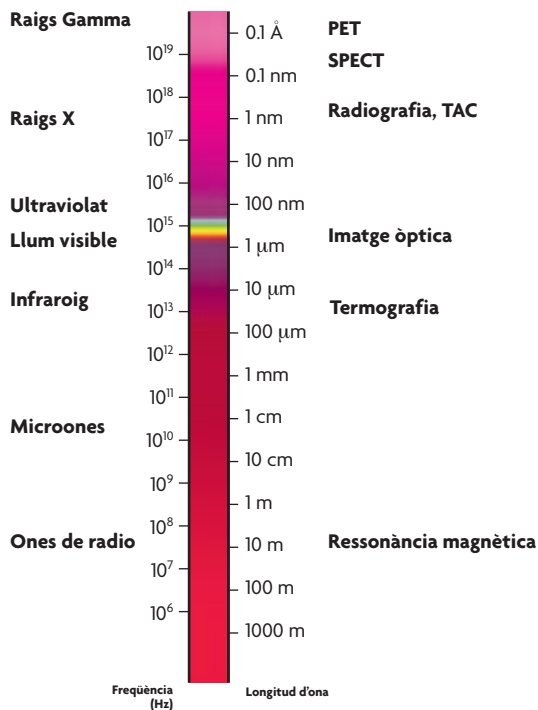
Segons siga l'energia que les caracteritza, les radiacions electromagnètiques ens proporcionen un ampli espectre de «missatgers» i, per tant, d'informació. A causa de la naturalesa dual de la radiació, el tipus de «missatger» es comportarà com a ona o com a corpuscle (fotó) depenent sobretot de la seua energia.

A excepció de l'endoscòpia, les imatges que obtenim no corresponen a allò que el metge podria veure si es decidira a operar el pacient; encara que els ulls dels humans es comporten com «detectors de radiació electromagnètica», són només sensibles a una part molt reduïda de l'espectre electromagnètic, és a dir, a la llum visible. Però si, per exemple, els nostres ulls foren capaços de percebre radiació infraroja, les imatges que el metge veuria serien aquelles que

ens ofereix la termografia. Aquesta tècnica, encara en fase d'investigació, proporciona «mapes de calor»; mitjançant aquests mapes es pot detectar la presència de certs tumors, ja que aquests solen emetre més calor (en forma de raigs infrarojos) que el teixit circumdant.

Altres missatgers invisibles són els raigs gamma, que consten de fotons d'alta energia i que procedeixen

**«TOT I QUE AVUI DIA
EXISTEIXEN MOLTES
TÈCNiques DE DIAGNÒSTIC
PER IMATGE, LA
RADIOGRAFIA ÉS LA
TÈCNICA VETERANA I UNA
DE LES MÉS ASSEQUIBLES»**



El tipus d'aplicació de les radiacions electromagnètiques al diagnòstic mèdic per imatge depèn de l'energia de la radiació o, el que és el mateix, de la seua freqüència (proporcional a l'energia) o de la seua longitud d'ona (inversament proporcional a la freqüència).

xen de desintegracions radioactives ocorregudes a l'interior de l'organisme. Les desintegracions no procedeixen dels nuclis atòmics propis del cos humà, sinó dels nuclis de determinats compostos radioactius, anomenats radiofàrmacs, que prèviament s'han administrat al pacient en quantitats molt petites. Els radiofàrmacs són substàncies radioactives especialment dissenyades perquè l'organisme no les puga distingir d'aquelles que està acostumat a metabolitzar, com la glucosa, l'aigua o l'amoníac. Són com espies infiltrats, que informen l'exterior sobre la seua localització mitjançant l'emissió de radiació. La seua posició, al seu torn, està relacionada amb el metabolisme de la substància natural que imiten, de manera que el que veiem en la imatge final dona compte del funcionament del cos en relació a una certa funció metabòlica.

■ RECONSTRUCCIÓ DE LA IMATGE

El procés de creació de la imatge a partir de les dades mesurades depèn de si l'objectiu final és una imatge plana o una imatge tomogràfica. Les imatges planes s'obtenen de manera semblant a una fotografia, és a dir,

«EN LES TÈCNiques DE DIAGNÒSTIC PER IMATGE, LA INFORMACIÓ ENS ARRIBA A TRAVÉS DE "MISSATGERS IMPERCEPTIBLES": NI ELS VEIEM, NI ELS ESCOLTEM, NI ELS SENTIM»

directament o quasi directament a partir del mesurament. Exemples d'imatges planes són les obtingudes mitjançant radiografia, ecografia o termografia.

Per a obtenir talls transversals o longitudinals del cos o reproduir volums sencers (imatges tridimensionals o 3D), es fan servir tècniques tomogràfiques. La complexitat d'aquestes tècniques no

es basa només en la tecnologia associada a l'emissió i detecció d'ones o partícules, sinó també en l'anomenat procés de «reconstrucció de la imatge». Aquesta tasca equival a la d'un detectiu que, amb poques proves, intenta determinar l'escenari del crim i identificar l'assassí.

Les «proves» amb què compten les tècniques tomogràfiques solen ser imatges planes obtingudes sota diversos angles i orientacions. Els «detectius» són algorismes matemàtics; i la «lupa», mantenint les similituds, serien els potents ordinadors que s'encarreguen de realitzar els càlculs.

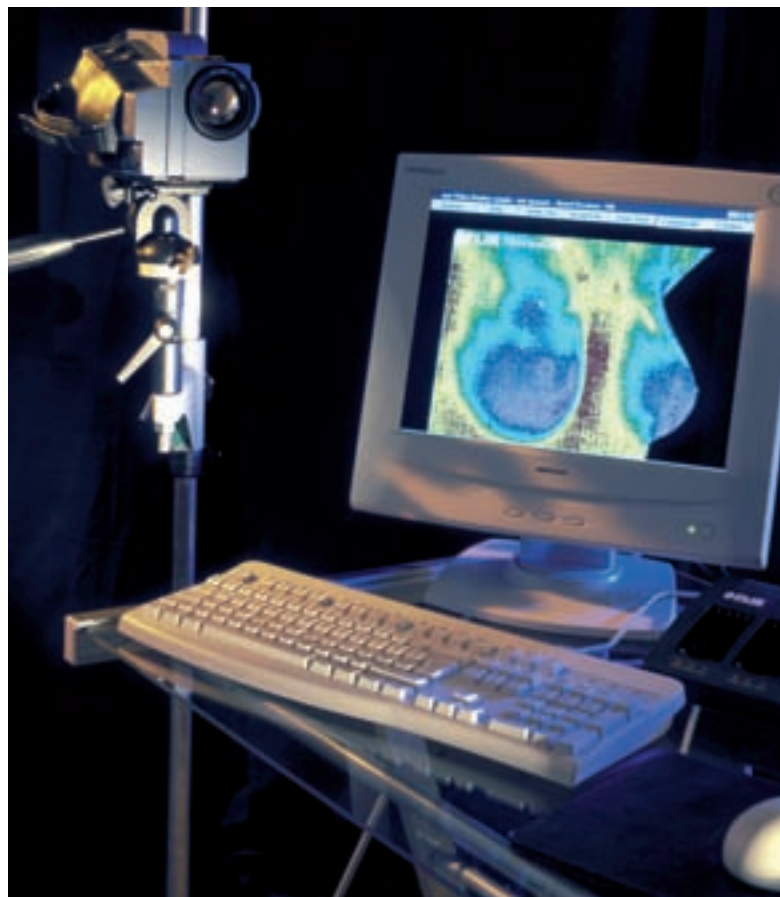
La tomografia pot anar associada a quasi qualsevol tècnica d'imatges planes. Per exemple, la detecció de raigs X és tant la base de la radiografia com de la tomografia computeritzada, també coneguda com TAC o

TC. El mateix ocorre si la base de la tècnica són ultrasons: ecografia 2D (plana) i 3D (tomografia); o radiació procedent de la desintegració d'un radioisòtop emissor de raigs gamma: gammagrafia (plana) i tomografia per emissió d'un únic fotó (SPECT en les seues sigles en anglès). També hi ha tècniques tomogràfiques sense paral·lel en el món de les imatges planes, com la PET.

El procés de reconstrucció de la imatge és molt complicat, sobretot perquè al detectiu li falta informació ja que no hi ha el detector perfecte, i perquè part de la informació s'ha perdut en el seu camí fins a nosaltres. A més, certs efectes físics deterioren la qualitat de la dita informació. La majoria dels fenòmens de degradació de la imatge s'expliquen per la naturalesa mateixa de la propagació de la radiació a través de la matèria. Per exemple, els implants de metall que porte un pacient produiran distorsions en les imatges de ressonància magnètica. Un fenomen de degradació important en TC, PET i SPECT és la desviació en la direcció de propagació que pateixen els fotons després de col·lidir amb els àtoms del cos humà. Això es tradueix en un possible esvaïment de la imatge i falsejament de la informació que aquesta conté. Altres causes de degradació naixen dels mateixos aparells de detecció, i poden estar relacionades amb imperfeccions dels components electrònics o dels materials emprats.

Gràcies al coneixement dels fenòmens físics subjacents a la formació i degradació de la imatge, els científics han desenvolupat mètodes per a compensar, corregir o reduir els efectes de degradació. Aquests mètodes poden aplicar-se a distints nivells: abans, durant o després de la reconstrucció. En alguns casos es pot prevenir la degradació de la imatge mitjançant l'ús de models físics integrats en l'algorisme de reconstrucció. Un exemple n'és el fenomen d'atenuació dels raigs gamma a l'interior del cos humà després de ser emesos per un radioisòtop (SPECT) o després de l'anihilació del positró (PET): als detectors els arriben menys fotons dels que es podria esperar donada una certa distribució de radioactivitat en el subjecte. La raó és que molts fotons són absorbits en el cos del pacient per culpa de l'efecte fotoelèctric, molts altres, per efecte Compton, es desvien de la seua trajectòria. Aquests dos fenòmens fan que es perda informació. No obstant això, si coneixem l'anatomia de la regió sota estudi (per exemple, gràcies a una imatge de TC prèvia), aquesta pèrdua d'informació es pot estimar i compensar.

**«ELS RADIOFÀRMACS SÓN
COM ESPIES INFILTRATS QUE
INFORMEN A L'EXTERIOR
SOBRE LA SEUA
LOCALITZACIÓ MITJANÇANT
L'EMISSION DE RADIACIÓ»**

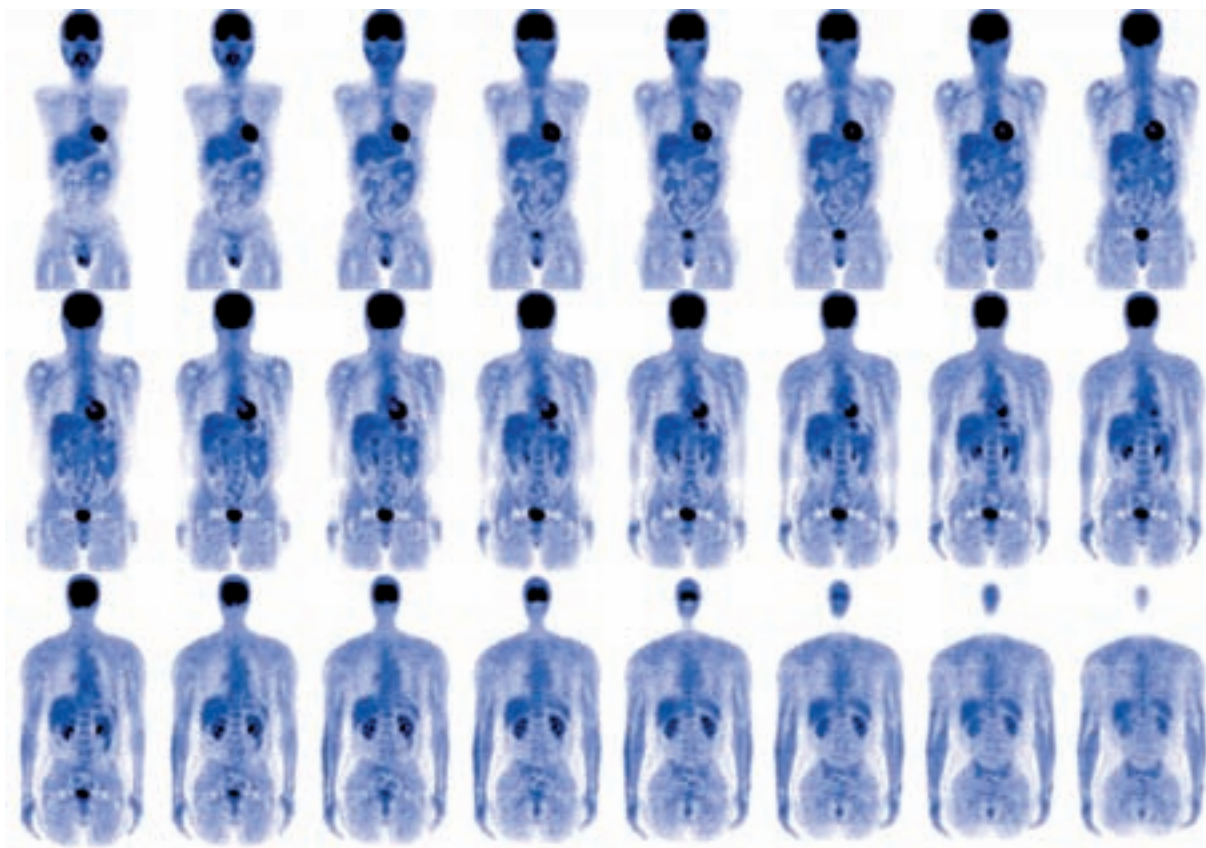


Equip per a termografia: en la pantalla de l'ordinador es visualitza la radiació infraroja detectada per una càmera especialment dissenyada per detectar el càncer de mama.

En els processos de detecció i reconstrucció de la imatge estan involucrats físics, enginyers, informàtics i matemàtics. Una vegada la imatge ha estat creada, interpretar-la és tasca del metge especialista en radiodiagnòstic o en medicina nuclear.

**■ TERÀPIA I CIRURGIA GUIADES
PER LA IMATGE**

Gràcies als avenços científics i tecnològics de les últimes dècades, els equips de diagnòstic mèdic s'han fet indispensables en tots els hospitals, i l'ús que n'han fet va més enllà del mateix diagnòstic. Per exemple, mitjançant determinades tècniques d'imatge, com la ressonància magnètica o la tomografia per emissió de positrons, el metge pot determinar si una teràpia contra el càncer és efectiva en el seu pacient o no. Gràcies a aquestes tec-



Seccions longitudinals procedents d'una imatge 3D de tomografia per emissió de positrons (PET). Estudi realitzat amb fluorodeoxiglucosa per estudiar la possible existència de metastasi en un pacient amb melanoma.

nologies el temps requerit per a esbrinar l'efectivitat de certes teràpies és molt menor, la qual cosa permet augmentar les possibilitats de curació del pacient i evitar-li efectes secundaris innecessaris o tractaments inadequats.

Un altre camp on les imatges mèdiques són fonamentals és la radioteràpia. Aquesta mena de teràpia persegueix la destrucció de cèl·lules tumorals mitjançant la irradiació del pacient. Per a planificar la intensitat i la distribució espacial de la radiació és necessari comptar amb imatges de l'interior del pacient que mostren amb alta precisió la localització del tumor i la dels òrgans de risc; a partir d'aquestes imatges es realitzen mapes de la zona a irradiar i de les que han de ser protegides.

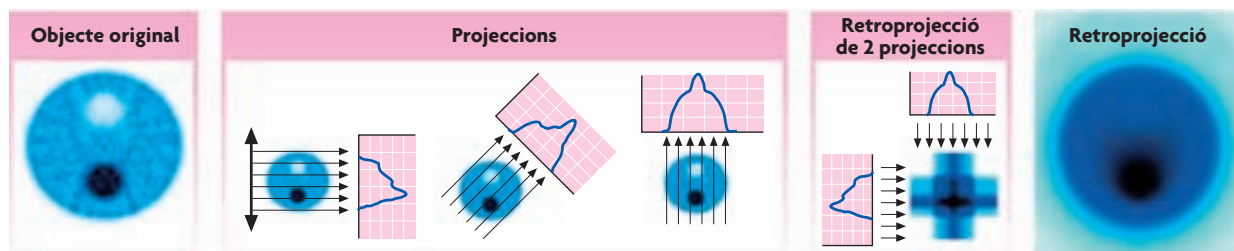
A l'inici d'aquest article dèiem que els mètodes de diagnòstic per imatge poden evitar algunes intervencions quirúrgiques innecessàries; també és cert que les imatges poden prestar suport al cirurgià durant la seua tasca. Es tracta de l'anomenada cirurgia guiada per la imatge. Mitjançant aparells especialment concebuts per a aquest objectiu, el professional pot veure en una pantalla el lloc en què es troba el seu bisturi en relació a l'objecte de la seua operació. En el cas del càncer,

també pot veure si, una vegada extirpat un cert tumor, queden cèl·lules cancerígenes residuals a la zona.

■ EL MÓN DIGITAL

Tot i que la radiografia tradicional encara recorre a un suport físic (la placa fotogràfica), la veritat és que en la majoria dels centres hospitalaris s'ha passat a la radiologia digital, és a dir, les imatges es produeixen directament en suport digital, i això facilita, entre altres coses, que es puguin enviar a les consultes o a altres hospitals a través de la xarxa informàtica i que es puguin emmagatzemar. Digitals són també les imatges que s'obtenen mitjançant PET, TC, o RM, entre altres.

El món invisible i continu apareix visible i discretitzat en la pantalla de l'ordinador. La informació continguda en la imatge es representa mitjançant nivells d'intensitat associats a píxels (de l'anglès, *picture element*). Un píxel és la unitat més petita de què es compon una imatge bidimensional. Si es tracta d'imatges 3D parlem de vòxels (*volumetric pixel*). La informació associada a un píxel o vòxel és un nombre que correspon a la inten-



El mètode més senzill per a reconstruir una secció bidimensional d'un objecte és la retroprojecció. Una projecció correspon, en aquest exemple, al perfil que obtenim en sumar el contingut de cada píxel al llarg de rectes paral·leles, orientades sota determinat angle (0, 45 i 90 graus en l'exemple del segon requadre). Retroprojectar significa escampar els valors dels perfils al llarg de les distintes línies que componen la projecció, assignant aquest valor a cada píxel de la línia. La intensitat de cada píxel correspon, doncs, a la suma dels valors de les rectes retroprojectades que passen pel dit píxel. En el tercer requadre s'han retroprojectat només les projeccions obtingudes a 0 i 90 graus. La imatge obtinguda està encara molt allunyada de l'original. Si són nombroses projeccions les usades en la retroprojecció (l'últim requadre), la imatge reconstruïda s'assembla més a l'original. Aquest mètode no es fa servir en la rutina clínica.

sitat amb què aquest element de volum serà representat en la pantalla. Si es tracta de tècniques de diagnòstic mitjançant la imatge de caràcter quantitatiu, com la PET, aquest nombre està directament relacionat amb la concentració espacial del radioisòtop sota estudi en aquesta regió de la imatge.

Donat un volum espacial concret, com major és el nombre de vòxels esmerçat per representar-lo, major serà la resolució espacial de la imatge, la qual cosa es tradueix en major definició i nitidesa. Per desgràcia el nombre de vòxels màxim ve limitat per la física i la geometria dels components de l'escàner emprat. Cada aparell es caracteritzarà, entre altres propietats, per la resolució intrínseca, i aquesta condicionarà el nombre de vòxels a emprar. Si usem menys vòxels dels que l'escàner permet estarem perdent informació, i «suavitant» la imatge. Si en són més, no guanyarem res excepte major quantitat de dades a emmagatzemar i, en alguns casos, un augment del soroll de fons.

La informació continguda en una imatge digital es pot visualitzar de moltes maneres. El més habitual és treballar amb talls en unes quantes direccions. Una mateixa imatge es pot representar en tons grisos o en colors: a cada vòxel se li associa un nivell de gris o un color d'acord amb la intensitat del dit vòxel i amb una escala; les escales poden ser de tipus logarítmic o lineal. Encara que la intensitat de cada vòxel és una magnitud objectiva, la percepció de la imatge dependrà molt del maneig de les escales de colors i de la perícia de l'observador. Una escala de color inadequada pot ressaltar detalls sense importància o ocultar lesions, perquè aquestes no podran ser diferenciades del fons que les rodeja. D'ací que l'experiència del metge siga fonamental a l'hora d'interpretar una imatge.

«EN LA CIRURGIA GUIADA PER LA IMATGE, EL PROFESSIONAL POT VEURE EN UNA PANTALLA EL LLOC ON ES TROBA EL BISTURÍ EN RELACIÓ A L'OBJECTE DE LA SEUA OPERACIÓ»

■ EN LA QUARTA DIMENSIÓ

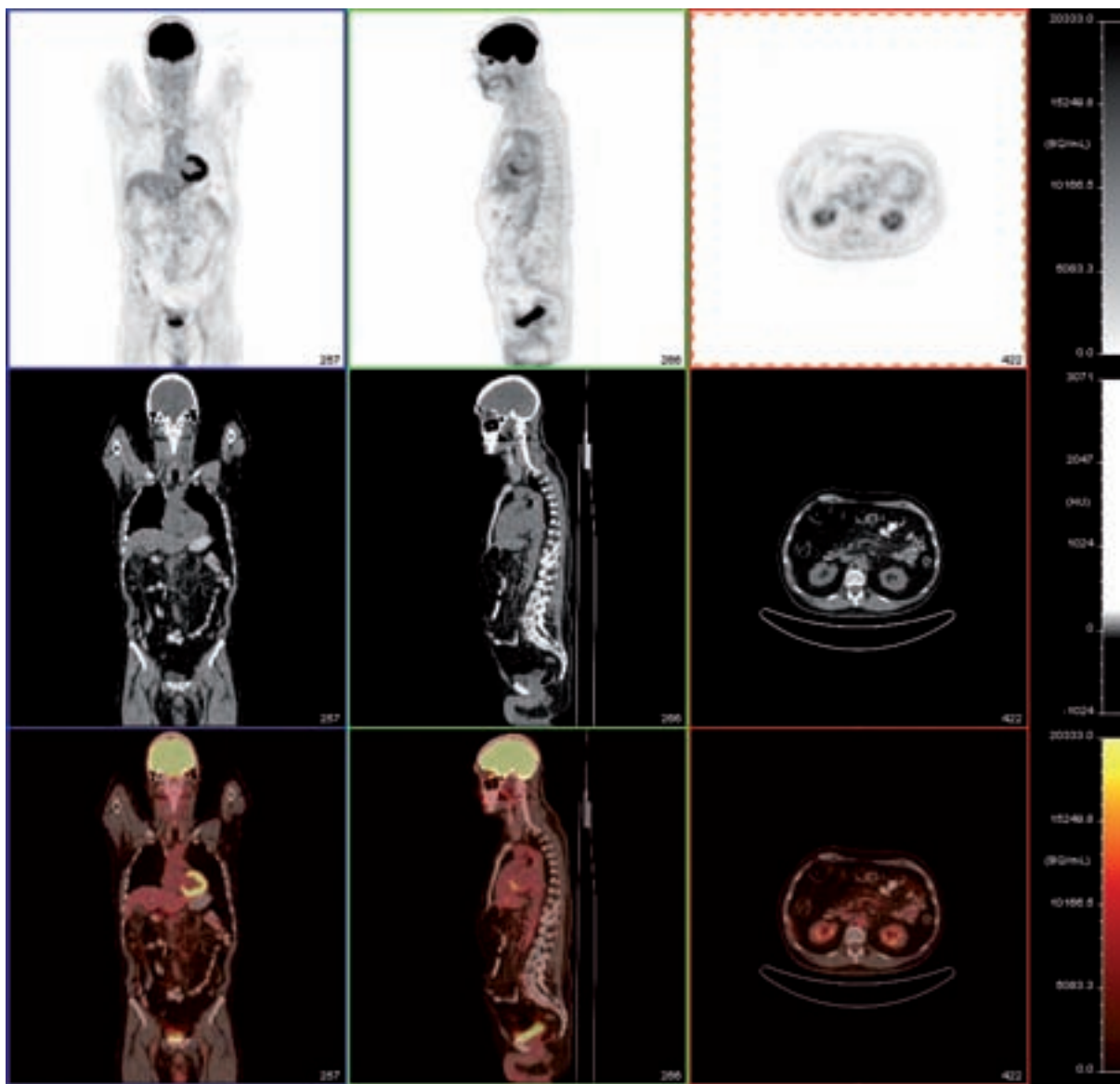
Cada vegada més clíniques ginecològiques ofereixen ecografies 4D a les dones embarassades. Aquesta quarta dimensió no és més que la dimensió temporal. En compte d'una imatge volumètrica obtinguda en un determinat moment, s'hi afegeix el factor temps per obtenir una pel·lícula. Aquesta quarta

dimensió és sobretot molt útil a l'hora d'estudiar la variació de certes propietats o substàncies al llarg del temps. Això, al seu torn, permet als científics aprofundir els seus coneixements sobre certes funcions metabòliques.

■ LA UNIÓ FA LA FORÇA

Hem comentat que l'energia de la radiació electromagnètica esmerçada determina el tipus d'informació que s'obté a partir de la imatge. Si bé les estructures anatòmiques es poden representar molt bé mitjançant TAC o ressonància magnètica, l'estudi de la bioquímica de l'organisme requereix tècniques com PET o SPECT, anomenades «funcionals» perquè amb elles podem visualitzar certes funcions metabòliques dels éssers vius. Per això, els mètodes d'imatge anatòmica i imatge funcional no s'han de veure com a competidors, sinó com complementaris.

Les imatges funcionals es caracteritzen per ser molt específiques, mostren només les zones on certs processos metabòlics estan ocorrent; no obstant això, ben sovint falta el marc anatòmic que permet a l'especialista localitzar amb precisió el lloc en qüestió. Per això, cada vegada és més freqüent visualitzar com una única imatge aquelles obtingudes mitjançant dues modalitats distintes. Aquest procés (coregistrat o fusió d'imatges) es realitza mitjançant programes per ordinador basats en algorismes matemàtics.



Fusió d'imatges procedents d'un escàner que combina la TC i la PET. Les imatges superiors corresponen a la PET, les intermèdies, a la TC, i les inferiors, a la fusió d'ambdues. En aquestes últimes s'empra el color per ressaltar la informació funcional (PET) sobre el marc anatòmic (TC), representat en blanc i negre.

■ DIAGNÒSTIC ASSISTIT PER ORDINADOR

Normalment una inspecció visual de les imatges és suficient per a emetre un diagnòstic. No obstant això, algunes tècniques o patologies poden requerir una anàlisi més detallada i quantitativa, a base de calcular les intensitats en determinades regions d'interès. Un pas més enllà el fa l'anomenat diagnòstic assistit per ordinador: mitjançant programes informàtics s'analitzen les imatges de manera automàtica o semiautomàtica, amb la meta de trobar lesions o alteracions dels teixits, com ara tumors o microcalcificacions.

El diagnòstic assistit per ordinador no pretén substituir l'«ull clínic» del metge, sinó facilitar-li la tasca; perquè, per molt que «una imatge valga més que mil paraules», sens dubte és el metge i no la imatge qui té la darrera paraula. ☺

Magdalena Rafecas López. Institut de Física Corpuscular (IFIC), Centre mixt CSIC – Universitat de València.

Martin Roos. Im Focus Onkologie, Urban & Vogel GmbH, Munic.

Maximiliano Lloret Llorens. Hospital Universitari La Fe, València.