

**2013**

UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA DE  
CARTAGENA

Luis Ginés García Pérez

**TRABAJO FIN DE PERIODO  
FORMATIVO DE  
DOCTORADO**

**MAGNETITA EN EL CUERPO  
HUMANO, CONSECUENCIAS  
POTENCIALES Y  
CARACTERIZACIÓN BÁSICA  
DE LA MAGNETITA  
BIOGÉNICA NANOMÉTRICA**



## CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	LOS ÓXIDOS DE HIERRO .....	1
1.2	CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y DOSIMETRÍA .....	4
2	LA EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SERES VIVOS.....	9
2.1	APLICACIONES QUE PUEDEN AFECTAR A TEJIDOS BIOLÓGICOS .....	9
2.1.1	Radiación Ionizante.....	9
2.1.2	Radiación No Ionizante (ultravioletas, radiofrecuencias y microondas).....	11
2.1.3	Radiación No Ionizante (frecuencias bajas y muy bajas).....	13
2.2	DIRECTRICES EN RADIACIÓN NO IONIZANTE .....	14
2.2.1	Evaluación de la Exposición .....	17
2.3	MATERIALES BIOLÓGICOS Y SIMULACIONES .....	18
3	EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS.....	23
3.1	EFFECTOS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE .....	23
3.2	EFFECTOS DE LOS CAMPOS DE RADIO FRECUENCIA Y MICROONDAS .....	28
3.2.1	Efectos Térmicos.....	29
3.2.2	Efectos Atérmicos y No Térmicos .....	30
3.3	EFFECTOS DE LOS CAMPOS DE BAJAS FRECUENCIAS.....	33
4	MÉTODOS DE COMPENSACIÓN DE CALENTAMIENTO .....	43
4.1	MECANISMOS DE PÉRDIDA Y GANANCIA DE CALOR.....	43
4.1.1	Mecanismos de Pérdida de Calor .....	43
4.1.2	Mecanismos de Ganancia de Calor .....	46
4.2	HIPOTÁLAMO Y ALTERACIONES DE LA REGULACIÓN TÉRMICA .....	46
4.2.1	Simulación Mediante un Modelo Termorregulatorio.....	48
5	PRESENCIA DE MAGNETITA EN EL CUERPO HUMANO .....	49
5.1	BIOMINERALIZACIÓN DE MAGNETITA EN LOS ANIMALES .....	49
5.1.1	Los Magnetosomas.....	51
5.2	BIOMINERALIZACIÓN DE MAGNETITA EN EL CUERPO HUMANO.....	52
5.2.1	Hierro divalente y trivalente en el Cerebro Humano. Estrés oxidativo.....	56
5.2.2	La Ferritina.....	57
5.2.3	Compuestos de Almacenamiento de Hierro en Estructuras Cerebrales .....	58
5.3	REPERCUSIONES EN LA SALUD HUMANA .....	60
5.3.1	Disrupción del Metabolismo Normal de Hierro en el Cerebro .....	60
5.3.2	Consecuencias Potenciales de la Magnetita Biogénica en Tejidos Neurodegenerativos .....	61

5.3.3	Magnetita Biogénica y Detección de Enfermedades Neurodegenerativas .....	62
5.3.4	La Ferritina y el Hierro en las Neurodegeneraciones .....	63
6	LA MAGNETITA MINERAL.....	67
6.1	LA GENERACIÓN GEOLÓGICA NATURAL.....	67
6.2	DEFINICIÓN .....	68
6.3	PROPIEDADES GENERALES.....	69
6.3.1	La Molécula de la Magnetita.....	69
6.3.2	La Celda Unitaria de la Magnetita.....	69
6.3.3	Cristalización.....	71
6.3.4	Algunas Propiedades Básicas .....	71
6.3.5	Principales Usos de la Magnetita Mineral.....	73
6.4	PROPIEDADES ELÉCTRICAS.....	73
6.4.1	Propiedades Electrónicas y Eléctricas .....	73
6.4.2	Variación de la Conductividad Eléctrica con la Temperatura.....	75
6.4.3	Anisotropía de la Conductividad Eléctrica.....	76
6.5	PROPIEDADES MAGNÉTICAS.....	77
6.5.1	Principales Parámetros en Magnetismo.....	77
6.5.2	Tipos de Magnetismo .....	78
6.5.3	Características Magnéticas Básicas de la Magnetita .....	79
6.5.4	Variación del Comportamiento Magnético con la Temperatura .....	80
7	LA MAGNETITA NANOMÉTRICA .....	81
7.1	NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS Y FERROFLUIDOS .....	81
7.1.1	Nanopartículas Magnéticas .....	82
7.1.2	Ferrofluidos: Síntesis con Magnetita.....	85
7.2	SÍNTESIS DE MAGNETITAS NANOMÉTRICAS. MORFOLOGÍAS Y TAMAÑOS.....	86
7.2.1	Síntesis Bacteriana de Magnetita Nanométrica.....	89
7.3	PRINCIPALES APLICACIONES .....	90
7.4	PROPIEDADES GENERALES Y PECULIARIDADES.....	92
7.4.1	Carencias en las Fichas de Datos de Seguridad.....	92
7.4.2	Diferencias en el Módulo de Young.....	94
7.4.3	Diferencias de Pureza en Magnetitas Biogénicas.....	94
7.4.4	Diferencias Morfológicas en las Magnetitas Biogénicas .....	94
7.5	PROPIEDADES ELÉCTRICAS.....	97
7.5.1	Permitividad, Conductividad y Tangente de Pérdidas a 300K.....	97
7.5.2	Variación de la Permitividad con la Temperatura a 1Mz.....	98
7.5.3	Variación de la Permitividad con la Temperatura a 0 y 0.5 T a 3906Hz .....	98
7.5.4	Variación de la Permitividad con la Frecuencia a 0 y 0.5 T.....	99

7.6	PROPIEDADES MAGNÉTICAS .....	99
7.6.1	Permeabilidad Magnética .....	99
7.6.2	Ciclo de Histéresis de la Magnética .....	100
7.6.3	Variación de las Propiedades Magnéticas en Función del Tamaño del Cristal .....	102
8	VALORACIÓN Y CONCLUSIÓN .....	105
8.1	LA EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SERES VIVOS .....	105
8.2	EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS .....	106
8.3	PRESENCIA DE MAGNETITA EN EL CUERPO HUMANO.....	108
8.4	LA MAGNETITA MINERAL.....	109
8.5	LA MAGNETITA NANOMÉTRICA.....	110
9	FUTUROS TRABAJOS .....	113
10	REFERENCIAS .....	115

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Óxidos de Fe en el sistema global.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2. Naturaleza multidisciplinar en la investigación de los óxidos de hierro.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 3. Representación de la propagación de una onda electromagnética. ....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 4. Representación de los diferentes tipos de radiación generada por los campos electromagnéticos .....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 5. Radiación gamma.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 6. Partícula alfa .....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 7. Partículas beta .....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 8. Partes de una célula.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 9. Célula en reposo (izquierda), y bajo la influencia de un campo eléctrico (derecha). .....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 10. Simulación robotizada de efecto biológico de telefonía móvil. Universidad Politécnica de Cartagena. ....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 11. Efecto fotoeléctrico .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 12. Efecto Compton.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 13. Producción de pares .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 14. Modelo de cabeza humana del Proyecto Humano Visible (arriba-izquierda), plano coronal y leyenda (abajo-derecha). ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 15. Magnetosoma de la bacteria magnetotáctica .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 16. Imágenes TEM y patrones de difracción de cristales representativos de magnetita y maghemita del cerebelo humano: .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 17. Micrografía TEM de magnetita biogénica extraída del hipocampo humano. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 18. Escáner de microscopio de fuerza magnética (MEM) de material de placa de hipocampo humano mostrando una respuesta magnética dipolar. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 19. Magnetitas.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 20. Izquierda: Modelo de una disposición octaédrica y tetraédrica con 3 octaedros y 2 tetraedros. Derecha: Configuración de 2 octaedros y 1 tetraedro .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 21. Estructura del grupo de la espinela .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 22. Celda unitaria cúbica centrada en caras. ....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 23. Celda unitaria de la magnetita. ....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 24. Octaedro.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 25. Formas cristalográficas de la magnetita: a- octaedro; b – rombododecaedro; c – octaedro limitado por planos {111}; d – doble .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 26. Variación de la conductividad eléctrica de la magnetita con la temperatura. ....</i>	<i>76</i>

<i>Figura 27. Anisotropía de la conductividad eléctrica de la magnetita a bajas temperaturas.</i>	76
<i>Figura 28. Isotropía de la conductividad de la magnetita a temperaturas inferiores a la temperatura ambiente hasta la temperatura de transición.....</i>	76
<i>Figura 29. Tipos de magnetismo: .....</i>	78
<i>Figura 30. Valor inverso de la susceptibilidad molar <math>1/\chi_{mol}</math>, en función de la temperatura, para <math>MnFe_2O_4</math> y <math>Fe_3O_4</math>. .....</i>	80
<i>Figura 31. Ciclos de histéresis para el ferrofluido con magnetita a partir de queroseno (a), y con aceite comestible (b).....</i>	85
<i>Figura 32. Comportamiento de un ferrofluido con un 21% de magnetita y preparado en aceite comestible. ....</i>	85
<i>Figura 33. Cristales de magnetita producidos hidrotérmicamente a 250 °C. ....</i>	87
<i>Figura 34. Izquierda: Cristales redondeados de magnetita obtenida con una lenta oxidación a temperatura ambiente. Derecha: Magnetita octaédrica obtenida por oxidación a 90 °C.....</i>	88
<i>Figura 35. Fotografía HREM de partículas de magnetita sintetizada .....</i>	88
<i>Figura 36. Distribución de diámetros de las partículas sintéticas de magnetita. ....</i>	88
<i>Figura 37. Difractograma de rayos X de las partículas de magnetita sintetizadas (a) y patrón de la magnetita (b). ....</i>	89
<i>Figura 38. Módulo de Young para la magnetita <math>Fe_3O_{4+\delta}</math>. ....</i>	94
<i>Figura 39. Imágenes HR-TEM de la magnetita de dominio simple extraída de la bacteria <i>Aquaspirillum magnetotacticum</i> (izquierda), y del cerebelo humano (derecha). ....</i>	95
<i>Figura 40. Magnetita extraída de <i>M. magneticum</i> AMB-1. a) Imágenes TEM; b) Imágenes HRTEM observadas en el eje de la zona [110]; c) Morfología ideal de las partículas magnéticas. ....</i>	96
<i>Figura 41. Representaciones de las variaciones de la parte real de la permitividad (41a), la conductividad (41b) y la tangente de pérdidas eléctricas (41c) al variar la frecuencia de <math>10^2</math> a <math>10^6</math> Hz, a una temperatura constante de 300K, utilizando en ambos ejes escalas logarítmicas.....</i>	97
<i>Figura 42. Variación de la constante dieléctrica en función de la temperatura medida a 1 MHz.....</i>	98
<i>Figura 43. Variación de la constante dieléctrica con la temperatura e influencia de campo magnético para <math>Fe_3O_4</math> a 3906 Hz. ....</i>	98
<i>Figura 44. Variación de la constante dieléctrica con la frecuencia e influencia de campo magnético para <math>Fe_3O_4</math> medido a <math>T= 300 K</math> .....</i>	99
<i>Figura 45. Curva de primera imanación de las partículas de magnetita sintetizadas. La línea corresponde a la ecuación de Fröhlisch-Kennelly. ....</i>	100
<i>Figura 46. Ciclo de histéresis de la magnetita en polvo.....</i>	100
<i>Figura 47. Ciclo de magnetización de partículas de magnetita de unos 30 nm a temperatura ambiente medida entre <math>\pm 750</math> Oe. ....</i>	101
<i>Figura 48. Detalle del ciclo de magnetización de magnetita nanométrica de 30 nm.....</i>	101

*Figura 49. Simulación de ciclos de histéresis de magnetita cúbica al aplicar un campo magnético en el eje de fácil magnetización con diferentes tamaños (de izquierda a derecha 0.1  $\mu\text{m}$ , 0.2  $\mu\text{m}$ , 0.5  $\mu\text{m}$ , 0.7  $\mu\text{m}$ , 1.0  $\mu\text{m}$ ) ..... 101*

*Figura 50. Magnetización (M) en función del campo (H) aplicado a 5K para diferentes muestras de magnetita nanométrica. .... 102*

*Figura 51. Rangos SSD para granos individuales y cadenas de cristales de magnetosomas interactuando entre sí. .... 104*

## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Listado de los óxidos e hidróxidos de hierro. ....</i>	<i>3</i>
<i>Tabla 2. Ecuaciones de Maxwell.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 3. Límites establecidos para las sumas de las fuentes según diferentes organismos. ....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 4. Límites recomendados de exposición a campos electromagnéticos. Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP), CEM guidelines, Health Physics 74, 494-522 (1998) .....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 5. Exposición máxima típica de la población frente a una fuente de campo electromagnético (Oficina Regional de la OMS para Europa) .....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 6. Dosis umbral aguda y efectos biológicos .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 7. Lesiones radiológicas según la dosis absorbida. ....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 8. IRM (magnetización remanente isotérmica) saturada media para el cortex cerebral y el cerebelo de cada cerebro. ....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 9. Concentraciones de ferritinas H y L, total de hierro y ratio entre las concentraciones de hierro y ferritina en varias estructuras del cerebro humano normal. ....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 10. Comparación del diámetro de hierro de la ferritina en diferentes estructuras del cuerpo humano.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 11. Comparativa de las concentraciones de hierro en la sustancia negra en afectados por Parkinson y de control. ....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 12. Comparativa de las concentraciones de hierro total, de ferritinas H y L, coeficientes de asimetría y concentraciones de hierro lábil en varias estructuras cerebrales.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 13. SIGMA-ALDRICH sigma-aldrich.com. Ficha de Datos de Seguridad de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006. Versión 4.8 Fecha de revisión 13.12.2011. Fecha de impresión 10.06.2012.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 14. Valores extraídos de permitividad, conductividad y tangente de pérdidas de la magnetita nanométrica para diferentes frecuencias.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 15. Efecto del tamaño de la partícula sobre el volumen de la celda unitaria, temperatura de transición magnética y magnetización de saturación de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.....</i>	<i>102</i>



## OBJETIVO Y RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo la recopilación de información que sirva para determinar en trabajos posteriores las probabilidades, si es que las hay, de que la exposición a un campo electromagnético actualmente permitido y evaluado como inofensivo para el cuerpo humano, pueda tener algún efecto cuando se tiene en cuenta la presencia de magnetita de tamaño nanométrico. Por ejemplo, el efecto de la generación de un nano-clima podría tener consecuencias graves en cuanto a desencadenante de reacciones químicas biológicas.

Para ello se introduce en primer lugar, dentro de la exposición a los campos electromagnéticos en los seres vivos, algunas de las aplicaciones que pueden afectar a los tejidos biológicos, una visión desde la Organización Mundial de la Salud acerca de la normativa vigente y seguridad en materia de radiación no ionizante, y una revisión de los materiales biológicos a tener en cuenta junto con algunos ejemplos de simulaciones.

A continuación se realiza una recopilación de los efectos biológicos detectados como consecuencia de la exposición a los diferentes campos electromagnéticos, tanto ionizantes como no ionizantes, distinguiéndose entre efectos térmicos, atérmicos y no térmicos; y una aproximación a los métodos de compensación del calentamiento de los que dispone el cuerpo humano y que pueden estar apantallando algunos de los efectos biológicos, pero también pudiendo provocar sobreesfuerzos en otras zonas como el hipotálamo.

Posteriormente se expone la presencia de magnetita en los seres vivos (magnetita biogénica) y en el cuerpo humano y la relación encontrada entre algunas enfermedades neurodegenerativas (Parkinson, Alzheimer, parálisis supranuclear progresiva y neuroferritinopatía) y las concentraciones de hierro en el organismo.

A partir de lo anterior y habiendo introducido en primer lugar la magnetita como uno de entre los dieciséis óxidos, hidróxidos y óxido-hidróxidos de hierro presentes en la naturaleza, el trabajo se centra en determinar las principales propiedades físicas y químicas de la magnetita, incidiendo en las características de su molécula, celda unitaria y propiedades cristalográficas, y en las propiedades eléctricas y magnéticas.

Finalmente, puesto que la magnetita biogénica hallada es en su mayoría de tamaño nanométrico, resulta imprescindible centrar la atención en las nanopartículas de magnetita, para seguidamente incidir sobre sus procesos de síntesis, sus principales usos y aplicaciones, principales características y propiedades eléctricas y magnéticas.



# 1 INTRODUCCIÓN

La mayoría de los materiales encontrados en los organismos son no magnéticos (diamagnéticos y paramagnéticos). Sin embargo también existen materiales ferromagnéticos como la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), que podría interactuar hasta un millón de veces más frente a un campo magnético externo. En 1992 Kirschvink y colaboradores <sup>[1][2]</sup> identifican la presencia de minerales magnéticos, presumiblemente magnetita y maghemita, en el cerebro del cuerpo humano. Es por ello que se ha incluido en primer lugar a modo de introducción en el *apartado 1.1* unas nociones básicas acerca de los óxidos e hidróxidos de hierro, su ubicación en el sistema global y su interés multidisciplinar.

Ante este hallazgo ha surgido repetidamente en el transcurso de los años la pregunta de si los diferentes campos electromagnéticos a los que se expone el cuerpo humano pueden afectar de alguna manera a los cristales de magnetita que pudieran encontrarse en el cuerpo humano y provocar así efectos, no necesariamente nocivos, en el organismo. Es por ello que en la presente introducción se ha incluido una información básica de *campos electromagnéticos y dosimetría (apartado 1.2)*. Como se verá más adelante las relaciones encontradas entre algunas enfermedades neurodegenerativas y las concentraciones de Fe en el cuerpo humano son, cuanto menos, inquietantes.

Finalmente se ha de tener en cuenta que las muestras de magnetita encontradas en los organismos y en el cuerpo humano tienen en general tamaño nanométrico. Como se verá más adelante, muchos materiales cambian sus características al reducir su tamaño hasta esta escala nanométrica. Ello representa un reto añadido, ya que es la razón por la que también resultará imprescindible una introspección en el campo de las nanopartículas magnéticas.

## 1.1 LOS ÓXIDOS DE HIERRO

Son compuestos comunes en la naturaleza y disponibles en el laboratorio. Están presentes en casi todas las partes del sistema global: atmósfera, pedosfera, biosfera, hidrosfera y litosfera, y participan en las interrelaciones entre ellas.

La figura 1 <sup>[3]</sup> esquematiza la localización de los óxidos de hierro en la Tierra a partir de menas, rocas y el agua.

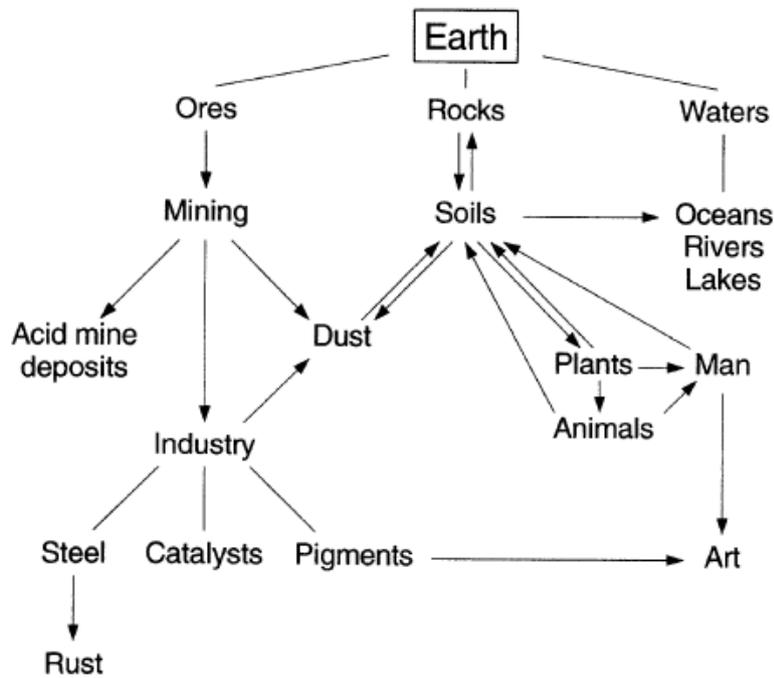


Figura 1. Óxidos de Fe en el sistema global

Inicialmente la formación de óxidos de Fe<sup>III</sup> se relacionaba predominantemente con las rocas magmáticas, tanto en ambiente terrestre como marino. Luego se han de tener en cuenta los procesos de redistribución entre los subsistemas del sistema global, que incluyen el transporte mecánico a través de la erosión del aire y del agua desde la pedosfera hacia la hidrosfera y la atmósfera, y lo que es más importante, la disolución de Fe<sup>II</sup> y precipitación oxidativa en otro subsistema.

La formación de minerales de hierro y la precipitación de óxidos de hierro en biología son ejemplos importantes de redistribución. El ser humano participa en estos procesos no sólo como organismo vivo, sino también como un consumidor del metal de hierro y sus óxidos para diferentes propósitos. El resultado general de todos estos procesos es un incremento de la presencia de óxidos de hierro en el sistema global a expensas de las rocas magmáticas primarias.

La consecuencia lógica de la amplia distribución de los óxidos de hierro es que muchas disciplinas diferentes se han interesado en ellos. En la figura 2 se esquematiza la naturaleza multidisciplinar de las investigaciones que se han realizado sobre los óxidos de hierro.

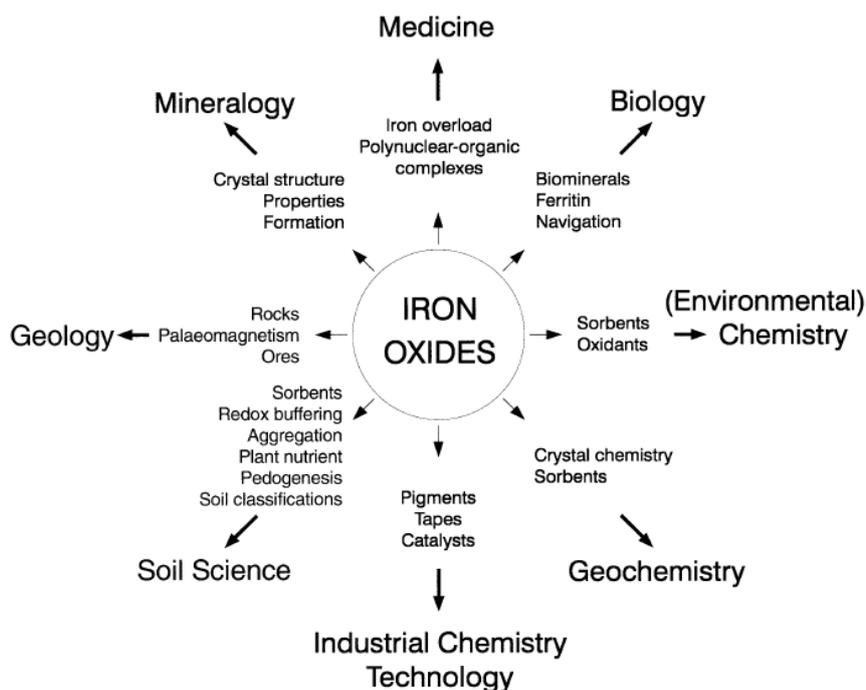


Figura 2. Naturaleza multidisciplinaria en la investigación de los óxidos de hierro.

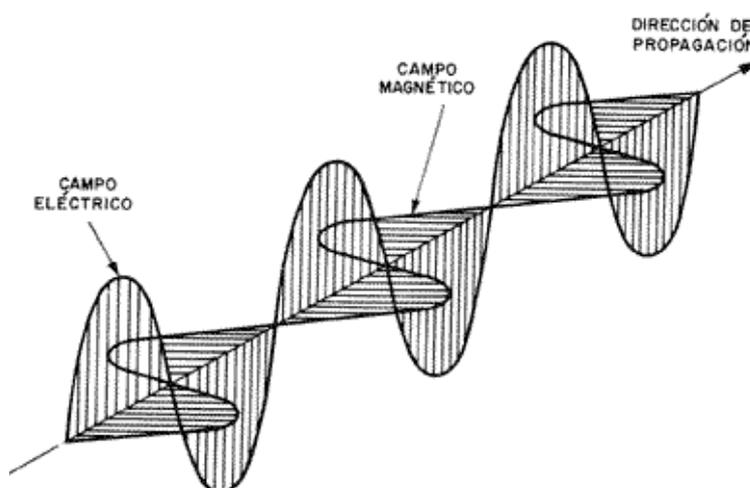
Hay 16 óxidos de hierro [3], los cuales pueden ser óxidos, hidróxidos u óxido-hidróxidos, aunque de forma genérica se les llama óxidos de hierro, los cuales se han listado en la tabla 1. Los óxidos de hierro están compuestos de Fe junto con O y/o OH. La mayoría de los compuestos de hierro están en estado trivalente. Tres compuestos, entre ellos la magnetita, contienen Fe<sup>II</sup>. Los óxidos de hierro constituyen paquetes cerrados de aniones (normalmente en configuración hexagonal o cúbica) cuyos huecos se llenan parcialmente con Fe divalente o trivalente, predominantemente en configuración octaédrica y, en algunos casos, tetraédrica

Oxide-hydroxides and hydroxides	Oxides
Goethite $\alpha$ -FeOOH	Hematite $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Lepidocrocite $\gamma$ -FeOOH	Magnetite Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (Fe <sup>II</sup> Fe <sup>III</sup> O <sub>4</sub> )
Akaganéite $\beta$ -FeOOH	Maghemite $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Schwertmannite Fe <sub>16</sub> O <sub>16</sub> (OH) <sub>y</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>z</sub> · n H <sub>2</sub> O	$\beta$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
$\delta$ -FeOOH	$\epsilon$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Feroxyhyte $\delta'$ -FeOOH	Wüstite FeO
High pressure FeOOH	
Ferrihydrite Fe <sub>5</sub> HO <sub>8</sub> · 4 H <sub>2</sub> O	
Bemalite Fe(OH) <sub>3</sub>	
Fe(OH) <sub>2</sub>	
Green Rusts Fe <sup>III</sup> <sub>x</sub> Fe <sup>II</sup> <sub>y</sub> (OH) <sub>3x+2y-z</sub> (A <sup>-</sup> ) <sub>z</sub> ; A <sup>-</sup> = Cl <sup>-</sup> ; 1/2 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	

Tabla 1. Listado de los óxidos e hidróxidos de hierro.

## 1.2 CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y DOSIMETRÍA

Los campos electromagnéticos son una combinación de campos de fuerza eléctricos y magnéticos. Tienen lugar tanto de forma natural como debido a la actividad humana <sup>[4]</sup>. La figura 3 representa la propagación de una onda electromagnética a lo largo de una dirección de propagación al tiempo que los campos eléctrico y magnético están en fase, es decir, toman valores extremos y valores nulos, al mismo tiempo:



*Figura 3. Representación de la propagación de una onda electromagnética.*

En el medio en que vivimos, hay campos electromagnéticos en todo lugar y tiempo, pero son invisibles para el ojo humano. Por ejemplo, los campos eléctricos se producen por acumulación de cargas eléctricas en determinadas zonas de la atmósfera por efecto de las tormentas, mientras que el campo magnético terrestre provoca la orientación de las agujas de los compases en dirección norte-sur, y pájaros y peces lo utilizan para orientarse. La figura 4 muestra para un espectro electromagnético a diferentes frecuencias, y lógicamente de longitudes de onda, la penetración de los campos electromagnéticos en la atmósfera así como la temperatura en Kelvin y grados Celsius a la que los cuerpos emiten la onda más intensamente:

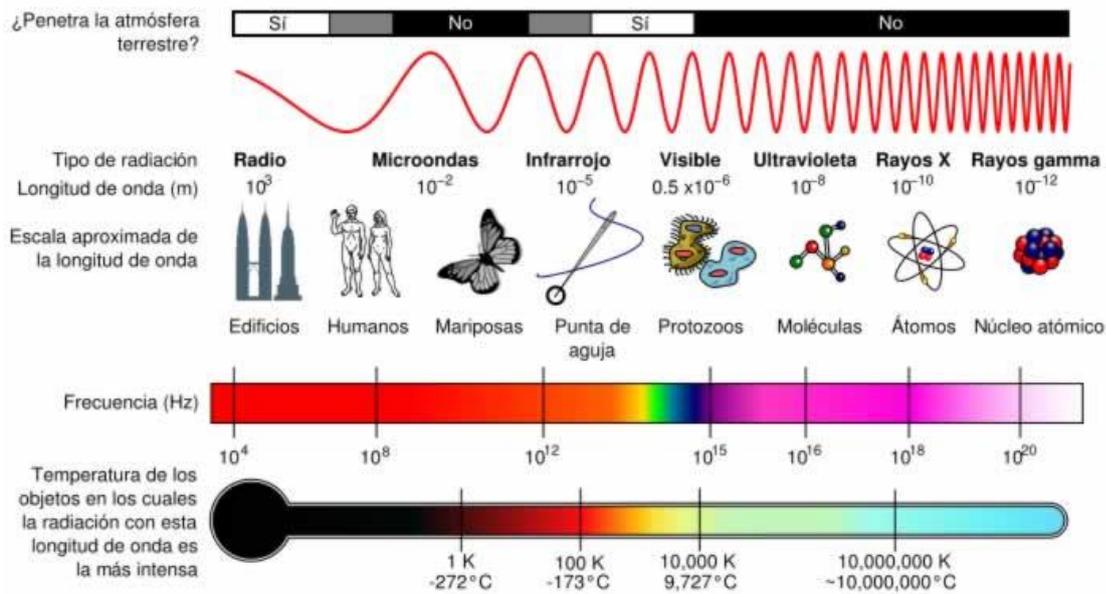


Figura 4. Representación de los diferentes tipos de radiación generada por los campos electromagnéticos

Además de las fuentes naturales, en el espectro electromagnético hay fuentes artificiales. Por ejemplo, para diagnosticar la rotura de un hueso se utilizan los rayos X, el suministro eléctrico lleva asociados campos electromagnéticos de frecuencia baja, y se usan diferentes tipos de ondas de radio de frecuencia más alta para transmitir información, ya sea por medio de antenas de televisión, estaciones de radio o estaciones base de telefonía móvil.

Consideremos ahora el ejemplo de la exposición a la radiación solar. El Sol da calor y luz que puede provocar quemaduras si la exposición es suficientemente prolongada (efecto del tiempo de exposición) para que la melanina no pueda protegernos (la melanina es un pigmento que da al pelo y a la piel su color y que nos protege frente a las radiaciones ultravioleta –UV- y visible). Podemos controlar sus efectos utilizando gafas de sol, sombreros, ropas etc., (medidas de prevención frente a la intensidad de exposición). Algunos efectos de esta radiación pueden ser nocivos pero otros pueden ser altamente beneficiosos para la salud.

Un efecto biológico de un campo electromagnético ocurre cuando la exposición al mismo causa algún efecto fisiológico detectable en un sistema vivo. Este efecto puede o no llevar a un efecto nocivo. Por tanto, es esencial diferenciar entre efecto biológico y efecto nocivo. Los efectos sobre la salud, positivos y negativos, son frecuentemente resultado de efectos biológicos que se acumulan sobre un cierto espacio temporal y que además dependen de la dosis recibida.

Los campos electromagnéticos pueden propagarse a través de cualquier medio, dieléctrico o magnético, y quedan definidos matemáticamente por las ecuaciones de Maxwell. A continuación se expone en la tabla 2 las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial, así como su ley predecesora, y las denominadas ecuaciones constitutivas:

Ley precedente	Forma diferencial de la ecuación de Maxwell
Ley de Gauss	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$
Ley de Gauss para el campo magnético	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
Ley de Faraday	$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Ley de Ampere generalizada	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
Ecuaciones constitutivas	$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ $\vec{B} = \mu \vec{H}$

Tabla 2. Ecuaciones de Maxwell

Siendo:

$\vec{B}$  = densidad de flujo o inducción magnética (Wb/m<sup>2</sup>)

$\vec{D}$  = densidad de flujo o desplazamiento eléctrico (C/m<sup>2</sup>)

$\vec{E}$  = intensidad de campo eléctrico (V/m)

$\vec{H}$  = intensidad de campo magnético (A/m)

$\vec{J}$  = densidad superficial de corriente (A/m<sup>2</sup>)

$\rho$  = densidad de carga eléctrica volumétrica (C/m<sup>3</sup>)

$\epsilon$  = permitividad eléctrica (F/m)

$\mu$  = permeabilidad magnética (H/m)

**Radiación ionizante y no ionizante** <sup>[5]</sup>. Las ondas electromagnéticas son transportadas por partículas llamadas cuantos de luz. Los cuantos de luz de ondas con frecuencias más altas (longitudes de onda más cortas) transportan más energía que los de las ondas de menor frecuencia (longitudes de onda más largas). Algunas ondas electromagnéticas transportan tanta energía por cuanto de luz que son capaces de romper los enlaces entre las moléculas.

De las radiaciones que componen el espectro electromagnético, los rayos gamma que emiten los materiales radioactivos, los rayos cósmicos y los rayos X tienen esta capacidad y se conocen como «radiación ionizante».

Las radiaciones compuestas por cuantos de luz sin energía suficiente para romper los enlaces moleculares se conocen como «radiación no ionizante».

Las fuentes de campos electromagnéticos artificiales que constituyen una parte fundamental de las sociedades industriales (electricidad, microondas y campos de radiofrecuencia) están en el extremo del espectro electromagnético correspondiente a longitudes de onda relativamente largas y frecuencias bajas y su radiación es no ionizante.

**Frecuencia de resonancia.** El fenómeno de resonancia se manifiesta cuando una onda interactúa con un sistema cuya frecuencia propia o fundamental es igual o un múltiplo entero de la frecuencia de la oscilación. La frecuencia propia del sistema es la frecuencia fundamental en alguno de sus modos de vibración.

Un ejemplo cotidiano: Cuando se impulsa un columpio con un niño sentado, si se considera el columpio como un péndulo, éste tiene una frecuencia propia dada por el peso del niño, sin

importar la amplitud de la oscilación, es decir sin importar la altura que alcanza el niño al columpiarse. Cuando otra persona impulsa al niño en el columpio, cada vez que pasa por su posición, ésta ejerce su fuerza una vez por ciclo, por lo que la frecuencia de la fuerza impulsora es igual a la frecuencia propia del sistema columpio-niño, y la amplitud de oscilación aumenta (fuerza y movimiento están en fase, están en resonancia).

A nivel de campos electromagnéticos, el acoplo de los campos y la distribución interna de energía absorbida son funciones del tamaño, forma, orientación y propiedades dieléctricas (permitividad y conductividad básicamente) de los seres vivos.

**Dosimetría Electromagnética.** Establece la relación entre una distribución de campos electromagnéticos libre de perturbaciones y los campos inducidos dentro de los tejidos biológicos. El fenómeno de exposición es muy diferente en situaciones de campo próximo y campo lejano. El cuerpo humano extrae energía fundamentalmente del campo eléctrico. La TAE (Tasa de Absorción Específica) o SAR (Specific Absorption Rate) es la cantidad que describe la potencia de absorción de los campos electromagnéticos, en los tejidos, expresados en vatios por kilogramo <sup>[6]</sup>:

$$TAE = \frac{1}{2} \sigma |\vec{E}|^2 \text{ W/m}^3; \quad TAE = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\rho} |\vec{E}|^2 \text{ W/Kg}$$

Siendo:

$\vec{E}$  = intensidad de campo eléctrico (V/m)

$\rho$  = densidad de carga eléctrica volumétrica (C/m<sup>3</sup>)

$\sigma$  = conductividad eléctrica (S/m -siemens por metro- o  $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ )

Para un órgano concreto la potencia recibida es:  $P = \int_M TAE \, dm$ ;  $m$  = masa (Kg)

El efecto biológico mejor detectado de la absorción de un campo electromagnético en los seres vivos es un incremento de la temperatura T, por lo que se suele asociar:

$$TAE = c \frac{\Delta T}{\Delta t}; \quad c = \text{calor específico (J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$$

No obstante, esta relación puede resultar bastante más compleja en los seres vivos por los efectos termorreguladores.

Por otro lado, se presenta en la tabla 3 con respecto a la cuantificación de la exposición a múltiples fuentes electromagnéticas, los límites actuales establecidos teniendo en cuenta las sumas de cada fuente detectada, con diferente formulación según el organismo:

NRPB	$\sum_{0 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{med}}{E_{lim}} \leq 1$	$\sum_{0 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{H_{med}}{H_{lim}} \leq 1$	$\sum_{0 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{S_{med}}{S_{lim}} \leq 1$
ICNIRP	$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{1 \text{ MHz}} \left( \frac{E_i}{l_E(f)} \right)^2 + \sum_{i>1 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \left( \frac{E_i}{E_{Li}} \right)^2 \leq 1$ $\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{1 \text{ MHz}} \left( \frac{H_i}{l_H(f)} \right)^2 + \sum_{i>1 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \left( \frac{H_i}{H_{Li}} \right)^2 \leq 1$		

*NRPB (National Radiological Protection Board)*

*ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)*

*Tabla 3. Límites establecidos para las sumas de las fuentes según diferentes organismos.*



## 2 LA EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SERES VIVOS

En este capítulo se realiza una recopilación de las fuentes principales y aplicaciones que se hacen de los campos electromagnéticos y que pueden afectar en diferentes formas y grados a los tejidos biológicos, tanto en radiación ionizante como no ionizante. Posteriormente se expone un resumen de las directrices en cuanto a radiación no ionizante y la evaluación de la exposición a los campos electromagnéticos. Finalmente se realiza una introducción a los diferentes tipos de materiales biológicos que se han de tener en cuenta en la exposición a los campos electromagnéticos y se citan algunos ejemplos de simulaciones.

### 2.1 APLICACIONES QUE PUEDEN AFECTAR A TEJIDOS BIOLÓGICOS

#### 2.1.1 Radiación Ionizante

**Radiación ultravioleta (UV).** Sólo pueden originar ionización en determinadas circunstancias. Para distinguir este tipo de radiación de la radiación que siempre causa ionización, se establece un límite energético inferior arbitrario para la radiación ionizante, que se suele situar en torno a 10 kiloelectronvoltios (keV).

**Equipos de Difracción de Rayos X.** Los rayos X se utilizan ampliamente en medicina principalmente con objetivos diagnósticos. Los rayos X usados en difracción <sup>[7]</sup> tienen longitudes de onda en el rango 0.5 – 2.5 Å, siendo el angstrom ( $1\text{Å} = 10^{-10}$  m.). Los rayos X se producen cuando una partícula cargada eléctricamente con suficiente energía cinética es frenada rápidamente. Habitualmente las partículas utilizadas son los electrones y la radiación se obtiene en un dispositivo conocido como tubo de rayos X que contiene una fuente de electrones y dos electrodos metálicos.

El alto voltaje entre los electrodos dirige los electrones hacia el ánodo –o blanco- y al golpear sobre él con una elevada velocidad producen rayos X en el punto de impacto que se irradian en todas direcciones. La mayor parte de la energía cinética de los electrones que golpean el blanco se convierte en calor y únicamente menos de un 1% se transforma en rayos X.

La difracción es esencialmente un fenómeno de dispersión al interactuar los rayos X con la materia. Se produce cuando algunos fotones del haz incidente son desviados sin pérdida de energía, constituyendo la radiación dispersada exactamente con la misma longitud de onda  $\lambda$  que la radiación incidente.

**Rayos Gamma.** Los rayos gamma más energéticos se han observado en los rayos cósmicos. Se producen en la desintegración radiactiva, normalmente con el objetivo de producir energía en reactores nucleares y en aplicaciones médicas, como fuentes de radioterapia, aunque también se usan con fines militares.

La radiación gamma, como muestra esquemáticamente la figura 5, es radiación electromagnética emitida por un núcleo cuando experimenta una transición de un estado de energía más alta a un estado energético más bajo. El número de protones y neutrones del núcleo no varía en estas transiciones.

Los rayos gamma se emiten a menudo inmediatamente después de una desintegración alfa o beta en la que el núcleo haya quedado en un estado de mayor energía. Los rayos gamma también pueden ser el resultado de la captura de un neutrón y de la dispersión inelástica de partículas subatómicas por núcleos.

Mientras que las partículas alfa y beta tienen alcances definidos en la materia, los rayos gamma experimentan una atenuación exponencial a medida que atraviesan la materia (si no se tiene en cuenta la acumulación de energía que resulta de la dispersión de los rayos gamma dentro de un material).

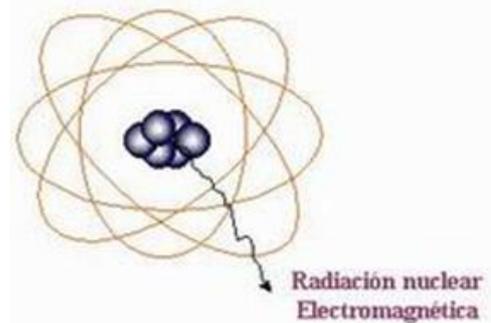


Figura 5. Radiación gamma

### 2.1.1.1 Partículas Alfa, Partículas Beta y Neutrones

**Partículas alfa.** Estas partículas son el conjunto de dos protones y dos neutrones, como se representa en la figura 6. Tienen su origen en el núcleo de un átomo radiactivo en proceso de desintegración y consiste en un acercamiento ocasional de dos protones y dos neutrones que se mueven lentamente atrapando electrones y asemejando la estructura del helio <sup>[8]</sup>. Tienen una carga eléctrica positiva y alta densidad de ionización (7 MeV), a pesar de lo cual viajan muy poco (10cms) y son detenidas por una película de agua, papel o la piel.

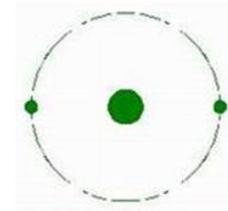


Figura 6. Partícula alfa

**Partículas beta.** Están formadas por electrones que vienen del núcleo de un átomo radiactivo en desintegración. Las partículas beta tienen una carga negativa y en algunas ocasiones se desprenden también partículas con la misma masa del electrón pero con carga positiva (positrones). Viajan a una alta velocidad y tienen una energía de 4MeV o mayor. Su capacidad de penetración es mayor que las partículas alfa, pero su poder de ionización es menor. Penetran 4 cm en madera y hasta 1.3 cm en piel <sup>[8]</sup>. La figura 7 representa esquemáticamente las partículas beta.



Figura 7. Partículas beta

**Neutrones.** Por lo general, los neutrones no son emitidos como resultado directo de la desintegración radiactiva natural, sino que se producen durante reacciones nucleares <sup>[8]</sup>.

Los reactores nucleares son los que generan neutrones con mayor abundancia. Los reactores nucleares producen neutrones cuando los núcleos del uranio que constituye el combustible nuclear se desdoblán o fisionan. De hecho, la producción de neutrones es esencial para mantener la fisión nuclear en un reactor.

Los aceleradores de partículas y las fuentes especiales de neutrones también producen

neutrones. Los aceleradores de partículas producen neutrones mediante la aceleración de partículas cargadas, como protones o electrones, hasta que alcanzan altas energías, para bombardear con ellas los núcleos estables de un blanco. Las partículas que pueden resultar de estas reacciones nucleares no son únicamente neutrones.

### **2.1.2 Radiación No Ionizante (ultravioletas, radiofrecuencias y microondas)**

**Radiación Ultravioleta (RUV).** Por su longitud de onda se distingue entre UVA (315 a 400 nm), UVB (280 a 315 nm) y UVC (100 a 280 nm). Entre las fuentes artificiales más importantes de exposición humana están las siguientes <sup>[9]</sup>:

- Soldadura al arco industrial. La principal fuente de exposición potencial a la RUV es la energía radiante de los equipos de soldadura al arco. Los niveles de RUV en torno al equipo de soldadura son muy altos y pueden producirse lesiones oculares y cutáneas graves en un tiempo de 3 a 10 minutos de exposición a distancias visuales de unos pocos metros. La protección de ojos y piel es obligatoria.
- Lámparas de RUV industriales y en el puesto de trabajo. Muchos procesos industriales y comerciales, tales como el curado fotoquímico de tintas, pinturas y plásticos, requieren la utilización de lámparas que emiten una radiación intensa en la región del UV.
- Lámparas de luz negra. Son lámparas especializadas que emiten predominantemente en la región UV, y por lo general se utilizan para pruebas no destructivas con polvos fluorescentes, para la autenticación de billetes bancarios y documentos, y para efectos especiales en publicidad y discotecas. No plantean ningún riesgo de exposición considerable para las personas, excepto en ciertos casos de piel fotosensibilizada.
- Tratamiento médico. Las lámparas de RUV se utilizan en medicina para diversos fines de diagnóstico -normalmente UVA-, y terapéuticos. Los niveles de exposición del paciente varían considerablemente según el tipo de tratamiento, y las lámparas UV empleadas en dermatología requieren una utilización cuidadosa por parte del personal.
- Lámparas RUV germicidas. La RUV con longitudes de onda en el intervalo de 250-265 nm es la más eficaz para esterilización y desinfección dado que corresponde a un nivel máximo en el espectro de absorción del ADN. Como fuente UV se utilizan con frecuencia tubos de descarga de mercurio de baja presión, ya que más del 90% de la energía radiada se emite en la línea de 254 nm.(UVC).
- Bronceado cosmético. Se trata de las camas solares para broncearse por medio de lámparas especiales que emiten principalmente UVA, aunque también algo en de UVB. El uso habitual de una cama solar puede contribuir considerablemente a la exposición cutánea anual de una persona al UV. Así mismo el personal que trabaja en salones de bronceado puede resultar expuesto a bajos niveles.
- Alumbrado general. Las lámparas fluorescentes son de uso habitual en el lugar de trabajo y doméstico. Estas lámparas emiten pequeñas cantidades de RUV y solo contribuyen en un pequeño porcentaje a la exposición anual de una persona a la radiación UV.

**Radiofrecuencias (RF) Y Microondas (MW).** Entre las aplicaciones de las MW y RF podemos nombrar las estaciones de radio y televisión, comunicaciones punto-punto en microondas, comunicaciones móviles de todo tipo (celulares, de onda corta etc.), radioaficionados, navegación (marítima y aérea), aplicaciones radar (militares y civiles), hornos microondas (para cocinar y aplicaciones industriales), amplificadores en compatibilidad electromagnética y metrología.

Los elementos básicos de un sistema de RF/MW son generadores o fuentes de RF/MW, líneas de transmisión (elementos utilizados para transportar la energía del generador a la antena y básicamente pueden ser cables coaxiales, líneas planas o guías de onda), y las antenas (dispositivos que acoplan el circuito que genera la energía electromagnética al espacio libre por donde se propaga la energía electromagnética que posteriormente recogerá otra antena).

En cuanto a los diferentes sistemas dependiendo de las aplicaciones podemos nombrar los siguientes <sup>[9] [5]</sup>:

- Transmisores de televisión y radio terrestres.. Las estaciones de radio y televisión emiten sus señales a través de antenas de AM (amplitud modulada), FM (frecuencia modulada), VHF (Very High Frequency) y UHF (Ultra High Frequency). Normalmente las señales de radio AM emiten entre 535-1700 KHz y las de FM entre 87-108 MHz.
- Sistemas de radar. La palabra radar es un acrónimo utilizado por la marina estadounidense en 1942 que significa detección y alcance vía radio (radio detecting and ranging) y, por supuesto, desarrollado únicamente con fines militares, aunque después su utilidad se expandió a otros ámbitos. El radar mide la intensidad y tiempo que tarda en volver un pulso que envía una antena y que choca en un blanco. De esa información se obtiene la distancia a la que se encuentra. Se envían alrededor de 1500 pulsos de alta potencia por segundo con una anchura de 10-50  $\mu$ s. Así mismo, son comunes los radares de tráfico que a través del efecto Doppler calculan la velocidad a la que avanza un móvil. Los primeros radares de efecto Doppler funcionaban a 10.525 GHz dentro de la banda X. Posteriormente se usaron a frecuencias de 24,15 GHz (en banda milimétrica). En la actualidad se utilizan en la banda de 33,7-36 GHz. Estos radares emiten una señal de débil potencia en forma de onda continua (CW) en lugar de pulsos y las potencias son del orden de 10 a 100 mW, siendo un valor típico 15 mW que es considerado una señal de débil.
- Estaciones de satélites terrestres. Un satélite es un transmisor/ receptor que es lanzado por un cohete y colocado en órbita alrededor de la Tierra sometido a la atracción gravitacional. Sus funciones son múltiples: telefónicas, meteorológicas, detección en la Tierra y lejana, televisión y radio y en plataformas para sistema global de posicionamiento (GPS). Son muy comunes las antenas parabólicas para plataformas de televisión digital que reciben señal enviada por las situadas en satélites en órbita geoestacionaria a 36.000 Kms de la Tierra.
- Comunicaciones microondas. Las comunicaciones punto a punto entre antenas con “visión” directa es una forma de comunicación utilizada habitualmente en radiocomunicaciones. Las antenas de comunicación de microondas emiten y reciben señales de relativamente baja potencia a través de distancia no muy grandes. Normalmente las antenas empleadas son muy directivas de forma que existe muy poca señal en otra dirección que no sea la del camino directo entre dos antenas.
- Equipos móviles de radio. Estos sistemas (no los celulares actuales) son los más antiguos sistemas de comunicación sin cable. Comenzó en USA en 1921 operando a 2MHz, de forma experimental para los departamentos de policía, y no empezaron de forma práctica hasta los años 40.
- Equipos buscadores. Son equipos que avisan cuando reciben una señal emitida por una antena. Su utilidad ha disminuido con la llegada de la telefonía celular pero aún sigue siendo una buena opción en determinados sectores. Las frecuencias de las señales pueden estar entre 16-150 KHz para lugares de menos de 4 hectáreas, en las bandas de HF (26-31 MHz) o VHF (49 MHz), en la de UHF (459 MHz) para edificios e industrias. Habitualmente los transmisores se colocan en lo alto de los edificios.
- Comunicaciones celulares (telefonía móvil). Este es un tipo de comunicación de banda

limitada, analógica o digital, en la que una persona se comunica vía radio a través de un terminal móvil con una antena que está situada relativamente cerca de él. Su crecimiento ha sido brutal en estos pocos últimos años, comenzando en los años 80, con la primera generación de móviles con tecnología analógica. Posteriormente se inició la tecnología digital, lo que supuso una mejora en las prestaciones y servicios ofrecidos. Se ha utilizado el sistema GSM (Global System for Mobile Communication), y la estandarización llevó a una tercera generación de móviles denominada UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) que en Europa se localiza en la banda de 2 GHz.

- Sistemas de comunicación personal. Aquí se engloban todos aquellos sistemas de comunicación personal sin cable.
- Otros sistemas. Se engloban todos aquellos sistemas que no se utilizan para la comunicación personal. Así, la energía de RF en el rango de 3 a 300 MHz se utiliza para distintos procesos industriales de calentamiento. Asimismo, aprovechando la habilidad de la energía de microondas para penetrar en un medio material, se utilizan para muchas aplicaciones los hornos microondas. En particular, en los hogares se utilizan hornos microondas operando a una frecuencia de 2,45 GHz.

### 2.1.3 Radiación No Ionizante (frecuencias bajas y muy bajas)

Los campos eléctrico y magnético de muy baja frecuencia (ELF) -de 0 a 300 Hz- se encuentran comúnmente en nuestro entorno <sup>[9] [5]</sup>:

- En los hogares las fuentes de estos campos son por ejemplo mantas eléctricas, calentadores de agua, secadores de pelo, afeitadoras eléctricas, televisiones, terminales de video, sistemas de música, sistemas de aire acondicionado, tubos fluorescentes, frigoríficos, estufas y cualquier otro electrodoméstico.
- En los lugares de trabajo son comunes fuentes de radiación ELF tales como ordenadores, máquinas de fax, copiadoras, luces fluorescentes, impresoras, scanner, centralitas telefónicas, motores y otros dispositivos eléctricos.

Normalmente la discusión sobre los efectos se restringe al campo magnético que es producido por corrientes alternas o campos variantes en el tiempo cuya intensidad y dirección cambien de forma regular. Estos campos provienen principalmente de fuentes creadas por el hombre, especialmente de servicios de potencia eléctrica, electrodomésticos y sistemas de comunicación.

Es muy común citar el campo estático magnético generado por la Tierra como fuente de especial atención. Sin embargo hay que considerar que su comparación con los campos provocados artificialmente no es adecuada debido a que la influencia en la materia es bastante diferente entre un campo estático y uno variable en el tiempo <sup>[9]</sup>.

La variación del campo magnético con la distancia a la fuente que lo crea depende del tipo de fuente <sup>[9]</sup>. Así si la fuente es un simple hilo conductor el campo varía como  $1/r$ . Si el campo lo provocan un par de hilos conductores entonces la variación es  $1/r^2$ . Si la fuente es un lazo de corriente, como lo que ocurre en los transformadores de la mayoría de los electrodomésticos y ordenadores la variación es como  $1/r^3$ . Otro tipo de fuente es la creada por las líneas de alta tensión. Éstas son transmitidas mediante líneas de distribución de tres hilos. Cada uno de ellos lleva una corriente desfasada de los demás en  $120^\circ$ , que se llama circuito balanceado. En este caso el campo magnético es proporcional a  $1/r^2$ , y si la línea no está balanceada entonces el campo varía como  $1/r$ .

## 2.2 DIRECTRICES EN RADIACIÓN NO IONIZANTE

Las normas que previenen la exposición excesiva a los campos electromagnéticos (CEM) presentes en el entorno existen de forma similar a otras normas establecidas para proteger nuestra salud (aditivos alimentarios, concentraciones de productos químicos en agua, contaminantes del aire, etc.).

Cada país establece sus propias normas nacionales relativas a la exposición a CEM. Sin embargo, la mayoría de estas normas nacionales se basan en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP). Esta organización no gubernamental, reconocida formalmente por la OMS, evalúa los resultados de estudios científicos realizados en todo el mundo. Basándose en un análisis en profundidad de todas las publicaciones científicas, la ICNIRP elabora unas directrices en las que establece límites de exposición recomendados, las cuales se revisan periódicamente y, en caso necesario, se actualizan.

El siguiente cuadro (tabla 4) <sup>[5]</sup> resume los límites recomendados de exposición, actualizados en 1998, por la ICNIRP correspondientes a los tipos de tecnologías que han causado preocupación en la sociedad: la electricidad en el hogar, las estaciones base de telefonía móvil y los hornos de microondas:

	Frecuencia de la red eléctrica europea	Frecuencia de estaciones base de telefonía móvil		Frecuencia de los hornos de microondas	
Frecuencia	50 Hz	50 Hz	900 MHz	1,8 GHz	2,45 GHz
	Campo eléctrico (V/m)	Campo magnético (μT)	Densidad de potencia (W/m <sup>2</sup> )	Densidad de potencia (W/m <sup>2</sup> )	Densidad de potencia (W/m <sup>2</sup> )
Límites de exposición para la población	5 000	100	4,5	9	10
Límites de exposición ocupacionales	10 000	500	22,5	45	

*Tabla 4. Límites recomendados de exposición a campos electromagnéticos. Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP), CEM guidelines, Health Physics 74, 494-522 (1998)*

Los límites de exposición recomendados de algunos países de la ex Unión Soviética y los de países occidentales pueden llegar a diferenciarse en un factor de más 100. Con la globalización del comercio y la rápida penetración de las telecomunicaciones en todo el mundo, ha surgido la necesidad de disponer de normas universales. Las normas futuras se basarán en los resultados del Proyecto Internacional sobre campos electromagnéticos de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Un límite recomendado no define de forma exacta el límite entre la seguridad y el peligro. No existe un nivel único por encima del cual la exposición se convierte en peligrosa para la salud; sino que el riesgo potencial para la salud aumenta de forma gradual con el nivel de

exposición de las personas. Las directrices marcan un determinado umbral por debajo del cual la exposición a campos electromagnéticos se considera segura, según los conocimientos de la ciencia. No se deduce de forma automática que por encima del límite indicado la exposición sea perjudicial.

Para fijar los límites de exposición, los estudios científicos deben identificar el umbral en el que se manifiestan los primeros efectos sobre la salud, cuyos experimentos deben basarse en estudios con animales.

Los estudios en animales <sup>[9]</sup>, llamados *in vivo*, tienen por objeto determinar los efectos biológicos de campos eléctrico y magnético sobre animales completos. Las investigaciones en animales expuestos a agentes tóxicos sospechosos son importantes para la predicción de la potencial toxicidad en los humanos y en la confirmación de los efectos indicados por los estudios epidemiológicos. También proporcionan una información muy valiosa para estimar los niveles a los que la toxicidad puede ocurrir. Los estudios en animales son muy importantes pues pueden ser la base para elaborar modelos fiables en los que examinar cómo los campos electromagnéticos influyen en la causa del riesgo. El proceso usual es exponer a los animales a un CEM y observar si desarrollan riesgos en su salud, cáncer u otras enfermedades. Estos experimentos, en si mismos hay que tomarlos con mucha cautela, en el sentido en que los animales podrían no exhibir las mismas respuestas, sensibilidad y propiedades que los humanos a los parámetros de la exposición.

Frecuentemente, se producen en los animales cambios sutiles de comportamiento a niveles bajos de exposición que preceden a cambios drásticos en la salud con niveles altos. El comportamiento anormal es un indicador muy sensible de la existencia de una respuesta biológica; este comportamiento anormal se ha seleccionado como el mínimo efecto perjudicial para la salud observable. Las directrices recomiendan prevenir la exposición a campos electromagnéticos a niveles en los que se producen cambios de comportamiento perceptibles.

Este umbral de cambios de comportamiento no es igual al límite recomendado, sino que la ICNIRP aplica un factor de seguridad de 10 en el cálculo de los límites de exposición ocupacionales y un factor de 50 para obtener el valor recomendado para la población general. Así, por ejemplo, en los intervalos de frecuencia de radio y microondas, los niveles máximos que probablemente experimentará en el entorno o en el hogar son al menos 50 veces menores que el umbral en el que se manifiestan los primeros cambios de comportamiento en animales.

La razón por la que los límites de exposición para la población general son más estrictos que los límites para la población expuesta por motivos ocupacionales es que ésta última está formada por adultos que generalmente están sometidos a condiciones de campos electromagnéticos conocidas y recibe formación sobre los riesgos potenciales y sobre cómo tomar precauciones adecuadas, mientras que en la población general hay personas de todas las edades y con diversos estados de salud que en muchos casos no saben que están expuestos a CEM.

Las directrices o normas no se pueden establecer actualmente basándose en especulaciones sobre los posibles efectos a largo plazo sobre la salud. Del conjunto de los resultados de todas las investigaciones no puede deducirse que los campos electromagnéticos produzcan efectos a largo plazo sobre la salud, como el cáncer.

Las directrices se establecen para la población media y no pueden tener en cuenta directamente las necesidades de una minoría de personas potencialmente más sensibles. Por ejemplo, las directrices sobre contaminación atmosférica no se basan en las necesidades especiales de las personas asmáticas. De forma similar, las directrices sobre campos electromagnéticos no están diseñadas para proteger a las personas de las interferencias en los dispositivos electrónicos médicos implantados, como los marcapasos cardíacos. Por el contrario, estas personas deben solicitar a los fabricantes y al médico que ha implantado el dispositivo que les asesore sobre el tipo de exposiciones que deben evitar.

El siguiente cuadro (tabla 5) <sup>[5]</sup> indica las fuentes más comunes de campos electromagnéticos. Todos los valores son niveles máximos de exposición de la población, por lo que normalmente la población está sometida a una exposición mucho menor:

Fuente	Exposición máxima típica de la población	
	Campo eléctrico (V/m)	Densidad de flujo magnético ( $\mu\text{T}$ )
Campos naturales	200	70 (campo magnético terrestre)
Red eléctrica (en hogares que no están próximos a líneas de conducción eléctrica)	100	0,2
Red eléctrica (bajo líneas principales de conducción eléctrica)	10 000	20
Trenes y tranvías eléctricos	300	50
Pantallas de televisión y computadora (en la posición del usuario)	10	0,7
	Exposición máxima típica de la población ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	
Transmisores de televisión y radio		0,1
Estaciones base de telefonía móvil		0,1
Radares		0,2
Hornos de microondas		0,5

*Tabla 5. Exposición máxima típica de la población frente a una fuente de campo electromagnético (Oficina Regional de la OMS para Europa)*

En situaciones cotidianas, la mayoría de las personas no se ven expuestas a campos electromagnéticos superiores a los límites recomendados. Los niveles de exposición típicos son muy inferiores a estos límites. Sin embargo, en ocasiones, una persona puede exponerse, durante un período corto, a niveles que se aproximan o incluso superan los niveles recomendados. Según la ICNIRP, para tener en cuenta los efectos acumulados, la exposición a los campos de frecuencia de radio y de microondas se debe calcular como promedio durante un determinado período; las directrices establecen que dicho período debe ser de seis minutos y se consideran aceptables las exposiciones a corto plazo superiores a los límites.

Según las directrices, la exposición a campos eléctricos y magnéticos de frecuencia baja no se calcula como promedio en el tiempo, sino que se incorpora el factor de acoplamiento. El acoplamiento se refiere a la interacción entre los campos eléctricos y magnéticos y el cuerpo expuesto a la radiación, y es función del tamaño y forma del cuerpo, el tipo de tejido y la

orientación del cuerpo con respecto al campo.

Las directrices deben ser conservadoras: la ICNIRP siempre supone un acoplamiento máximo del campo a la persona expuesta. Por consiguiente, los límites recomendados proporcionan una protección máxima. Por ejemplo, aunque las intensidades del campo magnético de las secadoras de pelo y de las máquinas de afeitarse superan aparentemente los valores recomendados, el acoplamiento extremadamente débil entre el campo y la cabeza impide la inducción de corrientes eléctricas que podrían superar los límites recomendados.

### 2.2.1 Evaluación de la Exposición

La **evaluación de la exposición** es la determinación o estimación de la magnitud y frecuencia de ocurrencia de la exposición para un individuo o grupo a un agente del medio ambiente <sup>[9]</sup>. Ello es clave para los estudios epidemiológicos; si los epidemiólogos no pueden evaluar la exposición de los individuos a un agente “sospechoso” no podrán determinar la influencia de ese agente sobre la salud o la enfermedad.

Siempre que estamos en contacto con un agente medioambiental (en el aire, el agua, la comida, etc.) estamos expuestos a ese agente. Algunos factores son beneficiosos, otros perjudiciales y otros ninguna de las dos cosas, y ello básicamente dependiendo de la duración de la exposición. Es muy útil diferenciar entre exposición y dosis:

- **Exposición** se refiere únicamente a la medida de un agente sin un particular conocimiento de aquellas características del agente que influyen en la salud.
- **Dosis** se refiere a la evaluación de una característica particular de la exposición que es significativa respecto a la salud. En los estudios de salud, los investigadores intentan medidas de dosis, pero en ausencia de las características de la exposición que son significativas, tienen que medir la exposición y usarla como una aproximación a la dosis. Para entender mejor esto, consideremos el caso de la radiación ionizante de rayos X. Una placa que detecta la radiación X mide la exposición a un individuo, pero difícilmente es una medida de la dosis. Sabemos que la razón a la que ocurre la exposición es importante, y la placa no da esa información. También se sabe que el área de exposición es importante y la placa no nos dice si la exposición corresponde al área de la placa o al cuerpo entero. Por ello es importante conocer la dosis, es decir, las características de la exposición que sean significativas.

Existen medios para determinar la exposición a campos electromagnéticos, pero no de medir la dosis. Cuando la evidencia del daño de la exposición a un agente ambiental es inequívoca, se toman **medidas preventivas** aún cuando se tenga poco conocimiento de cómo “funciona” el mecanismo.

En el caso de CEM, muchos científicos consideran los estudios epidemiológicos como equívocos. El motivo, en parte, es que no se conocen todos **los mecanismos** (es decir “como funcionan”) que describen la interacción del campo electromagnético con tejidos y células. Si se quieren diseñar estudios epidemiológicos mejores a partir de los cuales resolver el problema de los riesgos, se deben hacer mejores trabajos en cuanto a la evaluación de la exposición, y eso probablemente no sucederá hasta que se pueda contestar a las cuestiones acerca de los mecanismos.

## 2.3 MATERIALES BIOLÓGICOS Y SIMULACIONES

Es necesario conocer algunas características de las células y tejidos en el cuerpo humano para poder entender sus mecanismos asociados de interacción [9]. Cada ser humano está constituido por billones de células vivas que se agrupan entre sí para formar un órgano con unas ciertas funciones asignadas.

**Células.** Las células tienen diferentes tamaños (las de los músculos pueden ser de unos pocos milímetros y las nerviosas de un metro). La figura 8 representa los elementos generales que constituyen una célula. Las células están formadas por la membrana que mantiene a la célula unida, el citoplasma que

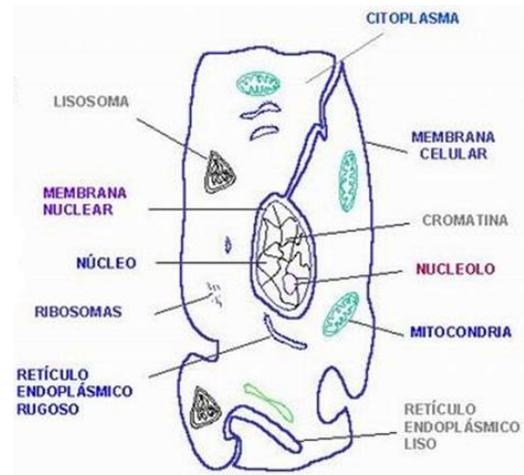


Figura 8. Partes de una célula

es una especie de gel en el interior de la membrana y, normalmente, el núcleo. No todas las células tienen núcleo. Dentro del citoplasma existen diferentes tipos de estructuras más pequeñas que realizan ciertas funciones metabólicas.

Las células son estructuras complejas con superficies cargadas. Las células contienen moléculas y átomos cargados que pueden cambiar su orientación y movimiento cuando se encuentran expuestos a una fuerza electromagnética. En la figura 9 se muestra un caso para el campo eléctrico: a la izquierda se muestra una célula en reposo, y a la derecha una célula bajo la influencia de un campo eléctrico:

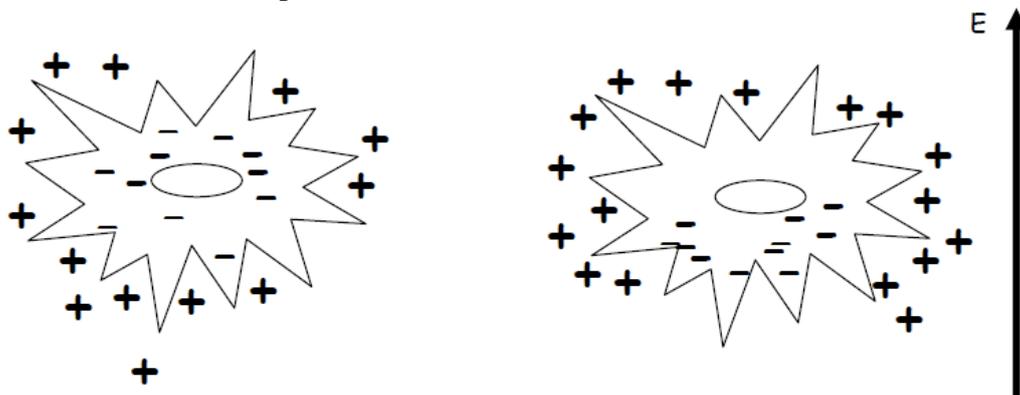


Figura 9. Célula en reposo (izquierda), y bajo la influencia de un campo eléctrico (derecha).

Las cargas se redistribuyen, la célula sigue siendo neutra pero es una estructura polar. Las interacciones del campo electromagnético con un sistema biológico se efectúan a través de las células, y se categorizan en interacciones con la membrana celular, con el citoplasma, y con el núcleo. Estas interacciones dependen, entre otras cosas, de la frecuencia.

Los núcleos de las células contienen la mayoría de la información hereditaria en los cromosomas y los genes. Las células crecen, cambian y se reproducen en un proceso continuo llamado mitosis, que comienza en el núcleo a través de una duplicación e igual distribución de los cromosomas. Las células sin núcleo no se pueden dividir mientras que

otras sufren de mitosis frecuentemente, como por ejemplo las de los embriones. Por ello es especialmente importante la protección a campos electromagnéticos durante el embarazo. A su vez, el proceso de mitosis tiene cuatro fases: profase, metafase, anafase y telofase. El período entre las divisiones se llama fase de reposo.

Hay diferentes procesos en la mitosis celular que podrían verse afectados por la radiación electromagnética, y existe un amplio campo de investigación en el estudio de los procesos que afectan a los cromosomas durante la mitosis afectada por un campo electromagnético.

**Tejidos.** Las células se agrupan y combinan con otros materiales para formar tejidos. Existen cuatro tipos de tejidos: epitelial, conectivo, muscular y nervioso.

- El tejido epitelial consta de células con una o varias capas. Realizan funciones de protección y regulación de la secreción o absorción de materiales.
- El tejido conectivo consta de células y materiales no vivos como fibras y sustancias gelatinosas que sostienen y conectan tejidos celulares al esqueleto. El tejido conectivo contiene muchas de las sustancias intercelulares que desarrollan la importante labor de transportar materiales entre ellas. Ejemplos de estos tejidos son los huesos y los cartílagos.
- El tejido muscular consta de células que van desde 1 a 40 milímetros de longitud con 40  $\mu\text{m}$  ( $1\mu=10^{-6}$  metros) de diámetro. Estos tejidos contienen una gran cantidad de sangre.
- El tejido nervioso controla y gobierna toda la actividad corporal y consta de células nerviosas o neuronas. Las neuronas tienen largas proyecciones llamadas axones y que son análogas a líneas de transmisión, y envían información al sistema nervioso central desde diferentes receptores de información.

Además merecen especial atención los siguientes conceptos <sup>[9]</sup>:

- **Material genético.** El genoma humano, que es una secuencia química que contiene la información básica del cuerpo humano, consiste en una cadena de ADN y está asociado a las moléculas proteínicas. Está organizado en estructuras llamadas cromosomas. El ADN es una macromolécula compleja, compuesta por dos cadenas o hélices que se entrelazan entre sí formando una doble hélice. Cada cadena está formada por millones de eslabones, llamados nucleótidos o bases nitrogenadas. Ambas hélices están unidas entre sí, a nivel de los eslabones complementarios de cada hélice, por parejas. La secuencia de los pares de bases es lo que determina el código genético.

Según el orden que sigan esos pares de bases, se codifica una función u otra, o simplemente no se codifica nada. El ADN de la célula se organiza en cromosomas. Cada cromosoma es una molécula muy larga de ADN. Cada vez que una célula se divide en dos, el genoma entero se duplica; en humanos y otros organismos complejos esa duplicación se realiza en el núcleo. La mínima secuencia de ADN que es capaz de codificar una función o una estructura completa se denomina GEN. Cada molécula de ADN contiene muchos genes, unidad funcional y física fundamental de la herencia.

Un gen es una secuencia ordenada de nucleótidos localizados en una cierta posición de un cromosoma específico y que codifica la información final. Podemos pensar en los genes como la información de un ordenador que se estructura en unidades de información llamados bits. Los genes son las unidades de información del ADN que se utilizan para construir las proteínas, entre otras cosas, del cuerpo humano. Se estima que el genoma humano tiene al menos 100.000 genes. El núcleo de la mayoría de las células humanas contiene dos conjuntos de cromosomas, provenientes cada uno de ellos del padre y de la madre. El ser humano tiene su ADN organizado en 23 pares de cromosomas distintos, es

decir, 46 cromosomas. Cada conjunto de 23 cromosomas tiene 22 autónomos y dos cromosomas sexuales X e Y. Los cromosomas contienen, aproximadamente, partes iguales de proteínas y ADN.

- **Transporte de calcio.** Los iones de calcio son partículas cargadas que tienen un papel vital en varios procesos celulares. El calcio es un componente crítico en la comunicación intercelular en el cuerpo y un regulador del crecimiento celular. El mantenimiento de una óptima concentración de calcio es muy importante.
- **Actividad de las enzimas.** Como otras proteínas, las enzimas consisten de largas cadenas de aminoácidos que se mantienen unidas. Están presentes en todas las células vivas y tienen una función esencial en el control de los procesos metabólicos.
- **Hormonas.** Las hormonas son sustancias químicas, que se transportan en la sangre de un órgano a otro y alteran la actividad funcional y algunas veces la estructura de algunos órganos.

**Los biosistemas como generadores de campos electromagnéticos** <sup>[12]</sup>. Hoy en día no hay duda de que los campos electromagnéticos pueden afectar a los biosistemas en diferentes niveles, ni de que no sean capaces de generar campos electromagnéticos. Y hay una pequeña duda acerca de que los biosistemas sean generadores de campos electromagnéticos. La cuestión principal es si los biosistemas utilizan los CEM para una interacción decidida (comunicación) y si es así en qué nivel del organismo sucederá. La cantidad de datos que soporta la última idea se construye con tanta rapidez como el incremento de preguntas que se necesitan resolver.

Uno de los principales problemas en esta línea de investigación tiene su origen en la falta de reproductibilidad típica que ya los científicos están acostumbrados a observar en sus experimentos. Muchos científicos culpan estas discrepancias a factores de confusión conocidos como propiedades geofísicas del lugar del experimento, gestión de tiempos y época del año del experimento, iluminación o condiciones del laboratorio y factores cosmo-físicos. Lo anterior sin mencionar que el propio científico es un biosistema y por lo tanto un generador de UPE (ultraweak photon emission) medible, como indican estudios desde 2005 a 2009 <sup>[13] [14] [15] [16] [17]</sup>, que puede inintencionadamente influir en el proceso experimental durante la manipulación de las muestras.

La cuestión primordial es “¿por qué debería importarnos si las células interactúan vía CEM?”: si la existencia de la comunicación celular a distancia resultara ser cierta, tendría un impacto sustancial sobre la comprensión de la biología y la investigación biológica. Dominar e influir el sistema de señales a distancia en los biosistemas podría abrir un completo horizonte nuevo en nuestra aproximación a la biología, y sus aplicaciones en biología y medicina podrían ser asombrosas <sup>[10]</sup>.

**Simulaciones.** Los campos eléctrico y magnético que interactúan con el cuerpo debidos a una fuente próxima pueden causar dos tipos de efectos biológicos: térmicos y no térmicos. Los efectos del campo magnético varían con la frecuencia y son, probablemente, más importantes en tejidos biológicos con pequeñas cantidades de magnetita de tamaño nanométrico.

En la figura 10 se presenta una simulación robotizada del efecto biológico de la telefonía móvil sobre un modelado de cuerpo humano. Simplificando el modelado del cuerpo de un animal como un dieléctrico con pérdidas, la cantidad de energía absorbida es función de la

longitud de onda de la radiación recibida.

Para un cuerpo humano de altura 1,75 metros y peso 70 Kgs la máxima absorción se produce aproximadamente a unos 70 MHz. En contraste, para un ratón de 5,5 cms de largo y 15 gramos de peso la frecuencia de resonancia es de 2,5 GHz, aproximadamente [9].

La frecuencia de resonancia, además de la eficiencia de acoplo del campo al cuerpo, depende de la orientación de la dimensión más larga del cuerpo con la dirección de polarización del campo electromagnético. En general, el máximo acoplo se produce cuando esa dimensión es paralela a la dirección en la que vibra el campo eléctrico.



*Figura 10. Simulación robotizada de efecto biológico de telefonía móvil. Universidad Politécnica de Cartagena.*

Por estas dependencias se ha introducido el concepto de SAR y tener así una normalización. Así por ejemplo, a la frecuencia de resonancia de 77 MHz un modelo humano en forma de esferoide tendría una SAR de 0,022 W/Kg por cada vatio/m<sup>2</sup> de potencia incidente, mientras que un modelo de ratón con frecuencia de resonancia 2,5 GHz tendría un SAR de 0,12 W/Kg para la misma densidad de potencia.

Otra dependencia esencial para ver la dificultad en la absorción de energía electromagnética es la dependencia de la conductividad eléctrica con la frecuencia.

Por otro lado, además de todas estas dependencias, es necesario apuntar otra que indica que la distribución de energía interna absorbida también depende de la longitud de onda y de las propiedades dieléctricas del medio. En ciertas condiciones, se pueden excitar modos complejos en el cuerpo debido a múltiples reflexiones que provocan la aparición de una onda estacionaria y dando lugar a distribuciones no uniformes de energía conocidos como “puntos calientes” o “hot spots”.

**Simulaciones con implantes.** A pesar de que las simulaciones simplifiquen la realidad, pueden aportar resultados útiles. En 2012 Adamos Kyriakou y colaboradores [11] publicaron los resultados de una investigación acerca de si las personas con dispositivos médicos implantados están protegidas según las guías de seguridad de CEM actuales en un rango de 10 a 100 MHz, realizando simulaciones de los propios dispositivos implantados, y concluyeron que estas personas no están intrínsecamente protegidas y necesitan especial consideración en las guías de seguridad.



### 3 EFECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

A continuación se describirán con más detalle algunos de los bioefectos y sus mecanismos descritos según el rango de frecuencia, que dividiremos en ionizantes, radiofrecuencia y microondas (RF/MW), y en baja frecuencia.

El efecto más evidente de la energía electromagnética es el calentamiento de los tejidos. En consecuencia, los límites recomendados de exposición a campos de radiofrecuencia y de microondas se establecen con el fin de prevenir los efectos sobre la salud ocasionados por el calentamiento localizado o de todo el organismo. El cumplimiento de las directrices asegura que los efectos de calentamiento son suficientemente pequeños para que no sean perjudiciales.

#### 3.1 EFECTOS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE

Los fotones de los rayos X y gamma interactúan con la materia y causan ionización de al menos tres maneras diferentes:

- **Efecto fotoeléctrico.** Es la interacción de un fotón que incide sobre los electrones de un átomo <sup>[8]</sup>, representado en la figura 11. El fotón cede toda su energía a un electrón y desaparece totalmente, desprendiéndose el electrón (llamado fotoelectrón) del átomo. Se realiza en las capas electrónicas interiores (k, l, m y n) y el fotoelectrón resulta con una Energía cinética  $E_c = h \nu - E_e$ , donde h es la constante de Plank,  $\nu$  es la frecuencia de la radiación incidente y  $E_e$  es la energía de enlace de la capa donde se originó.

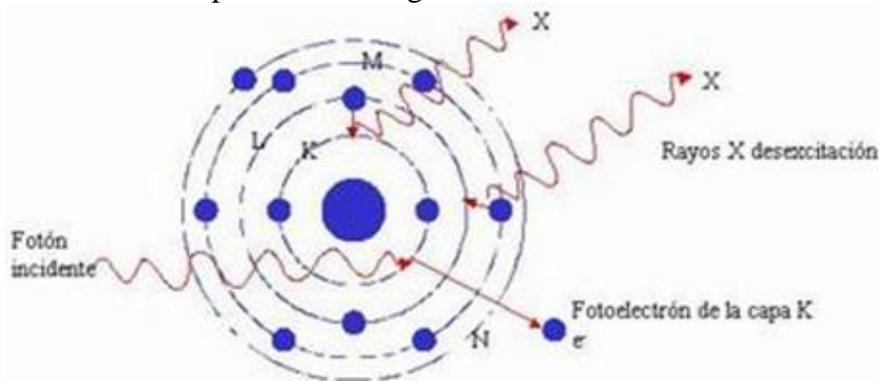


Figura 11. Efecto fotoeléctrico

- **Efecto Compton.** Los fotones de energía intermedia interactúan fundamentalmente mediante el efecto Compton <sup>[8]</sup>, en virtud del cual el fotón y un electrón colisionan esencialmente como partículas. El fotón continúa su trayectoria en una nueva dirección con su energía disminuida, mientras que el electrón liberado parte con el resto de la energía entrante (menos la energía de unión del electrón al átomo o a la molécula), como se representa en la figura 12.

En este proceso la energía interactúa con un electrón orbital del átomo, como si éste fuera un electrón libre, debido a que la energía de enlace del electrón es mucho menor que la energía del fotón incidente. El electrón recibe parte de la energía del fotón y es emitido en

un ángulo  $\alpha$ , en tanto que el fotón con energía reducida es dispersado con un ángulo  $-\alpha$ .

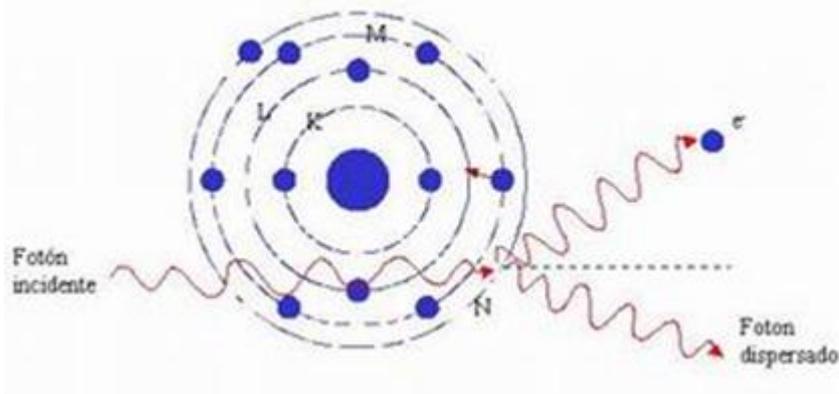


Figura 12. Efecto Compton

- **Producción de pares.** La producción de pares sólo es posible con fotones cuya energía sea superior a 1,02 MeV. Sin embargo cerca este valor el efecto Compton predomina todavía. La producción de pares <sup>[8]</sup> predomina con energías más altas. Tal como se representa en la figura 13, el fotón desaparece, y en su lugar aparece una pareja electrón-positrón (este fenómeno sólo ocurre en la proximidad de un núcleo, por consideraciones de conservación del momento cinético y de la energía). La energía cinética total del par electrón-positrón es igual a la energía del fotón menos la suma de las energías de la masa residual de electrón y positrón (1,02 MeV).

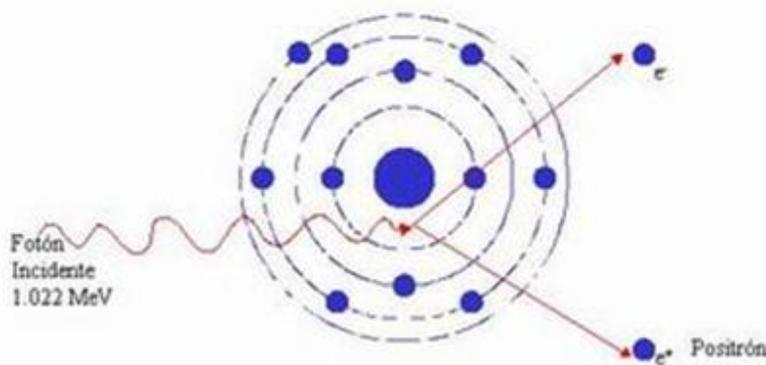


Figura 13. Producción de pares

Tras su descubrimiento por Roentgen en 1895, los **rayos X** fueron introducidos con tanta rapidez para el diagnóstico y tratamiento de las enfermedades que casi en seguida comenzaron a encontrarse lesiones debidas a exposición excesiva a la radiación entre los primeros radiólogos, que todavía no eran conscientes de sus riesgos. Las primeras lesiones fueron sobre todo reacciones cutáneas en las manos de quienes trabajaban con los primeros equipos de radiología, pero ya en el primer decenio se habían comunicado otros tipos de lesión, incluidos los primeros cánceres atribuidos a la radiación.

En el curso del siglo transcurrido desde estos primeros hallazgos, el estudio de los efectos biológicos de la radiación ionizante ha recibido un impulso permanente como consecuencia del uso cada vez mayor de la radiación en medicina, ciencia e industria, así como de las aplicaciones pacíficas y militares de la energía atómica.

El resultado es que los efectos biológicos de la radiación se han investigado más a fondo que los de prácticamente cualquier otro agente ambiental. El desarrollo de los conocimientos

sobre los efectos de la radiación ha determinado el perfeccionamiento de medidas para proteger la salud humana contra muchos otros peligros medioambientales, además de la radiación.

### **Naturaleza y mecanismos de los efectos biológicos de la radiación <sup>[8]</sup>:**

- **Deposición de energía.** A diferencia de otras formas de radiación, la radiación ionizante es capaz de depositar suficiente energía localizada para arrancar electrones de los átomos con los que interactúa. Así, cuando la radiación colisiona al azar con átomos y moléculas al atravesar células vivas, da lugar a iones y radicales libres que rompen los enlaces químicos y provoca otros cambios moleculares que dañan las células afectadas. La distribución espacial de los fenómenos ionizantes depende del factor de ponderación radiológica (wR) de la radiación.
- **Efectos sobre el ADN.** Cualquier molécula de la célula puede ser alterada por la radiación, pero el ADN es el blanco biológico más crítico, debido a la redundancia limitada de la información genética que contiene. Una dosis absorbida de radiación de 2 Gray (Gy) podría originar centenares de lesiones en sus moléculas de ADN, e incluso la muerte celular. La mayoría de lesiones son reparables, pero las producidas por una radiación ionizante concentrada (por ejemplo, un protón o una partícula alfa) son en general menos reparables que las generadas por una radiación ionizante dispersa (por ejemplo, un rayo X o un rayo gamma). Por lo tanto, las radiaciones ionizantes concentradas (alta TLE) tienen por lo común un mayor efecto biológico relativo (EBR) que las radiaciones ionizantes dispersas (baja TLE) en casi todas las formas de lesión.

Cabe en este punto las definiciones de Gray (Gy) y Sievert (Sv): Gray es la medida de la dosis absorbida por la materia radiada a razón de 1 julio por Kg, mientras que Sievert es la medida de la dosis eficaz o equivalente, que es 1 Gy multiplicado por un factor de ponderación consustancial a cada radiación (fotones, protones, electrones, neutrones, partículas alfa, iones pesados) y órgano (gónadas, médula ósea, pulmón, estómago, hígado, piel, ...) <sup>[12]</sup>

- **Efectos sobre los genes.** El daño del ADN que queda sin reparar o es mal reparado puede manifestarse en forma de mutaciones, cuya frecuencia parece aumentar como una función lineal de la dosis. El hecho de que la tasa de mutaciones parezca ser proporcional a la dosis se considera indicativo de que una sola partícula ionizante que atravesase el ADN es suficiente, en principio, para causar una mutación. En las víctimas del accidente de Chernóbil, la relación dosis-respuesta de las mutaciones de la glicoforina de células de la médula ósea es muy similar a la observada en supervivientes de la bomba atómica.
- **Efectos sobre los cromosomas.** Las lesiones por radiación del aparato genético pueden causar también cambios en el número y la estructura de los cromosomas, modificaciones cuya frecuencia se ha observado que aumenta con la dosis en trabajadores expuestos, en supervivientes de la bomba atómica y en otras personas expuestas a la radiación ionizante. La relación dosis-respuesta para las aberraciones cromosómicas en linfocitos de sangre humana se ha determinado con bastante exactitud, de manera que la frecuencia de aberraciones en esas células puede servir de dosímetro biológico útil.
- **Efectos sobre la supervivencia celular.** Entre las reacciones más tempranas a la irradiación figura la inhibición de la división celular, que aparece en seguida tras la exposición, aunque su grado y duración varían con la dosis. Si bien la inhibición de la mitosis es característicamente pasajera, la lesión radiológica de genes y cromosomas puede ser letal para las células en división, que en conjunto son muy sensibles a la radiación.

Medida en términos de capacidad de proliferación, la supervivencia de las células en división tiende a disminuir exponencialmente con el aumento de la dosis, de manera que 1-2 Gy bastan por lo general para reducir la población superviviente en alrededor del 50%.

- **Efectos sobre los tejidos.** Las células maduras que no están en división son relativamente radorresistentes, pero las que se dividen dentro de un tejido son radiosensibles, por lo que la irradiación intensiva puede matar un número suficiente para que el tejido se atrofie. La rapidez de esta atrofia depende de la dinámica de la población celular dentro del tejido afectado; es decir, en órganos caracterizados por un recambio celular lento, como el hígado y el endotelio vascular, el proceso es típicamente mucho más lento que en órganos caracterizados por un recambio celular rápido, como la médula ósea, la epidermis y la mucosa intestinal.

Por otra parte, conviene subrayar que si el volumen de tejido irradiado es lo bastante pequeño, o si la dosis se acumula con la lentitud suficiente, la gravedad de la lesión puede reducirse notablemente por la proliferación compensatoria de las células supervivientes.

- **Efectos agudos.** Como muestra la tabla 6 los efectos agudos de la radiación se deben sobre todo a la depleción (disminución de líquidos) de células progenitoras en los tejidos afectados, y sólo pueden inducirse por dosis lo bastante grandes para matar muchas de estas células.

DOSIS UMBRAL AGUDA	
DOSIS ABSORBIDA (Gy)	EFECTO
> 0.1	Rupturas cromosómicas difíciles de detectar Interferencia en la organogénesis
> 0.5	Probable retención momentánea de la espermatogénesis
> 2.0	Síndrome de radiación
> 4.0	50% de probabilidad de muerte
> 6.0	100% de probabilidad de muerte

Tabla 6. Dosis umbral aguda y efectos biológicos

Por este motivo, tales efectos se consideran de naturaleza no estocástica, o determinista, en contraste con los efectos mutágenos y cancerígenos de la radiación, que se consideran fenómenos estocásticos resultantes de alteraciones moleculares aleatorias en células individuales que aumentan como funciones lineales, sin umbral, de la dosis. Las lesiones agudas de los tipos que predominaban en los primeros trabajadores expuestos y en los pacientes tratados inicialmente con radioterapia han desaparecido prácticamente gracias a las mejoras introducidas en las precauciones de seguridad y en los métodos de tratamiento. Sin embargo, la mayoría de los pacientes tratados con radiación en la actualidad experimentan también alguna lesión del tejido normal irradiado.

Además, siguen ocurriendo accidentes radiológicos graves. Por ejemplo, entre 1945 y 1987 se informó de unos 285 accidentes en reactores nucleares ocurridos en diversos países, en los que resultaron irradiadas más de 1.350 personas, 33 de ellas con resultado mortal. El accidente de Chernóbil, por sí solo, liberó material radiactivo suficiente para exigir la evacuación de decenas de millares de personas y animales domésticos del área circundante, y originó enfermedades radiológicas y quemaduras en más de 200 personas entre componentes de equipos de emergencia y bomberos, de las que 31 fallecieron.

Los efectos a largo plazo del material radiactivo liberado sobre la salud no pueden predecirse con certeza, pero las estimaciones de los riesgos resultantes de efectos cancerígenos, basadas en modelos de incidencia de dosis sin umbral, suponen que pueden producirse hasta 30.000 muertes adicionales por cáncer en la población del hemisferio norte durante los 70 próximos años a consecuencia del accidente, aunque es probable que

los casos adicionales de cáncer en cualquier país sean demasiado escasos para permitir su detección epidemiológica.

Menos catastróficos, pero mucho más numerosos que los accidentes de reactores, han sido los accidentes en que han intervenido fuentes de rayo gamma médicas e industriales, que también han sido causa de lesiones y pérdida de vidas. Por ejemplo, la eliminación inadecuada de una fuente de radioterapia de cesio 137 en Goiânia, Brasil, en 1987 originó la irradiación de docenas de víctimas, cuatro de las cuales murieron.

Las reacciones agudas de los tejidos más radiosensibles son de interés general, por lo que se describen brevemente en las secciones siguientes:

- **Piel.** Las células de la capa germinal de la epidermis son muy sensibles a la radiación. En consecuencia, la rápida exposición de la piel a una dosis de 6 Sievert (Sv) o más provoca eritema (enrojecimiento) de la zona expuesta, que aparece dentro del primer día, suele durar unas cuantas horas y va seguido al cabo de dos a cuatro semanas de una o más oleadas de un eritema más profundo y prolongado, así como de depilación (pérdida de pelo). Si la dosis supera los 10 a 20 Sv, en dos o cuatro semanas pueden surgir ampollas, necrosis y ulceración, seguidas de fibrosis de la dermis y los vasos subyacentes, que pueden desembocar en atrofia y una segunda oleada de ulceración meses o años después. El factor de ponderación de la piel es de  $1\text{Sv} = (0.01 * \text{Fr}) \text{ Gr}$ ; siendo Fr el factor de ponderación del tipo de radiación.
- **Médula ósea y tejido linfoide.** Los linfocitos también son muy radiosensibles; una dosis de 2 a 3 Sv irradiada en poco tiempo a todo el cuerpo puede destruir un número suficiente de ellos para que disminuya el recuento de linfocitos periféricos y la respuesta inmunitaria se deteriore en pocas horas. Las células hematopoyéticas de la médula ósea tienen una sensibilidad similar a la radiación y su depleción con una dosis comparable es suficiente para causar granulocitopenia y trombocitopenia en las tres a cinco semanas siguientes. Si la dosis es mayor, estas disminuciones del recuento de granulocitos y plaquetas pueden ser lo bastante graves para originar hemorragia o una infección mortal. El factor de ponderación de la médula ósea es 0.12.
- **Intestino.** Las células progenitoras del epitelio que reviste el intestino delgado también tienen extraordinaria sensibilidad a la radiación. La exposición aguda a 10 Sv disminuye su número en grado suficiente para causar la denudación de las vellosidades intestinales suprayacentes en unos días. La denudación de una superficie grande de la mucosa puede dar lugar a un síndrome fulminante similar a la disentería que causa rápidamente la muerte. El factor de ponderación por defecto para los órganos es 0.05
- **Gónadas.** Los espermatozoides maduros pueden sobrevivir a dosis grandes (100 Sv), pero los espermatogonios son tan radiosensibles que una dosis de sólo 0,15 Sv aplicada rápidamente a ambos testículos basta para causar oligospermia, y una dosis de 2 a 4 Sv puede provocar esterilidad permanente. También los ovocitos son radiosensibles. Una dosis rápida de 1,5 a 2,0 Sv aplicada a ambos ovarios origina esterilidad temporal, y una dosis mayor, esterilidad permanente, en función de la edad de la mujer en el momento de la exposición. El factor de ponderación de las gónadas es 0.20
- **Aparato respiratorio.** El pulmón no es muy radiosensible, pero la exposición rápida a una dosis de 6 a 10 Sv puede hacer que en la zona expuesta se desarrolle neumonía aguda en el plazo de uno a tres meses. Si se afecta un volumen grande de tejido pulmonar, el proceso puede originar insuficiencia respiratoria al cabo de unas semanas, o conducir a fibrosis pulmonar en meses o años después. El factor de ponderación de los pulmones es 0.12
- **Cristalino del ojo.** Las células del epitelio anterior del cristalino, que continúan

dividiéndose toda la vida, son relativamente radiosensibles. El resultado es que una exposición rápida del cristalino a una dosis superior a 1 Sv puede generar en unos meses la formación de una opacidad polar posterior microscópica; y 2 a 3 Sv recibidos en una sola exposición breve (o la exposición a 5,5 a 14 Sv acumulada a lo largo de meses) pueden producir cataratas que dificulten la visión.

- **Otros tejidos.** En comparación con los tejidos ya mencionados, la sensibilidad de otros tejidos del cuerpo a la radiación es en general bastante inferior, aunque el embrión constituye una notable excepción. Conviene destacar que la radiosensibilidad de cualquier tejido aumenta cuando se encuentra en estado de crecimiento rápido.
- **Lesión radiológica de todo el cuerpo.** La exposición rápida de una parte importante del cuerpo a una dosis superior a 1 Gy puede producir el síndrome de radiación agudo, que comprende:
  - (1) Fase inicial prodrómica: malestar general, anorexia, náuseas y vómitos.
  - (2) Período latente.
  - (3) Fase principal de enfermedad. La fase principal de la enfermedad adopta por lo general una de las formas siguientes, según la localización predominante de la lesión radiológica: hematológica, gastrointestinal, cerebral o pulmonar
  - (4) Recuperación o muerte.
- **Lesión radiológica localizada.** A diferencia de las manifestaciones clínicas de la lesión radiológica aguda de todo el cuerpo, que suelen ser dramáticas e inmediatas, la reacción a la irradiación muy localizada, tanto si procede de una fuente de radiación externa como de un radionucleido depositado en el interior del cuerpo, tiende a evolucionar con lentitud y a producir pocos síntomas o signos a menos que el volumen de tejido irradiado y/o la dosis sean relativamente grandes, como muestra la tabla 7.

PARTE IRRADIADA	DOSIS ABSORBIDA ( Gy )	E F E C T O
Gónadas	0.5	Esterilidad temporal
Gónadas	8.0	Esterilidad definitiva
Cuero cabelludo	5.0	Caída temporal
Cuero cabelludo	25.0	Caída definitiva

Tabla 7. Lesiones radiológicas según la dosis absorbida.

### 3.2 EFECTOS DE LOS CAMPOS DE RADIO FRECUENCIA Y MICROONDAS

En cuanto a los efectos biológicos de la RF/MW se han desarrollado un número significativo de estudios que exploran la posible relación entre la exposición a la radiación de campos RF/MW y las enfermedades, incluyendo el cáncer. Sin embargo, todavía deberá de pasar un tiempo hasta que se tengan los resultados finales de la mayoría de los estudios.

Básicamente, existen tres tipos de efectos biológicos a estas frecuencias: efectos de nivel alto (térmicos), de nivel medio (atérmicos), y de nivel bajo (no térmicos).

**Efectos térmicos, no térmicos y atérmicos.** Los efectos térmicos <sup>[8]</sup> son los que causan un aumento de la temperatura debido a la energía absorbida de un campo electromagnético. Si la termorregulación no interviene se habla de efecto atérmico.

### 3.2.1 Efectos Térmicos

La fuerza producida por un campo eléctrico sobre un cuerpo cargado, tales como los iones móviles del cuerpo, produce que éstos se muevan y la resistencia a ese movimiento hace que el cuerpo se caliente. El aumento de temperatura se compensa por la termorregulación conducida por el flujo de la sangre. La relación entre el aumento de temperatura y la SAR es muy complicada, debido principalmente a lo complicado de modelar la influencia del flujo de sangre sobre la transferencia de calor.

Un resultado obvio de la radiación de RF/MW es el calentamiento del cuerpo humano a pesar de sus procesos propios de termorregulación. Estos efectos son conocidos desde las primeras investigaciones en efectos terapéuticos realizadas por los “padres” del electromagnetismo en el siglo XIX. Los efectos térmicos tienen implicaciones significativas en la salud humana y están relacionados con las corrientes inducidas. El calentamiento es la interacción primordial de los campos de RF/MW especialmente a frecuencias por encima de 1MHz. Por debajo, el efecto dominante es el de las corrientes inducidas.

Los efectos térmicos se pueden definir como una deposición de energía mayor que la capacidad termorregulatoria del cuerpo humano. Si una persona se calienta por alguna fuente externa a una razón más elevada puede ocurrir un daño térmico. Los efectos térmicos están fuertemente influidos por la temperatura ambiente y la humedad relativa. El calor inducido en el cuerpo aumenta con la masa del cuerpo, al menos para animales pequeños.

El cuerpo humano intenta regular su temperatura debido a un aumento térmico a través de la respiración y el intercambio de calor vía flujo sanguíneo. Las partes del cuerpo que tienen menos riego sanguíneo son las más afectadas por los efectos térmicos debido a que la termorregulación tiene una menor capacidad de acción.

- Los sistemas biológicos alteran su funcionamiento debido al cambio de temperatura. Temperaturas elevadas tienen efectos como cataratas, incremento de la presión arterial, vértigo y mareos, debilidad, desorientación o náuseas. Efectos térmicos adversos tales como cataratas y quemaduras en la piel se producen con exposiciones a campos de RF/MW con densidades de potencia muy altas y por encima de 1000 W/m<sup>2</sup>. Estos valores no se encuentran nunca cerca de fuentes de RF/MW convencionales aunque sí pueden existir cerca de transmisores de alta potencia tales como radares militares.
- **Efectos genéticos.** Los agentes que pueden dañar el ADN de las células se dice que tienen un potencial carcinógeno y se llaman genotoxinas o que tienen actividad genotóxica. El concepto de daño de ADN como base para la formación del cáncer está puesto en tela de juicio por la evidencia de que el cáncer puede provenir de factores que no actúan directamente sobre el ADN.

Si los campos de RF/MW no son directamente mutagénicos, existe siempre la cuestión de si pueden incrementar el desarrollo de células malignas o alterar otros procesos que produzcan cambios en el material genético. Relacionado con esto está la preocupación acerca de los efectos sobre la salud a exposiciones prolongadas a campos de RF/MW de bajo nivel.

Los investigadores creen que los cambios genéticos sólo se producen en presencia de un aumento sustancial de la temperatura, observaciones que están en total acuerdo con la interpretación de que la energía de RF/MW no causa daño directo en el ADN debido a la poca energía asociada a sus fotones.

- **Estudios en células** (in vitro). Aunque la radiación no ionizante no puede dañar el

ADN de la misma forma que lo hace la ionizante, es probable que la exposición a campos de RF/MW pueda producir alguna alteración en procesos celulares, lo que, indirectamente, puede afectar a la estructura de ADN. Por tanto los estudios en células (in vitro) son esenciales para interpretar los resultados experimentales. Sin embargo, la crítica a estos estudios se basa en el hecho de indicar daños en el ADN y además, en que los estudios en su gran mayoría no han sido replicados. Son multitud los estudios celulares unos mostrando efectos y otros no. Probablemente el más famoso fue el realizado por Lai y Singh en 1995 <sup>[18]</sup> en la Universidad de Washington, en Seattle: con frecuencias de 2,45 GHz (las de los hornos de microondas) y con valores de SAR de 1,2 W/kg vieron efectos en las células del cerebro de ratas. Eso produjo una gran controversia en las compañías de telefonía móvil (la frecuencia de los móviles de tercera generación, la famosa UMTS, está en torno a esa frecuencia y las de GSM cercanas) y preocupación entre los usuarios, pues parecía que se encontraba una conexión, con datos ciertamente sin comprobar, entre los teléfonos móviles y el cáncer de cerebro. Sin embargo no parece haber otros estudios que respalden estos resultados.

- **Estudios en animales** (in vivo). También se han realizado estudios en animales, en los que es más difícil de controlar los parámetros pero pueden dar una mejor valoración de las posibles consecuencias. De nuevo existe controversia entre diferentes estudios.

Como resumen de los estudios genéticos podemos decir que los estudios experimentales, especialmente los celulares, sobre exposición a campos de RF/MW no han dado indicios de evidencia genotóxica a menos que la potencia incidente fuera suficiente para causar daños térmicos. Por otro lado, hay muy pocos resultados positivos sobre efectos genéticos de radiación de RF/MW de baja intensidad, de entre los que algunos resultados no han sido replicados, o bien no han sido confirmados cuando han sido replicados por otros autores.

- **Proliferación celular.** La perturbación del ciclo normal celular es un posible signo de crecimiento incontrolado de células cancerosas. Se han descrito incrementos sólo en el caso en que haya calentamiento, e incluso otros estudios no encontraron estos incrementos.

### 3.2.2 Efectos Atérmicos y No Térmicos

La radiación electromagnética puede producir efectos no térmicos <sup>[8]</sup>. En general, pueden surgir cambios detectables sólo si el efecto del campo eléctrico con el medio biológico expuesto a un campo electromagnético no está enmascarado por el ruido térmico.

El **ruido térmico** es un movimiento aleatorio debido a la energía térmica que todos los cuerpos tienen al poseer una temperatura por encima del cero absoluto (-273°C o 0 Kelvin). Fué identificado por Jonson en 1928. Es debido al movimiento aleatorio de los electrones, originado por su energía térmica. Este movimiento da lugar a una corriente aleatoria y debido a ella en bornes de una resistencia aparece una tensión de ruido  $V_n$ . El valor medio de la tensión de ruido es siempre nulo, pero no su valor eficaz. La energía producida por un campo de radiofrecuencia en general es menor que el ruido térmico biológico <sup>[8]</sup>, y por tanto su efecto no térmico quedaría completamente enmascarado.

**Polarización celular.** Un mecanismo no térmico proviene de las moléculas que se polarizan con el campo eléctrico pudiendo producirse atracciones eléctricas entre ellas, como se vió anteriormente. Otro mecanismo no térmico está asociado al movimiento de corriente a través de las membranas que tienen un comportamiento fuertemente no lineal, es decir, cuando se

aplica una tensión a una membrana la corriente no es proporcional a ella, pudiendo afectar a las funciones de la membrana.

**Frecuencias resonantes.** Es posible que ciertos tejidos biológicos reaccionen muy sensiblemente a ciertas frecuencias resonantes y se deberían estudiar estas situaciones.

En cuanto a los efectos de la radiación de nivel bajo y medio <sup>[8]</sup> se trata de ver si estos niveles de potencia pueden causar cambios biológicos dañinos en ausencia de un aumento demostrable de la temperatura. Sobre este aspecto existe alguna controversia. Todos estos efectos se producen con valores de SAR inferiores a 2W/kg.

Se han descrito muchos en la literatura, pero básicamente casi todos hablan de efectos neuronales, morfológicos, actividad neurotransmisora y de las enzimas, concentración de iones y efectos sobre el metabolismo. Sobre este tema existe todavía mucha discrepancia entre los investigadores. Algunos consideran probados estos efectos y otros consideran que no está probada de ninguna manera la conexión entre los efectos no térmicos dañinos y la radiación de bajo nivel.

**Telefonía móvil.** Respecto a la aplicación de los resultados obtenidos sobre los efectos de la RF/MW correspondiente a la telefonía móvil hay que tener una enorme precaución. Parece claro que no existe en la actualidad una gran cantidad de datos que permitan concluir si la exposición a campos de RF/MW durante el uso normal de un teléfono móvil puede producir o no efectos nocivos sobre la salud. Puesto que parámetros de la RF/MW tales como frecuencia, intensidad, duración, modulación, forma de onda, etc. son esenciales para determinar la respuesta biológica, es necesario investigar mucho más en la interacción de tales parámetros con la respuesta de la señal de un móvil en condiciones normales.

Algunos investigadores dan por científicamente probados los efectos biológicos no térmicos de campos de RF/MW de niveles intermedios y bajos. Otros investigadores, sin embargo, no confirman la opinión anterior asegurando que esos resultados son meramente especulativos, afirmando que haya o no conexión entre los efectos y la exposición a campos de RF/MW, éstos sólo se producen a niveles mucho mayores de los que se encuentran en aplicaciones de telecomunicaciones.

Los diferentes organismos encargados de elaborar los límites a la exposición de CEM no han tenido hasta ahora en cuenta la protección frente a efectos no térmicos y atérmicos debido a la poca evidencia científica que existe en este aspecto.

Los efectos no térmicos también dependen fuertemente de factores de propagación de la onda electromagnética, como la modulación y la frecuencia. En la mayoría de los casos, los mecanismos de los efectos no se conocen todavía. Es importante conocer cómo se propaga la energía de RF/MW a través de un cuerpo biológico. Y cómo se distribuye la energía electromagnética por el cuerpo y cómo se dispersa por el cuerpo, especialmente si el aumento de temperatura no es medible por ser muy pequeño.

A continuación, se indicarán algunos efectos más significativos relacionados en la literatura sobre el tema, pero deben ser entendidos con bastante cautela:

- **Sistema nervioso.** Una revisión de la literatura sobre efectos de campos de RF/MW de niveles intermedios y bajos muestran que la exposición a niveles de SAR bajos (siempre menores que 2W/kg), bajo ciertas condiciones, pueden afectar al sistema nervioso,

incluyendo efectos morfológicos, electrofisiológicos, en la actividad neurotransmisora y en el metabolismo.

- **Sistema inmunológico.** También se han descrito efectos sobre el sistema inmunológico, sobre la morfología de los genes y los cromosomas, concentración de iones, morfología celular etc. Algunos de estos efectos nombrados han sido refutados por otros autores por lo que la situación al respecto no es clara.
- **Enzimas.** Se estima que la RF/MW modulada de bajo nivel puede afectar la actividad intracelular de las enzimas. Algunos estudios han detectado evidencias de cambios en esta actividad.
- **Hormonas.** La influencia de los campos de RF/MW pueden influir sobre la concentración de hormonas en la sangre.
- **Funciones de la membrana.** Las células poseen un voltaje a través de sus membranas y utilizan iones de calcio para muchos de los procesos de regulación en las células. Una alteración del campo eléctrico sobre la superficie de las células cambia la eficiencia de su comportamiento. Algunos estudios han encontrado cambios en la concentración de iones de calcio lo que se relaciona con las alteraciones en el funcionamiento de la membrana.
- **Catalizador de cáncer en animales.** Como la exposición a campos de RF/MW no se considera causante directo de carcinogénesis, la investigación se centra más bien en sus posibles efectos catalizadores, de ayuda a la proliferación de cáncer.  
Para hacernos una idea de cómo son estos estudios y que características tienen, podemos nombrar el realizado en la Universidad de Washington: un centenar de ratas se expusieron a radiación de RF/MW de 2,45 GHz modulada por una señal de 800 Hz durante 25 meses, 21.5 horas al día y con una SAR aproximada en los animales de 0,4 W/kg. Las ratas expuestas tuvieron un aumento significativo de tumores malignos respecto al grupo de control <sup>[19]</sup>.

También existe un conjunto de estudios realizados sobre animales tratados con carcinógenos químicos. Observemos que todos los estudios someten a los animales a radiaciones extremadamente prolongadas.

- **Otros estudios.** Los estudios se han centrado en efectos sobre la morfología del cerebro (sólo se han encontrado efectos a intensidades altas), sobre la morfología del ojo, y sobre cambios en el comportamiento.
  - **Aprendizaje espacial y memoria:** Como ejemplo en 2004 Jean-Christophe Cassel, Brigitte Cosquer, Rodrigue Galani y Niels Kuster <sup>[20]</sup> experimentaron que una exposición corporal completa realizada a ratas a 2.45 GHz no afectaba en absoluto sus capacidades de aprendizaje espacial y memoria, mediante lo que se conoce como laberinto de brazo radial.
  - **Memoria a corto plazo.** Sin embargo una investigación posterior (2010) realizada por M.P. Ntzouni, A. Stamatakis, F. Stylianopoulou y L.H. Margaritis sobre los efectos de la radiación de los móviles en la memoria a corto plazo de los ratones <sup>[21]</sup> indica que, si bien en exposiciones agudas no se detectan efectos, cuando la exposición es crónica afecta de forma significativa a su memoria a corto plazo.
  - **Ondas cerebrales de personas.** Un estudio <sup>[22]</sup> realizado por Jose Luis Relova, Sonia Pertega, Jose Antonio Vilar, Elena Lopez-Martin, Manuel Peleteiro y Francisco Ares-Pena en 2010 sobre la exposición del cerebro a la radiación de los móviles sugiere que los campos electromagnéticos pueden modular la actividad de las redes neuronales, así como que los pacientes epilépticos pueden ser especialmente sensibles a la radiación electromagnética. En concreto en primer lugar se ratifica que la exposición a CEM de los móviles incrementa en todos los individuos (epilépticos y no epilépticos) la actividad en frecuencia alfa (relacionado con la velocidad de procesamiento de la información y la capacidad cognitiva), pues este punto ha sido ya estudiado por

otros autores. Y en segundo lugar se detecta además para los pacientes epilépticos un incremento de la actividad de ondas beta y gamma (implicadas en la coordinación subyacente de los procesos neuronales de percepción, cognitivos y de atención).

- **Barrera Hematoencefálica** (sistema fisiológico que separa el cerebro de la médula espinal, de vital importancia para la salud ya que cualquier interrupción o trastorno de este sistema puede tener graves consecuencias). En una revisión de estudios <sup>[23]</sup> realizada por Anne Perrin, Celine Cretallaz, Alice Collin, Christine Amourette y Catherine Yardin en 2010, enfocada sobre 16 artículos de 2005 a 2009 <sup>[24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39]</sup>, de los cuales 3 fueron in vitro, 11 in vivo y 2 en personas, se detectó una calidad metodológica muy heterogénea. En detalle, y aparte su metodología, los estudios aportaron pruebas no convincentes del efecto de la exposición a bajos niveles de radiofrecuencia sobre la integridad de la barrera hematoencefálica (BBB). Además algunos estudios con metodología correcta sugerían que no había efectos para un SAR de más de 6 W/Kg, en incluso de 20 W/Kg para exposiciones agudas.

### 3.3 EFECTOS DE LOS CAMPOS DE BAJAS FRECUENCIAS

Los campos electromagnéticos de frecuencia baja (ELF) inducen corrientes en el organismo, pero también las pueden generar diversas reacciones bioquímicas del propio organismo. Las células o tejidos no podrán detectar ninguna corriente inducida por debajo de este nivel de generación propio. En consecuencia, a frecuencias bajas, las directrices aseguran que las corrientes inducidas por los campos electromagnéticos son menores que las corrientes naturales del organismo.

Recordemos que la electricidad es la fuente de energía más común en el mundo debido a la facilidad con que se genera y se transmite allá donde se necesita. Desde el principio del siglo XX la industria basada en la electricidad y sus tecnologías relacionadas han sido una parte fundamental de nuestra sociedad. Debido a que la electricidad es usada universalmente y juega un papel esencial en la economía y desarrollo de las naciones, la posibilidad de que los campos eléctrico y magnético sean perjudiciales para los trabajadores y consumidores es una materia que merece especial atención y estudio.

Durante mucho tiempo, los investigadores han intentado diversas teorías de interacción de frecuencias de ELF. Aunque la radiación de ELF no puede romper, debido a su baja energía, ningún enlace químico por débil que sea, existen mecanismos de interacción bien definidos <sup>[9]</sup> que muestran la interacción con los tejidos biológicos sin necesidad de romper enlace alguno.

- Los campos eléctricos pueden crear fuerzas sobre moléculas cargadas o neutras, o sobre sistemas celulares dentro de sistemas vivos. Estas fuerzas pueden causar movimiento de partículas cargadas o inducir tensiones entre las membranas celulares.
- Los campos magnéticos también pueden producir fuerzas sobre estructuras celulares, pero como la mayoría de los medios biológicos son no magnéticos, estas fuerzas son muy pequeñas.
- Además, los campos magnéticos pueden producir campos eléctricos en el interior de los cuerpos.

Aunque los campos eléctrico y magnético ocurren juntos, la mayoría de los estudios

únicamente se centran en los efectos del campo magnético. El argumento es que el campo magnético es muy difícil de apantallar y penetra mucho más fácilmente en los edificios y en el cuerpo humano que el campo eléctrico.

**Campo interno y externo: acoplo.** Existen diversos mecanismos de interacción propuestos en la literatura. Pero antes es necesario entender la relación entre el campo fuera y en el interior de un sistema biológico (acoplo), que depende fuertemente de la frecuencia.

- El campo eléctrico en el interior de un tejido biológico es mucho menor que fuera, habitualmente en varios órdenes de magnitud. Eso significa que, por ejemplo, el cuerpo humano es un buen apantallamiento del campo eléctrico, es decir, no lo deja “pasar”. Considérese el caso de un cuerpo humano bajo exposición a un campo de ELF: eléctricamente, el acoplo es muy pequeño; por ejemplo, un campo eléctrico externo de 1 KV/m (1000 V/m) puede inducir un campo interno de 1mV/m (que es  $10^{-3}$  V/m), lo que significa una reducción de 1 millón. Este valor de campo eléctrico es el típico bajo una línea de alta tensión. Además, este campo eléctrico crea una corriente de conducción en el interior del cuerpo unos cuantos órdenes de magnitud inferior a las corrientes creadas naturalmente por el corazón, nervios o músculos.
- Sin embargo, los tejidos biológicos son medios no magnéticos, lo que significa que el campo magnético externo es prácticamente el mismo que en el interior. La mayor parte del debate sobre límites aceptables sobre campos de ELF está expresado en términos del campo magnético.

Se han propuesto diferentes mecanismos de interacción con el campo electromagnético pero no todos están suficientemente bien establecidos. Fundamentalmente, los mecanismos propuestos son corrientes eléctricas inducidas, efectos directos sobre materiales biológicos magnéticos y efectos sobre radicales libres.

**Corrientes inducidas por el campo magnético.** En el rango de ELF un material biológico es un medio conductor. Debido a sus características morfológicas, las células presentan, por debajo de 100 Hz un comportamiento básicamente resistivo y muy poco inductivo. Un posible mecanismo de interacción del campo electromagnético con sistemas vivos, que se ha propuesto teóricamente, es la habilidad del campo magnético para estimular corrientes circulares (eddy currents) en las membranas de las células y en los fluidos de los tejidos, que circulan en un bucle cerrado que descansa en un plano perpendicular a la dirección del campo magnético. Esta corriente se puede calcular usando las ecuaciones de Faraday y Laplace, sin necesidad de resolver las ecuaciones de Maxwell. Por tanto, en el interior de un medio biológico se inducen corrientes y campos eléctricos debido al campo magnético.

La obtención de estas corrientes es complicada y sólo puede hacerse a través de simulaciones numéricas. Sólo en supuestos sencillos, es decir, modelando el cuerpo como un medio homogéneo la corriente puede obtenerse de forma analítica.

Así, la densidad de corriente en un camino circular alrededor de un campo magnético sinusoidal se puede obtener de la ley de Faraday y resulta ser:

$$J = \pi \sigma r B f \quad \text{A /m}^2$$

siendo  $\sigma$  la conductividad en S/m,  $r$  el radio del lazo o bucle,  $B$  la inducción magnética en Teslas y  $f$  la frecuencia en Hz.

Xi y Stuchly en 1994 <sup>[40]</sup> hicieron cálculos basados en modelos anatómicos humanos eléctricamente refinados y obtuvieron densidades de corrientes de  $2\text{mA/m}^2$  para campos de

100 $\mu$ T a 60 Hz. A frecuencias por encima de 100 KHz las corrientes inducidas producen calentamiento del sistema biológico expuesto. En el rango de las ELF, el calentamiento de tejidos no es problema, pero si la corriente inducida es muy grande, hay riesgo de estimular células eléctricamente excitables como las neuronas. A frecuencias menores de aproximadamente 100 KHz las corrientes necesarias para calentar sistemas biológicos son mayores que las corrientes necesarias para excitar neuronas y otras células eléctricamente excitables.

**Sustancias biomagnéticas.** Todos los organismos vivos están compuestos esencialmente de compuestos orgánicos diamagnéticos, pero también están presentes algunas moléculas paramagnéticas (por ejemplo el oxígeno O<sub>2</sub>) y microestructuras y estructuras ferromagnéticas (hemoglobina, magnetita). Estas microestructuras se comportan como pequeños imanes que están influenciados por campos externos que modifican su contenido de energía y se encuentran en bacterias y otros elementos biológicos pequeños.

El cerebro humano <sup>[2]</sup> contiene estos elementos que responden al campo magnético aplicado orientándose con él y creando algún efecto biológico. Los campos de ELF pueden crear efectos biológicos actuando como se ha descrito, pero para ello se necesitan campos magnéticos muy grandes de al menos 2 a 5  $\mu$ T.

**Radicales libres.** Los radicales libres son átomos o moléculas con al menos un electrón desapareado. Estos electrones son muy inestables y peligrosos porque normalmente los electrones vienen en pares. Estos electrones hacen que los radicales libres choquen con otras moléculas a las que pueden arrancar electrones, lo que causa que cambie su estructura pudiéndolas convertir a su vez en radicales libres que puede además prolongarse como una reacción en cadena. Los radicales libres son muy reactivos y existen durante cortos períodos de tiempo (típicamente menor que 1 ns) pero su efecto es extremo pues puede dañar la cadena de ADN.

Los campos magnéticos estáticos pueden influir en la respuesta de reacciones químicas entre pares de radicales libres. Puesto que el período de vida de los radicales libres es muy pequeño y los campos de ELF tienen un período muy alto, básicamente actúan, para estos casos, como los campos estáticos.

Campos magnéticos con intensidades menores que 50 $\mu$ T no producen efectos biológicos significativos en radicales libres, esto si no se tiene en cuenta las sustancias biomagnéticas, pues cualquier efecto se añadiría al campo geostacionario que varía entre 30 y 70  $\mu$ T.

**Membrana celular y enlace químico.** El campo eléctrico de baja frecuencia puede excitar la membrana celular causando efectos nocivos. A frecuencias de líneas de alta tensión el valor límite de la densidad de corriente para producir efectos nocivos es de alrededor de 10 mA/m<sup>2</sup> que se corresponde con un valor del campo eléctrico en los tejidos de 100 V/m.

Muchos científicos opinan que la membrana celular juega un papel esencial en los mecanismos de interacción ente el campo electromagnético y los tejidos biológicos. El mecanismo teórico propuesto por los científicos concluye que las células son estructuras bio-electroquímicas que interactúan con su entorno de varias formas, entre las que se incluyen interacciones mecánicas, térmicas, químicas, bioquímicas y eléctricas. El Dr. William Ross <sup>[41][42][43]</sup> (Universidad de California) asegura que los iones, especialmente los iones de calcio podrían jugar un papel similar al de un enlace químico entre el campo electromagnético y los procesos de la vida.

Como conclusión de los tres mecanismos biofísicos nombrados (corrientes inducidas, efectos directos sobre los materiales biológicos magnéticos y efectos sobre radicales libres) podemos decir que para que haya efectos nocivos notables es necesario intensidades de campo electromagnético importantes, y en cualquier caso, mucho mayores de las que habitualmente existen en nuestro entorno. Sin embargo, para entender los efectos bio-electro-químicos se necesita conocer más sobre cómo el campo de ELF afecta a los procesos de la vida. Los investigadores creen que hay que hacer una clara distinción entre esos tres bioefectos y el proceso de efectos bio-electro-químicos de manera que el efecto de campos ELF débiles hay que encontrarlo fuera del ámbito de la física convencional.

**Estudios sobre ELF y cáncer.** En la literatura sobre bioefectos de campos de ELF existen estudios sobre diferentes efectos sobre la salud; sin embargo, al que más atención se le ha prestado es a su posible relación con la inducción del cáncer<sup>[9]</sup>.

**Mecanismos del cáncer.** El cáncer es un término que describe al menos 200 enfermedades diferentes todas ellas con la característica común de un crecimiento incontrolado de las células.

El cáncer es un caso de mitosis incontrolada en el que las células se dividen de forma incontrolada y crecen fuera de todo control. Esencialmente, el cáncer es, por tanto, un desorden genético a nivel celular siendo un fallo en las propias células más que en el cuerpo entero. Las causas de muchos cánceres son desconocidas y son muchos los factores de influencia en el riesgo de contraer cáncer. Cada uno de los factores de riesgo conocidos tales como el tabaco, alcohol, radiación ionizante y otros contribuyen a tipos de cáncer específicos. El riesgo de cáncer está relacionado con muchas causas:

- El riesgo con amianto está relacionado con la longitud y dureza de las fibras.
- El riesgo con partículas en el aire está relacionado con su tamaño y su propensión para fijarse en los pulmones.
- La luz visible rompe enlaces en los procesos de fotosíntesis aunque ello no parece relacionado con el cáncer.
- La radiación de origen solar, como la radiación ultravioleta UV (especialmente la UVB) está asociada con el riesgo de contraer cáncer de piel y melanoma maligno.

Sin embargo, ya sabemos que la energía de un fotón de campos de baja frecuencia es insuficiente para romper enlaces químicos. En general, los cánceres potencialmente asociados a exposición a campo electromagnético son leucemia y tumores de pecho y cerebrales.

**Carcinogénesis.** La transformación de células sanas en células malignas es un proceso complejo, que incluye al menos tres etapas distintas debidas a deformaciones en el material genético de las células. El proceso global se denomina modelo de carcinogénesis multietapa:

El cáncer humano es el resultado de la acumulación de varios cambios genéticos y epigenéticos en una población de células dadas y se inicia por un daño en la cadena de ADN. Al agente que causa tal efecto se le llama *genotoxina*. Es altamente improbable que un simple daño genético en las células cause cáncer. Para ello se necesita una serie de daños genéticos. La genotoxina puede afectar a más de un tipo de células y por tanto causar más de un tipo de cáncer. Un agente epigenético es algo que incrementa la probabilidad de causar cáncer por un agente genotóxico. No existen ensayos estándares para la actividad epigenética y por tanto no hay una manera fácil de predecir si una agente presenta tal actividad.

Los efectos genotóxicos de campos de ELF han sido ampliamente estudiados. No se ha confirmado ningún cambio celular significativo bajo exposiciones a campos de ELF con niveles usuales. Los estudios muestran que los campos de ELF no causan ni daño en el ADN, ni aberraciones cromosómicas, ni mutaciones, ni transformaciones en las células, ni formación de micronúcleos, ni efectos mutagénicos a niveles comparables a los que existen en el ambiente habitual. Sólo unos pocos estudios han comunicado genotoxicidad de estudios experimentales en animales, pero la mayoría no han reproducido fielmente las condiciones ambientales o no han sido replicados.

Otros estudios han indicado que los campos de ELF podrían tener alguna actividad epigenética. Los mayores inconvenientes de los resultados provenientes de los estudios experimentales es que la mayoría de ellos no han sido replicados y, su repetición por otros autores es la única manera de comprobación de los resultados. Por otro lado, los resultados necesitan estar apoyados en mecanismos confirmados, lo que claramente no está todavía disponible.

La conclusión final de un gran número de estudios <sup>[9]</sup> en este campo, es que exposiciones a campo eléctrico y magnético con intensidades menores a 0,1mT no producen ningún cambio celular significativo tales como actividad genotóxica o epigenética. Sin embargo, unos pocos estudios sí han encontrado evidencia de actividad epigenética. También, para campos superiores a 0,1 mT pueden existir efectos nocivos.

**Hipótesis de la melatonina** <sup>[9]</sup>. Una posible interacción bajo investigación es que la exposición a campos de ELF suprime la producción de melatonina, que es una hormona producida por la glándula pineal localizada en una zona profunda del cerebro. La melatonina se produce principalmente por la noche y se libera mediante el flujo sanguíneo a través del cuerpo.

La melatonina llega a casi todas las células del cuerpo humano, destruyendo los radicales libres además de regular a otras actividades como los ciclos menstruales femeninos, el ritmo cardíaco, el sueño, el estado de ánimo y la genética. La secreción de melatonina decrece con la edad siendo máxima en la niñez y su producción es esencial para el sistema inmunológico protegiendo al cuerpo de infecciones y de las células cancerosas. Si el nivel de melatonina decrece diversos tipos de cánceres pueden proliferar.

Como se verá a continuación algunos estudios han concluido que los ELF pueden tener algún efecto relevante en el cáncer a través de una serie de subprocesos. Más concretamente los CEM reducirían la melatonina, lo que puede producir efectos genéticos que provocarían células cancerosas, defectos inmunológicos, crecimiento anormal y, finalmente, cáncer.

Es conocido que la melatonina se ve afectada por la luz <sup>[9]</sup>. Por ejemplo, las mujeres ciegas típicamente tienen más nivel de melatonina que las videntes y la incidencia del cáncer de mama es mucho menor. Otras frecuencias de la energía electromagnética diferente a la del visible pueden también tener influencia en la generación de melatonina. El interés básico en la melatonina de muchos científicos es que podría servir de base para explicar algunos estudios epidemiológicos.

Diversos laboratorios han encontrado reducción de melatonina en células, animales y personas expuestos a campos de ELF siendo un efecto que depende fuertemente del período

de exposición y de la intensidad del campo:

- En 1995 Selmaoui y colaboradores <sup>[44]</sup> realizaron un estudio con ratones expuestos a campos de 50 Hz con intensidades de 1, 10 y 100  $\mu$ Teslas durante 12 horas o durante 30 días durante 18 horas al día. Se observó un decrecimiento en la melatonina para los ratones expuestos 30 días (un 40% de reducción) y en los expuestos 12 horas a 100 $\mu$ T (un 20% de reducción). Para un 1 $\mu$ T no se observó reducción en ningún caso.
- Según Michael H. Repacholi (World Health Organization, 1998), en 1987 Stevens <sup>[45]</sup> propuso una relación entre la exposición a campos ELF (50/60 Hz) y la carcinogénesis a través de la acción del campo sobre la secreción de melatonina. Se reportó una inhibición de la secreción de melatonina y un descenso de la actividad de las enzimas involucradas en el metabolismo de la melatonina con exposición a ELF o campos magnéticos estáticos alternados rápidamente.

Pero también existen estudios en los que no se ha encontrado esa reducción:

- En 1995 Rogers y sus colaboradores <sup>[46]</sup> sometieron a monos a campos eléctricos de 60 kV/m y magnéticos de 50 $\mu$ T o de 30 kV/m y 100 $\mu$ T de 60 Hz durante 12 horas al día y 6 semanas. No encontraron ninguna evidencia de reducción en la melatonina.
- Graham y colaboradores en 2000 <sup>[47]</sup> no encontraron efectos entre hombres jóvenes voluntarios expuestos a campos de 60 Hz de 28,3 $\mu$ T.

Ningún estudio ha determinado los efectos en el metabolismo de la melatonina provocados por niveles bajos de corriente continua o campos de RF de amplitud modulada. Estos efectos deberían investigarse.

Los posibles **efectos** sobre diferentes actividades del cuerpo se resumen a continuación <sup>[9]</sup>:

**Material genético.** Mucha de la investigación en efectos biológicos de los CEM se ha dedicado a encontrar si la exposición a campos de ELF puede dañar el ADN o inducir mutaciones en él. Generalmente, se cree que la energía asociada con campos de ELF no es suficiente para causar un daño directo en el ADN; sin embargo, debe entenderse que pueden ser posibles efectos indirectos que cambien los procesos en las células que puedan producir un daño en el ADN. Por otro lado, campos de ELF con intensidades muy superiores a las habituales en el ambiente pueden producir cambios en la síntesis del ADN, cambiar la distribución molecular o inducir aberraciones cromosómicas. Sin nombrar ningún estudio en particular, en general los cambios mutagénicos sólo se observan a intensidad de campo magnético alta.

**Transporte de calcio.** El fenómeno de liberación de iones de calcio  $Ca^{++}$  de las células por exposición de campos de ELF es conocido especialmente en el cerebro y las células linfáticas. Niveles elevados de  $Ca^{++}$  se han encontrado con niveles tanto bajos como altos de campo en cultivos celulares y animales. El exceso de  $Ca^{++}$  puede causar perturbaciones en la actividad hormonal. Sin embargo, muchos científicos no estiman tan importante el papel del  $Ca^{++}$  en el cáncer y la leucemia aunque se conoce que las células segregan iones de calcio a las células circundantes como un mensaje para bloquear el desarrollo celular.

Según R. Glaser, M. Michalsky y R. Schramek.(1998) <sup>[48]</sup> a partir de 400 pruebas no hay efectos claros para esta actividad para campos magnéticos superiores pico a pico a 2.6 mT y frecuencias de 45Hz a 12kHz, ni para campos eléctricos superiores a 150 V/m a frecuencias de 15, 45, 100 y 500 Hz, y 1, 2, 5 y 10 Kz, existiendo importantes desviaciones estadísticas de resultados a frecuencias de 45, 740 y 1040 Hz.

**Actividad de las enzimas.** Existen estudios <sup>[9]</sup> sobre la influencia de los campos de ELF sobre las enzimas.

**Hormonas.** Muchos estudios <sup>[9]</sup> han demostrado los efectos sobre las hormonas de campos de ELF.

**Sistema inmunológico.** El sistema inmunológico no parece que se vea alterado por campos de ELF de niveles bajos.

**Comunicación intercelular.** Las interacciones intercelulares juegan un papel primordial en el desarrollo del sistema nervioso de todos los organismos. Las señales químicas y eléctricas a través de las membranas son las responsables de las comunicaciones intercelulares. Los campos de ELF pueden cambiar las propiedades de la membrana de las células, modificar las funciones celulares e interferir en la transferencia de información intercelular.

**Efectos no cancerosos.** Los efectos no cancerosos del campo de ELF en estudios in vitro no son tan numerosos como los anteriores. Se han estudiado efectos sobre la división y crecimiento celular para campos del orden de unos pocos V/m o décimas de mT.

También se han estudiado efectos asociados con la exposición de embriones a campos de ELF. La importancia de estos estudios es que se han realizado conjuntamente en seis laboratorios de cuatro países. Con campos de 100 Hz y señales pulsadas (de corta duración) se encontró un 6% de incremento en el número de embriones anormales.

#### **Estudios sobre cáncer en animales.**

- No existe ninguna evidencia en ningún estudio de que campos de ELF de baja intensidad puedan causar cáncer en animales:
- Existe un estudio <sup>[9]</sup> sobre animales tratados con un iniciador químico que ha encontrado un gran número de tumores en ellos cuando son sometidos a campos magnéticos de intensidades medias.
- Otros estudios en roedores sometidos a campos de ELF con valores de campo magnético de 100 $\mu$ T mostraron crecimiento en los tumores de mama pero no una mayor incidencia en su presencia.

Basándonos en los estudios realizados, es posible concluir que no hay una evidente conexión que ligue la exposición a campos de ELF con niveles del orden de los que existen en el ambiente habitual con el cáncer en animales. Para campos magnéticos altos se ha visto en ciertos estudios una relación positiva en la incidencia sobre el cáncer.

**Otros estudios en animales** <sup>[9]</sup>. Sobre la incidencia de campos de ELF en animales estudiando sus efectos sobre enfermedades no cancerosas existen también muchos estudios. Se han realizado estudios en ratas y ratones midiendo la influencia de campos de ELF en su presión sanguínea, actividad funcional y celular y resistencia del sistema inmunológico. El valor del campo magnético era de 2, 200 y 1000 $\mu$ T a 60Hz y la exposición era continua. No se encontraron efectos significativos. No hay una evidencia de que la exposición a campos de ELF cause cambios en los animales. Algunos estudios han indicado algunos cambios en el comportamiento social de monos, pero la recomendación en este sentido es continuar con los estudios.

**Estudios en humanos.** Los efectos de campos de ELF podrían ser estudiados en humanos con seguridad y con efectividad sobre voluntarios, a pesar de las limitaciones en la duración de la exposición y los tipos de pruebas que se les puedan hacer. Estos estudios se centran en los efectos que pueden ocurrir durante un tiempo que va de unos minutos a algunas semanas. Estudios más extensos en el tiempo son muy difíciles, si no imposibles, por la dificultad de controlar la exposición.

La selección de mecanismos fisiológicos para analizar está también limitada a aquellos que se puedan medir por métodos no invasivos o mínimamente invasivos. Por otro lado estos estudios tienen ciertas ventajas, pues se centran directamente en la especie “correcta” evitando extrapolación de resultados obtenidos de otras especies.

Los estudios con humanos voluntarios pueden ayudar a definir dosimetría y tipos de respuesta a los resultados dados por los estudios epidemiológicos y podrían guiar áreas de investigación en animales en los que hubiera que recurrir a métodos y mecanismos más invasivos.

Es conocido que muchas personas han dado a conocer diferentes efectos sobre la salud debidos a exposiciones de campos de ELF, tales como dolores de cabeza, cambios cardiovasculares, cambios en el comportamiento, confusión, depresión, dificultad en la concentración, perturbaciones del sueño, malas digestiones etc. Las fuentes esenciales en este campos son las encuestas a las personas que viven cerca de fuentes potenciales de campos de ELF, pruebas de laboratorio y datos epidemiológicos.

- **Efectos en el comportamiento.** El sistema nervioso central es un lugar de potencial interacción con los campos de ELF debido a la sensibilidad eléctrica de sus tejidos. El sistema nervioso central está compuesto de nervios periféricos, la médula espinal y el cerebro y su labor es controlar la transferencia de información entre los organismos y el entorno y también controla los procesos internos. La posibilidad de que los campos de ELF afecten al sistema nervioso central y en especial al cerebro causando efectos adversos en el comportamiento y las capacidades cognitivas ha sido una preocupación constante en los diferentes estudios. No hay resultados concluyentes.
- **Efectos en el sistema cardiovascular.** El corazón es un órgano bioeléctrico. El electrocardiograma es el diagnóstico esencial de los cardiólogos para determinar la condición del corazón. Densidades de corriente alrededor de  $0,1 \text{ mA/m}^2$  pueden estimular tejidos mientras que corrientes de  $1 \text{ A/m}^2$  interfieren con la acción del corazón causando fibrilación ventricular<sup>[9]</sup>.
- **Sensibilidad eléctrica.** La sensibilidad eléctrica también conocida como hipersensibilidad electromagnética o electrosensibilidad, es un desorden neurológico con síntomas de tipo alérgico que está relacionado con los CEM. Algunos individuos se muestran más sensibles a ciertas frecuencias reaccionando cuando se encuentran en las proximidades de fuentes electromagnéticas. Los síntomas de la electrosensibilidad pueden incluir dolores de cabeza, irritación en los ojos, náuseas, irritaciones en la piel, debilidad, fatiga, pérdida de concentración, dificultad de respirar, trastornos del sueño etc. Algunos autores consideran que este síndrome es puramente psicossomático<sup>[9]</sup>.
- **Shocks y microshocks.** Un mecanismo de interacción ente los campos de ELF y los tejidos vivos es la estimulación directa de células y membranas. Esto prueba la capacidad del cuerpo humano para percibir corrientes eléctricas que con toda probabilidad puedan producir shocks o microshocks dependiendo de la intensidad de la corriente. Por microshock se entiende arritmias cardíacas producidas por corrientes de baja intensidad

que pasan a través del corazón. El término shock se utiliza para describir todos los daños importantes de la corriente eléctrica que pueden causar pérdida de conciencia y graves quemaduras o a perder la vida. Shocks ocurren más frecuentemente en personas que tocan un objeto conductor grande, como un motor, cuando no está aislado de tierra. Se estima <sup>[9]</sup> que el umbral para la densidad de corriente para la estimulación de células excitables es de 1 mA/m<sup>2</sup>. A frecuencias de ELF esto se corresponde con un campo eléctrico en el interior del cuerpo de 100 V/m. El campo eléctrico necesario para producir un shock es comparable con el que se necesita para producir calor. El valor mínimo para el shock se incrementa con la frecuencia. Por tanto, a bajas frecuencias el shock es el daño límite y a frecuencias grandes el calentamiento y las quemaduras pueden ocurrir a intensidades de campo bajas antes de dar lugar a un shock.

Como cierre de este apartado se reproduce la conclusión de un artículo <sup>[49]</sup> que revisa los efectos de los CEM:

*“Se han llevado a cabo un gran número de estudios experimentales y epidemiológicos para dilucidar efectos asociados a la exposición de las personas a CEM de ELF y RF. No hay evidencia convincente de que se dañe el ADN. No obstante muchos estudios han aportado pruebas de que los CEM de relativamente baja intensidad son capaces de interactuar con muchas moléculas, células y procesos sistémicos asociados a la carcinogénesis, mutagénesis y teratogénesis. No está claro cómo estos estudios se interpretarán en términos de riesgos para la salud pública. Uno de los principales problemas es la ausencia de un mecanismo de interacción biofísico de aceptación general que pueda explicar los efectos biológicos reportados sin violar los principios físicos básicos. Además, se han dado casos de intentos de reproducir algunos de los hallazgos clave en laboratorios que no han tenido éxito. Las dificultades en reproducir los experimentos de CEM pueden ser debidos en parte al hecho de que no se hayan reproducido también de forma exacta todos los detalles del experimento. No obstante, estas dificultades de repetitividad podrían indicar que los posibles efectos de los CEM son sutiles, ya que los efectos fuertes no serían sensibles a pequeñas variaciones en los detalles de los experimentos. Pero la sutileza de los efectos no necesariamente significa que sean insignificantes. Debido al gran número de personas expuestas, incluso efectos sutiles pueden resultar importantes para la salud pública”.* (J. Juutilainen, S. Lang., 1997).



## 4 MÉTODOS DE COMPENSACIÓN DE CALENTAMIENTO

Como se puede comprobar los efectos térmicos ya conocidos <sup>[50]</sup> de las radiaciones de campos electromagnéticos artificiales no se recogen normalmente entre las causas probables de ganancia de calor ni de fiebre. Ello es debido a que las directrices y normativas que regulan la exposición a CEM para la población general velan por que esto no suceda, a pesar de la posibilidad de que ocurran accidentes.

Todas las valoraciones de efectos no térmicos (no así los atérmicos) pasan por alto el fenómeno de la termorregulación.

**Termorregulación.** La termorregulación es la capacidad del cuerpo para regular su temperatura. Los animales homeotermos tienen capacidad para regular su propia temperatura.

La temperatura normal del cuerpo de una persona varía dependiendo de su sexo, actividad reciente, consumo de alimentos y líquidos, hora del día y, en las mujeres, de la fase del ciclo menstrual en la que se encuentren. La temperatura corporal normal, de acuerdo con la Asociación Médica Americana (American Medical Association), puede oscilar entre 36,5 y 37,2 °C. El cuerpo humano tiene una temperatura interna de 37°C, mientras que la temperatura cutánea es de 33.5°C.

La temperatura con que la sangre llega al hipotálamo será el principal determinante de la respuesta corporal a los cambios climáticos, ya que el hipotálamo es el centro integrador que funciona como termostato y mantiene el equilibrio entre la producción y la pérdida de calor. Si la temperatura disminuye, aumenta la termogénesis y los mecanismos conservadores del calor:

El mantenimiento de la temperatura corporal, además depende del calor producido por la actividad metabólica y el perdido por los mecanismos corporales, así como de las condiciones ambientales. La termogénesis, o generación de la temperatura se realiza por dos vías:

- Rápida: termogénesis física, producida en gran parte por el temblor y el descenso del flujo sanguíneo periférico
- Lenta: termogénesis química, de origen hormonal y movilización de sustratos procedentes del metabolismo celular.

### 4.1 MECANISMOS DE PÉRDIDA Y GANANCIA DE CALOR

#### 4.1.1 Mecanismos de Pérdida de Calor

El cuerpo siempre está perdiendo calor, ya sea por factores ambientales o por procesos biológicos externos o internos. Una vez producido el calor es transferido y repartido a los distintos órganos y sistemas <sup>[50]</sup>.

**Mecanismos externos:**

- **Convección.** Así se pierde el 12% del calor. Ocurre en todo fluido, hace que el aire caliente ascienda y sea reemplazado por aire más frío. La ropa disminuye la pérdida. Si existe una corriente de aire (viento o ventilador mecánico) se produce una convección

forzada y la transferencia es mayor. Si no hay aire más fresco para hacer el reemplazo el proceso se detiene. Esto sucede, por ejemplo, en una habitación pequeña con muchas personas.

- **Radiación emitida.** Como todo cuerpo con temperatura mayor que 26,5 °C, los seres vivos también irradian calor al ambiente por medio de ondas electromagnéticas. Es el proceso en que más se pierde calor: el 60% <sup>[50]</sup>. La radiación es la propagación de energía a través del espacio vacío, sin requerir presencia de materia. Así es como el Sol, que está mucho más caliente que los planetas y el espacio de alrededor, nos transmite su energía y nos transmite su calor.
- **Conducción.** En este proceso se pierde el 3% del calor, si el medio circundante es aire a temperatura normal. Es la transferencia de calor por contacto con el aire, la ropa, el agua, u otros objetos (una silla, por ejemplo). Si la temperatura del medio circundante es inferior a la del cuerpo, la transferencia ocurre del cuerpo al ambiente (pérdida); si no, la transferencia se invierte (ganancia). Si el medio circundante es agua, la transferencia aumenta considerablemente porque el coeficiente de transmisión térmica del agua es mayor que el del aire.
- **Evaporación.** Pérdida del 22% del calor corporal, mediante el sudor, debido a que el agua tiene un elevado calor específico, y para evaporarse necesita absorber calor, y lo toma del cuerpo, el cual se enfría. Una corriente de aire que reemplace el aire húmedo por el aire seco, aumenta la evaporación. La evaporación de agua en el organismo se produce por los siguientes mecanismos:
  - Evaporación insensible o perspiración: se realiza en todo momento y a través de los poros de la piel, siempre que la humedad del aire sea inferior al 100%. También se pierde agua a través de las vías respiratorias.
  - Evaporación superficial: formación del sudor por parte de las glándulas sudoríparas, que están distribuidas por todo el cuerpo, pero especialmente en la frente, palmas de manos, pies, zona axilar y púbica.

Cuando la **temperatura ambiental excede a la corporal**, el calor se gana por el metabolismo, radiación, convección y conducción y solo se pierde por la evaporación asociada al sudor. El grado de humedad del aire influye en la pérdida de calor por sudoración, ya que cuanto mayor sea la humedad del medio ambiente menor cantidad de calor podrá eliminarse por este mecanismo.

La adaptación del organismo a temperaturas extremas es fundamental en los deportes en los que se requiere un trabajo continuo (carreras de fondo, ciclismo, carreras de esquí, natación de aguas abiertas). Es necesario un conocimiento detallado sobre la influencia que ejercen el calor y el frío en el organismo del deportista, sobre todo durante la ejecución de cargas de entrenamiento y de competición de gran magnitud, así como nociones acerca de los mecanismos y de las vías de suministro utilizables para conseguir una eficaz adaptación individual a temperaturas altas y bajas.

La aclimatación del organismo del deportista a los cambios de temperatura del medio ambiente está orientada, básicamente, a la disipación de calor cuando la temperatura es alta y a mantener el calor si la temperatura es baja. Del total de energía generada por el organismo de una persona, entre un 60 y un 80% se transforma en calor que va al medio, y el resto, entre 20 y 40%, se transforma en energía útil para el trabajo.

Cuando la **temperatura ambiente es menor que la de la piel**, la conservación del balance térmico no supone ningún problema para el organismo de la persona, ya que la pérdida de

calor se facilita por la suma de la convección y la radiación, siendo las pérdidas por conducción marginales.

En el ejercicio, la intensidad de trabajo determina una mayor producción de calor, y esta carga de calor es tan grande que este mecanismo, aunque es el primero en activarse, no alcanza para eliminar el calor circulante que la sangre lleva hasta la piel. En estas condiciones, el único medio del que dispone el cuerpo para liberarse del calor es la evaporación. Para ello, se activan las glándulas sudoríparas, que serán las encargadas de eliminar el calor por medio del sudor. Por lo tanto, la evaporación es la forma más eficaz que el organismo tiene para disipar el calor durante el ejercicio, y la posibilidad de realizar este trabajo de termorregulación con eficacia es crucial para el deportista.

**Mecanismos internos** (controlados por el organismo). Pueden ser voluntarios (sacarse ropa o desabrigarse –corteza cerebral-, o involuntarios. Estos últimos son:

- **Sudoración.** Cuando el cuerpo se calienta de manera excesiva, se envía información al área preóptica, ubicada en el cerebro, por delante del hipotálamo. Éste desencadena la producción de sudor. El cuerpo humano puede perder hasta 1,5 litros de sudor por hora.
- **Transpiración insensible.** Cada persona, en promedio, pierde 800 ml de agua diariamente. Ésta proviene de las células e impregna la ropa, que adquiere el olor característico.
- **Vasodilatación.** Cuando la temperatura corporal aumenta, los vasos periféricos se dilatan y la sangre fluye en mayor cantidad cerca de la piel para enfriarse. Por eso, después de un ejercicio la piel se enrojece, ya que está más irrigada.
- **Termólisis.** para controlar la temperatura, nuestro organismo utiliza mecanismos físicos de disipación cuando el calor del cuerpo se eleva demasiado. Estos mecanismos pueden tener control fisiológico o no, tales como la orina, heces, aire expirado e ingesta de alimentos fríos, con los que podemos reducir la temperatura, pero nuestro metabolismo apenas intervendrá.

Por el contrario, cuando nuestros centros de control activan nuestra fisiología, se produce vasodilatación: los vasos sanguíneos de la piel se dilatan intensamente. Una vasodilatación plena puede aumentar la transferencia de energía hacia la piel hasta 8 veces:

- Termólisis intensa: cuando la temperatura central del cuerpo es mayor que el nivel crítico, se produce una mayor pérdida de calor por evaporación (sudoración). Un aumento adicional de 1°C en la temperatura corporal provoca suficiente sudoración para eliminar 10 veces la producción basal de calor del cuerpo. Muchos animales inferiores tienen escasa capacidad de perder calor por su superficie corporal debido a que su superficie presenta un pelaje importante y porque la mayoría no presentan glándulas sudoríparas, por lo tanto utilizan un mecanismo sustitutivo, el mecanismo del jadeo, que produce un aumento de la frecuencia respiratoria con una respiración muy superficial que colabora con la rápida evaporación del agua de las superficies mucosas, especialmente la saliva en la lengua.

#### 4.1.2 Mecanismos de Ganancia de Calor

##### Mecanismos externos (radiación)

- **Radiación directa del sol.** La superficie del cuerpo absorbe una gran cantidad de calor como radiación infrarroja. Se ha calculado que el cuerpo humano obtiene un 92 %
- **Irradiación desde la atmósfera.** La atmósfera actúa como una pantalla amplificadora frente a las radiaciones provenientes del Sol, y hace incidir las radiaciones infrarrojas directamente sobre el cuerpo.

**Mecanismos internos.** Estos pueden ser voluntarios (abrigarse –corteza cerebral-, o involuntarios. Estos últimos son:

- **Vasoconstricción.** En el hipotálamo posterior existe el centro nervioso simpático encargado de enviar señales que causa una disminución del diámetro de los vasos sanguíneos cutáneos; ésta es la razón por la cual la gente palidece con el frío.
- **Piloerección.** La estimulación del sistema nervioso simpático provoca la contracción de los músculos erectores, ubicados en la base de los folículos pilosos, lo que ocasiona que se levanten. Esto cierra los poros y evita la pérdida de calor. También crea una capa densa de aire pegada al cuerpo, evitando perder calor por convección; esto es un signo genético de nuestro pasado animal (a los animales de pelo largo les permite formar una capa gruesa de aire aislante reduciendo la transferencia de calor al entorno).
- **Espasmos musculares o tiritones.** La musculatura esquelética se escapa del control voluntario y queda sometido al hipotálamo. El frío produce contracciones musculares involuntarias, que aumentan el tono muscular o contracción basal que tienen los músculos, y si es más intenso produce un temblor perceptible. Estas contracciones consumen energía que se transforma en calor.
- **Termogénesis.** Nuestra fuente permanente de calor es la actividad metabólica basal, al favorecer el temblor, la excitación simpática de producción de calor y la secreción de hormonas tiroideas. Durante los escalofríos la producción de calor puede aumentar 4 ó 5 veces por estimulación del hipotálamo posterior, en el área llamada “centro motor primario del temblor”. Las señales que provocan el temblor van por la médula espinal y a través de las motoneuronas anteriores llegan al músculo esquelético aumentando su tono:
  - Termogénesis química: este mecanismo biológico es muy simple, la noradrenalina y la adrenalina circulantes en sangre provocan un aumento del metabolismo celular, pero también el enfriamiento (acción sobre el área preóptica hipotalámica anterior) aumenta la producción de la hormona liberadora de TSH (hormona estimulante del tiroides). Esta, a su vez, estimula la producción de hormonas tiroideas, lo que aumenta el metabolismo celular de todo el cuerpo.
  - Termogénesis física: la estimulación de los centros simpáticos del hipotálamo posterior causan vasoconstricción cutánea. La vasoconstricción periférica favorece la conservación de la temperatura de la sangre circulante, al desplazarla a los tejidos más profundos.

#### 4.2 HIPOTÁLAMO Y ALTERACIONES DE LA REGULACIÓN TÉRMICA

**Hipotálamo.** El hipotálamo tiene un doble sistema de regulación de la temperatura <sup>[50]</sup>:

- *Región preóptica* del hipotálamo anterior: centro que regula el exceso de calor.
- *Hipotálamo posterior*: centro de mantenimiento del calor que regula el exceso de frío y la pérdida de calor. Conserva y mantiene la temperatura corporal. Son las células de la

región posterior (conservadora de calor) las que predeterminan la temperatura de 37°C. La norma para los centros es una temperatura de  $36,8 + 0,4$  °C.

Si la temperatura disminuye con respecto a la norma, aumenta la termogénesis. Si la temperatura aumenta con respecto a la norma, se activa la termólisis.

**Receptores térmicos.** El funcionamiento fisiológico de los receptores cutáneos está entre 33° y 25°C, de forma que cuando la temperatura cutánea es de 29°C, prácticamente no hay sudoración.

**Neurotransmisores.** Existen también algunos neurotransmisores que actúan a nivel de los centros. Así, por ejemplo, la serotonina estimula al centro de la termogénesis, y las catecolaminas estimulan al centro de la termólisis.

### **Alteración de la Regulación Térmica**

- **Fiebre:** “Estado de elevación de la temperatura central, la cual a menudo, pero no necesariamente, hace parte de la respuesta de un organismo pluricelular, a la invasión de organismos vivos, o materia inanimada, reconocidas como patogénicas o extrañas por el huésped”. A esta definición se debe agregar que dicho aumento en la temperatura central es debido a un aumento en el punto de ajuste hipotalámico en el cual las respuestas homeostáticas del individuo se encuentran intactas.
- **Hipertermia:** Aumento en la temperatura, en el cual el control estrecho ejercido por el hipotálamo se encuentra abolido, es decir, que a diferencia de la fiebre es un estado en el que la homeostasis se encuentra deteriorada.

### **Causas de la Fiebre:**

- **Golpes de calor:** El límite de calor que puede aumentar el humano, está relacionado con la humedad ambiental. Así, si el ambiente es seco y con viento, se pueden generar corrientes de convección, que enfrían el cuerpo. Por el contrario, si la humedad ambiental es alta, no se producen corrientes de convección y la sudoración disminuye, el cuerpo comienza a absorber calor y se genera un estado de hipertermia. Esta situación se agudiza más aún si el cuerpo está sumergido en agua caliente.

En el humano se produce una aclimatación a las temperaturas altas, así nuestra temperatura corporal puede llegar a igualar la del ambiente sin peligro de muerte. Los cambios físicos que conducen a esta aclimatación son: el aumento de la sudoración, el incremento del volumen plasmático y la disminución de la pérdida de sal a través del sudor.

- **Enfermedades infecciosas:** Es el caso de las bacterias que generan toxinas que afectan al hipotálamo, aumentando el termo estado. Afecta a los mecanismos de ganancia de calor, los cuales se activan. Los compuestos químicos que generan aumento de temperatura son los pirógenos (virus, productos bacterianos, endotoxinas, complejos inmunes).
- **Lesiones cerebrales:** Al practicar cirugías cerebrales se puede causar daño involuntariamente en el hipotálamo, el cual controla la temperatura corporal. Esta alteración ocurre también por tumores que crecen en el cerebro, específicamente en el hipotálamo, de manera que el termostato corporal se daña, desencadenando estados febriles graves. Cualquier lesión a esta importante estructura puede alterar el control de la temperatura corporal ocasionando fiebre permanente.

#### 4.2.1 Simulación Mediante un Modelo Termorregulatorio

En 2009 <sup>[51]</sup> M.A. García, J. Valenzuela y D. Sánchez, del. Dpto. de Tecnologías de la Información y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cartagena realizaron simulaciones 2D de un plano coronal de cabeza humana, extraído del Proyecto Humano Visible (PHV), como muestra la figura 14. La simulación contemplaba los tejidos cerebrales de usuarios de telefonía móvil en la banda GSM 1800, por lo que la exposición simulada era de 1 W a frecuencia de 1800 MHz.

La combinación mediante software propio de las ecuaciones de Maxwell y de un modelo termorregulatorio humano proporcionó tanto la TAE (tasa de absorción específica) como los incrementos de temperatura asociados a la exposición electromagnética, para todos los tejidos del modelo a lo largo de la dirección de propagación, para varias distancias entre el dipolo y la cabeza.

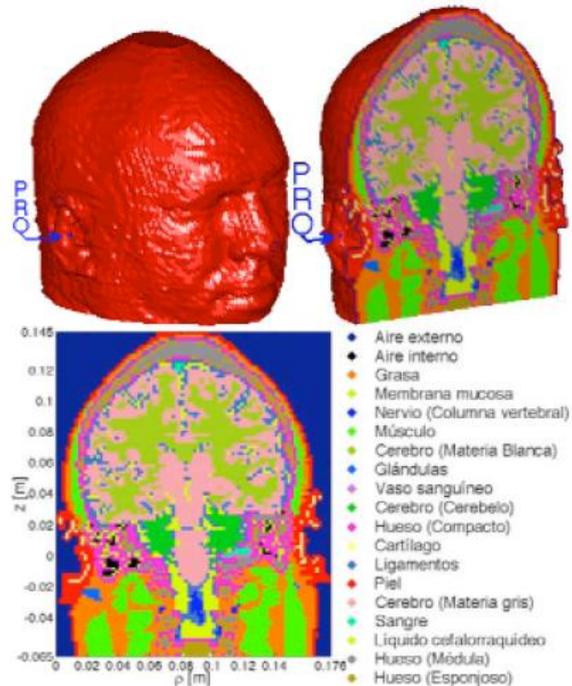


Figura 14. Modelo de cabeza humana del Proyecto Humano Visible (arriba-izquierda), plano coronal y leyenda (abajo-derecha).

Ello sin tener en cuenta factores como sudoración, respiración, pérdidas de calor variables en los pulmones, capilaridad, vasodilatación, flujo sanguíneo o metabolismo variables, ritmo cardíaco o alteraciones en la propia respuesta termorregulatoria debidas a que se incremente la temperatura en el hipotálamo.

En cuanto a las conclusiones en primer lugar se ha de tener en cuenta que habría que extrapolar el modelo a 3D, pero se obtuvieron resultados muy interesantes como:

- La naturaleza protectora del cráneo
- Incrementos térmicos por encima de 1 grado Celsius en tejidos del cerebro

## 5 PRESENCIA DE MAGNETITA EN EL CUERPO HUMANO

La mayoría de los materiales encontrados en los organismos son clasificados como no-magnéticos, bien sea diamagnéticos (repelidos débilmente por un campo magnético como el agua en casi todas las sustancias grasas) o paramagnéticos (atraídos débilmente hacia el campo magnético, como la desoxihemoglobina en las células sanguíneas). Para los materiales de estos tipos la influencia física directa del campo magnético terrestre es extraordinariamente débil ya que la energía de interacción magnética es muchos órdenes de magnitud por debajo de la energía térmica de base (interna de la materia),  $kT$  (donde  $k$  es la constante de Boltzman y  $T$  la temperatura absoluta) <sup>[1]</sup>.

No obstante existen otros materiales denominados ferromagnéticos que interactúan muy fuertemente con el campo magnético terrestre. A diferencia de las sustancias diamagnéticas y paramagnéticas las acciones mecánico-cuánticas sobre electrones no apareados con los materiales ferromagnéticos fuerzan los momentos magnéticos de los electrones (magnetones de Bohr) a formar alineaciones de rango elevado. Los momentos magnéticos de cada magnetón de Bohr en tales cristales se suman vectorialmente, y en algunos materiales un cristal de tan sólo unas pocas decenas de nanómetros de tamaño tendrá energía de interacción magnética con el campo magnético terrestre de 50 micro-teslas ( $\mu T$ ) <sup>[1]</sup> en exceso de energía térmica de base.

### 5.1 BIOMINERALIZACIÓN DE MAGNETITA EN LOS ANIMALES

Según Lowenstam y Weinel, en 1989 <sup>[52]</sup> ya se habían identificado al menos 12 minerales de hierro en los organismos, aunque sólo dos de ellos han sido encontrados también precipitados en los vertebrados. Estos son la ferrihidrita ( $5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$ ), que es el mineral que se encuentra en la molécula ferritina y la sustancia denominada frecuentemente en la literatura médica como hemosiderina, y la magnetita ( $Fe_3O_4$ ). De estos materiales, la ferrihidrita es paramagnética mientras que la magnetita posee una variedad de ferromagnetismo denominado ferrimagnetismo.

A volúmenes similares <sup>[2]</sup> estas propiedades harían que la magnetita interactuara sobre  $10^6$  veces más con los campos magnéticos externos que con cualquier material biológico. La magnetita es también el único compuesto metálico conocido fabricado por organismos vivos y tiene la conductividad eléctrica más alta que cualquier otro material celular.

Debido a que la magnetita es el único material biogénico conocido en organismos superiores que es ferromagnético a temperatura ambiente, es importante revisar brevemente la historia de su descubrimiento en animales y qué se conoce de su distribución filogenética (clasificación de las especies según su proximidad evolutiva) y función biológica:

- Heinz A. Lowenstam (1962) <sup>[53]</sup> fue quien descubrió la magnetita precipitada bioquímicamente como material de recubrimiento en la rádula (estructura que se localiza en la base de la boca y la concha de los moluscos) de los chitones (moluscos marinos de la clase Polyplacophora). Él y sus colaboradores fueron capaces de demostrar el origen biológico de este material a través de una variedad de estudios de trazado radio-isotópico y mediante el examen detallado de la ultra-estructura de la boca. Antes de este descubrimiento el origen de la magnetita sólo se concebía en rocas ígneas o metamórficas sometidas a altas temperaturas y presiones. En los chitones la magnetita sirve para

endurecer las capas dentales, capacitándolos para extraer y comer algas de los sustratos rocosos más superficiales (unos pocos milímetros). En 1985 Nesson y Lowenstam <sup>[54]</sup> publicaron los resultados de los análisis ultra-estructurales e histológicos detallados de la formación de la magnetita en la rádula y apuntaron que el proceso comienza con un transporte inicial de hierro metabólico al extremo posterior del saco de la rádula. Este hierro se deposita como mineral ferrihidrita en una malla orgánica previamente formada de material proteínico, formando una o dos filas distintas de dientes rojizos. A través de algún proceso la ferrihidrita se convierte rápidamente en magnetita a través de una reacción acoplada con reducción de hierro y re-cristalización.

- La bacteria magnetotáctica fue el segundo organismo en que se encontró magnetita biogénica <sup>[55]</sup>. Se precipitó cristales de magnetita de tamaño sub-micrométrico en una vacuola de membrana fosfolípida intracelular, formando estructuras denominadas “magnetosomas”, que se describen en el *apartado 5.1.1*. Las cadenas de estos magnetosomas actúan como simples agujas de compás que pasivamente dirigen a las células de la bacteria en alineaciones con el campo magnético terrestre y les permiten buscar la zona micro-aerofílica en la interfaz agua/lodo de la mayoría de los ambientes acuosos naturales. Estas bacterias nadan hacia el norte magnético en el hemisferio norte, hacia el sur magnético en el hemisferio sur, y en ambos sentidos en el ecuador geomagnético, aunque en el ecuador las densidades de población son mucho más bajas <sup>[2]</sup>. Los magnetosomas basados en magnetita se han encontrado también en las algas magnetotácticas eucarióticas, en que cada célula contiene varios miles de cristales. La greigita mineral ferrimagnética ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ) también ha sido descubierta posteriormente en los magnetosomas de un primitivo grupo de bacterias.

Una recopilación extensiva de los 30 años anteriores a los años 90 <sup>[2]</sup> demuestra que muchos organismos poseen la habilidad bioquímica de precipitar la magnetita mineral ferrimagnética ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y la greigita ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ). En términos de su distribución filogenética, la biomineralización de la magnetita está particularmente esparcida, habiéndose documentado en monera, protozoos y animales, con un registro fósil hasta el período Precámbrico. Dentro del reino animal se conoce dentro de moluscos, artrópodos y cordados y se sospecha en muchos otros grupos. En los microorganismos y peces, cadenas lineales de cristales de magnetita enlazados por membrana (magnetosomas) forman estructuras descritas como “magnetos biológicos de barra”.

El movimiento del material ferromagnético encontrado en los organismos, como respuesta a los campos magnéticos externos, ha de tenerse en cuenta en principio en los efectos magnéticos a nivel celular, tales como la alineación magnética de la bacteria magnetotáctica y algas o la respuesta magnetotáctica de las abejas. Bajo ciertas condiciones los movimientos inducidos de los magnetosomas pueden ser suficientemente capaces para abrir mecánicamente los canales iónicos de las trans-membranas sensitivas que, por otro lado, tienen el potencial de influir en un amplio rango de procesos celulares.

Aunque el conocimiento de las funciones biológicas de la magnetita es todavía incompleto, en la boca de chitón sirve como un agente que aporta dureza – es el material biogénico conocido más duro formado por un organismo. En los microorganismos la magnetita es responsable de la respuesta magnetotáctica de la bacteria y del alga eucariótica. La magnetita también parece estar involucrada en la habilidad de muchos animales para usar el campo geomagnético como dirección de orientación o navegación; las cadenas de magnetosomas en el salmón, que se parecen muchísimo a aquellas de bacterias y algas, podrían utilizarse con este propósito. El

trabajo conductual realizado con abejas por H. Schiff y G. Canal <sup>[56]</sup> que demuestra que la búsqueda del norte puede cambiarse al sur con un breve pulso magnético confirma que un material ferromagnético como la magnetita forma parte del sistema sensorial magnético de la abeja.

Aparte de las funciones de la magnetita descritas anteriormente, existe un problema añadido: la magnetita se sabe <sup>[2]</sup> que se forma comúnmente en una variedad de tejidos para los que la función sensorial es bastante improbable – tumores en ratones y humanos, por ejemplo. Incluso muchos de los cristales de magnetita extraídos del cerebro humano muestran características que podrían ser efectos de disolución. De ahí que se sospeche que la magnetita tiene todavía roles desconocidos en la bioquímica eucariótica (células con núcleo), quizás como una fuente localizada de hierro para activar enzimas basadas en hierro. Los altos niveles de magnetita en los tumores que crecen rápidamente en ratones atisban que pueden tener un rol en la división celular.

Aunque el hierro juega un papel importante en prácticamente todos los organismos vivos, - principalmente a través del transporte electrónico debido a su capacidad para cambiar la valencia-, tiene una capacidad biológica bastante limitada y, en algunas situaciones, puede resultar tóxico para las células. Por esta razón es necesario para los organismos segregar hierro en una forma no tóxica.

### 5.1.1 Los Magnetosomas

En 1975 Blakemore <sup>[55]</sup> descubrió que ciertas bacterias se orientaban según el campo magnético terrestre.

Son orgánulos presentes en las bacterias procariontas magnetotácticas. Contienen entre 15 y 20 cristales de magnetita que juntos actúan como una brújula para orientar las bacterias magnetotácticas en los campos geomagnéticos, lo que simplifica la búsqueda de sus ambientes preferidos de microaerofilia. Cada cristal de magnetita dentro de un magnetosoma está rodeado por una bicapa lipídica y proteínas solubles. La membrana que los rodea contiene fosfolípidos <sup>[2]</sup>, proteínas y glicolípidos.



*Figura 15. Magnetosoma de la bacteria magnetotáctica*

En la mayoría de las bacterias magnetotácticas, los magnetosomas están dispuestos en una o más cadenas, como puede observarse en la figura 15.

En general, los cristales magnetosomas tienen alta pureza química <sup>[1]</sup>, rangos estrechos de tamaño, las especies específicas de morfologías de cristal y exhiben un régimen específico dentro de la célula. Estas características indican que la formación de magnetosomas está bajo el control biológico preciso y es mediada por biomineralización. Las bacterias magnetotácticas mineralizan de óxido de hierro, los cuales contienen cristales de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), o magnetosomas de sulfuro de hierro, que contienen cristales de greigita ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ). Se han identificado también otros minerales de sulfuro de hierro en magnetosomas de sulfuro de hierro.

La morfología de las partículas de cristales de magnetosomas varía, pero es coherente dentro de las células de una sola especie o cepa bacteriana magnetotáctica <sup>[1]</sup>. Tres morfologías cristalinas generales han sido reportadas en las bacterias magnetotácticas:

- más o menos cúbico
- alargado prismático (más o menos rectangular)
- forma de diente, bala o punta de flecha.

Los cristales de menor tamaño son superparamagnéticos, es decir, no permanentemente magnéticos a temperatura ambiente, y las paredes de dominio se forman en cristales más grandes.

La función de los magnetosomas en la célula bacteriana es la de orientar en el campo magnético existente. El magnetosoma puede permitir a la bacteria ir fijando su posición con respecto al norte, pudiendo trazar una ruta a través del campo magnético hacia zonas de distintas concentraciones de oxígeno y de nutrientes.

La mayoría de las bacterias que producen los magnetosomas se engloban en los géneros *Magnetospirillum* o *Magnetococcus*. Las bacterias del género *Magnetospirillum* son bacterias con forma de sacacorchos (espirilos) Gram negativas, perteneciente al grupo taxonómico de las alfa-proteobacterias. Son anaerobios facultativos o microaerófilos y viven en zonas de transición entre zonas anoxigénicas y zonas oxigenadas. Su hábitat predilecto son las zonas húmedas enfangadas o sedimentos marinos donde existen ambientes ricos en azufre y escasos en oxígeno.

## **5.2 BIOMINERALIZACIÓN DE MAGNETITA EN EL CUERPO HUMANO**

Antes de 1992 <sup>[1][2]</sup> en los estudios de imágenes de resonancia magnética (MRI) y almacenamiento iónico, se asumía universalmente que no había materiales magnetizados permanentemente (ferromagnéticos) presentes en los tejidos humanos. Una asunción similar se había realizado en prácticamente todas las valoraciones biofísicas del riesgo humano asociado con la exposición a campos magnéticos de frecuencia extremadamente baja (ELF) y por estudios críticos epidemiológicos que sugerían una conexión entre los campos magnéticos débiles de frecuencia de suministro eléctrico y varios desórdenes de salud humana. Estos análisis se enfocaron en los efectos colaterales de la inducción eléctrica o posibles interacciones diamagnéticas y paramagnéticas. De ahí que la asunción implícita de los estudios del pasado de que los tejidos humanos están libres de material ferromagnético necesita ser valorada de nuevo críticamente y testeada experimentalmente.

El descubrimiento en los años 80 de que los tejidos humanos también contienen trazas de magnetita podría tener implicaciones biomédicas importantes. La magnetita ha sido el primer material verdaderamente novedoso descubierto como un precipitado bioquímico en tejidos humanos desde el comienzo de la ciencia médica –todo en el cuerpo humano, desde los huesos hasta los tejidos más blandos se consideraba diamagnético o paramagnético <sup>[52]</sup>.

Aunque la cantidad total de magnetita en un cuerpo humano adulto es pequeña (unos pocos cientos de microgramos), hay varios millones de cristales por gramo interactuando fuertemente con los campos magnéticos externos. Como los efectos a nivel celular pueden a menudo conducir a efectos globales, particularmente en los sistemas neurológico e

inmunológico, es importante para la salud humana conocer qué hace este material en los tejidos humanos y cómo se forma.

No obstante se considera que las investigaciones previas a 1992 sobre la magnetita biogénica en tejidos humanos no fueron del todo concluyentes. En 1992 Joseph L. Kirschvink y colaboradores <sup>[1]</sup> reportaron que los tejidos humanos poseen cristales similares de magnetita biogénica, con un mínimo estimado entre 5 y 100 millones de cristales de dominio simple por gramo en los tejidos del cerebro humano. Los extractos de partículas magnéticas del tejido solubilizado examinados con TEM (microscopía electrónica de transmisión) de alta resolución y difracción electrónica identificaron minerales la solución sólida magnetita-maghemita, con muchas morfologías de cristal y estructuras parecidas a aquellas precipitadas por bacterias magnetotácticas y peces.

**Muestras de tejidos.** En sus experimentos utilizaron material del cerebro humano obtenido entre 12 a 14 horas postmortem del Consorcio Centro de Investigación de la Enfermedad de Alzheimer de California del Sur. Se tomaron muestras de siete cerebros de pacientes de edad media 65 años desde 48 a 88 años. Se sospechaba que cuatros de ellos padecían Alzheimer. Se incluyeron muestras tanto de áreas corticales cerebrales como de cerebelo de los siete cerebros. Se obtuvieron además de los anteriores en un caso cerebro y dura espinal, ganglio basal y cerebro medio, y en otro caso bulbos olfativos, sinus sagital superior y tentorium de la dura.

**Magnetometría.** Las sub-muestras de las medidas magnéticas se retiraron de los tejidos utilizando herramientas similares en un laboratorio libre de polvo protegido magnéticamente. Las medidas de los materiales ferromagnéticos se realizaron utilizando un magnetómetro que empleaba dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID) sesgado a radiofrecuencias RF, diseñado para medir el momento ferromagnético total de las muestras situadas dentro de la bobina de Helmholtz.

**Resultados de Magnetometría.** Todos los tejidos examinados tenían magnetizaciones remanentes isotérmicas (IRMs) que saturaban al aplicar campos de aproximadamente 300 mT, una característica propia de las series de magnetita-maghemita. La habilidad de ganar o perder magnetización remanente en estos experimentos es una característica definitiva de los materiales ferromagnéticos. La tabla 8 muestra los valores medios de cada cerebro. La magnetización media indica el equivalente a unos 4 ng de magnetita por cada gramo de tejido. En contraste, los valores medios para las meninges de tres cerebros (tabla 4) son casi 20 veces mayor, o de unos 70 ng/g. En comparación, las medidas de IRM de los cubitos de hielo des-ionizados arrojan un ruido de fondo de unos 0.5 ng/g.

Tissue	Saturated IRM, $\mu\text{A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$	Magnetite, ng/g	No. of subsamples
<b>Brain</b>			
1	0.14 ± 0.08	3.0 ± 1.4	11
2	0.18 ± 0.10	3.9 ± 2.2	5
3	0.14 ± 0.05	3.0 ± 1.1	5
4	0.27 ± 0.21	5.9 ± 4.6	6
5	0.20 ± 0.09	4.3 ± 2.0	3
6	0.19	4.1	1
7	0.33 ± 0.19	7.2 ± 4.1	2
<b>Meninges</b>			
1	2.5 ± 1.8	54 ± 39	8
2	2.5 ± 1.5	54 ± 33	8
6	5.0	109	1

Tabla 8. IRM (magnetización remanente isotérmica) saturada media para el cortex

### *cerebral y el cerebelo de cada cerebro.*

En la tabla 8 los datos de IRM saturado se han expresado en  $\mu\text{A m}^2 \text{ kg}^{-1}$  (peso húmedo) (media  $\pm$ SD). Las muestras occipitales eran de las áreas de Brodman (BA) 17, 18 y 19; las muestras temporales eran de BA 20, 21 y 22; las muestras parietales eran de BA 3,1, 2, 5 y 7; y las muestras frontales eran de BA 4 y 6. Los tamaños de las muestras iban de los 0.5 g a 22 g. Las meninges de las muestras cerebrales 1, 2 y 6 fueron analizadas aparte. La técnica del cubito de hielo se utilizó para todas las meninges, y para los tejidos cerebrales 2 y para 7 de las 11 muestras del 1. No se detectaron diferencias en los resultados al utilizar esta técnica. Las concentraciones de magnetita fueron estimadas teniendo en cuenta que la remanencia de saturación debería ser exactamente la mitad de la magnetización de saturación para una dispersión de cristales de dominio simple. Los cerebros 1 a 4 eran de pacientes normales, los cerebros 5 y 6 eran de pacientes con Alzheimer confirmado, y el cerebro 7 era de un paciente con sospecha de Alzheimer.

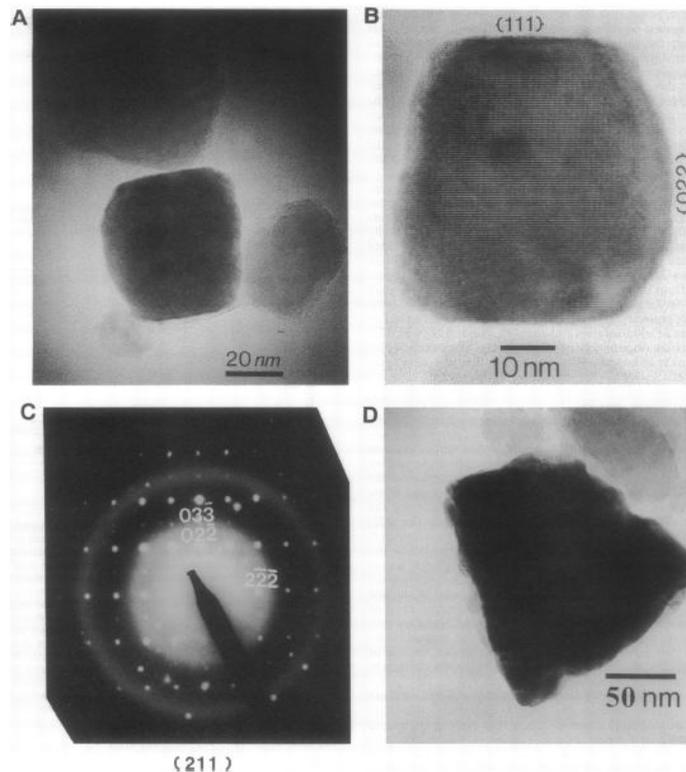
Hubo una consistencia considerable en las medidas IRM tanto para los tejidos cerebrales como de las meninges. Hubo una pequeña diferencia en IRM de un área del cortex cerebral a otra en el cerebro versus cortex del cerebelo. Las diferencias entre tejidos de cerebros normales y aquellos con sospecha o Alzheimer confirmado fueron despreciables. Las áreas de cerebro que se reportaron previamente con un contenido alto de hierro incluían el núcleo dentado, ganglio basal y áreas de cerebro medio. Las muestras de estas áreas no tenían mayor contenido de partículas magnéticas que las del cerebelo o del cortex cerebral.

Los valores de coercitividad magnética (resistencia a la desimanciación) media eran de aproximadamente 30 mT, pero con rangos desde 12 mT (pía del cerebelo) a 50 mT (ganglio basal), dentro del rango de coercitividad para la magnetita de dominio simple. En cuanto a las distribuciones de coercitividad, medida por adquisición de IRM y su desmagnetización, y la relativamente lenta tendencia a adquirir un ARM (magnetización remanente anhistórica) sugiere que las partículas in situ están en pequeños grupos que interactúan. La comparación con las muestras de control de las bacterias sugiere entre 50 a 100 partículas por agrupación <sup>[1]</sup>.

**Resultados de Extracción y Microscopía Electrónica.** La figura 16 muestra dos morfologías de cristal representativo de las partículas magnéticas extraídas. Los tamaños de grano eran bimodales, con 62 de los 70 cristales medidos en el rango de 10 a 70 nm y los restantes 8 con tamaños 90 a 200 nm. Las medidas de las sombras TEM de 62 de las partículas más pequeñas en un agregado muestra un tamaño medio de  $33.4 \pm 15.2$  nm. El valor medio estaba sesgado hacia los tamaños mayores debido a que el procedimiento de extracción discriminaba contra partículas muy pequeñas que se mueven más lentamente a través del líquido. La relación entre forma y tamaño para todas las partículas medidas cae dentro de los campos superparamagnéticos y de dominio simple para la magnetita. El volumen estimado de los cristales, realizado asumiendo formas de partículas equivalentes, implica que las partículas más grandes se componen de un máximo de aproximadamente 85% de la magnetita. Se estimó que los tejidos cerebrales contienen un mínimo de 5 millones de cristales por gramo, distribuidos en clases discretas de 50.000 a 100.000. De forma similar, las meninges contienen un mínimo de 100 millones de cristales por gramo, en clases de 1 a 2 millones.

Los análisis de rayos x de dispersión de energía de los cristales dieron picos consistentes

de Fe, con picos de Cu variable (de las rejillas TEM de cobre) y menor de Si, Ca y Cl (probablemente contaminantes de los envases). La mezcla de óxidos Fe-Ti, que están normalmente presentes al menos en cantidades de traza en los minerales magnéticos formados geológicamente no se detectaron en ninguno de los cristales cerebrales examinados. Los patrones de micro-difracción electrónica indexada de los cristales individuales y agregados de partículas arrojaron la característica d-espacial de la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) con partículas más pequeñas que mostraban una oxidación variable hacia el radical de solución sólida ferrimagnética, maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ). Esta oxidación probablemente ocurrió durante el proceso de extracción, como se observa comúnmente en las magnetitas de grano muy fino.



*Figura 16. Imágenes TEM y patrones de difracción de cristales representativos de magnetita y maghemita del cerebelo humano:*

*(A) Agrupación de pequeñas partículas del cerebelo.*

*(B) Imagen TEM de alta resolución de maghemita muestra el patrón de intersección  $\{111\}$  y bordes  $\{02\bar{2}\}$ , con elongación en la dirección de mallado  $[111]$ .*

*(C) Patrón de difracción electrónica indexado del área seleccionada de este cristal, tomado en la zona  $\langle 211 \rangle$ . Los anillos de difracción para un agregado de pequeños cristales confirma la identificación de magnetita-maghemita.*

*(D) Una de las partículas de magnetita de mayor tamaño.*

La Figura 16A es una imagen de una agrupación de partículas pequeñas del cerebelo, y la Figura 16B muestra una imagen TEM de alta resolución de un cristal de maghemita de dominio simple bien ordenado en la zona  $[211]$ . Muestra características típicas de los cristales de magnetita formados dentro de las membranas de los magnetosomas y son muy similares a las partículas de dominio simple de las estructuras de cadenas de magnetosomas presentes en los tejidos dermo-etmoidales del salmón. La Figura 16C muestra el patrón de ubicación de difracción electrónica indexada del cristal.

La Figura 16D muestra una de las partículas mayores de aproximadamente 200 nm. Otras partículas pueden tener hasta 600 nm de diámetro. La microdifracción electrónica indica que estas partículas están dominadas por un cristal simple, con partículas más pequeñas ocasionalmente adheridas a su superficie. Su tamaño y forma medidos las sitúa dentro del campo estable de dominio simple. Estas partículas tienen energías de orientación magnética en el campo geomagnético de 20 a 150 veces mayor que la energía térmica  $kT$ .

Desde el descubrimiento de la magnetita en el cerebro humano se han extraído partículas de este material y se han visualizado y caracterizado magnética y morfológicamente a través del microscopio electrónico de transmisión (TEM) (Figura 17) y magnetometría de dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID). Las partículas son generalmente menores de 200 nm y, en la mayoría de los casos, son del orden de unas pocas decenas de nanómetros.

Según Jon Dobson en su mini-revisión de 2001 <sup>[57]</sup> mientras que algunas partículas muestran bordes disueltos, otras mantienen las caras cristalinas originales y todas las partículas examinadas son químicamente puras (esto es común en la magnetita biogénica). Morfológicamente las partículas son similares a aquellas observadas en la bacteria magnetotáctica, y el análisis magnético de las muestras de masa de tejido indica que las partículas se presentan generalmente en grupos que interactúan magnéticamente.

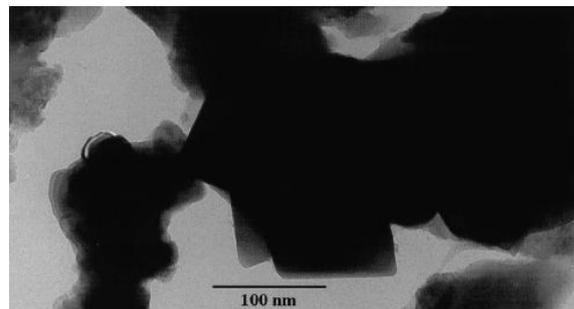


Figura 17. *Micrógrafo TEM de magnetita biogénica extraída del hipocampo humano.*

Aunque la ferritina es el principal mecanismo para el almacenamiento de hierro en el cerebro, el trabajo experimental de los años 90 demostraron la presencia de otra forma de hierro en el tejido cerebral humano, la magnetita biogénica ( $Fe_3O_4$ ). Se verán más adelante algunas de las consecuencias potenciales de la presencia de magnetita en el tejido con enfermedad neurodegenerativa.

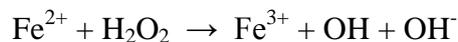
### 5.2.1 Hierro divalente y trivalente en el Cerebro Humano. Estrés oxidativo.

El hierro divalente juega una función crucial en la reacción de Fenton conduciendo al estrés oxidativo. En 1988 Sofic y colaboradores <sup>[58]</sup> encontraron altas concentraciones de hierro divalente en la sustancia negra (SN). Debido a que tales concentraciones altas de hierro divalente serían muy peligrosas para las células, la confirmación de este hallazgo era esencial, y el espectroscopio de Mössbauer es probablemente el mejor método para determinar el ratio de  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ .

Según Andrzej Friedman y colaboradores en 2011 <sup>[59]</sup> los estudios de Mössbauer mostraron que no había señal del hierro divalente, y la simulación computarizada indica que la señal no es detectable por debajo del 5% del hierro total. Las concentraciones elevadas de hierro divalente encontradas por Sofic y alumnos podrían explicarse por el método que utilizaron en sus investigaciones. Los tejidos eran homogéneos en presencia de pepsina y ácido hidrolórico. Cuando se prepararon las muestras de esta forma el hierro trivalente pudo reducirse a ferroso. Es más, el espectroscopio de Mössbauer para muestras tratadas de esta

forma dio el espectro del hierro divalente.

Durante décadas se ha considerado el estrés oxidativo <sup>[59]</sup> como un factor importante en el proceso de la neurodegeneración. Esta teoría propone que un exceso de radicales libres conduce a la muerte de las células nerviosas. El desequilibrio puede ser causado tanto por una producción creciente de radicales libres como por una neutralización insuficiente de los organismos carroñeros. El cerebro humano parece ser particularmente vulnerable a los daños por estrés oxidativo debido a su alta concentración de lípidos y ácidos grasos no saturados, a su relativamente alta concentración de hierro y a la baja concentración de enzimas capaces de desactivar las especies de oxígeno reactivo (ROS). La presencia de daños debido al estrés oxidativo puede demostrarse por la presencia de altas concentraciones de productos de oxidación, como el malondialdehído y el glicol timina. Los radicales libres son generados, entre otros, a través de la reacción de Fenton, en la que el hierro divalente juega un papel importante:



Como la mayoría del hierro en el cerebro humano está presente como hierro destinado a la ferritina, es obvio que cualquier cambio en la estructura o función de la ferritina puede relacionarse con el daño oxidativo <sup>[59]</sup>.

### 5.2.2 La Ferritina

Las ferritinas fueron identificadas sobre los años 40 y desde entonces se han podido caracterizar bastante bien. Se encuentran en casi todos los sistemas biológicos, con una remarcable conservación de la estructura y capacidad para oxidar e incorporar hierro. Las propiedades de las ferritinas en animales, plantas y bacterias han sido sujeto de numerosos estudios y de un reciente estudio completo en *Biochimica Biophysica Acta* (1800, 8, 2010) <sup>[60]</sup>.

En el cuerpo humano, tanto en el cerebro como en la mayoría de los organismos, el hierro se almacena principalmente en el núcleo de la proteína de almacenamiento de hierro ferritina. La ferritina <sup>[59]</sup> es una celda esférica hueca de 12 nm de diámetro compuesta de 24 subunidades. El hueco central de la celda es de 8 nm de diámetro y está ocupado habitualmente por el biomineral de hierro ferrihidrita, un óxido de hierro hidratado ( $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) que generalmente contiene sólo Fe(III). Esta es la forma en que se almacena la mayor parte del hierro en el cuerpo.

Su función principal es almacenar hierro celular de forma dinámica <sup>[59]</sup>, protegiendo la célula del daño potencial de los radicales de hierro, y permitir la liberación del metal según la demanda celular.

El cuerpo humano tiene tres genes de ferritina funcional: FTH en el cromosoma 11 codifica la cadena pesada citosólica (cadena-H) de 183 aminoácidos, FTL en el cromosoma 19 codifica la cadena ligera citosólica (cadena-L) de 175 aminoácidos, y la menos intrón (región dentro de un gen) FTMT del cromosoma 5 que codifica el precursor de la ferritina mitocondrial (FtMt) de 242 residuos.

El núcleo de ferrihidrita de la ferritina <sup>[59]</sup> es capaz de almacenar correctamente más de 4.500 átomos de hierro que, en condiciones normales, se mantienen no-reactivas frente a otras

moléculas dentro de la célula debido al aprisionamiento de la misma proteína. La captación se cree que se hace principalmente a través de un proceso de oxidación en que el Fe(II) altamente tóxico es capturado dentro de la proteína y oxidado para ser almacenado como Fe(III) menos tóxico en forma de ferrihidrita. Como la cantidad de hierro almacenado en el núcleo de la ferritina es de alguna forma variable, los incrementos de hierro observados durante los exámenes histológicos de tejido neurodegenerativo pueden ser debidos al aumento de átomos de hierro almacenados en el núcleo de la proteína. Mientras que el incremento del número de átomos de hierro en el núcleo de la ferritina habría de tenerse en cuenta para algunos excesos de hierro observados en exámenes histológicos, otra forma de hierro aparece presente, la cual podría tener consecuencias significativas para la progresión de las enfermedades neurodegenerativas y su detección temprana.

Si el núcleo de la ferritina llega a saturarse o la ferritina funcionara de forma anómala, el mecanismo oxidación del Fe(II) se perdería. Este proceso podría conducir a la formación de magnetita biogénica, que es mucho más magnética (ferrimagnética) que la ferrihidrita (antiferromagnética superparamagnética a temperatura corporal) y contiene mallas alternativas de Fe(II) tóxico y Fe(III) menos tóxico.

### 5.2.3 Compuestos de Almacenamiento de Hierro en Estructuras Cerebrales

Patológicamente las enfermedades neurodegenerativas, que pueden ser causadas por estrés oxidativo <sup>[59]</sup> -Alzheimer (AD), Parkinson (PD) y parkinsonismos atípicos- tienen lugar en áreas definidas del cerebro humano. El córtex hipocampo (Hip) es la región cerebral más afectada en las primeras fases de AD, el PD involucra la sustancia negra (SN) y en parkinsonismos atípicos otros ganglios basales (p.e. globus pallidus GP) también son afectados. Por consiguiente la mayoría de los estudios que investigan la etiología de la neurodegeneración analizan estas estructuras. Se han utilizado bastantes métodos físicos, químicos y bioquímicos para averiguar las propiedades de la ferritina y de otras moléculas vinculadas al hierro en Hip, SN y GP humanos, algunos de ellos son el espectroscopio de Mössbauer (MS), microscopio electrónico (EM) y el ensayo inmuno-absorbente ligado a enzimas (ELISA):

- El espectroscopio de Mössbauer MS es un método físico basado en la emisión de resonancia sin contraste y absorción de rayos gamma descubierto en 1958 por Rudolf Mössbauer (galardonado con el Premio Nobel en física por este descubrimiento en 1961). Se utiliza principalmente para cuantificar los compuestos que contienen hierro, pero también en muestras biológicas y tejidos humanos. Este método permite una identificación inequívoca de los compuestos que contienen hierro, con una evaluación del ratio de hierro divalente versus trivalente y concentración de hierro total de la muestra.
- El microscopio electrónico se ha utilizado para determinar el diámetro de los núcleos de hierro dentro de la ferritina y de la hemosiderina y para la identificación de las formas de hierro dentro del núcleo de hierro
- El ensayo inmuno-absorbente ligado a enzimas ELISA se ha utilizado para determinar las concentraciones de las cadenas H y L de la ferritina en la SN, GP e Hip.

El espectro de Mössbauer de los tejidos cerebrales humanos normales sugiere que casi todos los átomos de hierro forman grupos e interactúan magnéticamente a bajas temperaturas <sup>[59]</sup>. Los parámetros obtenidos de Mössbauer de todos los espectros medidos sugieren que en

todas las muestras que se han investigado el hierro está presente como hierro de ferritina.

Si se asume que la mayoría del hierro en los tejidos cerebrales humanos normales está asociado a la ferritina, averiguar la composición de las sub-unidades de la ferritina parece convertirse en una investigación necesaria para los próximos pasos. Las concentraciones de ferritinas H y L en SN, GP y Hip se determinaron mediante ELISA basado en anticuerpos monoclonales específicos y calibrado con homopolímeros de ferritina H y L. Estos resultados junto con las concentraciones de hierro total en la ferritina del espectro de Mössbauer son los que se muestran en la Tabla 9. La última columna de la tabla muestra el ratio entre la concentración de Fe y el total de las concentraciones de ferritina H y L de la muestra. Este ratio refleja el llenado de las cavidades de la ferritina por los átomos de hierro. El valor de este ratio se correlaciona con el diámetro del núcleo de hierro de la ferritina, determinado por el microscopio electrónico.

Structure	Concentration of H ferritin (ng/mg wet tissue)	Concentration of L ferritin (ng/mg wet tissue)	Concentration of iron (ng/mg wet tissue)	Fe/(H + L)
SN	460 ± 70	105 ± 21	177 ± 14	~1/3
GP	335 ± 20	70 ± 6	183 ± 22	~1/2
Hip	150 ± 30	20 ± 10	45 ± 10	~1/4

Tabla 9. Concentraciones de ferritinas H y L, total de hierro y ratio entre las concentraciones de hierro y ferritina en varias estructuras del cerebro humano normal.

Otra cuestión es el posible rol de la hemosiderina en el proceso de la neurodegeneración. La hemosiderina es un producto de la degradación de la ferritina y se detecta en el cerebro humano. Se ha aislado hemosiderina de la SN humana, y esto ha permitido su investigación mediante el microscopio electrónico, que demuestra que los núcleos de hierro son significativamente más pequeños que los de la ferritina ( $2.0 \pm 0.5$  nm vs.  $3.7 \pm 0.5$  nm). Queda por investigar cómo la hemosiderina podría interferir en el proceso de la neurodegeneración.

Las diferencias estructurales de las ferritinas de diferentes órganos e incluso de varias partes del cerebro pueden afectar a la cristalización del núcleo de hierro de la ferritina. Estudios más detallados de los núcleos de hierro de la ferritina de SN, GP, Hip e hígado con el microscopio electrónico muestran diferencias significativas. Los resultados se han presentado, junto con el ratio H/L en la tabla 10.

Structure	Liver	SN	GP	Hip
Diameter of the iron core of ferritin (nm)	6.0 ± 0.5	3.7 ± 0.5	3.5 ± 0.5	3.1 ± 0.5
H/L ratio	0.40 ± 0.04	5.5 ± 0.5	5.0 ± 0.4	14.5 ± 0.8

Tabla 10. Comparación del diámetro de hierro de la ferritina en diferentes estructuras del cuerpo humano.

Como se puede ver el decremento del diámetro del núcleo de hierro de la ferritina está acompañado por un incremento del ratio H/L. Se postula que esto puede ser un reflejo de las diferencias locales del ratio del metabolismo del hierro <sup>[59]</sup>.

## 5.3 REPERCUSIONES EN LA SALUD HUMANA

### 5.3.1 Disrupción del Metabolismo Normal de Hierro en el Cerebro

En el cuerpo humano la disrupción del metabolismo normal del hierro en el cerebro es una característica de varios desórdenes neurodegenerativos <sup>[57]</sup> como la enfermedad de Alzheimer (AD), Parkinson (PD), y la parálisis supranuclear progresiva (PSP).

Por ejemplo, se sabe que en los pacientes de Alzheimer ocurre una acumulación de hierro excesiva, particularmente en las placas AD y los niveles totales de hierro son elevados en el hipocampo, amígdala, núcleo basal de Meynert y el cortex cerebral. Estos elevados niveles de hierro en el tejido neurodegenerativo no se correlacionan con niveles elevados de ferritina o de la proteína de transporte de hierro extracelular transferrina. De hecho se ha reportado una reducción de transferrina en algunas regiones de los cerebros de pacientes AD y PD, indicando movilidad y segregación de hierro reducidas.

Algunos estudios <sup>[57]</sup> han mostrado que hay varias formas de hierro que pueden jugar un rol significativo en los procesos bioquímicos que conducen a la progresión de estas enfermedades. Se cree principalmente que es resultado del estrés oxidativo – la generación de radicales libres a través de la reacción Fenton. No obstante otros resultados sugieren que la ferritina podría actuar modulando la formación de los filamentos tau en PSP (aunque no existen indicaciones fiables de niveles anormales de ferritina en el tejido neurodegenerativo) y que el hierro podría promover agregados de betaA4.

Aunque la asociación de concentraciones anómalas de hierro con el tejido neurodegenerativo está bien documentada, particularmente en AD, los métodos anteriores a 2001 para ensayar con el hierro en tejidos enfermos generalmente son específicamente iónicos, han tenido una resolución espacial pobre y proporcionaron una información cuantitativa poco fiable <sup>[57]</sup>. Posteriormente se han realizado algunos progresos en el análisis de hierro en alta resolución de tejidos de AD (Smith y otros). Estos mostraron, utilizando técnicas de teñido de hierro modificado, que el hierro activo redox está fuertemente asociado con las placas AD y los ovillos neurofibrilares. Este trabajo también demostró que el hierro asociado a lesiones es distinto del hierro segregado en la ferritina y proporcionó la evidencia indirecta de la presencia de Fe(II) en el tejido de AD.

Si bien esta técnica ofrece una resolución mejorada, todavía no es posible identificar la forma estructural del hierro o la distribución mapeada del Fe(II). De manera que las anomalías del hierro asociadas con la enfermedad neurodegenerativa no están bien caracterizadas y la forma estructural/molecular del exceso de hierro en las placas AD y tejido neurodegenerativo en general no se conocen.

No obstante la investigación en este campo <sup>[57]</sup> comienza a ver algo de luz sobre el rol del hierro. Por ejemplo, un trabajo realizado por Floor, E. <sup>[61]</sup> publicado en el año 2000 demostró una mayor conexión entre los niveles altos de hierro en el ganglio basal y el estrés oxidativo en los pacientes de Parkinson.

Una disrupción del metabolismo del hierro y un incremento de hierro en la misma región del cerebro también implica las enfermedades de Huntington y Alzheimer, y la acumulación de hierro se ha asociado a la microgliosis y se ha correlacionado con el daño incrementado a la

región CA1 del hipocampo a través de las interacciones hierro-zinc en los modelos de enfermedades neurodegenerativas.

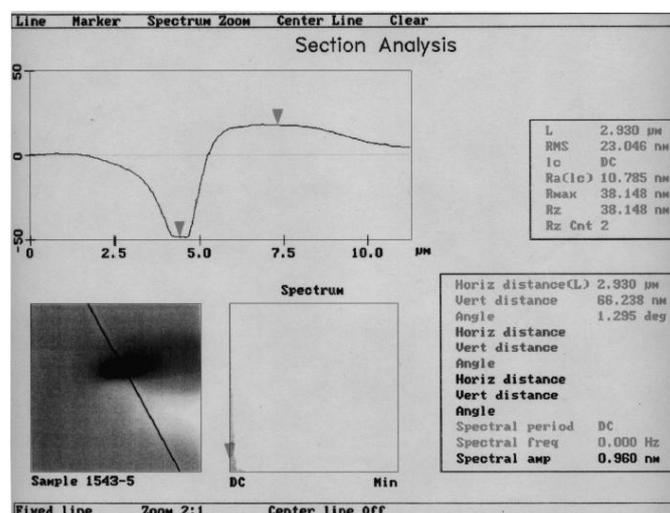
Debería apreciarse no obstante que algunos resultados han mostrado que la presencia de nucleósidos oxidados en las neuronas no parece estar relacionada con material de placa senil ni ovillos neurofibrilares en el Alzheimer, aunque hay indicaciones de que el hierro es una fuente significativa de daño oxidativo.

### 5.3.2 Consecuencias Potenciales de la Magnetita Biogénica en Tejidos Neurodegenerativos

Los estudios experimentales preliminares realizados por el equipo de Jon Dobson y Carmen Quintana (Instituto de Microelectrónica de Madrid) <sup>[57]</sup> sugieren que esta magnetita biogénica puede encontrarse en las placas AD, placas seniles y filamentos tau anómalos extraídos de tejidos PSP. Además los análisis de muestras relativamente grandes (varios gramos) de tejido AD realizados por el equipo de Kirschvink indican la presencia de magnetita y/o maghemita, aunque las placas se fueron analizadas de forma separada.

En 1995 se utilizó un microscopio de fuerza magnética (MFM) para examinar una muestra de tejido del hipocampo que contenía material de plaqueta. Este material opaco exhibía una respuesta como la de un dipolo, consistente con la presencia de material magnético como la magnetita y/o la maghemita (ambas tienen propiedades magnéticas similares) (Figura 18). La ferritina, que es superparamagnética (no tiene un comportamiento como el de un magneto a temperatura corporal) no produciría una respuesta tal.

Figura 18. Escáner de microscopio de fuerza magnética (MEM) de material de placa de hipocampo humano mostrando una respuesta magnética dipolar.



A finales de 1999 se utilizó un microscopio HR-TEM y un espectroscopio de pérdida de energía electrónica para examinar la ferritina en filamentos helicoidales pareados de tejido AD y ferritina ligada a filamentos tau anómalos en parálisis supranuclear progresiva neurodegenerativa. Los resultados dieron indicaciones preliminares de la presencia de óxido de hierro cúbico dentro de la cavidad de la proteína ferritina con espectro similar al de los estándares de magnetita / maghemita sintéticas.

Como se discutió previamente, es posible que la ferritina pueda actuar como un precursor en

la formación de magnetita biogénica en el cuerpo humano, quizá a través de una sobrecarga de hierro en el núcleo y la ruptura de la función normal de la proteína. Esto está avalado por la evidencia de que haya magnetita dentro de la cavidad de la ferritina.

Si la presencia de magnetita biogénica en las placas de AD y tejido neurodegenerativo se confirma, tendría consecuencias importantes para la comprensión de la progresión de las enfermedades neurodegenerativas –incluso posiblemente también su inicio- y permitiría una detección y diagnóstico temprano.

La magnetita biogénica puede jugar un papel en el inicio y progresión de la enfermedad neurodegenerativa mediante la producción de radicales libres que dañaran el tejido en el lugar de la acumulación de magnetita. Niveles elevados de hierro libre en el tejido cerebral afectado de Alzheimer se han supuesto como posible causa de la degeneración neuronal a través de los procesos de radicales libres vía reacción Fenton. No obstante, las nanopartículas de magnetita y maghemita muestran tener un efecto sustancial en la generación de radicales libres. Experimentos anteriores demostraron que los complejos hierro-oxígeno pueden ser un catalizador más efectivo para los radicales libres dañinos en los tejidos cerebrales que la reacción Fenton.

Estos efectos se han conseguido a través de campos magnéticos fuertes locales generados mediante partículas de magnetita biogénica que estabilizan estados triplet durante las reacciones bioquímicas que tienen lugar a su alrededor. Esto conduce a la producción de radicales libres que dañarían la membrana y cambios en los resultados de la reacción. Incluso campos magnéticos relativamente débiles podrían influir fuertemente sobre los resultados de la reacción. Además, Fe(II) en la magnetita puede ser oxidado con facilidad (formando maghemita) y este proceso, junto con los efectos de campo magnético local pueden influir en la producción y agregación de  $\beta$ -amiloides. Esto es particularmente relevante si se considera que existen estudios que muestran que el hierro promueve la agregación de  $\beta$ -amiloides péptidos *in vitro* y que los  $\beta$ -amiloides potencian la formación de radicales libres al estabilizarse el hierro ferroso <sup>[57]</sup>.

### **5.3.3 Magnetita Biogénica y Detección de Enfermedades Neurodegenerativas**

Además de las implicaciones potenciales para la progresión de la enfermedad, existen también posibles beneficios en la presencia de magnetita en tejidos neurodegenerativos <sup>[57]</sup>. La detección temprana es uno de los objetivos principales en los esfuerzos de la investigación en neurodegeneración y uno de los métodos que se consideran actualmente es el uso de imágenes de resonancia magnética MRI. Habitualmente en pacientes más avanzados las imágenes MR muestran regiones de hiperintensidad debida a la atrofia del área afectada del cerebro. Mientras que este método puede ser bueno en la identificación de enfermedades neurodegenerativas tales como el Alzheimer, cuando se observa la enfermedad ya se ha desarrollado significativamente desde sus estados iniciales.

Si la magnetita está presente en las placas y tejido neurodegenerativo, estos métodos podrían adaptarse para buscar regiones en que hubiera acumulación de magnetita en sujetos que puedan tener predisposición a estas enfermedades. Ello podría conducir a técnicas para la detección de las enfermedades neurodegenerativas en una fase más temprana que la posible actualmente en que el tejido atrofiado ya se encuentra en estados avanzados de la enfermedad.

### 5.3.4 La Ferritina y el Hierro en las Neurodegeneraciones

#### 5.3.4.1 Neurodegeneración con Acumulación de Hierro en el Cerebro

Según Andrzej Friedman y colaboradores en 2011 <sup>[59]</sup> la neurodegeneración con acumulación de hierro en el cerebro (NBIA) es un grupo de desórdenes cognitivos y extrapiramidales progresivos que incluyen el anteriormente denominado síndrome de Hallervorden-Spatz, la neuroferritinopatía y la aceruloplasminemia. El epónimo original para esta enfermedad reconoció el trabajo de los neuropatólogos alemanes Julius Hallervorden y Hugo Spatz. El nuevo término NBIA es más favorable a la luz de las poco éticas actividades de Hallervorden y Spatz antes y durante la Segunda Guerra Mundial.

Las NBIAs están caracterizadas por la acumulación de hierro predominantemente en el globus pallidus, así como esferoides axonales extensivas en varias regiones del cerebro. Estudios recientes indican múltiples causas genéticas, y la enfermedad puede ocurrir también sin un respaldo genético evidente. La forma genética más frecuente es la pantotenato kinasa-2 asociado a neurodegeneración (PKAN) con una mutación en el gen de la pantotenato kinasa-2 (PKAN2). Otras formas están asociadas con una mutación en los genes de fosfolipasa A2 (PLA2G6), FTL (neuroferritinopatía), CP (aceruloplasminemia), FA2H (hidroxilasa 2 de ácido graso) y ATP13A2 (ATPasa tipo 13A2).

- La PKAN clásica se caracteriza por su aparición a edad temprana y rápida progresión, a menudo asociada con mutaciones sin sentido o de desplazamiento del marco. Rasgos característicos son: distonia, disartria, parkinsonismo, espasticidad, hiperreflexia, retinopatía pigmentaria y posibles impedimentos cognitivos. La PKAN atípica se caracteriza por una aparición más tardía y lenta progresión y a menudo está asociada a mutaciones sustitutivas de PANK2. La mayoría de los individuos con PKAN muestran acumulaciones de hierro cerebral en el GP y SN en escaneos MRI de T2-ponderados, que forman un grafo muy característico conocido como “ojo de tigre”. Más recientemente se ha demostrado que una regulación baja de PANK2 en células de cultivo alteró el status de hierro con un gran incremento en la ferroportina – proteína exportadora del hierro celular-, y decremento en la ferritina.
- Un segundo tipo de NBIA es causado por la mutación del gen PLA2G6 que codifica la enzima fosfolipasa A2 independiente de calcio, que cataliza la hidrólisis de los glicerofosfolípidos. Defectos en la fosfolipasa A2 conducen a una serie de fenotipos. Las mutaciones PLA2G6 están asociados a prácticamente todos los casos de distrofia neuroaxonal infantil, pero sólo a unos pocos casos de neurodegeneración idiopática con acumulación de hierro cerebral. Las características clínicas y neuropatológicas presentan una conexión entre PLA2G6 y PD.
- La aceruloplasminemia, un desorden del metabolismo del hierro con ausencia completa de la actividad de la ferroxidasa ceruloplasmina, está causado por mutaciones en el gen CP, que codifica la ceruloplasmina. Curiosamente esta proteína es conocida por asistir a la ferroportina en el mecanismo de la exportación de hierro celular en el cerebro, pero no hay datos de cómo pueda afectar a la ferritina en el cerebro. Las señales neurológicas típicas incluyen: impedimento cognitivo, dyskinesia craneofacial, ataxia cerebelar y degeneración retinal. Además los pacientes muestran ausencia de ceruloplasmina serica y alguna combinación de las siguientes: baja concentración de cobre serico, baja

concentración de hierro sérico, alta concentración de ferritina sérica, e incremento de la concentración de hierro hepático. El diagnóstico está soportado por un MRI característico que encuentra intensidades bajas anormales que reflejan la acumulación de hierro en el cerebro (estriado, tálamo, núcleo dentado) e hígado en imágenes ponderadas de T1 y T2.

- La neuroferritinopatía es predominantemente un desorden en el movimiento heredado caracterizado por la deposición de hierro y ferritina en el cerebro, niveles de ferritina sérica baja o normal, y valores clínicos variables elevados. Clínicamente los síntomas tienen un espectro muy amplio desde corea a distonía o características parkinsonianas típicas y perturbaciones de funciones cognitivas. La neuroferritinopatía es una enfermedad de progresión lenta que aparece en adultos caracterizada por la formación de agregados de ferritina y agrupaciones de hierro en el cerebro y otros órganos. FTL es el único gen actualmente conocido asociado a la neuroferritinopatía. La mayoría de las mutaciones son inserciones de uno o dos nucleótidos en el gen FTL que causa un desplazamiento y modifica el término-C de FTL. Estas modificaciones alteran las propiedades físicas y funcionales de las ferritinas, causando un desequilibrio en la homeostasis de hierro del cerebro.

Las mutaciones patogénicas en el gen FTL se cree que reducen la capacidad de la ferritina para almacenar hierro, resultando como consecuencia un exceso de hierro en las neuronas cerebrales. Estas células pueden responder produciendo más ferritina en un intento de gestionar el hierro libre. El exceso de hierro y ferritina acumulado en el cerebro, particularmente en el ganglio basal, provoca desórdenes de movimiento y otros cambios neurológicos vistos en la neuroferritinopatía. Las neuroferritinopatías representan una evidencia directa de que los cambios en la estructura de la ferritina causan un almacenamiento de hierro deficiente y pueden conducir a una neurodegeneración con daño neuronal probablemente causado por un exceso de hierro lábil más que por los agregados de hierro y ferritina.

### 5.3.4.2 La Enfermedad de Parkinson (PD)

La enfermedad de Parkinson PD es un desorden progresivo con un cuadro clínico típico y patología que involucra principalmente la SN con agregados de  $\alpha$ -sinucleína y formación de cuerpos de Lewy. La hipótesis de que el incremento de la concentración de hierro en la SN es una de las causas de PD se formuló en 1989 [59]. Esta hipótesis estaba soportada por los datos experimentales que mostraban un incremento de hierro en la sustancia negra SN parkinsoniana. Pero también se publicaron datos mostrando que no se incrementaba la concentración de hierro en la SN parkinsoniana comparada con otras de control. La tabla 11 presenta los resultados de varios estudios en que se evalúa la concentración del hierro total en SN. Parece que no hay una evidencia concluyente para un incremento sustancial de la concentración de hierro total en SN parkinsoniano [59].

Authors and year of publication	Method	Iron concentration in parkinsonian SN (ng/mg)	Iron concentration in control SN (ng/mg)	PD/control ratio
Hallgren&Sourander, 1958 [84]	Colorimetry		185 ± 65	
Earle, 1968 [67]	X-ray fluorescence			2
Sofic et al., 1988 [49]	Spectrophotometry	85 ± 11	48 ± 8	1.77 ± 0.37
Zecca&Swartz, 1993 [85]	Total reflection		410 ± 223	
Griffiths&Crossman, 1993 [68]	X-ray fluorescence			
Loeffler et al., 1995 [70]	Atomic absorption	281 ± 22	140 ± 13	2.01 ± 0.24
Zecca et al., 2001 [73]	Colorimetry			0.82 ± 0.08
Wypijewska et al., 2010 [71]	Neutron activation analysis		154 ± 45	
	Mössbauer spectroscopy	177 ± 18	177 ± 14	1.00 ± 0.13

Tabla 11. Comparativa de las concentraciones de hierro en la sustancia negra en afectados por Parkinson y de control.

Esto no excluye un posible rol del hierro en el proceso, ya que puede afectar no en su cantidad total pero sí en su forma como hierro lábil, que dispara la neurodegeneración vía química de Fenton. Al evaluar la concentración de hierro lábil en Parkinson y control de la SN, se detectó un incremento de hierro lábil. Es importante destacar que la cantidad de este hierro lábil es pequeña, sobre 1/2000 del total del hierro tanto en PD como en control.

Una cuestión importante es la fuente de hierro en PD para la reacción de Fenton. En la literatura se han considerado dos fuentes posibles: neuromelanina y ferritina <sup>[59]</sup>:

**Neuromelanina.** La neuromelanina de la SN podría jugar un papel doble. Al inicio del proceso la neuromelanina quelata el hierro en exceso, pero con la progresión de la enfermedad, cuando la concentración de hierro en la neuromelanina alcanza un nivel crítico, ésta libera el hierro causando estrés oxidativo. Es difícil confirmar esta hipótesis desde que el hierro se une a la neuromelanina durante la preparación de la muestra para la determinación del hierro. Tampoco el espectro de Mössbauer obtuvo ninguna señal, de muestras no pretratadas de SN parkinsonianos ni de control, que pudiera atribuirse a la neuromelanina.

**Ferritina.** Una evidencia importante para la posible involucración de la ferritina en la patogénesis de la neurodegeneración en PD viene del MS. El espectro de la ferritina en PD muestra una asimetría mayor que en los controles. Esta diferencia no puede ser relacionada a hierro que no sea de la ferritina ya que las concentraciones de este son demasiado pequeñas para ser detectadas mediante MS. Por consiguiente puede postularse que en PD el hierro de la SN es empacado dentro de la célula de ferritina de una manera ligeramente diferente al de control, que podría ser debido a una diferencia en la estructura de ferritina de PD frente a la de control. Existe alguna controversia en la literatura en cuanto al cambio de concentración de ferritina en SN parkinsoniano comparado con el de control. Aproximadamente 5 -10% de los individuos de más de 60 años tienen Cuerpos de Lewy (LB) en su SN. A estos sujetos se les refiere como casos incidentales de cuerpos de Lewy (ILB). El ILB se cree que es un pre-síntoma del Parkinson. Koziorowski y alumnos encontraron bajas concentraciones de ferritina L en ILB y en PD comparado con los controles. La ferritina H en PD es mayor que en ILB y los controles.

Bajos niveles de ferritina L en PD y ILB como en las mutaciones del gen FTL en neuroferritinopatía pueden reducir la capacidad de la ferritina para almacenar hierro, resultando una liberación del mismo. En la neuroferritinopatía las mutaciones en el gen FTL afectan al plegamiento y estabilidad de la proteína incrementando la sensibilidad y capacidad del hierro intracelular para el estrés oxidativo y el daño del DNA. En general se acepta que el estrés oxidativo juega un rol importante en la patogénesis de PD.

#### **5.3.4.3 La Parálisis Supranuclear Progresiva (PSP)**

La PSP es un desorden parkinsoniano atípico asociado con la rigidez axial progresiva, parálisis de la mirada vertical, disartria y disfagia. Sus señales patológicas son atrofia, pérdida de neuronas y gliosis en el cortex, ganglio basal y núcleo del tronco encefálico. Las neuronas afectadas muestran acumulación de ovillos neurofibrilares derivados de microtúbulos asociados a la proteína tau, a la que está asociada la ferritina. A diferencia de PD, PSP no ha sido estudiada intensamente para el hierro. Se demostró en los primeros estudios que había un incremento del total de concentración de hierro en la SN de PSP utilizando el espectroscopio

de plasma acoplado inductivamente, y se sugirió en estudios más recientes la posibilidad de que hubiera un exceso de hierro en el ganglio basal de estos pacientes, utilizando nanodifracción electrónica y microscopía electrónica de alta resolución. Además un estudio de MS encontró un incremento de un 50% de la concentración total de hierro en GP y SN aislada de cerebros PSP sobre los de control. Hay una correlación significativa entre la concentración de hierro en GP y SN en cerebros de PSP que sugiere un mecanismo similar de destrucción en ambas estructuras <sup>[59]</sup>. El coeficiente de asimetría del espectro de Mössbauer era significativamente superior en GP de PSP que en GP de control, que puede reflejar la cristalización diferente del hierro dentro de la ferritina en PSP.

#### 5.3.4.4 La Enfermedad de Alzheimer (AD)

Se trata de un desorden neurodegenerativo progresivo que afecta a las funciones cognitivas. El cortex del hipocampo es el área del cerebro mayormente afectada en la fase temprana de la enfermedad, así como el estrés oxidativo. Smith y alumnos encontraron acumulaciones de hierro en placas seniles y ovillos neurofibrilares en cerebros de pacientes AD. Se podría especular que como el cortex hipotalámico está ya fisiológicamente en alto riesgo de estrés oxidativo, la desregulación de hierro podría ser el punto de inicio en esta enfermedad neurodegenerativa con cambios en los niveles de ferritina que pueden conllevar un incremento de la capacidad de hierro para la reacción de Fenton. Galazka-Friedman y colaboradores utilizaron diferentes métodos para evaluar el hierro y los compuestos ligados al hierro en los tejidos Hip humanos. Los resultados de estos estudios se presentan en la tabla 12.

Structure	Total iron ng/mg wet	L ferritin ng/ $\mu$ g protein	H ferritin ng/ $\mu$ g protein	Coefficient of asymmetry of Mössbauer spectra	Labile iron ng/g wet
SN control	177 $\pm$ 14	5.0 $\pm$ 0.5	19.3 $\pm$ 1.5	1.06 $\pm$ 0.02	76 $\pm$ 5
SN PD	177 $\pm$ 18	2.7 $\pm$ 0.5	26.4 $\pm$ 3.5	1.14 $\pm$ 0.03	135 $\pm$ 10
GP control	183 $\pm$ 22			1.08 $\pm$ 0.02	
GP PSP	257 $\pm$ 19			1.12 $\pm$ 0.03	
Hip control	45 $\pm$ 10	0.6 $\pm$ 0.1	5.8 $\pm$ 0.6		
Hip AD	66 $\pm$ 13	1.4 $\pm$ 0.3	19.4 $\pm$ 1.5		

Tabla 12. Comparativa de las concentraciones de hierro total, de ferritinas H y L, coeficientes de asimetría y concentraciones de hierro lábil en varias estructuras cerebrales.

Los parámetros de Mössbauer obtenidos para todas las muestras sugerían que la mayor parte del hierro está asociado a la ferritina. La concentración media de hierro determinada por MS en las muestras Hip de Alzheimer determinadas por absorción atómica eran mayores que las de control. Las concentraciones de las cadenas H y L de ferritina en Alzheimer eran ambas superiores a las de control.

Connor y alumnos <sup>[62]</sup> también encontraron que el ratio H/L en el cortex era mayor que en la sustancia negra, y se detectó una disminución de la concentración de la ferritina L en el cortex y en la sustancia negra en pacientes con Alzheimer y Parkinson. La disminución en la concentración de ferritina L en el cortex de pacientes con Alzheimer fue mayor que en la sustancia negra de pacientes con Parkinson.

## 6 LA MAGNETITA MINERAL

En este capítulo, una vez realizada la introducción a los óxidos e hidróxidos de hierro, se presenta la magnetita como mineral, su generación geológica natural, sus propiedades generales, cristalográficas, físicas y químicas básicas, así como propiedades eléctricas y magnéticas, cerrando el capítulo con algunas de sus principales aplicaciones.

### 6.1 LA GENERACIÓN GEOLÓGICA NATURAL

La génesis geológica natural de la magnetita tiene lugar en un origen magmático accesorio en casi todas las rocas básicas, y otros como por diferenciación magmática, pegmatítico neumatolítico, de metamorfismo de contacto, exhalativo volcánico, hidrotermal y sedimentario.

En cuanto a yacimientos de magnetita, ésta es frecuente en ambientes de tipos diversos. Hay gran abundancia de este material en la zona de Kiruna, Suecia.

En España <sup>[63]</sup>:

- Los cristales octaédricos mejor formados, presentando recrecimientos, se encuentran en San Pablo de los Montes (Toledo) como producto de meteorización y en placeres.
- Económicamente los yacimientos más importantes radican en los Cotos Wagner y Vivaldi de la provincia de León.
- Está citado en las arenas de las rías gallegas, principalmente en la de Vigo y Viveros (Pontevedra).
- También de igual forma en las playas de Marbella (Málaga) y Cabo de Gata (Almería).
- De cierta importancia es la mineralización de Cala (Huelva) lo mismo que las de la provincia de Sevilla y las de Burguillos del Cerro (Badajoz).
- Cabe destacar también El Escorial (Madrid), Jerez de los Caballeros y Zafra (Badajoz), Naralázaro (Sevilla), Os Civis (Lérida), Campos (Asturias), Cehegín (Murcia) y Sierra Almagrera (Almería).

En la Región de Murcia <sup>[64]</sup>:

- En la Sierra de Cartagena se localizan mineralizaciones masivas en el denominado manto silicatado o de magnetita que se caracteriza por su contenido en sulfuros, siderita, cuarzo y greenalita, entre otros. Algunos ejemplares de estas zonas son muy magnéticos, por lo que pueden ser considerados como imanes naturales.
- En el Cabezo Gordo (Torre Pacheco) aparecen importantes mineralizaciones en las rocas metamórficas del complejo Nevado-Filábride, junto con otros óxidos e hidróxidos de hierro, donde hay ejemplares masivos y octaedros de hasta 2 cm. Algo semejante ocurre en algunas minas de la Sierra de Enmedio (Lorca), aquí aparecen ejemplares masivos asociados a mineralizaciones de oligisto y goethita en rocas del complejo Alpujárride.
- En los materiales triásicos (facies Keuper) del norte de Ulea aparecen cristales octaédricos aislados de cerca de los 3 cm.
- Pero el yacimiento más importante de este mineral en la región, se localiza en Cehegín donde aparecen importantes mineralizaciones asociadas a ofitas. Fueron objeto de diversas explotaciones, cuyos restos se localizan desde el paraje del Chaparral hasta los Baños de Gilico. En esta zona la magnetita aparece asociada a pirita y calcopirita o a cloritas, localizándose masas granulares con pequeños octaedros, y rombododecaedros de tamaño centimétrico en las fracturas de la ofita.

## 6.2 DEFINICIÓN

La magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  es un mineral <sup>[65]</sup> negro ferrimagnético que contiene tanto  $\text{Fe}^{\text{II}}$  como  $\text{Fe}^{\text{III}}$ , constituido por óxido ferroso-diférrico (véanse las figuras 19.a y 19.b). Junto con la titanomagnetita, es el responsable de las propiedades magnéticas de las rocas, objeto de los estudios paleomagnéticos. Es característico que este material tenga propiedades magnéticas en su estado puro (véase la figura 19.c).



Figura 19. Magnetitas  
19a. Magnetita

Designación. La magnetita pertenece a la categoría de los minerales óxidos, del grupo de las espinelas.

Etimología <sup>[66]</sup>. Probablemente derivada del nombre de la localidad griega de Magnesia, en Macedonia. Una fábula de Plinio atribuía el nombre al de un pastor de nombre Magnes que descubrió el mineral al observar que se adhería a los clavos de su calzado.



Figura 19b. Magnetita de Isla de Ischia (Italia)

Sinónimos: ICSD 65339, piedra imán (cuando se presenta con polaridad natural), piedra de Hércules, mineral de hierro magnético, PDF 19-629. Éstos reflejan la diversidad de disciplinas que se han podido interesar en este mineral.



Figura 19c. Magnetita de Cartagena (España)

Según la Asociación Mineralógica Internacional (IMA) la magnetita se clasifica como:

Especies válidas (Pre-IMA) 1845.

Clasificación de Strunz 4.BB.05.

Clasificación de Dana 07.02.02.03

Fórmula aprobada:  $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$

Forma de presentarse: Mineral accesorio común en rocas ígneas y metamórficas. Puede ser producido biogénicamente por una amplia variedad de organismos. Frecuentemente en cristales octoédricos, raramente en dodecaédricos. Masivo o diseminado en agregados granudos compactos, también en arenas sueltas magnéticas de color pardo oscuro. Una variedad particular la constituye la valentinesita, combinación de magnetita con cuarzo.

## 6.3 PROPIEDADES GENERALES

### 6.3.1 La Molécula de la Magnetita

La magnetita<sup>[3]</sup> difiere de la mayoría del resto de óxidos de hierro en que es un óxido mixto de Fe<sup>II</sup> y Fe<sup>III</sup>. Su fórmula es Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sup>2+</sup>O·Fe<sub>2</sub><sup>3+</sup>O<sub>3</sub>, o como Y[YX]O<sub>4</sub> donde X = Fe<sup>II</sup>, Y = Fe<sup>III</sup> y los corchetes denotan ubicaciones octaédricas (M ubicaciones). Entre el Fe<sup>II</sup> y el Fe<sup>III</sup> se distribuyen 8 ubicaciones tetraédricas (T ubicaciones), donde los iones trivalentes ocupan ambas ubicaciones: tetraédricas y octaédricas.

En la magnetita estequiométrica es Fe<sup>II</sup> / Fe<sup>III</sup> = 0.5.

En la figura 20(izquierda) se representa una disposición octaédrica y tetraédrica con 3 octaedros y 2 tetraedros, mientras que en la figura 20(derecha) la configuración es tan sólo de 2 octaedros y 1 tetraedro.

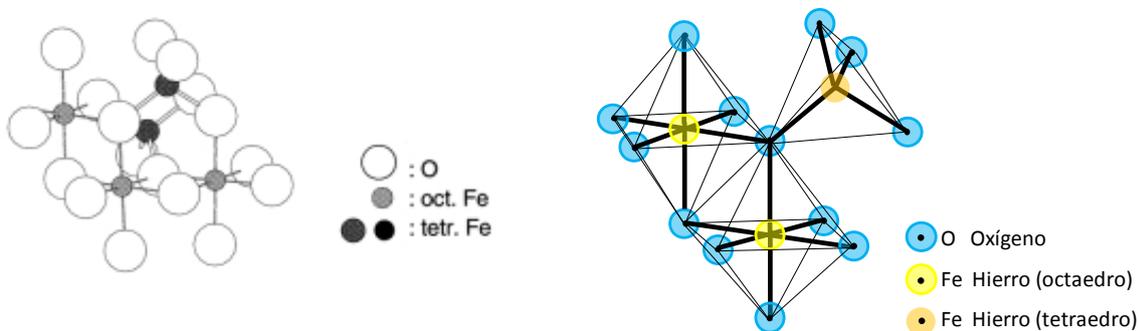


Figura 20. Izquierda: Modelo de una disposición octaédrica y tetraédrica con 3 octaedros y 2 tetraedros. Derecha: Configuración de 2 octaedros y 1 tetraedro

### 6.3.2 La Celda Unitaria de la Magnetita

Los principales detalles de la estructura de la magnetita se establecieron en 1915, siendo uno de las primeras estructuras minerales a las que se aplicaron los rayos X. La magnetita<sup>[3]</sup> presenta estructura cristalina de espinela inversa, -que puede observarse en la figura 21-, y es isoestructural con otros compuestos como el Jacobsite (Fe<sup>III</sup> Mn<sup>II</sup> Fe<sup>III</sup> O<sub>4</sub>), Magnesioferrita (Fe Mg Fe O<sub>4</sub>) y Ulvoespinela (Fe<sub>2</sub> Ti O<sub>4</sub>). Existen sustituciones de Fe por magnesio y manganeso. El vanadio también puede reemplazar al hierro dando lugar a la Coulsonita.

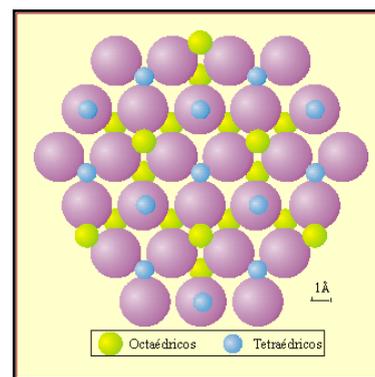


Figura 21. Estructura del grupo de la espinela

Algunas de sus características son:

- Sistema cristalino Cúbico
  - Clase normal o hexooctaedro.
  - Símbolo H-M: 4/m $\bar{3}$ 2/m o m3m (3 ejes cuaternarios + 3 planos de simetría perpendiculares + 4 ejes ternarios + 6 ejes binarios + 6 planos de simetría)

- perpendiculares + 1 centro de simetría)
- Red de Bravais: cúbica centrada en las caras (F), como se muestra en la figura 22. Tiene una celda unitaria cúbica centrada en las caras, de 32 iones  $O^{2-}$  que se distribuyen regularmente en paquetes cerrados cúbicos a lo largo del  $[111]$ .
- Grupo espacial:  $Fd3m$
- Dimensiones de celda:
  - La longitud de la arista de la celda unitaria es  $a = 0.8396\text{nm}$ ,  $8,3963\text{Å}$ .
- Unidades de fórmula por unidad de celda:
  - $Z = 8$ . La celda unitaria contiene 8 moléculas de magnetita.
- El volumen de la celda unitaria es  $V = 590.80 \text{Å}^3$

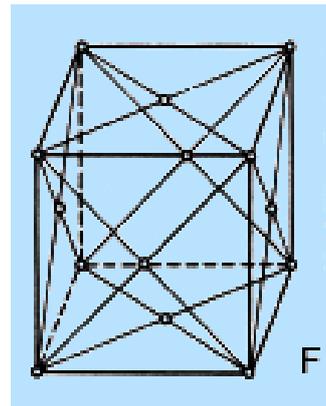


Figura 22. Celda unitaria cúbica centrada en caras.

En esta estructura, la mitad de los cationes de  $Fe^{III}$  ocupan huecos tetraédricos, mientras que la otra mitad de los cationes  $Fe^{III}$  y todos los  $Fe^{II}$  ocupan huecos octaédricos. Estos huecos tetraédricos y octaédricos se generan debido al empaquetamiento de aniones óxido, según el esquema representado en la figura 23.

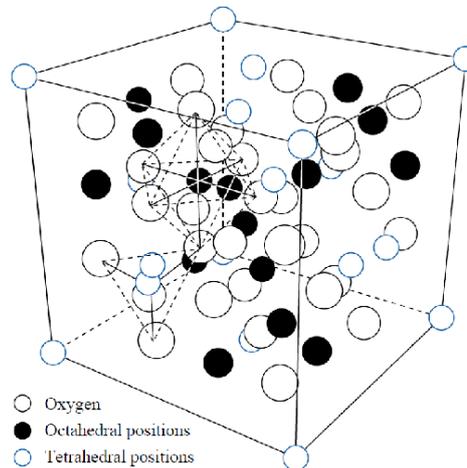


Figura 23. Celda unitaria de la magnetita.

### 6.3.3 Cristalización

El octaedro (figura 24) es una forma compuesta de 8 triángulos equiláteros. Dichas caras en forma de triángulos interceptan a los tres ejes cristalográficos a la misma distancia, su forma de notación de  $\{111\}$ . Los minerales comúnmente exhiben la misma forma octaédrica simple como es el caso de la magnetita, y también de la cromita, franklinita, espinela, pirocloro, cuprita, oro, y diamante. En ocasiones la fluorina, pirita y galena toman esta forma.

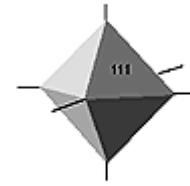


Figura 24. Octaedro.

La **magnetita geológica natural** se presenta comúnmente <sup>[3]</sup> como cristales octaédricos limitados por planos  $\{111\}$ , y menos frecuentemente rombo-dodecaédricos, aunque puede presentarse en otras formas (figura 25). La simetría ocurre sobre el plano  $\{111\}$ .

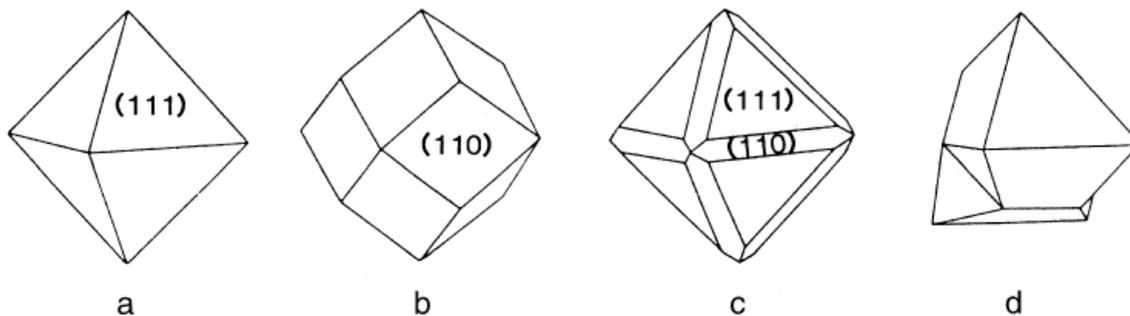


Figura 25. Formas cristalográficas de la magnetita: a- octaedro; b – rombododecaedro; c – octaedro limitado por planos  $\{111\}$ ; d – doble

### 6.3.4 Algunas Propiedades Básicas

**Propiedades Ópticas.** Existen diferentes sistemas para cuantificar el color y asistir en la comparación de colores, entre los más importantes existen dos sistemas de CIE-Lab y la clasificación de colores de Munsell. Brevemente los sistemas CIE están basados en el principio de la tricromaticidad debido a que el ojo humano responde a sólo 3 componentes de color correspondientes a los valores de triestímulo X, Y y Z. Los valores de triestímulo pueden ser computerizados a partir del espectro reflejante y pueden convertirse matemáticamente a coordenadas para crear un espacio de color uniforme. En el sistema CIE-LAB estas coordenadas cartesianas son  $L^*$ (brillo o valor),  $a^*$ (rojo-verde) y  $b^*$ (amarillo – azul), de forma que todos los colores pueden expresarse como combinación de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . Existen instrumentos para una medida rápida de las componentes  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . La saturación de color viene dada por  $\sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$  y el matiz por el arctan ( $b^*/a^*$ ).

En las ciencias geológicas el color se mide habitualmente utilizando el sistema de clasificación de Munsell <sup>[3]</sup>. Este sistema define el color en función del matiz H (posición del color en el espectro), cantidad o croma C (pureza del matiz desde el gris al color puro) y valor V (brillo del color en una escala que va desde el blanco al negro).

- Color: Negro grisáceo, negro metálico.
  - Según la clasificación de Munsell: negro
  - Color RL (reflected light): Gris con tinte marrón.
- Raya: Negra.

- Brillo: Metálico.
- Índice de refracción:  $n = 2.42$
- Isotrópico
- Transparencia: Opaco.
- Luminiscencia: no fluorescente

El **módulo de Young** o de elasticidad de la magnetita cristalina simple  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  es  $E_{\text{magn}} = 248$  GPa en la dirección  $\langle 111 \rangle$ , 230 GPa en la dirección  $\langle 110 \rangle$ , y 208 GPa en la dirección  $\langle 110 \rangle$ . En su forma policristalina  $E_{\text{magnpc}} = 225.8$  GPa, y se constata una disminución del módulo de Young en presencia de Co o Mn.

- Dureza: 5.5 a 6. Hoja de cuchillo. Ortoclase
- Densidad: 5.18 g/cm<sup>3</sup>
- Exfoliación Imperfecta. Fractura Sub concoidea - Fracturas desarrolladas en materiales frágiles caracterizados por un punto y superficies curvas. Tenacidad quebradiza.
- Radiactividad: GRapi = 0 (Gamma Ray American Petroleum Institute). La magnetita no es radiactivo.

- Peso molecular 231.54 gm

La magnetita pulverizada es soluble en clorhídrico concentrado.

### Composición:

Contiene el 31.03% de FeO y el 68.97%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Hierro: 72.36% Fe: 31.03% FeO  
68.97%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Oxígeno: 27.64% O

100.00 %      100.00% = TOTAL OXIDO

- Punto de fusión: 1583 a 1597 °C
- Punto de ebullición: 2623 °C
- Calor de fusión: 138.16 KJ/mol
- Calor de descomposición: 605.0 KJ/mol
- Calor de vaporización: 298 KJ/mol
- Energía libre estándar de formación  $\Delta G_f^0$ : -1012.6 KJ/mol
- Producto de solubilidad  $\log (\text{Fe}^{+2})^3 / (\text{H})^8 \cdot (\text{e}^-)^2$  : 35.7

**Sustitución de cationes** <sup>[3]</sup>. Aunque la magnetita estequiométrica es  $\text{Fe}^{\text{II}} / \text{Fe}^{\text{III}} = 0.5$ , frecuentemente la magnetita no es estequiométrica debido a un submallado de  $\text{Fe}^{\text{III}}$  con deficiencia de catión. El hierro divalente puede también ser reemplazado parcial o completamente por otros iones divalentes como el  $\text{Mn}^{\text{II}}$ ,  $\text{Ni}^{\text{II}}$ ,  $\text{Cu}^{\text{II}}$ ,  $\text{Co}^{\text{II}}$ ,  $\text{Zn}^{\text{II}}$  y  $\text{Ca}^{\text{II}}$ .

El ajuste de los iones huéspedes en las estructura es asistido por la flexibilidad del oxígeno que lo rodea, el cual puede expandirse o contraerse para acomodar cationes que difieran en tamaño al  $\text{Fe}^{\text{II}}$ . La sustitución de cationes viene acompañada de cambios en la longitud de la arista de la celda unitaria:

- En la síntesis de magnetitas <sup>[3]</sup> se sintetizaron magnetitas sustituidas que contenían más de 0.01 metales de transición a 90 °C. Las curvas de disolución indicaban que Co, Ni y Zn se distribuían aleatoriamente dentro de la estructura y reemplazaban el Fe<sup>II</sup> octaédrico. En contraste a lo anterior, Cu, Mn y Cd se concentraban cerca de la superficie de los cristales. Tras convertir estas magnetitas a maghemita se formaba alrededor del cristal una zona libre exterior a partir de los elementos de traza, indicando que el Fe oxidado había migrado y formado una nueva capa de maghemita dejando los elementos de traza en el interior.
- Cuando se convirtió la magnetita a hematite, los elementos de traza divalentes eran expulsados, debido a su valencia y tamaño, y se concentraban en las capas superficiales del óxido, mientras que Cr y Mn, compatibles con la estructura corundum, permanecían en la hematite.
- Las magnetitas sustituidas <sup>[3]</sup> preparadas a pH 12 desde ferrihidrita contenían más de 0.1 mol/mol de Mn, Cu, Co o Ni. Los productos proporcionaron desde magnetitas con bajos niveles de sustitución a totalmente sustituidas MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (ferritas).
- Cuando en la magnetita hay sustituciones de Ca aumenta la arista de la celda unitaria, y si hay sustituciones de aluminio disminuye el tamaño de la celda y baja el punto de Curie <sup>[3]</sup>.

### 6.3.5 Principales Usos de la Magnetita Mineral

La magnetita fue el primer material magnético que el hombre observó en la naturaleza y el primero que utilizó tecnológicamente al introducir con su uso mejoras cruciales en los sistemas de orientación para la navegación (en particular, con el desarrollo de la brújula). Es uno de los óxidos de hierro más abundantes en la naturaleza, y se encuentra naturalmente en muy diversos ambientes, razón por la cual presenta intereses especiales en diferentes campos, como se pretende ilustrar con algún detalle a continuación:

- Importante mena de hierro. Junto con la hematita es una de las menas más importantes, al contener un 72% de hierro (es el mineral con más contenido en hierro).
- Como material de construcción: se usa como añadido natural de alta densidad en hormigones, especialmente para protección radiológica.
- En calderas industriales: la magnetita es un compuesto muy estable a altas temperaturas, aunque a temperaturas bajas o en presencia de aire húmedo a temperatura ambiente se oxide lentamente y forme óxido férrico. Esta estabilidad de la magnetita a altas temperaturas hace que sea un buen protector del interior de los tubos de la caldera. Es por ello que se hacen tratamientos químicos en las calderas industriales que persiguen formar en el interior de los tubos capas continuas de magnetita.

## 6.4 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

### 6.4.1 Propiedades Electrónicas y Eléctricas

La configuración electrónica <sup>[3]</sup> del Fe<sup>+3</sup> es 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup> 3s<sup>2</sup> 3p<sup>6</sup> 3d<sup>5</sup> mientras que la del Fe<sup>+2</sup> es 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup> 3s<sup>2</sup> 3p<sup>6</sup> 3d<sup>6</sup>. Para los óxidos de hierro son precisamente los electrones del Fe de la capa 3d los que determinan sus propiedades electrónicas, magnéticas e inclusive algunas espectroscópicas, de ahí que los orbitales con estos electrones tengan un mayor interés.

Un orbital es la región del espacio ocupada por un electrón simple o por un par de electrones. Según el principio de exclusión de Pauli el máximo número de electrones en un orbital cualquiera es 2, y donde esto se consigue los electrones han de tener spin (momento angular intrínseco) opuesto. El spin del electrón influye fuertemente en las propiedades magnéticas de un compuesto.

Hay 5 orbitales d disponibles cada uno con una orientación espacial diferente. En un átomo aislado estos 5 orbitales están degenerados, por ejemplo, sus energías son iguales. En el nivel más bajo de energía el  $\text{Fe}^{3+}$  tiene 5 electrones d desapareados, y el  $\text{Fe}^{2+}$  tiene 2 electrones apareados y 4 desapareados.

En relación con su estructura, los dos lugares de catión diferentes – (A) tetraédrica ocupada por  $\text{Fe}^{3+}$  y (B) octaédrica ocupada por  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$  - forman la base para dos submallados magnéticos interpuestos. La estructura espinela inversa de la magnetita resulta del hecho de que el CFSE (crystal field stabilization energy) del  $\text{Fe}^{2+}$  es mayor para la coordinación octaédrica que para la tetraédrica, así que el  $\text{Fe}^{2+}$  ocupa preferentemente los lugares octaédricos. Para el  $\text{Fe}^{3+}$  el CFSE es cero tanto para la coordinación octaédrica como para la tetraédrica, de forma que este ión no tiene preferencia alguna por el tipo de coordinación.

El principal tipo de interacción es de acoplamiento antiferromagnético a través del enlace de  $127^\circ \text{Fe}_A - \text{O} - \text{Fe}_B$  que es más fuerte que el acoplamiento en los sitios octaédricos. En los últimos sitios los electrones están térmicamente deslocalizados sobre los iones de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ . Es esta deslocalización la responsable de la alta conductividad de la magnetita.

- Densidad electrónica: 4.89 gm/cc
- Índice de fermiones (tipo básico de partícula con spin semientero responsable de casi toda la masa): 0.01
- Índice de bosones (tipo básico de partícula con spin entero): 0.99

Semiconductor es un elemento que se comporta como un conductor o como aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre.

El hematite, wüstite, maghemita y magnetita son semiconductores <sup>[3]</sup>. En concreto la magnetita muestra casi todas las propiedades metálicas. Para que un compuesto sea semiconductor la característica principal es que la separación entre la banda de valencia de los orbitales y la banda de conducción sea menor de 5 eV, y esta condición se encuentra para los óxidos anteriores.

En la mayoría de los óxidos de hierro con propiedades semiconductoras la excitación electrónica se consigue por irradiación con luz visible de un longitud de onda adecuada (1 eV =  $1000 \text{ cm}^{-1}$  - fotoconductividad).

Fotoelectricidad de la magnetita:

- Efecto de absorción fotoeléctrico ( $P_e$ ): 22.14 barns/electron  
 $P_e = (Z^{3.6}/10) * 0.0025$ ;  $Z = \text{Número atómico del átomo}$   
 $P_{e_{\min}} = \sum A_i Z_i P_i / \sum A_i Z_i$ ;  $A_i = \text{número atómico del átomo } i \text{ en el mineral}$ ;  
 $Z_i = \text{número atómico del átomo } i$ ;  $P_i = \text{valor } P_e \text{ del átomo } i$
- Efecto fotoeléctrico (U):  $P_{e_{\min}} \times \rho_e$  (densidad electrónica) = 108.32 barns/cc.

En un *semiconductor intrínseco*, por ejemplo, cuando el cristal se encuentra a temperatura ambiente algunos electrones pueden absorber la energía necesaria para saltar a la banda de conducción dejando el correspondiente hueco en la banda de valencia. Obviamente el proceso inverso también se produce, de modo que los electrones pueden caer, desde el estado energético correspondiente a la banda de conducción, a un hueco en la banda de valencia liberando energía. A este fenómeno se le denomina recombinación.

Sucede que, a una determinada temperatura, las velocidades de creación de pares e-h, y de recombinación se igualan, de modo que la concentración global de electrones y huecos permanece constante. Siendo "n" la concentración de electrones (cargas negativas) y "p" la concentración de huecos (cargas positivas), se cumple que:  $n_i = n = p$

A  $n_i$  se le denomina concentración intrínseca del semiconductor, y es función exclusiva de la temperatura y del tipo de elemento.

Si a un semiconductor intrínseco se le añade un pequeño porcentaje de impurezas, es decir, elementos trivalentes o pentavalentes, el semiconductor se denomina *extrínseco*, y se dice que está dopado.

Un *semiconductor tipo n* se obtiene llevando a cabo un proceso de dopado añadiendo un cierto tipo de átomos al semiconductor para poder aumentar el número de portadores de carga libres (en este caso negativos o electrones).

Un *semiconductor tipo p* se obtiene llevando a cabo un proceso de dopado, añadiendo un cierto tipo de átomos al semiconductor para poder aumentar el número de portadores de carga libres (en este caso positivos o huecos).

La magnetita puede considerarse como casi un metal deficiente con huecos en los espacios octaédricos. Como semiconductor tanto tipo p como n <sup>[3]</sup> presenta una barrera de energía potencial de tan sólo 0.1 eV (de ahí que la magnetita tenga la resistividad más baja de todos los óxidos), siendo su longitud de onda de excitación de  $10^3 \text{ cm}^{-1}$ .

Su conductividad de entre  $10^2$ - $10^3 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$  es casi metálica. En la arista del octaedro compartido, los iones de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  en las posiciones octaédricas están muy cercanos y como resultado los huecos pueden migrar fácilmente de  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  y facilita una buena conductividad.

## 6.4.2 Variación de la Conductividad Eléctrica con la Temperatura

A temperaturas por encima de  $T_V \sim 120 \text{ K}$  (llamada temperatura de Verwey) los electrones en los sitios octaédricos se encuentran térmicamente deslocalizados entre los iones  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$  (en el fenómeno conocido como *electron hopping*), lo que da lugar a la alta conductividad eléctrica y térmica de la magnetita en comparación con otras ferritas.

$$(T_{\text{Verwey}} = 120\text{K} \sim 153\text{C}) < T < (859\text{K} \sim 586\text{C})$$

En la figura 26 puede observarse <sup>[67]</sup> cómo la conductividad en  $(\Omega \text{ cm})^{-1}$  aumenta significativamente (pasando de menos de 50 a 250) hasta

aproximadamente los 400K en que comienza a disminuir en menor grado hasta que pierde su comportamiento ferrimagnético a la temperatura de 859K con un valor próximo a 200. A temperaturas superiores el valor de la conductividad se estabiliza. En 1939 el científico holandés Evert Verwey [67] descubrió que la conductividad eléctrica de la magnetita disminuye abrupta y dramáticamente a bajas temperaturas. A unos -150 °C el mineral metálico se convierte en un aislante.

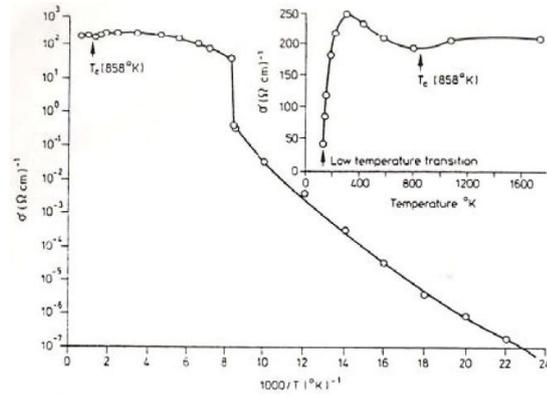


Figura 26. Variación de la conductividad eléctrica de la magnetita con la temperatura.

Por debajo de la temperatura de Verwey se produce un ordenamiento de la configuración de los iones de  $Fe^{2+}$  y  $Fe^{3+}$  en los sitios octaédricos que inhibe la deslocalización electrónica.

### 6.4.3 Anisotropía de la Conductividad Eléctrica

La anisotropía de la conductividad eléctrica de la magnetita aumenta desde la temperatura de transición ( $119.4 \pm 0.3$  K) a 95K, para permanecer prácticamente constante [68] a temperaturas inferiores. La figura 27 representa la anisotropía de la conductividad de una muestra de magnetita de cristales sintéticos formando una barra rectangular de 1cm de longitud y paralela a la dirección [110] tras enfriarla en dos campos magnéticos de orientación diferente. Sin embargo por encima de la transición, la conductividad eléctrica de la magnetita presentó propiedad isotrópica. La figura 28 muestra la conductividad entre la temperatura ambiente y la de transición para dos muestras con forma de barra rectangular en las direcciones [111] y [110].

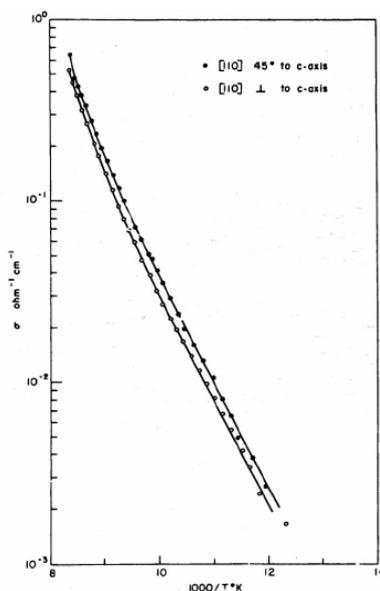


Figura 27. Anisotropía de la conductividad eléctrica de la magnetita a bajas temperaturas.

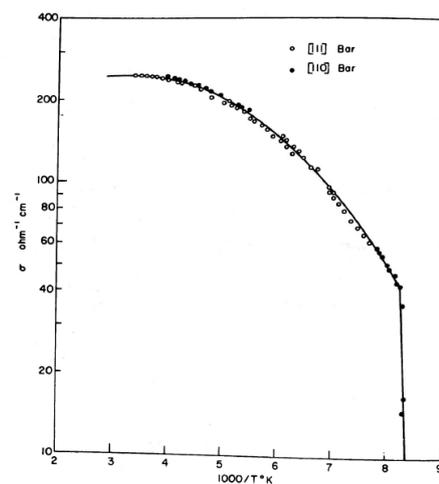


Figura 28. Isotropía de la conductividad de la magnetita a temperaturas inferiores a la temperatura ambiente hasta la temperatura de transición.

Se destaca que a temperaturas próximas a la del cuerpo humano (37°C, aproximadamente 310K) la variación de la conductividad respecto a la temperatura sigue siendo significativa, con un valor aproximado a  $2,5 \cdot 10^3$  S/m., que lo ubica dentro del rango de los conductores eléctricos casi metálicos <sup>[69]</sup>.

## 6.5 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

### 6.5.1 Principales Parámetros en Magnetismo

Los principales parámetros utilizados para caracterizar las propiedades magnéticas de los sólidos son la susceptibilidad magnética, la permeabilidad y el momento magnético <sup>[3]</sup>. Cuando una sustancia se sitúa dentro de un campo magnético de fuerza H (unidades Teslas), la intensidad de magnetización J (por ejemplo el momento magnético de la muestra por unidad de volumen [ $A \cdot m^{-1}$  o  $J \cdot T^{-1} \cdot m^{-3}$ ]) se relaciona con H a través de la susceptibilidad magnética, k, de la sustancia:  $J = k H$

La susceptibilidad magnética puede expresarse en términos de volumen, como k ( $m^3 \cdot m^{-3}$  o  $J \cdot T^{-2} \cdot m^{-3}$ ) o de masa  $\chi$  ( $m^3 \cdot kg^{-1}$  o  $J \cdot T^{-2} \cdot kg^{-1}$ ).

La densidad o flujo de las líneas de fuerza en un sólido situado en un campo magnético H se denomina inducción magnética B, definida según la siguiente relación:  $B = \mu (H + J)$

La tendencia de las líneas magnéticas de fuerza a pasar a través de un medio en relación a la tendencia a pasar a través del vacío es la permeabilidad magnética  $\mu$ . Este es uno de los parámetros que distingue un material diamagnético de una sustancia paramagnética.

La permeabilidad se define como:  $\mu = \mu_0 (1 + k)$ ; donde  $\mu_0$  es la permeabilidad en el vacío. La permeabilidad magnética <sup>[70]</sup> es la relación entre la inducción magnética y la intensidad del campo magnético; es respecto al magnetismo lo que la conductividad es respecto a la electricidad. Es una propiedad del material y así, cuando se emplean fuentes electromotrices (EM) el voltaje inducido en un conductor bajo la superficie varía, no sólo en la relación del campo magnético, sino también con la permeabilidad magnética del conductor. De la ecuación de Maxwell:  $\nabla \times E = -\mu \partial H / \partial t$ , se desprende que las corrientes inducidas son multiplicadas por el factor  $\mu = B/H$  en H/m (henrios por metro).

El momento magnético m es un término utilizado para cuantificar las propiedades magnéticas de una sustancia. No se mide directamente, pero se obtiene de la medida de la susceptibilidad molar, con la que se relaciona de la siguiente forma:

$$\chi = \mu_0 \frac{N m^2}{3 k T}$$

donde N es el número de Avogadro y k la constante de Boltzman. El momento magnético fundamental es el magnetón de Bohr  $\beta$  tal que:

$$\beta = \frac{e h}{4 \pi c m_e} = 9.2732 \cdot 10^{-24} \text{ A m}^2$$

donde e y  $m_e$  son la carga y masa del electrón, respectivamente.

La expresión del momento magnético puede reducirse a:  $m = 2.83 \sqrt{\chi T}$

Las unidades del momento magnético son Julios/Tesla, aunque a veces se expresa en magnetones de Bohr.

## 6.5.2 Tipos de Magnetismo

La figura 29 representa los diferentes tipos de magnetismo <sup>[3]</sup>. El diamagnetismo es la propiedad básica de todas las sustancias a repeler un campo magnético. La susceptibilidad magnética  $k$  de una sustancia diamagnética es pequeña, negativa e independiente de la temperatura ( $-10^{-6}$ )

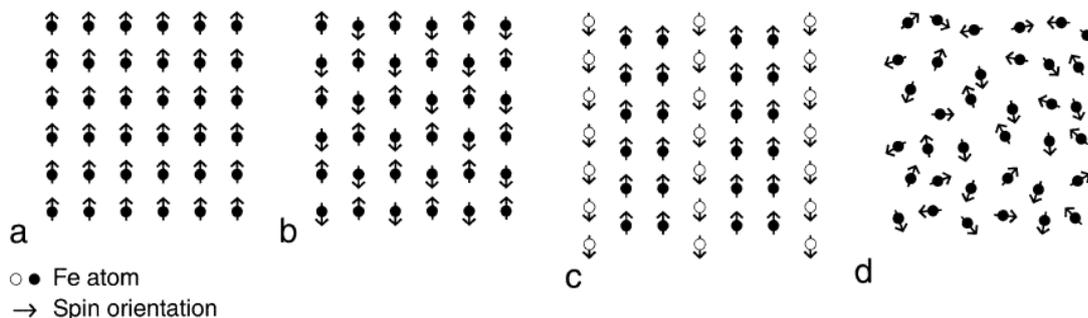


Figura 29. Tipos de magnetismo:

a) ferromagnetismo, b) antiferromagnetismo, c) ferrimagnetismo, d) paramagnetismo

Las sustancias paramagnéticas son atraídas hacia un campo magnético. Dichas sustancias poseen electrones no apareados que están aleatoriamente orientados en diferentes átomos. Cada átomo, ión o molécula de una sustancia paramagnética puede visualizarse como un pequeño imán con su propio momento magnético inherente. La aplicación de un campo magnético causa un alineamiento parcial de estos imanes paralelos al campo. La susceptibilidad magnética es positiva y pequeña (0 a 0.01), varía con la temperatura y su comportamiento puede describirse según la ley de Curie-Weiss:

$$\chi_M = \frac{C_M}{T - T_C}$$

siendo  $C_M$  y  $T_C$  la constante de Curie y la temperatura de Curie respectivamente, y  $T$  es la temperatura.

La dependencia de la temperatura de  $\chi_M$  es el resultado de dos fuerzas opuestas: cuando la temperatura aumenta, la alineación incrementada por los momentos magnéticos en la sustancia se opone mediante vibraciones térmicas más fuertes, de ahí que  $\chi_M$  decrezca. Bajo una cierta temperatura (Néel o Curie) que depende de cada óxido, los óxidos de hierro transitan hacia un estado ordenado magnéticamente y se convierten en ferromagnéticos, antiferromagnéticos, ferrimagnéticos o paramagnéticos.

La temperatura de transición se denomina temperatura de Curie ( $T_C$ ) para ferromagnéticos y ferrimagnéticos, y temperatura de Néel ( $T_N$ ) para sustancias antiferromagnéticas.

Las sustancias ferro y ferrimagnéticas son fuertemente atraídas por un campo magnético. En una sustancia ferromagnética la alineación de los spins de los electrones es paralela. Tienen un momento magnético neto, gran permeabilidad magnética y susceptibilidad magnética positiva y de valores altos. ( $0.01 - 10^6$ ). Al aumentar la temperatura los momentos

magnéticos y la susceptibilidad bajan rápidamente.

En sustancias antiferromagnéticas los spines de los electrones tienen momentos magnéticos iguales y están alineados de una forma antiparalela. Tienen un momento magnético global 0, permeabilidad positiva y una positiva pero baja susceptibilidad (0 – 0.1). Al incrementar la temperatura normalmente aumenta la susceptibilidad debido a que el ordenamiento antiparalelo se desequilibra.

Las sustancias ferrimagnéticas tienen en común con las antiferromagnéticas en que existe antiparalelismo, pero los diferentes spines tienen momentos diferentes, de forma que un material ferrimagnético tienen un momento magnético resultante.

El supermagnetismo resulta de una anisotropía magnética, por ejemplo debido a la existencia de direcciones cristalográficas preferidas a lo largo de las cuales los spines de los electrones se alinean más fácilmente y la sustancia se magnetiza con más facilidad. La dirección preferida para esta fácil magnetización es a lo largo del eje o juego de ejes cristalográficos, por ejemplo para la magnetita, a lo largo de las direcciones [111].

El esferomagnetismo es una propiedad por la que algunos materiales amorfos o pobremente ordenados que contienen enlaces metal-O-metal que, si el metal lleva momento magnético, puede dar soporte a reacciones de super-intercambio.

### 6.5.3 Características Magnéticas Básicas de la Magnetita

El fuerte magnetismo de la magnetita se debe a un fenómeno de ferrimagnetismo: los momentos magnéticos de los distintos cationes de hierro del sistema se encuentran fuertemente acoplados, por interacciones antiferromagnéticas, pero de forma que en cada celda unidad resulta un momento magnético no compensado. La suma de estos momentos magnéticos no compensados, fuertemente acoplados entre sí, es la responsable de que la magnetita sea un imán <sup>[3]</sup>.

- Temperatura de Curie: 859 °K (a partir de la cual el material pasa a ser paramagnético).
- Magnetización de saturación ( $\sigma_s$  a 300 K): 92 - 100 A m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> o J T<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>
- Constante de anisotropía ( $K_{\text{eff}}$ ): 10<sup>4</sup> – 10<sup>5</sup> J m<sup>-3</sup>
- Constante de restricción magnética ( $\lambda$ ): 35 · 10<sup>-6</sup>
- Susceptibilidad magnética ( $K = M/H$ ) en el S.I.: 1200x10<sup>3</sup> a 19200x10<sup>3</sup>

Los dos lugares de catión diferente en la estructura – (A) tetraédrica ocupada por Fe<sup>3+</sup> y (B) octaédrica ocupada por Fe<sup>3+</sup> y Fe<sup>2+</sup> - forman la base para dos submallados magnéticos interpuestos. Por debajo de T<sub>C</sub> los momentos magnéticos de los sitios A y B son antiparalelos y, en suma, las magnitudes de los tipos de estos momentos magnéticos son desiguales, causando el ferrimagnetismo. La disposición de spin se escribe como Fe<sup>3+</sup> [Fe<sup>3+</sup> Fe<sup>2+</sup>] O<sub>4</sub>. El principal tipo de interacción es de acoplamiento antiferromagnético a través del enlace de 127° Fe<sub>A</sub> – O – Fe<sub>B</sub> que es más fuerte que el acoplamiento en los sitios octaédricos.

#### 6.5.4 Variación del Comportamiento Magnético con la Temperatura

El comportamiento ferrimagnético de la magnetita ocurre a temperatura ambiente por debajo de la Temperatura de Curie  $T_C$ , que en el caso de la magnetita es de 859 K. Por encima de ésta el material tiene un comportamiento paramagnético.

El paramagnetismo se produce cuando las moléculas de una sustancia tienen un momento magnético permanente. El campo magnético externo produce un momento que tiende a alinear los dipolos magnéticos en la dirección del campo. La agitación térmica aumenta con la temperatura y tiende a compensar el alineamiento del campo magnético. En las sustancias paramagnéticas la susceptibilidad magnética es positiva pero muy pequeña comparada con la unidad.

En la figura 30 se representa el valor inverso de la susceptibilidad molar  $1/\chi_{mol}$ , en función de la temperatura tanto para  $MnFe_2O_4$  como para la magnetita  $Fe_3O_4$  [71]. Las asíntotas para altas temperaturas se exponen con pendientes acordes a las constantes de Curie. Puede observarse cómo la susceptibilidad de la magnetita toma valores próximos a 0,02 para 900K y 0,01 para 1000K, como se indicaba anteriormente valores positivos pero muy pequeños comparados con la unidad.

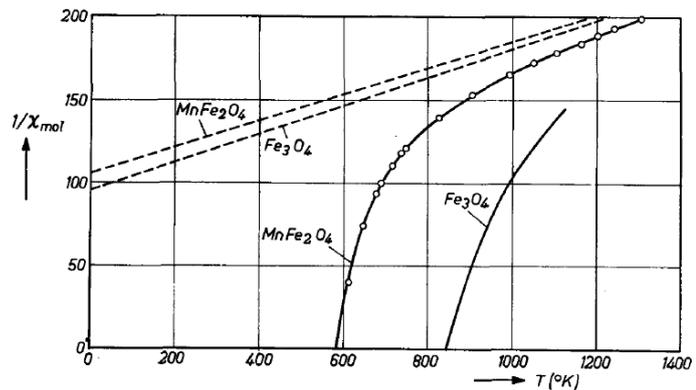


Figura 30. Valor inverso de la susceptibilidad molar  $1/\chi_{mol}$  en función de la temperatura, para  $MnFe_2O_4$  y  $Fe_3O_4$ .

## 7 LA MAGNETITA NANOMÉTRICA

### 7.1 NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS Y FERROFLUIDOS

Las nanopartículas <sup>[72]</sup> son partículas cuya característica principal es su tamaño, que es del orden del nanómetro, esto es  $10^{-9}$  metros, hasta unos 100nm. Como referencia, los átomos pueden estar entre los 0.1 a 0.4 nm.

La sola característica del tamaño hace variar otras características que se asumían como propias del elemento o material específico. Un ejemplo que puede aportar una idea significativa es el de una macropieza de metal: en una esfera de 2cm de diámetro, sólo una pequeñísima proporción de ella (1 entre 10 millones de átomos) forman la capa superficial. En una partícula nanométrica de 10 nm de diámetro el 10% de sus átomos están en la capa superficial, y esto se incrementa hasta un 50% en partículas de 2 nm.

Las propiedades mecánicas de los materiales, como la resistencia, y más en concreto la dureza y la resistencia a la fricción de los metales, pueden incrementarse enormemente al bajar a nivel nano el tamaño del grano.

En cuanto a las propiedades químicas, es evidente que cuando se trabaja con nanopartículas la superficie aumenta enormemente respecto al mismo material a escala macro. Muchos catalizadores de reacciones químicas se han sintetizado a escala nano para mejorar sus prestaciones, hasta el punto de que incluso el oro, arquetipo de material inerte, a escala nanométrica es un excelente catalizador para la oxidación del monóxido de carbono (CO).

Respecto a las propiedades magnéticas, es conocido que el hierro es un material magnético, y sin embargo un trozo de hierro puro no se magnetiza. Se puede probar que éste no atraerá a una bola de hierro. Por el contrario, la bola será atraída por un imán. Y sin embargo, si se sitúa la bola entre el imán y el trozo de hierro inicial, la bola será atraída hacia el hierro, perdiéndose esta propiedad al alejar el imán. Es decir, ante un imán, el hierro se magnetiza tanto que supera el magnetismo del imán, y esta propiedad revierte al alejarse el imán.

La fuente del magnetismo son sus átomos constituyentes, que disponen de diminutos imanes dipolares permanentes cuya fuerza se denomina momento magnético del átomo. En estos materiales la fuerte interacción entre los átomos alinea los imanes atómicos para producir magnetización macroscópica, pero no es éste su estado habitual, ya que por lo general el hierro puro no es un imán, quedando los momentos magnéticos compensados para minimizar la energía.

Sin embargo esta compensación se rompe al llegar a un tamaño crítico (aproximadamente 100 nm.), en que los momentos magnéticos dejan de compensarse y actúan en un único sentido comportándose el trozo de hierro como un fuerte imán permanente.

### 7.1.1 Nanopartículas Magnéticas

Las **nanopartículas magnéticas** son en general reactivamente superiores a las micropartículas magnéticas (MMPs), ya que reaccionan mucho más rápidamente y sin necesidad de agitar la mezcla. Lógicamente ello está vinculado a su mayor ratio superficie por volumen <sup>[72]</sup>.

Al mismo tiempo, su magnetización de saturación ( $M_S$ ) es un parámetro importante que permite que las MNPs puedan ser manipuladas mediante un campo magnético externo. Los metales puros (Fe, Co, Ni), los óxidos de hierro (magnetita  $Fe_3O_4$  y maghemita  $\gamma-Fe_2O_3$ ), ferromagnetos tipo espinela ( $MeO \cdot Fe_2O_3$ ,  $Me=Fe, Co, Mg, Zn, Mn, Ni, etc.$ ) y aleaciones ( $FePt, FeCo, FePd, CoPt, MnAl, CoPt_3, etc.$ ) son candidatos a construcciones de MNPs biofuncionales. Entre ellos, la magnetita, la maghemita y  $FePt$  son los materiales más empleados debido a su alta  $M_S$  y estabilidad química.

**Generación natural.** Las nanopartículas se encuentran habitualmente en la Tierra. En la atmósfera por ejemplo las generan los volcanes, y los incendios forestales. En los océanos las generan las fosas hidrotermales. También algunas bacterias y moluscos generan nanopartículas, e incluso las explosiones de supernovas en el espacio generan nanopartículas. Las nanopartículas afectan al clima: quizá la mayor contribución de las nanopartículas al clima sea que sirven de núcleo de condensación de las nubes, es decir contribuyen fuertemente a la formación de las nubes, de forma que una nanopartícula de 100 nm puede condensar una nube de 10  $\mu m$ , que a su vez se transformará en una gota de lluvia de 0.5 mm.

**Síntesis.** Una simple vela encendida produce a través de la combustión nanopartículas de carbono de diámetro aproximado a 10 nm <sup>[72]</sup>, y la tinta india, posteriormente china en el 2700 a.d.c., contenía nanopartículas de carbono en suspensión.

Pero la síntesis de nanopartículas ya se ha estructurado en métodos Bottom-Up y Top-Down. En los métodos Bottom-Up en primer lugar se identifica la nanopartícula de interés para luego producir y ensamblar el dispositivo requerido, mientras que en los métodos Top-Down se parte de un material macro para crear una estructura o dispositivo.

Entre los métodos Bottom-Up se desarrollan los que usan vapor supersaturado, los que producen las nanopartículas en vacío, por selección de tamaño en aerosoles, síntesis química en líquidos en suspensión, etc.; y entre los métodos Top-Down básicamente se realiza por litografía de haz de electrones (EBL) y utilizando haces de iones focalizados (FIB).

El tamaño de las nanopartículas magnéticas (MNPs), de 1 a 100 nm, puede aproximarse al de las biomacromoléculas, lo que permite interactuar con ellas mucho mejor que las partículas de escalas superiores. Por ello la biocompatibilidad de las MNPs será un requisito a tener en cuenta, seleccionando aquellas que no sean tóxicas o al menos, las de menor toxicidad.

**Preparación, modificación de la superficie y funcionalización de las NNPs <sup>[73]</sup>.**

- Preparación de MNPs (algunos ejemplos clásicos de bioseparación): La coprecipitación química de  $Fe^{2+}$  y  $Fe^{3+}$  en solución de  $H_2O$  en presencia alcalina ( $NaOH$  o  $NH_3 \cdot H_2O$ ) para sintetizar nanopartículas de los óxidos de hierro (magnetita  $Fe_3O_4$  y maghemita  $\gamma-Fe_2O_3$ ) es quizá el método más fácil y utilizado.

La descomposición térmica y reducción de precursores organometálicos (acetilacetonatos

metálicos:  $M(\text{acac})_n$ ,  $M=\text{Fe, Mn, Co, Ni, Cr}$ ;  $n=2$  o  $3$ ,  $\text{acac}=\text{acetililacetato}$ ; cupferronatos metálicos:  $M^x\text{Cup}_x$ ,  $M=\text{ion metálico}$ ;  $\text{Cup}=\text{N-nitrosofenilhidroxilamina}$ ; pentacarbonilos de hierro), la síntesis de microemulsión (agua en aceite, W/O; aceite en agua, O/W) y la síntesis hidrotérmica son ejemplos típicos de síntesis de MNPs.

Frente a los anteriores otros métodos de síntesis como por spray y pirolisis laser, sonoquímica, y sol-gel, recientemente existe un creciente interés en utilizar las MNPs originadas por bacterias para aplicaciones biológicas (magnetosomas). Un beneficio del uso de MNPs originadas biológicamente es su superior biocompatibilidad, ya que están rodeadas de una membrana de lípido que contiene fosfolípidos.

- Modificación de la superficie de las MNPs. Mantener la estabilidad en el tiempo de las MNPs sin aglomeración ni precipitación es todavía un reto, perdiendo a veces incluso sus propiedades superparamagnéticas. Por ello en la mayoría de procesos para evitar esta inestabilidad se recurre a aislar el núcleo magnético del entorno mediante una funda protectora. Además, a través de estos procesos esta cápsula protectora se selecciona de forma que aumente la funcionalidad de las MNPs según la aplicación deseada.

Un ejemplo es a través de surfactantes cuidadosamente seleccionados, que reducen la tensión superficial, como el ácido laurico, el ácido mirístico, el ácido oléico, el ácido dodecibencenosulfónico, etc., eficientes con MNPs solubles en agua.

Con el fin de prevenir la agregación de MNPs se utilizan los polímeros, tanto naturales como sintéticos, que abren una puerta hacia lo que parece un rango ilimitado de posibilidades en la incorporación de propiedades específicas a las MNPs. Macromoléculas originales naturales, celulosas, dextran, gelatinas, agarosa y carragenina se utilizan en biomedicina.

También se utilizan materiales inorgánicos como carbono, plata, oro y silicio para encapsular las MNPs de forma que, a la vez que proporcionan estabilidad a las nanopartículas en soluciones acuosas, son muy útiles como agentes biológicos y químicos.

En los últimos años se ha estudiado muchas pequeñas moléculas orgánicas con el fin de dar estabilidad y funcionalidad a las MNPs. El ácido cítrico es el ejemplo típico utilizado para la magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en el rango de 8 a 10 nm.

**Principales usos** <sup>[73]</sup>. Las nanopartículas se aplican mediante la denominada *nanotecnología incremental* para producir materiales avanzados con propiedades específicas a sus usos, gracias al cambio de propiedades de los materiales a escala nanométrica.

Hoy en día ya se están usando en los dispositivos de almacenamiento de datos (en paquetes de nanopartículas) pero la capacidad de utilizar las nanopartículas individualmente aumentaría la densidad de almacenamiento enormemente.

Un punto cuántico, generalmente es una nanoestructura semiconductor que confina el movimiento, en las tres direcciones espaciales, de los electrones de la banda de conducción, los huecos de la banda de valencia, o excitones (pares de enlaces de electrones de conducción de banda y huecos de banda de valencia). En el mundo macroscópico, los puntos cuánticos pueden tener el aspecto de una simple pastilla plana, o estar disueltos en un líquido. Sin embargo esa sustancia ha sido elaborada en el laboratorio partiendo de unos pocos átomos, con técnicas que manipulan la materia a escalas de nanómetros. Los puntos cuánticos se utilizan en:

- Optoelectrónica. Con los puntos cuánticos de materiales semiconductores, como arseniuro

de indio y fósforo de indio, se fabrican diodos láser emisores de luz más eficientes que los usados hoy en lectores de CD y de códigos de barras.

- **Biomedicina.** En forma de cristales independientes, pero manteniendo su fundamento y sus propiedades físicas. Los puntos cuánticos emiten luz brillante y muy estable. Con ellos se obtienen imágenes de mucho contraste usando láseres menos potentes, y no existe el temor de que se apaguen. Además, la longitud de onda tan específica a la que brillan evita las superposiciones, y permite teñir a la vez muchas más estructuras que con los métodos de tinción tradicionales.
- **Paneles solares experimentales.** La tercera generación de células fotovoltaicas usa entre otras posibilidades las superficies con puntos cuánticos. El rendimiento es mayor que las células de primera y segunda generación y su fabricación es más económica. Un punto cuántico funcionando podría colocar, eventualmente, a la electricidad solar en una posición económica igual a la electricidad del carbón. Si esto pudiera hacerse, sería revolucionario.
- **Nuevos sistemas de iluminación con un rendimiento más eficiente.**

Uno de los saltos tecnológicos en la *nanotecnología de evolución* (nanotecnología que trata de construir nanopartículas que de forma individual realicen alguna función específica útil) ha sido el desarrollo de nanopartículas simples que pueden funcionar como transistores insertables modularmente en dispositivos electrónicos.

#### **Aplicaciones de las MNPs <sup>[73]</sup>.**

- **Aislamiento de células con MNPs.** Para una separación efectiva las células de interés han de ser etiquetadas con MNPs extrínsecas para lograr el contraste suficiente de susceptibilidad magnética respecto a las otras células y al medio, a excepción de la bacteria magnetotáctica que contiene MNPs intrínsecas en sus propias células que no necesitan etiquetado.
- **Extracción de proteínas con MNPs.** El aislamiento y purificación de proteínas tradicionalmente se ha realizado mediante repetición de procesos como electroforesis, filtración, centrifugación y cromatografía hasta alcanzar una calidad mínima. Para superar sus limitaciones se han desarrollado técnicas de separación mediante afinidad magnética, intercambio iónico e hidrofóbico. Es evidente que en estos últimos procesos se obtendrán mejores resultados con MNPs que con MMPs.
- **Extracción de ácidos nucleicos con MNPs.** La extracción de ADN/ARN está siendo un paso fundamental para estudios de diagnóstico, terapia y análisis genético. La extracción de ácidos nucleicos en fase sólida magnética, comparada con los métodos convencionales, ofrece claras ventajas tanto en tiempo de proceso como en requisitos químicos, coste económico y facilidad de automatización.
- **Las nanopartículas pueden interactuar con los organismos vivos <sup>[72]</sup>.** En general en las aplicaciones médicas actuales basadas en nanopartículas éstas están destinadas a localizar tipos específicos de células (normalmente células tumorales) y realicen alguna acción como eliminarlas o mostrarlas en una resolución muy alta para diagnóstico.

Una forma diferente de alcanzar el objetivo es incorporar el medicamento a nanopartículas magnéticas, de forma que puedan ser dirigidas y concentradas en el lugar objetivo mediante un campo magnético externo.

En el tratamiento de tumores por hipertermia las nanopartículas magnéticas pueden elevar la temperatura de las células cancerígenas con el fin de eliminarlas.

### 7.1.2 Ferrofluidos: Síntesis con Magnetita

Los ferrofluidos <sup>[74]</sup> forman parte de una nueva clase de materiales magnéticos. Estos consisten en nanopartículas magnéticas coloidales dispersas y estabilizadas en un líquido portador y que presentan propiedades de fluido y magnéticas, por lo que son de gran importancia tecnológica.

**Ciclo de histéresis de ferrofluido de magnetita** <sup>[74]</sup>. Para un ferrofluido a partir de queroseno o de aceite comestible se observa que la magnetización de saturación es directamente proporcional al aumento en la concentración de magnetita, según gráficas de la figura 31.

En los preparados con queroseno se obtiene un rango de magnetización específica entre 7.3 y 13.37 emu/g, y en los preparados con aceite comestible se obtiene un rango de 5.49 a 18.9 emu/g., dependiendo de las concentraciones de magnetita de cada preparado. Es interesante observar el comportamiento de estos ferrofluidos al acercarse un imán, como puede comprobarse en la figura 32. El ferrofluido responde inmediatamente al acercarse un imán, debido a la alineación de las partículas, e incrementando la viscosidad del ferrofluido. Este vuelve a su estado inicial al retirar el imán.

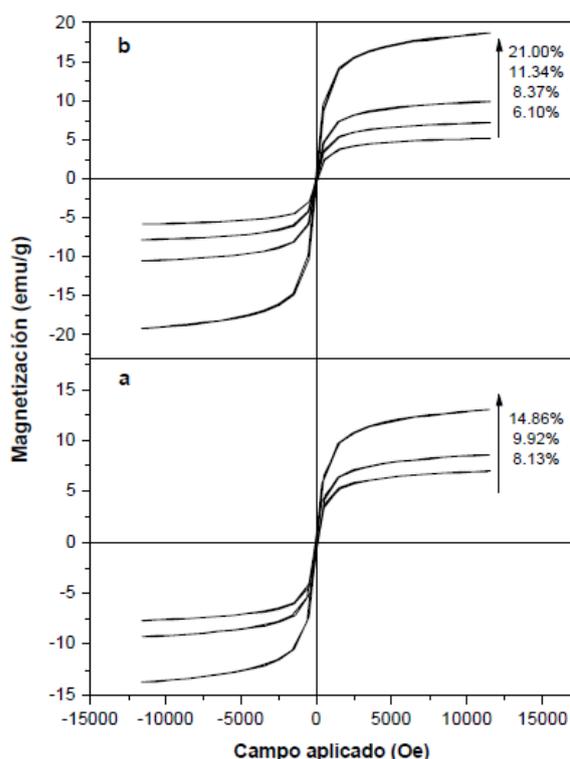


Figura 31. Ciclos de histéresis para el ferrofluido con magnetita a partir de queroseno (a), y con aceite comestible (b).



Figura 32. Comportamiento de un ferrofluido con un 21% de magnetita y preparado en aceite comestible.

Actualmente entre sus aplicaciones se pueden mencionar algunas como sellos magnéticos en motores, como lubricantes en discos magnéticos, instrumentos para memoria óptica y

giroscopios. Otras aplicaciones son en instrumentos magnéticos como bocinas, tintas magnéticas para cheques bancarios, unidades de refrigeración magnética, etc. Los ferrofluidos también tienen aplicaciones en medicina como por ejemplo, liberadores de medicinas, para restringir el flujo sanguíneo en determinadas partes del cuerpo, y actúan como material opaco para el diagnóstico de imágenes usando rayos X o resonancia magnética nuclear.

Una forma de obtener partículas de magnetita para posteriormente obtener un ferrofluido es a través de la técnica de coprecipitación química <sup>[74]</sup>, que consiste en mezclar una solución de cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) y cloruro ferroso ( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) al 0.1 M con agitación mecánica a una velocidad de 2000 rpm. La relación molar de  $\text{FeCl}_3:\text{FeCl}_2$  se obtiene constante con un valor de 2:1.

Esta solución se calienta hasta una temperatura de 70 °C, inmediatamente se aumenta la velocidad de agitación hasta 7500 rpm y se agrega rápidamente una solución de hidróxido de amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) al 10% en volumen, formándose instantáneamente un precipitado oscuro que son las nanopartículas de magnetita.

Este precipitado ha de lavarse varias veces con agua destilada para eliminar los iones de  $\text{Cl}^-$  y el hidróxido de amonio remanente, que inhiben la adsorción de las moléculas del estabilizador que se usará para la preparación del ferrofluido. Las nanopartículas de magnetita lavadas han de mantenerse en suspensión para facilitar su uso en la preparación del ferrofluido.

**Preparación de un ferrofluido con magnetita** <sup>[74]</sup>. Se puede llevar a cabo mediante el método de peptización. Utilizando ácido oleico como surfactante, queroseno o aceite comestible como líquido portador y la magnetita en suspensión como material magnético. En primer lugar se prepara una solución de magnetita/ácido oleico/queroseno o aceite comestible, y se pone a calentar a 70 – 75 °C con agitación constante a 450 rpm hasta que se evapora el agua residual que contenía la magnetita y se forma una pasta (tiempo aproximado 6 horas). Después se agrega una solución de ácido oleico/queroseno o aceite comestible hasta obtener el ferrofluido estable (aprox. 4 horas), a la misma temperatura y velocidad de agitación.

## 7.2 SÍNTESIS DE MAGNETITAS NANOMÉTRICAS. MORFOLOGÍAS Y TAMAÑOS.

La síntesis en sistemas acuosos <sup>[3]</sup> a temperaturas inferiores a 100 °C produce un fino granulado ( $<0.1 \mu\text{m}$ ) de cristales cúbicos u octaédricos redondeados. Son ejemplos la oxidación de soluciones  $\text{Fe}^{2+}$  a pH neutro vía verdín y la precipitación directa de las soluciones mezcla de  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  a pH 4-6.

La magnetita se puede obtener a partir de un proceso de síntesis basado en la adición de una base a una disolución acuosa de sales férricas y ferrosas <sup>[75]</sup>. La reacción se realiza mediante:

- i. Se mezcla 40 ml de una disolución 1 mol/l de  $\text{FeCl}_3$  y 10 ml de otra disolución 2 mol/l de  $\text{FeCl}_2$  y 2 mol/l de  $\text{HCl}$ ,
- ii. La mezcla se vierte poco a poco con una pipeta que llega hasta el fondo del recipiente, en 500 ml de otra disolución 0.7 mol/l de  $\text{NH}_4\text{OH}$ , mientras esta última se mantiene en agitación mecánica,
- iii. Se mantiene la agitación durante 20 minutos y posteriormente se elimina el sobrenadante mediante decantación magnética.
- iv. Una vez obtenidas las partículas de magnetita es necesario asegurarse la estabilidad de las

suspensiones en disolución acuosa. Para ello hay que tener en cuenta que la estabilidad depende del pH de la suspensión con la que se va a trabajar:

- Si el medio es básico, las partículas se dispersan en una disolución acuosa 1 mol/l de hidróxido de tetrametilamonio.
  - Por el contrario, si es ácido, el precipitado obtenido después de la decantación magnética se dispersa en una disolución 2 mol/l de ácido perclórico.
- v. Después la suspensión de magnetita obtenida se centrifuga y se redispersa en agua desionizada hasta alcanzar el pH final deseado en la suspensión resultante.

Una síntesis hidrotérmica de magnetita <sup>[3]</sup> habitualmente produce cristales octaédricos simples que pueden llegar a ser del orden de 10 nm, como puede comprobarse en la figura 33, en la que los cristales de magnetita se han producido hidrotérmicamente a 250 °C. a partir de una solución 0.01 M Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> en presencia de 0.4 M trietanolamina, 2.4 M NaOH y 0.85 M N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>.

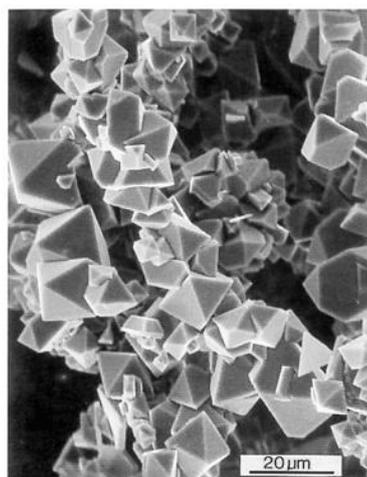


Figura 33. Cristales de magnetita producidos hidrotérmicamente a 250 °C.

En presencia de mineralizadores como 0.1 M HI o 2 M NH<sub>4</sub>Cl y a 0.207 MPa y 416-800 °C, la magnetita crece en cristales cuyas formas son combinación de rómbico dodecaedro (formas {101}), estando los cristales más redondeados de lo normal. Con ácido fórmico se pueden producir cristales de 0.1-0.2 mm. <sup>[3]</sup>

Una descomposición hidrotérmica de quelatos Fe-TEA en presencia de hidracina (180 °C) produce octaedros polidispersos microscópicos. Se pueden obtener esferas y octaedros uniformes y de mayor tamaño (0.03-1.1 μm) si el verdín se oxida con KNO<sub>3</sub> a 90 °C y pH 6-10.

La magnetita obtenida a partir de Fe(OH)<sub>2</sub> en una solución muy básica forma cubos de mayor tamaño que, con verdín a pH 8.5 forma pequeños y gruesos platos y que a partir de soluciones Fe<sup>II</sup>/Fe<sup>III</sup> a pH 13 cristaliza partículas de 5 nm. La coagulación inicial de las partículas primarias es seguida de una recristalización de contacto dentro de los agregados esféricos. Las esferas formadas cuando el Fe<sup>2+</sup> se encuentra en exceso sobre el OH<sup>-</sup> a pH 12 forma cristales cúbicos.

La magnetita producida por reducción seca de hematite mantiene la forma y tamaño de las partículas originales de hematite, obteniéndose magnetitas tanto esféricas como en listones <sup>[3]</sup>. Las magnetitas sustituidas con metal (Mn, Co, Cu, Ni) se obtienen a partir de ferrihidritas sustituidas con metal a pH 12 son cúbicas y de 10 a 50 nm de grosor. Las magnetitas que crecen mediante una oxidación lenta de verdín a pH 6 en presencia de fosfato 0.05-0.10 mol/mol se presentan en octaedros bien definidos con planos {111} suaves.

La figura 34 <sup>[3]</sup> (izquierda) muestra cristales redondeados de magnetita obtenida con una lenta oxidación (150 días) de una solución 0.05 M FeCl<sub>2</sub> a pH 11.7 y temperatura ambiente, mientras que la figura 34 (derecha) magnetita octaédrica obtenida por oxidación de una solución 0.5 M FeSO<sub>4</sub> con KNO<sub>3</sub> en 1.43 M KOH a 90 °C.

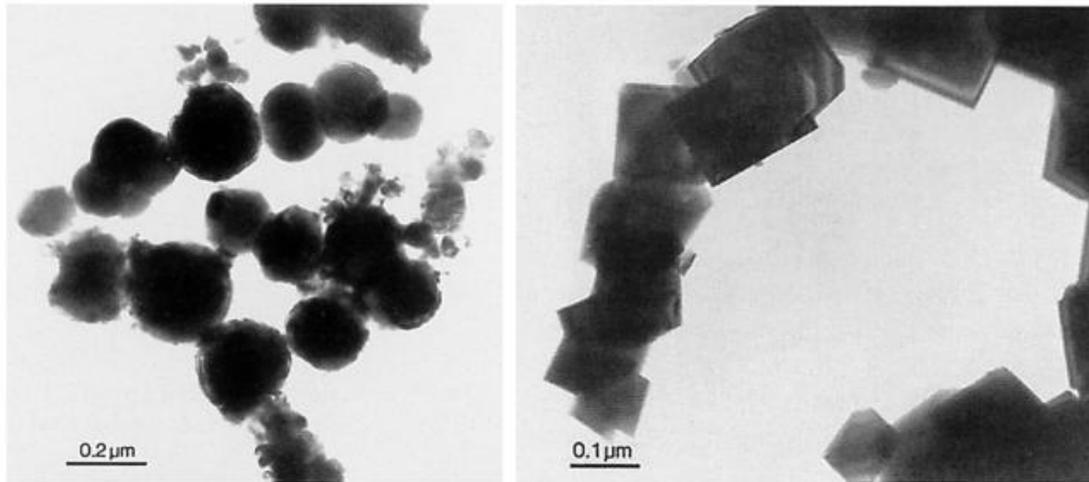


Figura 34. Izquierda: Cristales redondeados de magnetita obtenida con una lenta oxidación a temperatura ambiente. Derecha: Magnetita octaédrica obtenida por oxidación a 90 °C.

En la figura 35 puede verse una de las fotografías obtenidas en un microscopio electrónico de transmisión de alta resolución, HREM (STEM Philips CM20) de las partículas de magnetita sintetizadas se ha realizado un histograma midiendo el diámetro de aproximadamente 250 partículas <sup>[75]</sup>.

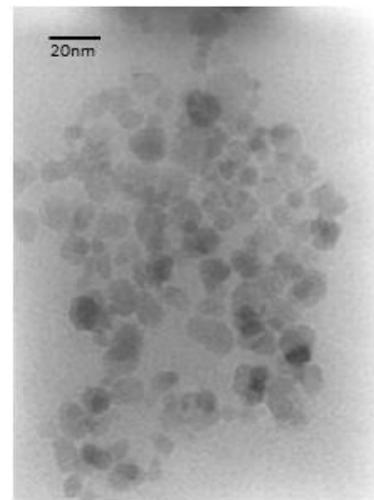


Figura 35. Fotografía HREM de partículas de magnetita sintetizada

El diámetro medio obtenido es de  $11.1 \pm 2.0$  nm, como muestra la figura 36. En dichas fotografías también se observa que la forma de las partículas es aproximadamente esférica.

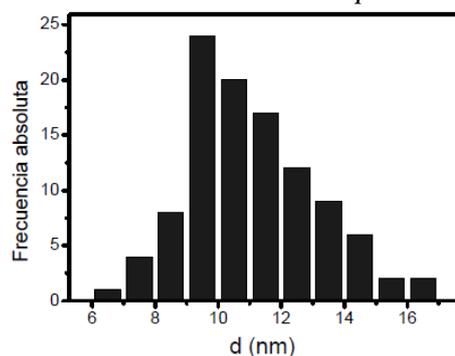


Figura 36. Distribución de diámetros de las partículas sintéticas de magnetita.

Superficie específica. También se determinó <sup>[75]</sup> la superficie específica de estas partículas de magnetita mediante absorción de  $N_2$ , por el método BET multipunto con un aparato Quantasorb Jr. Quantachrome (USA). El valor obtenido fue de  $42.2 \text{ m}^2/\text{g}$ .

**Estructura cristalina.** La estructura de las partículas de magnetita sintetizadas mediante coprecipitación química se determina mediante difracción de rayos X empleando el método de Debye-Scherrer. Se adjunta un ejemplo (figura 37) [74] en el que se ha utilizado un difractómetro Siemens D-5000 usando radiación  $\text{CuK}\alpha$  (25 mA, 35 kV) en un rango de medición de 10 a 80 grados angulares en la escala de  $2\theta$ , con una velocidad de barrido de 0.02 grados angulares por segundo. Se observa la correspondencia entre ambos espectros.

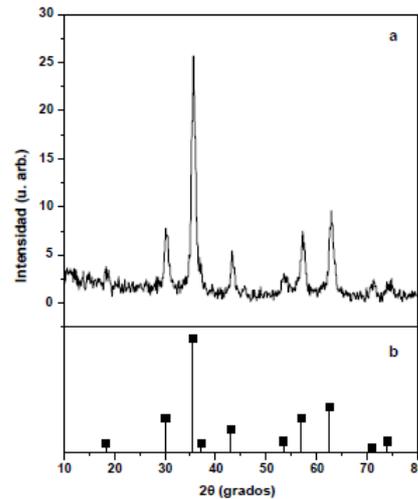


Figura 37. Difractograma de rayos X de las partículas de magnetita sintetizadas (a) y patrón de la magnetita (b).

Si el tamaño de partícula y la distribución del tamaño de los cristales de magnetita son similares, la morfología del cristal afecta coercitivamente en el orden: **esferas < cubos < octaedros** [3], alineados con el incremento del número de ejes magnéticos a lo largo de estas series de formas. Controlando las condiciones de precipitación y de ahí el tamaño de la partícula y su morfología, se pueden producir magnetitas con rangos coercitivos del orden de 2.4 a 20  $\text{kAm}^{-1}$ .

### 7.2.1 Síntesis Bacteriana de Magnetita Nanométrica

Las nanopartículas magnéticas, que son únicas debido a sus elementos estructurales y funcionales, tienen varias aplicaciones novedosas. La popularidad y practicidad de los materiales de nanopartículas crean la necesidad de un método de síntesis que produzca partículas de calidad en cantidades considerables. En 2005 Yeary, L.W., Ji-Won Moon, Love, L.J., Thompson, J.R. y colaboradores [76] describieron un método que utiliza síntesis bacteriana para crear nanopartículas de magnetita. Se incubó la cepa de la bacteria termofílica *Thermoanaerobacter ethanolicus* TOR-39 bajo condiciones anaeróbicas a 65°C durante dos semanas en una solución acuosa que contenía iones de Fe de un precursor de la magnetita (akaganeita). Las partículas de magnetita se formaron fuera de las células bacterianas. Se verificó el tamaño y morfología de la partícula mediante scattering de luz dinámica, difracción de rayos X y microscopía electrónica de transmisión. Los cristales tenían un tamaño medio de 45 nm. Se caracterizaron las propiedades magnéticas utilizando el magnetómetro SQUID, y se observó una magnetización de saturación de 77  $\text{emu/g}$  a 5K. Estos resultados son comparables a aquellos obtenidos de nanopartículas de magnetita sintetizada químicamente.

### 7.3 PRINCIPALES APLICACIONES

Las aplicaciones de la magnetita nanométrica son muy diversas, distinguiéndose entre aquellas de origen natural y/o biológico, y las aplicaciones que el ser humano ha realizado. A continuación se exponen un conjunto de ambos tipos <sup>[77]</sup>.

Un interesante tema entre biólogos y naturalistas ha sido el de los métodos de orientación de especies como aves, abejas, tortugas y peces durante sus procesos migratorios. Muchas clases de células y especies animales pueden sintetizar sus propios cristales de magnetita.

En efecto, una de las brújulas más pequeñas conocidas tiene lugar en las llamadas bacterias magnetotácticas, que contienen del orden de medio centenar de nanopartículas de magnetita, con diámetros de entre 20 y 150 nanómetros, que forman estructuras magnéticas de entre 1 y 3 micrómetros de largo <sup>[55] [78]</sup>. Estas estructuras se encuentran alineadas en el interior de las células por medio de la acción de una proteína. Es el caso por ejemplo de la *Magnetospirillum magnetotacticum* <sup>[79]</sup>.

Son amplios los estudios en este campo y múltiples los reportes de identificación de magnetita en los órganos de diversas especies <sup>[80] [81] [82]</sup>. En 1999 se informó el descubrimiento de un órgano que podría funcionar como una brújula magnética interna, una línea de cristales de magnetita en la nariz de una especie de trucha <sup>[83]</sup>.

Han sido de tal relevancia los hallazgos que hoy se cree que la magnetita es el material universal usado por todas las especies de animales que pueden orientarse, aunque persiste la creencia en muchos investigadores de que los animales podrían tener más de un órgano de navegación <sup>[84]</sup>.

Por otro lado, en el campo de la cultura y los estudios en paleontología también se ha sugerido otra posibilidad muy llamativa. Se trata de utilizar los resultados de estudios sobre magnetitas en bacterias halladas en excavaciones y cuevas para determinar condiciones ambientales, temperaturas e incluso direcciones de los campos magnéticos terrestres en épocas ancestrales. Esta posibilidad nace de un hecho interesante: dado su carácter magnético, la magnetita que se usaba como pigmento en las pinturas rupestres puede retener información precisa sobre la dirección del campo magnético terrestre en el momento en que se grabaron por medio del proceso de “congelamiento” de los momentos magnéticos del material durante el secado de las pinturas rupestres <sup>[85] [86] [87]</sup>.

Otro aspecto en el que la magnetita ha tenido un papel altamente relevante es el relacionado con estudios de óxidos de hierro en ambientes extraterrestres. Hay numerosos reportes en los que se devela la presencia de magnetita en Marte y otros lugares del sistema solar. Se ha encontrado incluso en el famoso meteorito ALH84001 y se ha relacionado su presencia con fósiles de microorganismos como indicativo posible de la presencia de vida en el pasado en Marte <sup>[88] [89] [90]</sup>.

Otra de las útiles aplicaciones actuales de los materiales ferrimagnéticos como la magnetita corresponde a los ferrofluidos. Dentro de los usos llamativos de los ferrofluidos se puede citar su empleo en ejes de rotación de discos duros, ayudando a mantener sellos de polvo en los ejes y previniendo desperfectos y mal funcionamiento por contaminantes. También se usan en sistemas de sonido como bocinas y parlantes, elementos que presentan vibración y transformación de impulsos eléctricos en ondas sonoras. Así mismo como componentes de amortiguamiento en motores, dado que ciertas piezas pueden quedar suspendidas en el

ferrofluido, con cuyo uso se evita la necesidad de soportes y se disminuyen los efectos de vibración por contactos directos entre partes del motor.

Una aplicación muy valiosa para la industria y los procesos de reciclaje consiste en la separación de metales de desperdicio. Actualmente se emplean grandes tanques llenos con ferrofluidos, ante todo basados en magnetita, en los que se sumergen los residuos de chatarra metálica de diferentes industrias. La separación de los diferentes metales se logra controlando la densidad (o la viscosidad) del ferrofluido por medio de la variación de la temperatura y la aplicación de campos magnéticos de intensidad variable. Con esto se logra que trozos de diferentes metales floten en instantes distintos (dependiendo de la densidad del ferrofluido), permitiendo su extracción y recuperación de manera diferenciada. También se ha implementado el uso de los ferrofluidos en sensores de aceleración o “acelerómetros”, dispositivos en los que se registran cambios en la posición de un imán que levita sobre el ferrofluido. Además presentan aplicaciones ópticas, en cuanto exhiben propiedades como birrefringencia magnética y dicroísmo; con ellos se diseñan interruptores o switches ópticos y obturadores. Una más es la posibilidad de usarlos en el campo de la seguridad bancaria, al emplearse en el desarrollo de tintas magnéticas, lectores y medios de grabación magnética.

Como aplicaciones más llamativas y sorprendentes en el creciente campo de la biomedicina podemos citar diversos estudios sobre el uso de nanopartículas de magnetita como agente de contraste en imágenes de resonancia magnética para efectos de diagnóstico médico <sup>[91] [92]</sup> y como agente de transporte y dosificación eficaz de medicamentos en lo que en inglés se conoce como “drug targeting delivery” <sup>[93]</sup>. En este caso el concepto consiste en generar sistemas “inteligentes” de dosificación con características especiales como la posibilidad de controlar el desprendimiento de una droga –o cualquier sustancia activa– por medio de la producción de un estímulo externo tal como un cambio de temperatura o de pH. Generalmente la estructura de la sustancia que se aplica es del tipo core-shell, consistente en un núcleo o core de material magnético como magnetita y una corteza de recubrimiento o shell de algún polímero biocompatible (termosensible y biodegradable) <sup>[94] [95] [96]</sup>.

Por sus características biocompatibles la magnetita es quizá uno de los óxidos más empleados en aplicaciones biomédicas. El rasgo de “termosensible” es muy importante si se requiere controlar la zona o lugar de descarga y la cantidad de medicamento de acuerdo con algún patrón específico de dosificación. Estos materiales “inteligentes” se pueden guiar a las ubicaciones deseadas por medio de campos magnéticos externos y luego generar un cambio de temperatura aplicando un campo magnético alterno en la zona afectada, de forma que se realice la liberación del medicamento. De esta manera puede incrementarse de forma sustancial la eficiencia en su transporte y al mismo tiempo disminuir efectos secundarios no deseados por aplicación indiscriminada en otras porciones de tejido vecino <sup>[97] [98] [99]</sup>.

En los últimos años se ha experimentado en usos biomédicos sobre animales en las que se emplean partículas con núcleos de óxidos con recubrimientos de azúcares para atacar algunos tipos de cáncer localizados. Así, estas partículas ingresan en las células cancerosas y mediante la aplicación de campos magnéticos alternos se induce hipertermia en la región afectada, aumentando la temperatura por unos minutos a unos 45 °C, debido a la fricción generada por el movimiento de las partículas, con la consecuente eliminación del tejido afectado <sup>[100]</sup>.

Cabe mencionar los trabajos más recientes del Grupo de Magnetismo del Centro Atómico de Bariloche en Argentina, en forma conjunta con la Facultad de Medicina de la Universidad de

Buenos Aires. Allí han avanzado en una técnica para tratar el problema de desprendimiento de retina. La idea es insertar un imán pequeño en la parte posterior del ojo afectado y luego inyectar una solución de nanopartículas de magnetita que resultan atraídas por el imán y en su trayectoria empujan la retina devolviéndola a su posición normal. Este es un tratamiento promisorio que ya se ha probado con éxito en animales; está en la fase inicial de la experimentación en ojos humanos.

Por otro lado, uno de los aspectos más recientes hacia los que se ha dirigido la atención es que la magnetita ha resultado un excelente candidato para usos en el campo de la espintrónica, debido al alto grado de polarización en una de las sub-bandas de espín en el nivel de Fermi a temperatura ambiente <sup>[101] [102] [103] [104]</sup>, brindando la posibilidad de obtener corrientes de espines altamente polarizadas. Este es un novedoso campo de la nanotecnología relacionado con la dinámica y procesos de transferencia de información basados en el transporte del espín (en lugar de la carga eléctrica) de un sistema para diseñar dispositivos funcionales. Entre las motivaciones para trabajar en el campo de la espintrónica está la creciente demanda pública por incrementar cada vez más la velocidad y disminuir el tamaño de los dispositivos electrónicos, además entre los potenciales beneficios se cuenta la posibilidad de desarrollar computadores en los que una única unidad se utilice como dispositivo de cómputo y almacenamiento, con menores niveles de consumo, o aun más, la posibilidad de diseñar dispositivos conceptualmente innovadores en los que se combinen las prestaciones funcionales conocidas con algunas otras novedosas.

## 7.4 PROPIEDADES GENERALES Y PECULIARIDADES

### 7.4.1 Carencias en las Fichas de Datos de Seguridad

A pesar de que la magnetita nanométrica se utiliza en numerosos campos de investigación, como se verá posteriormente, y ésta se puede adquirir por ejemplo en solución acuosa o de tolueno fácilmente en el mercado, en precios que oscilan entre los 150 a 350 €/5ml, es destacable la carencia de información respecto a sus propiedades tanto físicas y químicas como de estabilidad y reactividad, como se puede comprobar en la tabla 13. A continuación se lista algunos detalles de la ficha de datos de seguridad de una solución de nanopartículas magnetitas de 10 nm de tamaño medio y de 5 mg/mL en agua (Sigma-Aldrich, 2012) <sup>[105]</sup> con las siguientes propiedades:

concentration	5 mg/mL in H <sub>2</sub> O
magnetization	>45 emu/gat 4500 Oe
avg. part. size	10 nm
particle size	9-11 nm (TEM)
density	0.865 g/mL at 25 °C
<b>Composición/información sobre los componentes</b>	
Mezclas	
Sinónimos : Magnetic iron oxide nanocrystals	
Formula : Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	
Peso molecular : 231,53 g/mol	

<b>Componente</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Concentración</b>
Triiron tetraoxide No. CAS 1317-61-9 No. CE 215-277-5	Skin Irrit. 2; Eye Irrit. 2; STOT SE 3; H315, H319, H335; Xi, R36/37/38	< 10 %
<b>Propiedades Físicas y Químicas</b>		
Información sobre propiedades físicas y químicas básicas:		
a) Aspecto Estado físico: líquido		l) Densidad de vapor sin datos disponibles
b) Olor sin datos disponibles		m) Densidad relativa sin datos disponibles
c) Umbral olfativo sin datos disponibles		n) Solubilidad en agua sin datos disponibles
d) pH sin datos disponibles		o) Coeficiente de reparto n-octanol/agua sin datos disponibles
e) Punto de fusión/ punto de congelación sin datos disponibles		p) Temperatura de autoinflamación sin datos disponibles
f) Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición sin datos disponibles		q) Temperatura de descomposición sin datos disponibles
g) Punto de inflamación sin datos disponibles		r) Viscosidad sin datos disponibles
h) Tasa de evaporación sin datos disponibles		s) Propiedades explosivas sin datos disponibles
i) Inflamabilidad (sólido, gas) sin datos disponibles		t) Propiedades comburentes sin datos disponibles
j) Inflamabilidad superior/inferior o límites explosivos sin datos disponibles		Otra información de seguridad sin datos disponibles
k) Presión de vapor sin datos disponibles		
<b>Estabilidad y reactividad</b>		
Reactividad sin datos disponibles		Materiales incompatibles sin datos disponibles
Estabilidad química sin datos disponibles		Productos de descomposición peligrosos
Posibilidad de reacciones peligrosas sin datos disponibles		Otros productos de descomposición peligrosos sin datos disponibles
Condiciones que deben evitarse sin datos disponibles		

Tabla 13. SIGMA-ALDRICH sigma-aldrich.com. Ficha de Datos de Seguridad de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006. Versión 4.8 Fecha de revisión 13.12.2011. Fecha de impresión 10.06.2012

## 7.4.2 Diferencias en el Módulo de Young

**Módulo de Young E**, o de elasticidad longitudinal (Kester y col., 1999) <sup>[106]</sup>. Se obtiene el módulo de Young en función de la temperatura de oxidación para la magnetita  $Fe_3O_{4+\delta}$ . Como se presenta en la figura 38 éste primero decrece con la temperatura de oxidación, llegando a un mínimo a 150 °C, y obteniéndose el máximo a 230 °C. Y luego vuelve a decrecer hasta los 300 °C. Al principio de la oxidación el módulo de Young es de 180 GPa para la magnetita nanocrystalina, no existiendo una influencia significativa en presencia de Co o Mn a escala nanométrica.

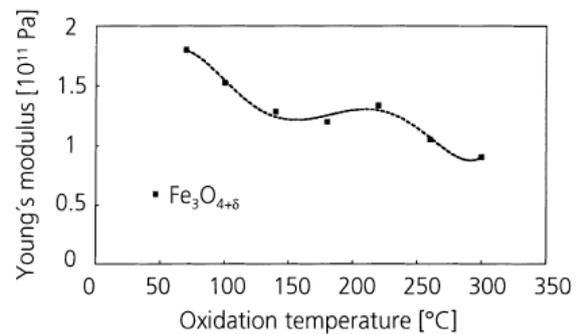


Figura 38. Módulo de Young para la magnetita  $Fe_3O_{4+\delta}$ .

Se ha de recordar del apartado 6.3.4. *Algunas Propiedades Básicas* que el módulo de Young de la magnetita cristalina simple  $Fe_3O_4$  tiene valores acotados de 208 a 248 GPa., según la dirección, disminuyendo en presencia de Co o Mn.

## 7.4.3 Diferencias de Pureza en Magnetitas Biogénicas

Según Joseph L. Kirschvink y colaboradores <sup>[1]</sup> los cristales magnetosomas tienen alta pureza química. Las magnetitas bacterianas tienden a ser de óxido de hierro bastante puro, con concentraciones no detectables del elemento titanio, que está presente típicamente en la magnetita producida geológicamente.

Por otra parte según Jon Dobson en su mini-revisión de 2001 <sup>[57]</sup> mientras que algunas partículas muestran bordes disueltos, otras mantienen las caras cristalinas originales y todas las partículas examinadas son químicamente puras, refiriéndose a la magnetita biogénica humana.

## 7.4.4 Diferencias Morfológicas en las Magnetitas Biogénicas

Los cristales de magnetita formados dentro de las vesículas magnetosómicas tienen, aparte de la pureza, dos características principales que las distinguen de las magnetitas formadas en procesos geológicos <sup>[1]</sup>:

- **Cristalización.** Las magnetitas inorgánicas normalmente son pequeños cristales octaédricos, a menudo con dislocaciones de mallado y otros defectos de cristal. Sin embargo los estudios utilizando el microscopio electrónico de alta resolución (HR-TEM) revelan que las magnetitas bacterianas son cristales casi perfectos, normalmente alargados en la dirección [111]. La elongación de los cristales biogénicos en la dirección [111] sirve para maximizar el momento magnético neto de la partícula y, presumiblemente, es el resultado de la selección natural de sus propiedades magnéticas.

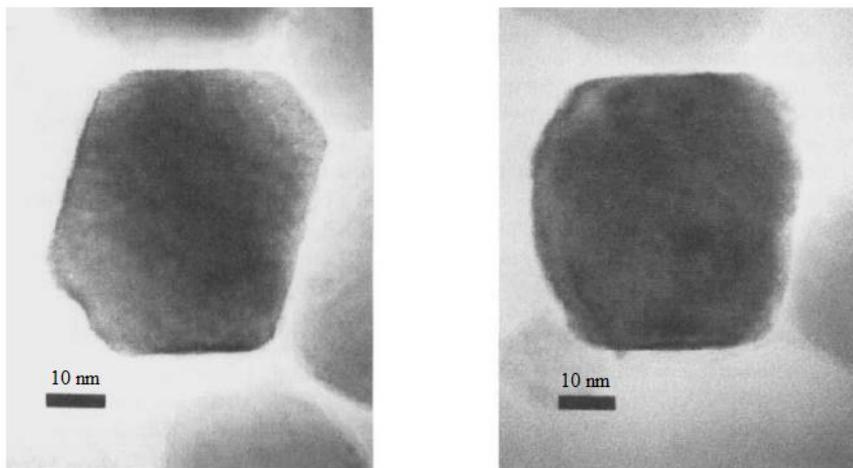
Morfológicamente las partículas de magnetita en el cuerpo humano <sup>[57]</sup> son similares a aquellas observadas en la bacteria magnetotáctica, y el análisis magnético de las muestras de masa de tejido indica que las partículas se presentan generalmente en grupos que interactúan magnéticamente.

- **Tamaño de cristal.** Las magnetitas inorgánicas tienden a tener distribuciones de tamaño según la normal-logarítmica. Sin embargo los cristales de magnetita bacteriana están restringidos a un tamaño de rango entre 30 a 500 nm. <sup>[1]</sup>  
En concreto, según Jing Yang y colaboradores <sup>[107]</sup>, los cristales de los magnetosomas son típicamente 35-120 nm de largo, que los hace de un solo dominio, y por consiguiente tienen el máximo momento magnético posible por unidad de volumen para una composición dada.

Según se indicó en el apartado 5.2 *Biomineralización de Magnetita en el Cuerpo Humano*, se han encontrado dos morfologías de cristal representativo de las partículas magnéticas extraídas. Los tamaños de grano eran bimodales:

- 62 de los 70 cristales medidos (88,57%) se encontraban en el rango de 10 a 70 nm, con un tamaño medio de 33.4nm (sesgado hacia mayores debido al procedimiento de extracción) y una amplia dispersión de  $\pm 15.2$  nm.
- 8 de los 70 cristales (11,43%) tenían tamaños 90 a 200 nm.

Las características citadas de las magnetitas biogénicas son compartidas por los cristales de magnetita extraídos de la bacteria magnetotáctica y del salmón, y por algunas de las extraídas posteriormente de tejidos blandos del cerebro humano <sup>[1]</sup>.



*Figura 39. Imágenes HR-TEM de la magnetita de dominio simple extraída de la bacteria *Aquaspirillum magnetotacticum* (izquierda), y del cerebelo humano (derecha).*

La figura 39 realiza una comparativa de imágenes de Microscopía Electrónica de Transición de Alta Resolución (HR-TEM) de magnetitas bacteriana y humana. Nótese las caras correctamente expresadas  $\{111\}$  cubriendo ambas terminaciones de la partícula. Ésta es una característica común de los cristales de magnetita formados dentro de vacuolas de membrana de bicapa-lípida, y se desconoce la magnetita geológica de este tamaño.

Sin embargo también hay diferencias: La imagen HR-TEM de la magnetita bacteriana muestra varias series de bordes de mallado del cristal (finas líneas) que corresponden a tres series de planos  $\{111\}$  espaciados una distancia de 4.8 Å. En el cristal de origen humano hay

un patrón de bordes de mallado de dos  $\{111\}$  intersecando y uno  $\{11\bar{2}\}$  ( $4.8 \text{ \AA}$  y  $2.9 \text{ \AA}$  respectivamente), con un alargamiento de la partícula en la dirección  $[111]$ .

En una revisión <sup>[108]</sup> de 2008 sobre la formación de la magnetita bacteriana y su aplicación, Atsushi Arakaki y colaboradores proponen la siguiente morfología (cubo-octaedro) de cristal a partir de las imágenes de microscopía electrónica de transición realizadas de cristales de magnetita extraídos de la bacteria *Magnetospirillum magneticum* AMB-1 (figura 40):

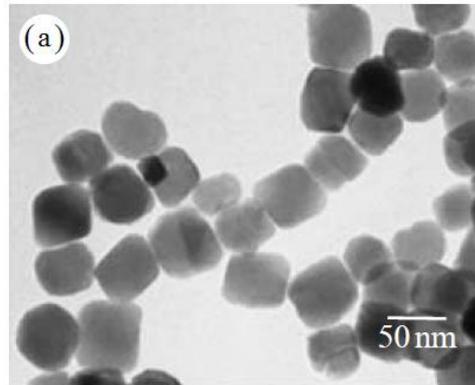
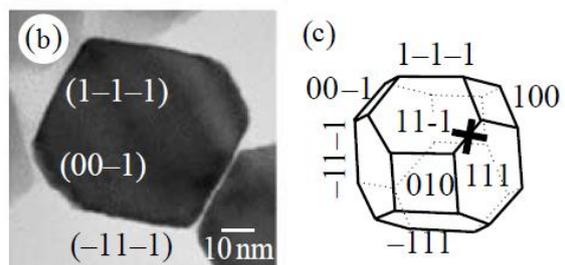


Figura 40. Magnetita extraída de *M. magneticum* AMB-1. a) Imágenes TEM; b) Imágenes HRTEM observadas en el eje de la zona  $[110]$ ; c) Morfología ideal de las partículas magnéticas.



## 7.5 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

### 7.5.1 Permitividad, Conductividad y Tangente de Pérdidas a 300K

La permitividad eléctrica compleja ( $\epsilon_r = \epsilon'_r - i \epsilon''_r$ ) se ha medido <sup>[109]</sup> para magnetitas de tamaño nanométrico (muestras homogéneas de 30 nm de tamaño) a 300 K para un intervalo de frecuencias comprendido entre 100 Hz y 1 MHz.

Como puede verse en la figura 41a la parte real de la permitividad se mantiene prácticamente constante en gran parte del intervalo de frecuencias aumentando para frecuencias bajas y disminuyendo fuertemente para frecuencias altas.

Concretamente otros estudios de 2010 realizados por Kong y colaboradores <sup>[110]</sup> arrojan datos muy inferiores de permitividad eléctrica  $\epsilon'_r$  en magnetitas de tamaño nanométrico (entre 20 y 50 nm) a temperatura ambiente (~300K) y a altas frecuencias (1 – 20 GHz), de valores entre 4.9 - 4.8.

La conductividad de la magnetita nanométrica permanece constante en la figura 41b, aumentando ligeramente al aumentar la frecuencia al final del intervalo.

No obstante, estos resultados de conductividad son muy inferiores a los obtenidos para magnetitas micrométricas:  $10^2 - 10^3 (\Omega\text{cm})^{-1}$  <sup>[3]</sup>, y más concretamente  $2.5 \cdot 10^3 \text{ S/m}$  <sup>[67]</sup> a 300K, frente a  $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ S/m}$  en magnetitas nanométricas <sup>[109]</sup>, lo que evidencia que la magnetita pasa a ser un semiconductor en tamaños nanométricos.

En la figura 41c la tangente de pérdidas disminuye casi linealmente al aumentar la frecuencia, estabilizándose a frecuencias elevadas.

Los estudios mencionados anteriormente <sup>[59]</sup> arrojan datos muy similares para la tangente de pérdidas en magnetitas de tamaño nanométrico (entre 20 y 50 nm) a temperatura ambiente (~300K) y a altas frecuencias (1 – 20 GHz), de valores entre 0.34 - 0.22.

De los gráficos representados anteriormente se pueden tomar los siguientes valores (tabla 14) de permitividad, conductividad y tangente de pérdidas para diferentes órdenes de magnitud de frecuencias:

$\nu$ (Hz)	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
$\epsilon'_r$	400	200	200	200	100
$\sigma (\Omega\text{m})^{-1}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$6.0 \cdot 10^{-3}$
$\tan\delta$	700	100	10	1	0.7

Tabla 14. Valores extraídos de permitividad, conductividad y tangente de pérdidas de la magnetita nanométrica para diferentes frecuencias.

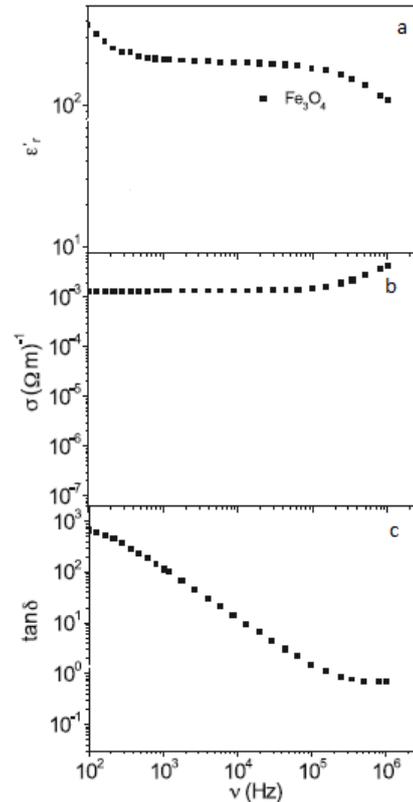


Figura 41. Representaciones de las variaciones de la parte real de la permitividad (41a), la conductividad (41b) y la tangente de pérdidas eléctricas (41c) al variar la frecuencia de  $10^2$  a  $10^6$  Hz, a una temperatura constante de 300K, utilizando en ambos ejes escalas logarítmicas.

### 7.5.2 Variación de la Permitividad con la Temperatura a 1Mz

Estudios <sup>[109]</sup> publicados en 2010 (figura 42) muestran la variación de la constante dieléctrica (parte real de la permitividad) de muestras homogéneas de magnetita de 30 nm de tamaño al variar la temperatura de 200K a 300K para una frecuencia de 1 MHz.

Como se observa, al tomar escala logarítmica en la representación de la constante dieléctrica, el valor aumenta de forma lineal con la temperatura, mostrando a 300K un valor próximo a **100**. No obstante este valor sólo es válido para la frecuencia de 1MHz, y habrá que tener en cuenta otros valores dependiendo de la frecuencia.

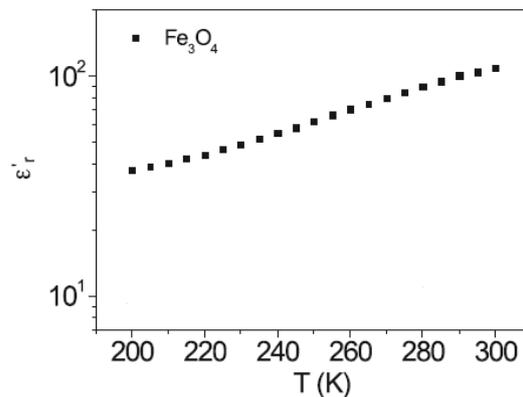


Figura 42. Variación de la constante dieléctrica en función de la temperatura medida a 1 MHz

### 7.5.3 Variación de la Permitividad con la Temperatura a 0 y 0.5 T a 3906Hz

La figura 43 muestra la variación de la constante dieléctrica (parte real de la permitividad) de muestras homogéneas de magnetita de 30 nm de tamaño al variar la temperatura de 200K a 300K para una frecuencia de 3906 Hz con campos magnéticos nulo y de 0.5 teslas <sup>[109]</sup>.

Como puede verse el valor de la constante dieléctrica aumenta al aumentar el campo magnético de forma progresiva entre los 200 y los 230K y luego, entre 230K y 300K, mantiene un cierto paralelismo respecto a los valores sin campo magnético.

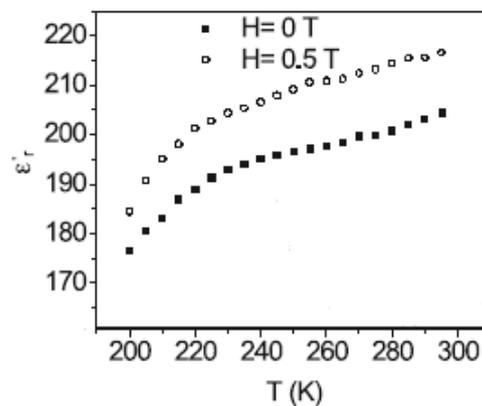


Figura 43. Variación de la constante dieléctrica con la temperatura e influencia de campo magnético para  $Fe_3O_4$  a 3906 Hz.

### 7.5.4 Variación de la Permitividad con la Frecuencia a 0 y 0.5 T

La figura 44 muestra la representación de las variaciones de la parte real de la permitividad de las muestras de magnetita de 30 nm al variar la frecuencia de  $10^2$  a  $10^6$  Hz, a una temperatura constante de 300K, al someter al material a un campo magnético de 0 y 0.5 teslas <sup>[109]</sup>.

Como puede verse en dicha figura las variaciones respecto a la existencia o no de campo magnético son mínimas.

Cabe destacar el detalle del efecto magnetocapacitivo MC en la figura 44, que mide precisamente la diferencia relativa porcentual de la permitividad en presencia de un campo magnético:

$$MC (\%) = 100 \cdot (\epsilon'_{r(H=0.5T)} - \epsilon'_{r(H=0T)}) / \epsilon'_{r(H=0T)}$$

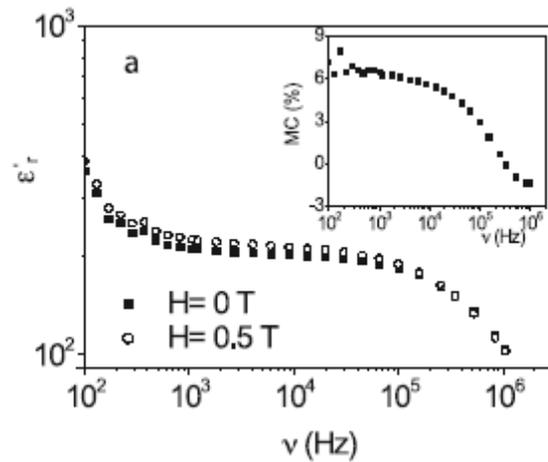


Figura 44. Variación de la constante dieléctrica con la frecuencia e influencia de campo magnético para  $Fe_3O_4$  medido a  $T= 300 K$

## 7.6 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

### 7.6.1 Permeabilidad Magnética

En la práctica, considerando que las máximas susceptibilidades, aún de los materiales magnéticos, raras veces son mayores de 0.2 c.g.s.u.. Por lo tanto los valores de la permeabilidad son apreciablemente mayores que la unidad sólo en casos muy raros. Por ello el efecto de  $\mu$  es muy ligero en general, excepto en la magnetita concentrada ( $\mu = 5$ ) <sup>[70]</sup>.

En la figura 45 se puede ver la curva de primera imanación para una distribución de magnetitas nanométricas entre 6 y 17 nm con una media de 11,1 nm de grosor, obtenida con un dispositivo DSM-8 Magneto/susceptometer (Francia) [75]. Los datos de la curva de magnetización se pueden ajustar a la ley de Fröhlisch-Kennelly:

$$M = \frac{\chi_i H}{1 + \frac{\chi_i}{M_S} H}$$

Donde  $\chi_i$  es la susceptibilidad magnética inicial ( $H \rightarrow 0$ ) y  $M_S$  es la magnetización de saturación. Los valores correspondientes al mejor ajuste de los datos de la figura a la ecuación anterior son:

$$M_S = 448 \pm 9 \text{ kA/m} \quad (1 \text{ kA/m} = 4\pi \text{ Oe} \text{ -Oersted})$$

$$\chi_i = 9.03 \pm 0.12$$

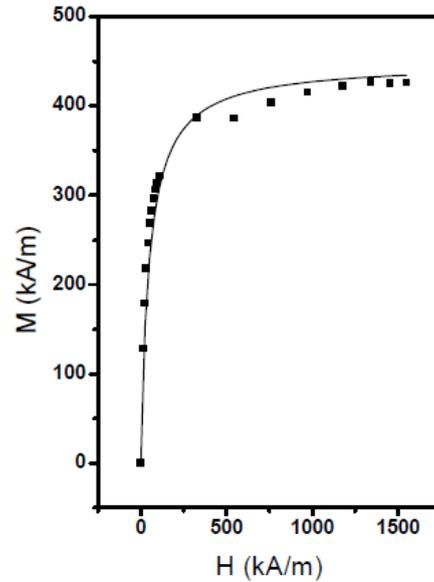


Figura 45. Curva de primera imanación de las partículas de magnetita sintetizadas. La línea corresponde a la ecuación de Fröhlisch-Kennelly.

De este modo la permeabilidad magnética inicial de las partículas de magnetita es:

$$\mu_{p,m}^i = 1 + \chi_i = \mathbf{10.03} \pm 0.12$$

Que es un valor muy superior al  $\mu = 5$  arriba indicado para magnetita no nanométrica concentrada.

### 7.6.2 Ciclo de Histéresis de la Magnética

La magnetita en polvo tiene un comportamiento típico de un material superparamagnético, es decir, con cero coercitividad. La figura 46 muestra el gráfico del ciclo de histéresis de la magnetita en polvo con una magnetización específica de saturación de 73.2 emu/g [74].

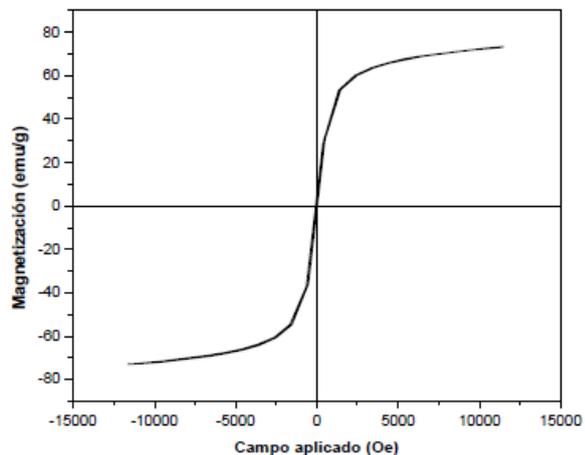


Figura 46. Ciclo de histéresis de la magnetita en polvo

La figura 47 recoge la variación de la magnetización de muestras de magnetita en función del campo magnético, medida a temperatura ambiente <sup>[109]</sup>. Como se puede observar, la magnetización se incrementa al aumentar la intensidad del campo magnético aplicado hasta alcanzar prácticamente el punto de saturación cerca del campo máximo de  $\pm 1$  Tesla.

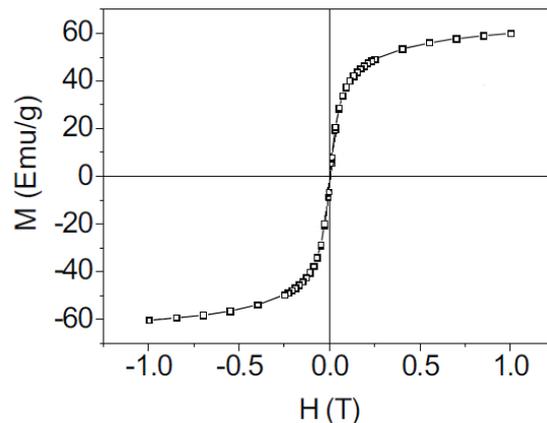


Figura 47. Ciclo de magnetización de partículas de magnetita de unos 30 nm a temperatura ambiente medida entre  $\pm 750$  Oe.

Cabe señalar que la magnetización máxima de estas muestras <sup>[109]</sup> es inferior a los valores encontrados en la bibliografía ( $\sim 80$  emu/g) <sup>[71]</sup>, como es de esperar para partículas con un tamaño menor que el del monodominio ( $\sim 70$  nm).

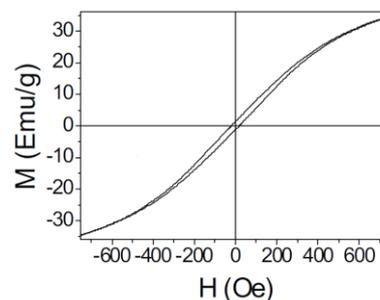


Figura 48. Detalle del ciclo de magnetización de magnetita nanométrica de 30 nm.

Además, y como se puede ver en el detalle de la Figura 48, las partículas de magnetita aún muestran un pequeño campo coercitivo ( $H_C$ ) de unos 20 Oe para muestras con un tamaño de partícula de unos 30 nm.

Por otro lado mientras diferentes simulaciones realizadas en 1995 <sup>[111]</sup> (figura 49) de magnetitas muestran un endurecimiento magnético al disminuir el tamaño de grano desde  $1\mu\text{m}$  hasta 100 nm, la figura 48 revela una magnetización suave para magnetitas de 30nm, lo que en principio parece incoherente, salvo si se considera que mientras en la figura 49 van aumentando las propiedades de dominio simple conforme disminuye el tamaño de grano, en la figura 49 con un tamaño de grano de magnetita no biogénica de 30nm, se considera que el material ha sobrepasado el rango de magneto estable de dominio simple y tendría propiedades superparamagnéticas.

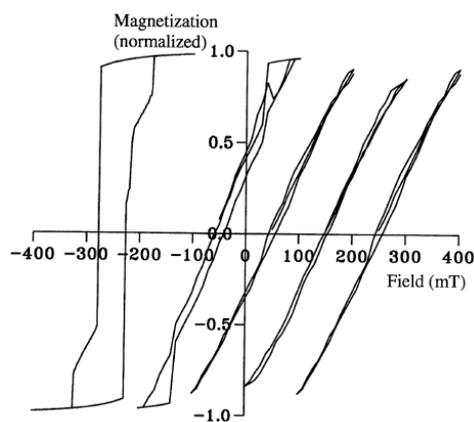


Figura 49. Simulación de ciclos de histéresis de magnetita cúbica al aplicar un campo magnético en el eje de fácil magnetización con diferentes tamaños (de izquierda a derecha  $0.1\mu\text{m}$ ,  $0.2\mu\text{m}$ ,  $0.5\mu\text{m}$ ,  $0.7\mu\text{m}$ ,  $1.0\mu\text{m}$ )

Sin embargo los datos de permeabilidad magnética de magnetitas de tamaño nanométrico (entre 20 y 50 nm) también se ha medido en unidades c.g.s. <sup>[110]</sup> a temperatura ambiente ( $\sim 300\text{K}$ ) y a altas frecuencias (1 – 20 GHz), obteniéndose un valor de  $\mu = 1.40$ , lo que

infiere la pérdida del comportamiento magnético a altas frecuencias, frente a los datos anteriores.

### 7.6.3 Variación de las Propiedades Magnéticas en Función del Tamaño del Cristal

Las magnetitas inorgánicas tienen propiedades magnéticas desde superparamagnetismo (en partículas menores de 6 nm y hasta de 30 nm <sup>[75]</sup>) a de dominio múltiple en función del tamaño.

En la síntesis de la magnetita por precipitación mezclando soluciones de  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  y 7 M de  $\text{NH}_4\text{OH}$  a 80-90 °C se puede controlar el tamaño de la partícula variando la concentración del cloruro ferroso para obtener partículas del rango de 5 a 100 nm. <sup>[112]</sup>.

En la tabla 15 se muestran los resultados experimentales a 5 K de cómo varían el volumen de celda unitaria, la temperatura de transición magnética y la magnetización de saturación de la magnetita para distintas muestras con tamaño desde 6.4 a 91.4 nm.

Sample	Solution Concen. (%)	Particle Size nm	Unit Cell Volume (Å) <sup>3</sup>	T <sub>(M)</sub> °C	M <sub>s</sub> μ <sub>B</sub> /fu
M28	0.025	6.4	592.7	465	1.1
M32	0.05	10.8	587.7	535	2.6
M34	0.60	37.8	586.5	566	2.3
M37	3.00	91.4	586.4	568	2.0

Tabla 15. Efecto del tamaño de la partícula sobre el volumen de la celda unitaria, temperatura de transición magnética y magnetización de saturación de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

A dicha temperatura la magnetización es máxima para las partículas de 10 nm. Se concluye <sup>[112]</sup> que la magnetización de saturación es máxima para nanopartículas del orden de 10 nm., como puede observarse en la figura 50.

Se ha de tener en cuenta que mientras que las muestras M28 y M32 están en fase sencilla, las M34 y M37, de mayor tamaño de grano, contienen  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  como fase de impureza (12 y 7% respectivamente).

Recientes investigaciones (CSIC 2012) <sup>[113]</sup> han demostrado que la magnetita conserva su orden ferrimagnético (imanación) estable con un espesor de tan sólo 1 nm y al menos hasta 200 °C, lo que supone un avance para su posible uso en espintrónica, tecnología relacionada con el almacenamiento y el tratamiento de la información. Podría tratarse del imán (óxido de hierro imantado) más delgado estudiado hasta la fecha.

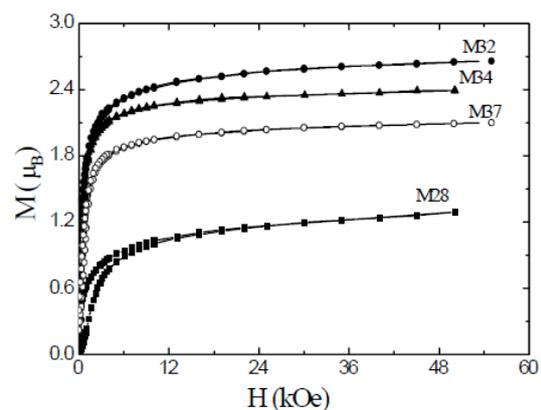


Figura 50. Magnetización (M) en función del campo (H) aplicado a 5K para diferentes muestras de magnetita nanométrica.

Para el caso de magnetitas biogénicas, es decir, aquellas cuyo origen se encuentra en los seres vivos, a continuación se lista algunas características magnéticas de las magnetitas biogénicas en función de su origen y tamaño:

- Los cristales de magnetita bacteriana están restringidos a un tamaño de rango entre 30 a 500 nm, con formas que los confinan a un campo de estabilidad magnética de dominio simple.
- Los cristales de menor tamaño ( $< 30$  nm) tienen un dominio simple también, pero no presentan en general estabilidad magnética debido a la agitación térmica y presentan un comportamiento superparamagnético, es decir, no permanentemente magnéticos a temperatura ambiente.
- Los cristales de mayor tamaño ( $> 500$  nm) muestran estructuras de dominio múltiple.
- La mayoría de los cristales de magnetosomas documentados en la literatura tienen un rango de tamaño de 35–120 nm<sup>[114]</sup>, y están por encima de la franja de tamaño SP/SSD (SP = superparamagnética; SSD = magneto estable de dominio simple) para granos individuales de magnetita cúbica, esto es 25–30 nm<sup>[115]</sup>, aunque hay documentación, por ejemplo Arató y colaboradores en 2005<sup>[116]</sup>, de cristales de magnetosomas que caen bien dentro de la región superparamagnética, ya que se reportó cristales de magnetosomas de menos de 20 nm de longitud<sup>[117]</sup>.

Según se representa en la figura 51, se ha combinado los estudios realizados<sup>[117]</sup> para el límite de la zona SP a SSD (tiempo de relajación  $t_m=60s$  y cadena alineada en configuración  $\langle 111 \rangle$ ) con los modelos de Muxworthy & Williams<sup>[118]</sup> para el tamaño de transición de SD a MD (multidominios).

Utilizando el formato de Butler & Banerjee de 1975<sup>[119]</sup>, se muestra la longitud (eje longitudinal), mejor que el volumen, frente a los diferentes ratios axiales de elongación del grano (AR; ejes transversal/longitudinal o anchura/longitud) para cristales individuales paralelepípedos de magnetitas.

El uso de la longitud facilita la comparación con Butler & Banerjee<sup>[119]</sup>, pero la figura es algo más compleja de entender debido a que al movernos horizontalmente sobre la figura, el volumen del grano cambia, esto es, existe un cambio tanto de forma como de volumen que contribuyen a la banda crítica. De ahí que el tamaño de bloqueo crece con la elongación. Para granos que no interactúan existe un rango de tamaño de grano marcado por  $d_{min}$  y  $d_{max}$ , donde ambos estados, SD y MD, son posibles.

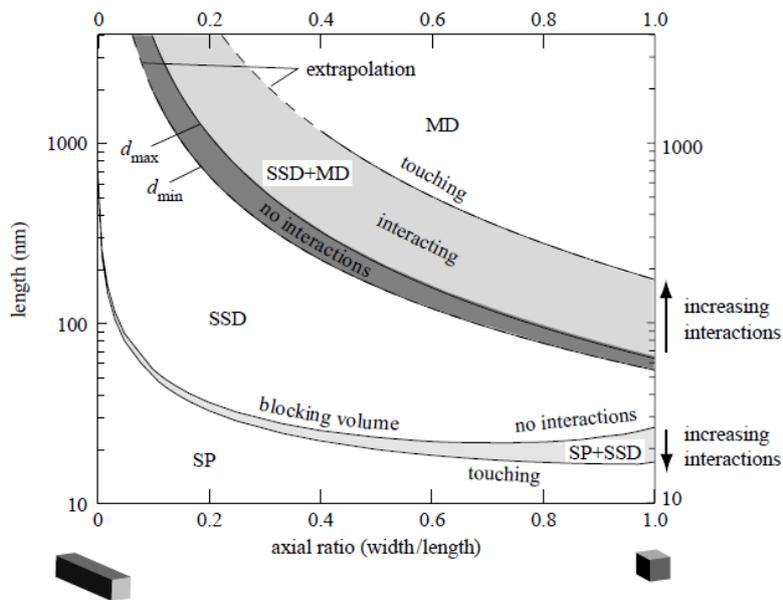


Figura 51. Rangos SSD para granos individuales y cadenas de cristales de magnetosomas interactuando entre sí.

## 8 VALORACIÓN Y CONCLUSIÓN

### 8.1 LA EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SERES VIVOS

Durante décadas los científicos han intentado explicar cómo interacciona el campo electromagnético con un sistema biológico, aún cuando éste no tenga energía suficiente como para ionizar un átomo o inducir calor. Sólo en el caso de la radiación ionizante se evidencia rotundo acuerdo entre los científicos acerca de los graves efectos biológicos que provoca su exposición.

**Sistemas biológicos y campos electromagnéticos.** Las bases de la interacción electromagnética con un medio material fueron resueltas hace más de un siglo a través de las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, la aplicación de estas bases a un sistema biológico es muy complicada debido a la extrema complejidad y múltiples niveles de organización de los organismos vivos, además de la gran variedad de propiedades eléctricas de los tejidos biológicos.

Hoy día no existe la menor duda de que los campos electromagnéticos afectan a los sistemas biológicos, ni de que los sistemas biológicos sean capaces de generar campos electromagnéticos. Las investigaciones en este sentido incluye ya están enfocadas en si los sistemas biológicos son capaces de utilizar los campos electromagnéticos que generan con algún fin específico.

No obstante muchas simulaciones sobre los efectos de los CEM en la cabeza humana la simplifican aproximándola a un dieléctrico con pérdidas, pasando por alto cuestiones ya no sólo características de los diferentes tejidos sino otras de tipo funcional como la termorregulación o la emisión de ondas cerebrales.

**Efectos térmicos, no térmicos y atérmicos.** Cuando la termorregulación hace que la temperatura no aumente, cualquier efecto biológico se dice que es no térmico, lo que realmente es un efecto térmico enmascarado, en el que el organismo lucha por mantener su temperatura, ya que la propia termorregulación es su efecto térmico.

Como comparativa supongamos el caso de un vehículo con control de velocidad que se programa a velocidad constante: al subir una carretera inclinada la velocidad se mantiene invariable, pero el motor trabaja más, el consumo se dispara y los neumáticos sufren mayor desgaste. Si el vehículo pierde la velocidad establecida es porque es incapaz de mantenerla, a pesar de sus recursos de regulación cinética.

Cuando en un ser vivo aumenta la temperatura tan sólo 1 °C se dice que tiene fiebre, y lo que se espera como causa probable es un golpe de calor o una enfermedad infecciosa. Puesto que los efectos más evidentes de los campos electromagnéticos sobre los seres vivos son los térmicos y, a diferencia con la materia inerte existen procesos termorreguladores, se evidencia la necesidad de investigarlos en profundidad, cómo actúan frente a un efecto térmico provocado por un campo electromagnético, y más aún, si son afectados funcionalmente por el propio campo electromagnético. En este punto juega un papel fundamental el hipotálamo.

## 8.2 EFECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

**Radiofrecuencias (RF) y Microondas (MW).** En relación a los efectos biológicos de las radiofrecuencias y microondas muchos de los estudios experimentales publicados en revistas y reuniones científicas presentan el inconveniente de no proporcionar suficientes detalles sobre las condiciones de exposición. La mayoría de los efectos citados en la literatura no se relacionan directamente con enfermedades humanas o su relación es cuanto menos dudosa debido a la falta de explicación y conocimiento de los mecanismos de interacción. En cualquier caso es esencial entender que la falta de evidencia sobre posibles efectos adversos para la salud no es igual a la evidencia de que no exista ningún efecto. De la misma forma, es imposible demostrar la inocuidad del campo electromagnético, por lo que la pregunta que debemos hacernos no es si la radiación electromagnética es inocua para la salud, sino bajo qué niveles la ciencia no ha encontrado ningún efecto nocivo y por tanto, a la luz del conocimiento científico, no producen efectos nocivos en la salud.

El balance de los estudios disponibles no propone que los campos de RF/MW causen cáncer u otras enfermedades, aunque sí exista alguna evidencia sobre efectos en las funciones biológicas, incluyendo las cerebrales, que puedan ser inducidas por radiación de RF/MW a niveles comparables con los asociados a los habituales de la telefonía móvil.

Hasta el momento, sin embargo, no hay evidencia de que esos efectos biológicos desarrollen riesgos para la salud. No se sabe con absoluta seguridad cuáles son los efectos de exposición prolongada a campos de RF/MW ni si son acumulativos.

El resultado de un efecto acumulativo es sustancial en los efectos sobre la salud. La larga exposición acumulativa es el producto del tiempo y la exposición personal media, como el efecto de la radiación ionizante, por ejemplo los rayos X, que es acumulativo.

Merece la pena destacar que los campos de RF/MW modulados (mezclados con una señal de menor frecuencia) o pulsados (transmisión a intervalos de tiempo muy pequeños) parece ser que producen más efectos.

Claramente se necesitan más estudios y análisis, bien realizados, independientes e imparciales y así conseguir un avance significativo en el conocimiento del comportamiento los sistemas vivos que además debe de ser difundido al público en general. Todo esto implica la necesidad de invertir esfuerzos para poder realizar evaluaciones precisas de las fuentes de campo electromagnético más habituales en nuestro entorno.

Finalmente, podemos decir que los efectos de la radiación de RF/MW son sólo una amenaza si la dosis de radiación es muy alta. En el caso de la mayoría de las fuentes de RF/MW de nuestro entorno habitual, especialmente las correspondientes a la telefonía móvil, la dosis no es alta. La detección de respuestas biológicas a exposiciones de bajo nivel requiere el diseño de procedimientos de investigación muy sensibles lo que puede crear una gran posibilidad de producir resultados contradictorios. Estas investigaciones dependen fuertemente de la habilidad y experiencia de los investigadores involucrados, siendo necesario que los resultados que se obtengan sean comparados con investigaciones bien estructuradas de laboratorios independientes de equipos expertos.

Conflicto de intereses. En 2010 <sup>[120]</sup> Lotte E. van Nierop, Martin Röösl, Matthias Egger y Anke Hussa publicaron una actualización de una revisión sobre 59 estudios sobre los efectos biológicos producidos por los móviles publicados entre 1995 y 2005, y se detectó que los estudios financiados por las industrias eran los menos propensos a reportar efectos de la radiación de los móviles sobre la salud. Se actualizó con los estudios realizados de 2005 a 2009 extrayendo financiaciones, conflictos de interés y resultados. De los 75 estudios adicionales el 12% fueron financiados por la industria, el 44% por las administraciones y el 19% de financiación mixta, no estando clara la financiación en el 25% de ellos. Los hallazgos previos fueron confirmados: los estudios financiados por la industria volvieron a ser los más reacios a reportar efectos en sus resultados. Es interesante que la proporción de estudios indicando efectos declinó en el período de 1995 a 2009, independientemente de los fondos de financiación. Las fuentes de financiación y los conflictos de intereses son importantes en este campo de investigación.

**Frecuencias bajas y muy bajas (ELF).** En conjunto, de la literatura disponible sobre efectos biológicos de campos de ELF, no se deducen resultados adversos sobre la salud. Esto significa que la preocupación pública sobre estos efectos no está basada en pruebas científicamente establecidas.

Por otro lado, establecer tales pruebas es muy difícil. La falta de conexión entre los resultados experimentales (in vitro o in vivo), datos en humanos y los mecanismos de interacción complica en gran manera las conclusiones. Dada la complejidad de los organismos vivos, es muy difícil aplicar el conocimiento de esas fuentes.

Los estudios celulares dan un conocimiento de las alteraciones fisiológicas potenciales a nivel celular básico debido a la exposición y otros efectos, siendo necesario evaluar los efectos sobre la salud humana de la exposición prolongada a campos de ELF.

Sin embargo, existe cierta dificultad para extrapolar evidencias de los estudios en animales a otras especies, aunque es plausible aceptar que ciertos efectos ocurridos en una especie incrementa el indicio de que se puedan producir efectos similares en otras especies. Muchas de las evidencias experimentales justifican moderadamente una relación causal entre la exposición a campos de ELF ambientales y cambios en la función biológica. Sin embargo, la falta de consistencia debilita la creencia de que esta asociación sea realmente debida a los campos de ELF. Por tanto, no es posible, de estudios experimentales, demostrar la existencia de ese riesgo.

Sólo es posible probar que, bajo ciertas condiciones de exposición, existe un efecto. Para conseguir una posible prueba, se necesitará mejor control de la exposición a los campos de ELF, incluyendo efectos transitorios, incrementar los estudios en animales y simular de forma más fiable los efectos en humanos reales y, asimismo, incrementar los estudios en personas con incidencia directa en los efectos que podrían llevar a alteraciones de la salud.

Aunque la evaluación de riesgos está generalmente basada en datos experimentales de sistemas biológicos, es necesaria la consideración de posibles mecanismos, por dos razones básicas:

- Los datos experimentales de efectos de campos de radiofrecuencia son inconsistentes y fragmentados en muchos aspectos, de manera que una comprensión de los mecanismos biofísicos sobre los efectos estudiados puede ayudar a racionalizar y entender los datos.
- Es necesario extrapolar datos desde una condición de exposición a otras y, para una

extrapolación fiable, es necesario un entendimiento de los mecanismos. Por lo tanto, el conocimiento de los mecanismos de interacción es esencial para identificar procesos apropiados de dosimetría, para predecir las relaciones dosis-respuesta, para diseñar mejores experimentos y para servir de base para determinar si ciertos niveles de exposición provocan daños en los tejidos biológicos.

Respecto a la exposición a radiación de ELF ocurre a distancias mucho menores que la longitud de onda. Esto tiene importantes implicaciones, porque bajo tales condiciones se tratan como componentes independientes. La situación es sustancialmente diferente de la que ocurre en la radiación a campos de RF/MW en donde los campos eléctrico y magnético están indisolublemente unidos. Esta es la razón por la que a estas frecuencias las investigaciones se han centrado en los efectos de un campo o el otro.

### **8.3 PRESENCIA DE MAGNETITA EN EL CUERPO HUMANO**

La magnetita biogénica se ha encontrado en muchos organismos desde bacterias a vertebrados superiores, incluyendo el cuerpo humano. Donde se ha estudiado más ampliamente forma cristales de dominio simple (permanentemente magnético) dentro de vacuolas de bicapa-lípida denominadas magnetosomas, a menudo alineadas.

El hallazgo de cristales de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) en el cerebro humano ha sido uno de los descubrimientos mineralogénicos más importantes de la última década. J. L. Kirschvink hizo pública en 1992 -mediante su ya trabajo clásico Magnetite biomineralization in the human brain- la presencia en el cerebro humano de minerales de la familia de la magnetita-maghemita, cuyas morfologías y estructuras se asemejan a los precipitados por bacterias magnetotácticas. No obstante posteriormente y a través del espectroscopio de Mössbauer se demostró que la maghemita ( $\text{Fe}_{2,67}\text{O}_4$  o bien  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) no era sino uno de sus productos típicos de oxidación. Esta oxidación probablemente ocurrió durante el proceso de extracción de las muestras.

Se ha estimado que en la mayoría de los tejidos del cerebro humano hay un mínimo de cinco millones de cristales de magnetita por gramo, y más de 100 millones de cristales por gramo para la pía y dura. Si a esto le añadimos que los cristales de magnetita se encuentran en el cerebro constituyendo grupos de entre 50 y 100 partículas, parece evidente concluir que todo cerebro humano está caracterizado por unas determinadas propiedades magnéticas. Como era de esperar, el descubrimiento de la magnetita en el cerebro ha hecho que la controversia sobre los efectos generados por la exposición continuada de los seres vivos a determinados campos eléctricos, magnéticos o electromagnéticos se abriera de nuevo.

Desde otra perspectiva de investigación se sabe, por ejemplo, que existe un sentido magnético en varias especies y que la base de este sentido, y su papel determinante en los desplazamientos migratorios, se basa en la existencia de materiales ferri y ferromagnéticos en el cerebro.

El descubrimiento de la magnetita del cerebro no sólo ha supuesto un marco común de investigación donde convergen distintas disciplinas científicas (medicina, mineralogía física, etcétera), sino que ha abierto nuevas líneas para el estudio de los procesos de biomineralización y para comprender mejor determinados tipos de interacciones entre el cerebro humano y el medio que nos rodea.

Existen indicadores de que también hay en los tejidos partículas magnéticas agrupadas más grandes. El origen de éstas permanece sin conocerse, habiéndose incluso afirmado recientemente que prácticamente todo el hierro de un cerebro humano normal está en la ferritina. Aunque de forma general el Fe se encontraría bajo la forma de ferrihidrita ( $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ), se ha reportado que incluso dentro de la ferritina podrían crecer partículas de magnetita y también a partir de núcleos con ferritina seguida de una disfunción celular. Más concretamente, análisis recientes de microscopía electrónica de la ferritina de tejidos afectados de la enfermedad de Alzheimer indican que se pueden formar óxidos de hierro dentro de la proteína relacionada con la patogénesis.

Existen varios caminos que conducen a la neurodegeneración. Uno de estos es el daño por estrés oxidativo a través de la química de Fenton. La ferritina puede jugar un papel importante en este proceso, particularmente cuando las mutaciones o su desregulación conducen a incapacitar la retención del hierro dentro de la ferritina. El hierro que no es retenido puede comenzar la producción de radicales libres en cantidades excesivas. En la enfermedad de Parkinson (PD) y en neuroferritinopatía hay un defecto de cadenas L de ferritina, que puede disminuir en concentración (PD) o ser defectuosa (neuroferritinopatía), conduciendo hacia un exceso de hierro lábil. En la enfermedad de Alzheimer (AD) hay un suave incremento del ratio de las cadenas de ferritina H/L. En la parálisis supranuclear progresiva (PSP) parece ser muy diferente y caracterizada por un incremento importante de la concentración total de hierro en el tejido afectado. Desafortunadamente no se conocen datos hasta la fecha sobre cualquier cambio en la ferritina que pueda concernir tanto al ratio de las cadenas de ferritina H/L como a la estructura del núcleo de hierro.

## 8.4 LA MAGNETITA MINERAL

La magnetita, mineral conocido desde la antigüedad debido a su propiedad magnética, como óxido de hierro, es un material común en la naturaleza.

Su magnetismo y comportamiento como semiconductor eléctrico viene derivado de la estructura de sus átomos constituyentes, y está perfectamente definida tanto su estructura molecular  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  como la de su celda unitaria cúbica centrada en caras constituida por 8 moléculas. Habitualmente cristaliza formando octaedros, si bien puede presentarse formando cubos e incluso formas más redondeadas y alargadas, dependiendo del tamaño y proceso de síntesis del cristal.

Hoy en día existen diferentes métodos artificiales para sintetizar magnetita nanométrica, siendo los más comunes los de coprecipitación química. Aunque la magnetita estequiométrica es  $\text{Fe}^{\text{II}} / \text{Fe}^{\text{III}} = 0.5$ , frecuentemente la magnetita no es estequiométrica debido a un submallado de  $\text{Fe}^{\text{III}}$  con deficiencia de catión. El hierro divalente puede también ser reemplazado parcial o completamente por otros iones divalentes como el  $\text{Mn}^{\text{II}}$ ,  $\text{Ni}^{\text{II}}$ ,  $\text{Cu}^{\text{II}}$ ,  $\text{Co}^{\text{II}}$ ,  $\text{Zn}^{\text{II}}$  y  $\text{Ca}^{\text{II}}$ .

En cuanto a las propiedades eléctricas, la magnetita es un semiconductor, aunque por debajo de los 119K (temperatura de transición de Verwey) es aislante. Conforme aumenta la temperatura, aumenta también la conductividad hasta aproximadamente los 400K, luego disminuye y finalmente se estabiliza a los 859K con un valor próximo a los  $200 (\Omega \text{ cm})^{-1}$ . La conductividad presenta anisotropía por debajo de la temperatura de transición e isotropía por

encima de la misma, es decir, a temperatura ambiente es isotrópica.

Respecto a las propiedades magnéticas, la magnetita es paramagnética a temperaturas superiores a la Temperatura de Curie ( $T_c = 859 \text{ }^\circ\text{K}$ ), siendo ferrimagnética por debajo de la misma. En la propiedad ferrimagnética aunque existe antiparalelismo, tiene un momento magnético resultante. Además existe una dirección preferente de magnetización a lo largo de la dirección [111], presentando anisotropía a temperatura ambiente. La susceptibilidad magnética de la magnetita varía con la temperatura tomando valores próximos a 0,02 para 900K y 0,01 para 1000K, es decir valores positivos pero pequeños comparados con la unidad.

## 8.5 LA MAGNETITA NANOMÉTRICA

La génesis biológica de la magnetita, es decir la magnetita generada por los seres vivos, no la fabrica sino a escala nanométrica, y sus propiedades, aún en estudio, pueden diferir de la magnetita de mayor tamaño. Por ejemplo el módulo de elasticidad o de Young de la magnetita es de 225 GPa frente a los sólo 180 GPa para la magnetita nanocristalina, su grado de pureza es mayor en nanocristales biogénicos, y su comportamiento magnético puede pasar de ser ferrimagnético a superparamagnético (una combinación de ferromagnético y paramagnético) cuando su tamaño es nanométrico.

La magnetita nanométrica tiene como principales ventajas frente a otras nanopartículas magnéticas, su alta magnetización de saturación y estabilidad química, a las que hay que añadir sus características biocompatibles, lo que convierte en un verdadero foco de atención en investigación, aflorando multitud de aplicaciones tanto a nivel industrial como tecnológico y de biomedicina, y pudiendo surgir nuevos retos como la investigación de la interacción de los campos electromagnéticos y la magnetita nanométrica ubicada en los seres vivos.

En cuanto a las propiedades eléctricas de la magnetita de tamaño nanométrico, se ha tabulado las variaciones de la permitividad, la conductividad y la tangente de pérdidas eléctricas a 330K de 100 Hz y 1 MHz. La permitividad también varía con la temperatura, y con el campo magnético, habiéndose documentado varios trabajos al respecto.

Finalmente en el capítulo dedicado a las propiedades magnéticas se ha evidenciado por ejemplo que mientras que la bibliografía aporta valores para la permeabilidad magnética de  $\mu = 5$  para magnetita no nanométrica concentrada, para una distribución de magnetitas nanométricas entre 6 y 17 nm con una media de 11,1 nm de grosor la permeabilidad magnética inicial registrada es de 10,03.

Es interesante comprobar que incluso a nivel nanométrico la magnetita tiene propiedades que varían en función del tamaño de la partícula, como la magnetización de saturación, habiéndose comprobado en 2012 que la magnetita nanométrica puede mantener estables sus propiedades magnéticas incluso en partículas de tan sólo 1 nm de grosor.

No obstante otros ciclos de histéresis reportados indican que mientras que la magnetita en polvo tiene un comportamiento superparamagnético, las partículas de magnetita aún muestran un pequeño campo coercitivo ( $H_C$ ) de unos 20 Oe ( $1\text{kA/m}=4\pi \text{ Oe}$  -Oersted) para muestras con un tamaño de partícula de unos 30 nm. Por otro lado diferentes simulaciones de magnetitas

muestran un endurecimiento magnético al disminuir el tamaño de grano desde 1  $\mu\text{m}$  hasta 100 nm.

La explicación de lo anterior podría ser el aumento de las propiedades de dominio simple conforme disminuye el tamaño de grano hasta que con un tamaño de grano de magnetita no biogénica de 30nm, el material habría sobrepasado el rango de magneto estable de dominio simple y tendría propiedades superparamagnéticas.

La clasificación del comportamiento magnético de las nanopartículas de magnetita sintética difiere también de la reportada para magnetitas nanométricas de origen biogénico, en que un cristal de proporción cúbica (no alargado) de 70 nm es SSD+MD (SSD = magneto estable de dominio simple, MD = multidominio), mientras que los de 30 nm sigue siendo de dominio simple. Así pues el origen de la magnetita también puede ser un parámetro diferencial de algunas de sus propiedades magnéticas.



## 9 FUTUROS TRABAJOS

En este trabajo de investigación se ha partido de tres áreas diferentes:

- En primer lugar se atiende a los campos electromagnéticos, sus efectos biológicos y los métodos de compensación de calor de que dispone el cuerpo humano. Este área es interesante porque indica cómo pueden afectar los campos electromagnéticos a los seres vivos, aún sin tenerse en cuenta la presencia de materiales magnéticos.

Este área tiene un amplio abanico de investigaciones pendientes. Cada vez son más las aplicaciones que se realizan y que emiten campos electromagnéticos con diferentes objetivos. En el campo de las directrices en cuanto a radiación es previsible que con el avance de las investigaciones, éstas lleguen a tener en cuenta no sólo los efectos térmicos y de variaciones conductuales en los animales, sino otros efectos de carácter fisiológico. Por ejemplo, el hecho de que el cuerpo humano no aumente su temperatura frente a un campo electromagnético no significa que el hipotálamo no esté trabajando para que así sea.

- Por otro lado y en segundo lugar, los estudios de Kirschvink en 1992 demostraron la presencia de magnetita en el ser humano. Este punto se ha desarrollado partiendo de la magnetita que se haya podido detectar en otros organismos y finaliza presentando los últimos descubrimientos acerca de las conexiones entre las concentraciones de hierro en el cuerpo humano y las enfermedades neurodegenerativas.

Respecto a este área queda mucho por investigar. Sirvan de ejemplo la definición de las relaciones exactas entre la ferritina y la biomineralización de la magnetita en el cuerpo humano, o la definición de las funciones de la magnetita en el cerebro. Sin embargo es un área que a priori escapa a una investigación basada en las tecnologías industriales.

- En tercer lugar este trabajo recopila las características generales y propiedades eléctricas y magnéticas de la magnetita. Sin embargo al constatar el tamaño nanométrico de los cristales de magnetita encontrados en el cuerpo humano, se hace necesaria la investigación de las nanopartículas magnéticas y más concretamente, de las características y propiedades eléctricas y magnéticas de la magnetita de tamaño nanométrico.

Dentro de este área de investigación se encausa el presente trabajo de investigación dentro de las tecnologías industriales, a través de la simulación del comportamiento de la magnetita nanométrica de características similares a las detectadas en el cuerpo humano. No obstante para ello sería necesario todavía resolver algunas definiciones como son:

- Se han extraído los valores de permitividad, conductividad y tangente de pérdidas eléctricas de la magnetita nanométrica para diferentes órdenes de frecuencias (de  $10^2$  a  $10^6$  Hz). Sin embargo queda pendiente su homólogo en cuanto a propiedades magnéticas (permeabilidad magnética y tangente de pérdidas).
- Se ha de revisar si hay otras propiedades que puedan afectar al comportamiento de la magnetita nanométrica. A modo de ejemplos la magnetoestricción o inclusive comportamientos derivados de la teoría cuántica. Es probable que la respuesta sea negativa precisamente en estos dos casos: por ejemplo un cristal cúbico de unos 30 nm de arista estaría conteniendo unas 36 celdas unitarias de magnetita por arista, lo que lleva a 46.656 celdas dentro del cristal. Puesto que cada celda contiene 8 moléculas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  finalmente se tendrían unos 2.612.736 átomos de Fe y O, cifra muy superior a la habitual en teoría

cuántica. No obstante una revisión más completa de éstas y otras propiedades es aconsejable.

- Es muy interesante definir el comportamiento térmico de la magnetita nanométrica. Por ejemplo su calor específico, junto con las propiedades eléctricas y magnéticas, podrían concluir en una simulación frente a un campo electromagnético en la generación de un aumento de temperatura de orden nanométrico (nanoclima). Si esto se comprobara en primer lugar y luego se confirmara, podría tener serias repercusiones en cuanto a la concepción actual de los efectos de los campos electromagnéticos sobre los seres vivos, ya que un aumento de temperatura en un espacio nanométrico podría catalizar reacciones bioquímicas no previstas.

## 10 REFERENCIAS

- [1] “Magnetite in Human Tissues: A Mechanism for the Biological Effects of Weak ELF Magnetic Fields”. Joseph L. Kirschvink, Atsuko Kobayashi-Kirschvink, Juan C. Diaz-Ricci, and Steven J. Kirschvink. *Bioelectromagnetics Supplement 1*: 101-103 (1992) Wiley-Liss, Inc.
- [2] “Magnetite biomineralization in human brain”. Joseph L. Kirschvink, Atsuko Kobayashi-Kirschvink, and Barbara J. Woodford. *Biophysics*: Vol. 89 pp. 7683-7687 (August 1992).
- [3] “The Iron Oxides. Structures, properties, reactions, occurrences and uses”. R.M. Cornell, U. Schwertmann. Wiley-Vch Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim. ISBN: 3-527-30274-3 (2003)
- [4] *Apuntes de “Interacción de la materia con los campos electromagnéticos”*. Alejandro Díaz, Juan Monzó, Antonio Lozano, Antonio Martínez. Universidad Politécnica de Cartagena (2012).
- [5] [http://www.who.int/m/topicgroups/who\\_organization/en/index.html](http://www.who.int/m/topicgroups/who_organization/en/index.html). Organización Mundial de la Salud
- [6] <http://www.bioingenieria.edu.ar/academica/catedras/radiaciones/Descargas/> “Radiaciones no ionizantes”. (2009)
- [7] *Apuntes de “Difracción de Rayos X”*. José Pérez Pérez. Universidad Politécnica de Cartagena (2012).
- [8] <http://www.monografias.com/trabajos30/higiene-trabajo/higiene-trabajo5.shtml> “Radiaciones ionizantes y no ionizantes”. G. Pichardo Villalón, J.A. Sánchez Vázquez, J.C. Sánchez Gómez. Miembros del grupo ACRI. © Monografias.com S.A.
- [9] *Apuntes de “Efectos Biológicos del Campo Electromagnético”*. Miguel Ángel Solano Vérez y Juan Sáiz Ipiña. Grupo de Electromagnetismo de la Universidad de Cantabria (2010).
- [10] “Electromagnetic cellular interactions”. Michal Cifra, Jeremy Z. Fields, Ashkan Farhadi. Elsevier. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* (2010)
- [11] “Local Tissue Temperature Increase of a Generic Implant Compared to the Basic Restrictions Defined in Safety Guidelines”. Adamos Kyriakou, Andreas Christ, Esra Neufeld, and Niels Kuster. *Bioelectromagnetics* 33:366-374 (2012)
- [12] “La medida de la radiación y la evaluación de sus efectos”. [http://www.sievert-system.org/WebMasters/sp/contenu\\_mesure.html](http://www.sievert-system.org/WebMasters/sp/contenu_mesure.html) 2013
- [13] “An introduction to human biophoton emission”. *Forsch Komplementärmed Klass Naturheilkd* 12, 77e83. Van Wijk, R., Van Wijk, E.P.A., 2005.

- [14] “Anatomic characterization of human ultra-weak photon emission with a moveable photomultiplier and CCD imaging”. Van Wijk, R., Kobayashi, M., Van Wijk, E., 2006. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 83 (1), 69e76.
- [15] “Measurement of bioluminescence and thermal fields from humans: comparison of three techniques for imaging biofields”. Creath, K., Schwartz, G., 2006.. In: *Proceedings of SPIE*, vol. 6285, p. 628505.
- [16] “Spontaneous ultraweak photon emission from human hands is time dependent”. Cifra, M., Van Wijk, E., Koch, H., Bosman, S., Van Wijk, R., 2007.. *Radioengineering* 16 (2), 15e19.
- [17] “Imaging of ultraweak spontaneous photon emission from human body displaying diurnal rhythm”. Kobayashi, M., Kikuchi, D., Okamura, H., 2009. *PLoS ONE* 4 (7), e6256.
- [18] “Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells”. Henry Lai, Narendra P. Singh. Article first published online: 19 OCT 2005. DOI: 10.1002/bem.2250160309. Copyright © 1995 Wiley-Liss, Inc., A Wiley Company. Issue *Bioelectromagnetics Bioelectromagnetics Volume 16, Issue 3*, pages 207–210, 1995
- [19] “Long-term, low-level microwave irradiation of rats”. Chou CK, Guy AW, Knnz LL, Johnson RB, Crowley JJ, Krupp JH. *Bioelectromagnetics* 1992; 13:469-96.
- [20] “Whole-body exposure to 2.45 GHz electromagnetic fields does not alter radial-maze performance in rats”. Jean-Christophe Cassel, Brigitte Cosquer, Rodrigue Galani, Niels Kuster. Elsevier. *Behavior Brain Research* (2004).
- [21] “Short-term memory in mice is affected by mobile phone radiation. M.P. Ntzouni, A. Stamatakis, F. Stylianopoulou, L.H. Margaritis. Elsevier. *Patopsicología* (2011)
- [22] “Effects of Cell-Phone Radiation on the Electroencephalographic Spectra of Epileptic Patients”. Jose Luis Relova, Sonia Pertega, Jose Antonio Vilar, Elena Lopez-Martin, Manuel Peleteiro y Francisco Ares-Pena. *Telecommunications Health & Safety* (2010).
- [23] “Effects of radiofrequency field on the blood-brain barrier: A systematic review from 2005 to 2009”. Anne Perrin, Celine Cretallaz, Alice Collin, Christine Amourette y Catherine Yardin. Elsevier (2010).
- [24] “Electromagnetic fields (GSM 1800) do not alter blood-brain barrier permeability to sucrose in models in vitro with high barrier tightness”. H. Franke, et al. *Bioelectromagnetics* 26 (2005) 529–535.
- [25] “Effects of Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) electromagnetic fields on the blood-brain barrier in vitro”. H. Franke, et al. *Radiat. Res.* 164 (2005) 258–269.
- [26] “Electromagnetic interference in the permeability of saquinavir across the blood-brain barrier using nanoparticulate carriers”. Y.C. Kuo, C.Y. Kuo, *Int. J. Pharm.* 351 (2008) 271–281.

- [27] “Histopathological examinations of rat brains after long-term exposure to GSM-900 mobile phone radiation”. G. Grafstrom, et al. *Brain Res. Bull.* 5 (2008) 257–263.
- [28] “Blood-brain barrier and electromagnetic fields: effects of scopolamine methylbromide on working memory after whole-body exposure to 2.45 GHz microwaves in rats”. B. Cosquer, et al. *Behav. Brain Res.* 161 (2005) 229–237.
- [29] “Neonatal mouse brain exposure to mobile telephony and effect on blood-brain barrier permeability”. J.W. Finnie, et al. *Pathology* 38 (2006) 262–263.
- [30] “Effect of mobile telephony on blood-brain barrier permeability in the fetal mouse brain”. J.W. Finnie, et al. *Pathology* 38 (2006) 63–65.
- [31] “Mobile phone radiation and the developing brain: behavioral and morphological effects in juvenile rats”. T. Kumlin, et al. *Radiat. Res.* 168 (2007) 471–479.
- [32] “Lack of effects of 1439 MHz electromagnetic near field exposure on the blood-brain barrier in immature and young rats”. M. Kuribayashi, et al. *Bioelectromagnetics* 26 (2005) 578–588.
- [33] “Effects of head-only exposure of rats to GSM-900 on blood-brain barrier permeability and neuronal degeneration”. F. Poullietier de Gannes, et al. *Radiat. Res.* 172 (2009) 359–367.
- [34] “Blood-brain barrier permeability and nerve cell damage in rat brain 14 and 28 days after exposure to microwaves from GSM mobile phones”. J.L. Eberhardt, et al. *Electromagn. Biol. Med.* 27 (2008) 215–229.
- [35] Effects of 915 MHz electromagnetic-field radiation in TEM cell on the blood-brain barrier and neurons in the rat brain”. H. Masuda, et al. “*Radiat. Res.* 172 (2009) 66–73.
- [36] “Radiofrequency-radiation exposure does not induce detectable leakage of albumin across the blood-brain barrier”. J.M. McQuade, et al. *Radiat. Res.* 171 (2009) 615–621.
- [37] “Increased blood-brain barrier permeability in mammalian brain 7 days after exposure to the radiation from a GSM-900 mobile phone”. H. Nittby, et al. *Pathophysiology* 16 (2009) 103–112.
- [38] “Exposure to an 890-MHz mobile phone-like signal and serum levels of S100B and transthyretin in volunteers”. F. Söderqvist, et al. *Toxicol. Lett.* 189 (2009) 63–66.
- [39] “Mobile and cordless telephones, serum transthyretin and the blood-cerebrospinal fluid barrier: a cross-sectional study”. F. Söderqvist, et al. *Environ. Health* 8 (2009) 19.
- [40] “Induced electric currents in models of man and rodents from 60 Hz magnetic fields”. Xi, W.; Stuchly, M.A.; Gandhi, O.P. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on.* Nov. 1994

- [41] “Influence of pulsed magnetic fields on calcium binding in isolated brain tissue”. Bawin, S.M., Lin-Liu, S., Adey, W.Ross. and Pilla, A.A. *Electrochemical Society, 157th Annual Meeting, St. Louis, MO, May 1980. Abstract No. 461.*
- [42] “Weak, amplitude-modulated radiofrequency fields modify  $45\text{Ca}^{2+}$  release from cat cerebral cortex”. Bawin, S.M., Adey, W.Ross, Lawrence, A.F., and Bassen, H.I. *Proc. Bioelectromagnetics Soc. 2nd Annual Meeting, San Antonio, TX, September 1980.*
- [43] “Effect of ELF modulated 450 MHz field on calcium efflux from rat synaptosomes”. Lin-Liu, S., and Adey, W.Ross. *Ibid, Abstract No. 35.*
- [44] “Sinusoidal 50Hz magnetic fields depress rat pineal NAT activity and serum melatonin. Role of duration and intensity of exposure”. Selmaoui B., Touitou Y. (1995). *Life Sci* 58:1539-1549.
- [45] “Electric power use and breast cancer: a hypothesis”. Stevens RG (1987) *Am J Epidemiol* 125: 556–61.
- [46] “Distribution of the excitatory amino acid receptor subunits GluR2(4) in monkey hippocampus and colocalization with subunits GluR5-7 and NMDAR1”. SJ Siegel, WG Janssen, JW Tullai, SW Rogers, T Moran, SF Heinemann and JH Morrison. *The Journal of Neuroscience, 1 April 1995, 15(4):2707-2719*
- [47] “Multi-night exposure to 60 Hz magnetic fields: Effects on melatonin and its enzymatic metabolite”. Graham, C., Cook, M. R., Sastre, A., Riffle, D. W. and Gerkovich, M. M. (2000),. *Journal of Pineal Research, 28: 1–8. doi: 10.1034/j.1600-079x.2000.280101.x*
- [48] “Is the  $\text{Ca}^{2+}$  transport of human erythrocytes influenced by ELF- and MF-electromagnetic fields?”. Glaser, R.; Michalsky, M.; Schramek, R. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics, Volume 47, Number 2, December 1998 , pp. 311-318(8). Elsevier*
- [49] “Genotoxic, carcinogenic and teratogenic effects of electromagnetic fields. Introduction and overview”. J. Juutilainen, S. Lang. Elsevier. *Mutation Research* (1997).
- [50] “Apuntes de Homeostasis y Temperatura”. Erika Acuña P y Ma. José Espinoza A. Colegio Hispano Americano. Padres Escolapios. Dpto. Ciencias. 2012.
- [51] “Respuesta termorregulatoria de usuario en la banda de GSM 1800”. Miguel A. García Fernández, Juan F. Valenzuela Valdés, David Sánchez Hernández. Departamento de Tecnologías de la Información y Comunicaciones. Universidad Politécnica de Cartagena (2009)
- [52] “On Biomineralization.” Lowenstam HA, Weinel- S (1989). New York: Oxford University Press, 324 PP.
- [53] “Magnetite in denticle capping in recent chitons (polyplacophora)”. Lowenstam HA (1962). *Geol Soc Am Bull* 73:435--438.

- [54] “Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms: A New Biomagnetism.” Nesson MH, Lowenstam HA (1985): *Biomineralization processes of the radula teeth of chitons*. In Kirschvink JL, Jones DS, MacFadden BJ (eds). New York: Plenum Press, pp 333-363.
- [55] “Magnetotactic bacteria.” Blakemore RP (1975). *Science* 190:377-379.
- [56] “Diminutos cristales de magnetita en el cerebro”. Jesús Martínez-Frías, doctor en Ciencias Geológicas y colaborador científico del CSIC. *El País* (22 de enero de 1997).
- [57] “Nanoscale biogenic iron oxides and neurodegenerative disease”. Jon Dobson. *Federation of European Biochemical Societies. Elsevier Science B.V.* (2001).
- [58] “Increased iron (III) and total iron content in post mortem substantia nigra of parkinsonian brain”. Sofic E, Riederer P, Heinsen H, Beckmann H, Reynolds GP, Hebenstreit G, et al. *J Neural Transm* 1988; 74:199e205.
- [59] “Ferritin as an important player in neurodegeneration”. Andrzej Friedman, Paolo Arosio, Dario Finazzi, Dariusz Koziorowski, Jolanta Galazka-Friedman. *Parkinsonism and Related Disorders* 17 (2011) 423-430. Elsevier.
- [60] “The iron redox and hydrolysis chemistry of the ferritins”. Bou-Abdallah F. *Biochim Biophys Acta* 1800; 2010:719e31.
- [61] Floor, E. (2000) *Cell. Mol. Biol.* 46, 709-720.
- [62] “A quantitative analysis of isoferritins in select regions of aged, parkinsonian, and Alzheimer’s diseased brains”. Connor JR, Snyder BS, Arosio P, Loeffler DA, LeWitt P. *J Neurochem* 1995; 65:717e24.
- [63] “Magnetita” <http://www.uned.es/cristamine/fichas/magnetita/magnetita.htm>
- [64] “Magnetita” <http://www.regmurcia.com>
- [65] “Magnetite” <http://webmineral.com/data/Magnetite.shtml>. Last updated on 12/31/2009. David Barthelmy
- [66] [http://www.unican.es/Centros/minas/exposicion/sistemas/detalle\\_mineral.asp?id=160](http://www.unican.es/Centros/minas/exposicion/sistemas/detalle_mineral.asp?id=160)
- [67] “Complementos de química inorgánica y analítica: problemas del primer cuatrimestre” Departamento de Química Inorgánica Analítica y Química Física 2008. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- [68] “Magnetic and Electric Properties of Magnetite at Low Temperatures” B.A. Calhoun. 1953. Technical Report 68.. Laboratory for Insulation Research. Massachusetts Institute of Technology.
- [69] “Advanced Engineering Electromagnetics”. Constantine A. Balanis. 1989. John Wiley & Sons. Arizona State University.

- [70] "Problemas de ingeniería de puesta a tierra". Miguel De La Vega Ortega. 2002. Editorial Limusa S.A.de C.V. Grupo Noriega Editores.
- [71] "Ferrites. Physical Properties of Ferromagnetic Oxides in Relation to their Technical Applications". J. Smith, H.P.J. Wijn. 1959. Wiley, New York (EEUU).
- [72] "Introduction to nanoscience and nanotechnology". Chris Binns. 2010 A. John Wiley & Sons, Inc., Publication, Hoboken. New Jersey.
- [73] "Progress in Nanoparticles Research" Editor Chris Thomas Fresiras. ISBN 978-1-60456-705-2. Nova Science Publishers, Inc. (New York) 2008. Chapter 2. Preparation of Magnetic Nanoparticles and Application to Isolation of Cells and Extraction of Biomacromolecules from Biological Samples.
- [74] "Síntesis y propiedades de ferrofluidos de magnetita". L.A. García Celda y col. Superficies y Vacío, marzo 2003, año/vol. 16, n° 001. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales A.C.
- [75] "Fluidos magnéticos compuestos por partículas submicrométricas ferri y paramagnéticas". Tesis doctoral. Facultad de Ciencias – Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada. Cecilia Galindo González. Marzo 2008. Editorial de la Universidad de Granada.
- [76] "Magnetic properties of biosynthesized magnetite nanoparticles". Ji-Won Moon; Love, L.J.; Thompson, J.R.; Rawn, C.J.; Phelps, T.J. *Magnetics, IEEE Transactions on* (2005).
- [77] "Una mirada al estudio y las aplicaciones tecnológicas y biomédicas de la magnetita". Johan Mazo-Zuluaga. *Revista EIA n° 16* (2011) Escuela de Ingeniería de Antioquía, Medellín (Colombia).
- [78] "Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-LiMo<sub>3</sub>Se<sub>3</sub> nanoparticle clusters as superparamagnetic nanocompasses". Osterloh, Frank E.; Hiramatsu, Hiroki; Dumas, R. K. and Liu, Kai (2005). *Langmuir*, vol. 21, No. 21, pp. 9709-9713.
- [79] "Cobalt ferrite nanocrystals: Out-performing magnetotactic bacteria". Prozorov, Tanya; Palo, Pierre; Wang, Lijun; Nilsen-Hamilton, Marit; Jones, DeAnna; Orr, Daniel; Mallapragada, Surya K.; Narasimhan, Balaji; Canfield, Paul C. and Prozorov, Ruslan (2007). *ACS-Nano*, vol. 1, No. 3 (October), pp. 228-233.
- [80] "Minerals formed by organisms". Lowenstam, Heinz Adolf. (1981). *Science*, vol. 211, No. 4487 (March), pp. 1126-1131
- [81] "Martian 'microbes' cover their tracks". Kerr, Richard A. (1997). *Science*, vol. 276, No. 5309 (April), pp. 30-31.
- [82] "Magnetite defines a vertebrate magnetoreceptor". Diebel, Carol E.; Proksch, Roger; Green, Colin R.; Neilson, Peter and Walker, Michael M. (2000). *Nature*, vol. 406, No. 6793 (July), pp. 299-302.

- [83] “Structure and function of the vertebrate magnetic sense”. Walker, Michael M.; Diebel, Carol E.; Haugh, Cordula V.; Pank-hurst, Patricia M.; Montgomery, John C. and Green, Colin R. (1997). *Nature*, vol. 390, No. 6658 (November), pp. 371-376.
- [84] “A home for Maori science”. Bohannon, John (2007). *Science*, vol. 318, No. 5852 (November), p. 907.
- [85] “Oxygen and iron isotope studies of magnetite produced by magnetotactic bacteria”. Mandernack, Kevin W.; Bazylinski Dennis A.; Shanks, Wayne C. and Bullen, Thomas D. (1999). *Science*, vol. 285, pp. 1892-1896.
- [86] “Magnetic art”. Holden, Constance (2004). *Science*, vol. 305, No. 5684, p. 603.
- [87] “New evidence on the earliest human presence at high northern latitudes in northeast Asia”. Zhu, R. X.; Potts, R.; Xie, F.; Hoffman, K. A.; Deng, C. L.; Shi, C. D.; Pan, Y. X.; Wang, H. Q.; Shi, R. P.; Wang, Y. C.; Shi, G. H. and Wu, N. Q. (2004). *Nature*, vol. 431, No. 7008 (September), pp. 559-562.
- [88] “Jarosite and hematite at Meridiani Planum from Opportunity’s Mössbauer spectrometer”. Klingelhöfer, G.; Morris, R. V.; Bernhardt, B.; Schröder, C.; Rodionov, D. S.; de Souza Jr., P. A.; Yen, A.; Gellert, R.; Evlanov, E. N.; Zubkov, B.; Foh, J.; Bonnes, U.; Kankleit, E.; Gütlich, P.; Ming, D. W.; Renz, F.; Wdowiak, T.; Squyres, S. W. and Arvidson, R. E. (2004). *Science*, vol. 306, No. 5702 (December) pp. 1740-1745.
- [89] “Soils of Eagle crater and Meridiani Planum at the Opportunity Rover landing site”. Soderblom, L. A. et al. (and other 43 authors). (2004). *Science*, vol. 306, No. 5702, pp. 1723-1726.
- [90] “Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data”. Bibring, Jean-Pierre; Langevin, Yves; Mustard, John F.; Arvidson, Raymond; Gendrin, Aline; Gondet, Brigitte; Mangold, Nicolas; Pinet, P.; Forget, F. and The Omega Team (2006). *Science*, vol. 312, No. 5772, pp. 400-404.
- [91] “Commercial applications of ferrofluids”. Raj, K. and Moskowitz, R. (1990). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 85, No. 1-3 (April), pp. 233-245.
- [92] “Magnetite-loaded carrier erythrocytes as contrast agents for magnetic resonance imaging”. Brähler, M.; Georgieva, R.; Buske, N.; Müller, A.; Müller, S.; Pinkernelle, J.; Teichgräber, U.; Voigt, A. and Bäuml, H. (2006). *Nano Letters*, vol. 6, No. 11, pp. 2505-2509.
- [93] “Magnetic silica dispersions: Preparation and stability of surface-modified silica particles with a magnetic core”. Philipse, Albert P.; van Bruggen, Michel P. B. and Pathmanoharan, Chellapah (1994). *Langmuir*, vol. 10, No. 1 (January), pp. 92-99.
- [94] “Metal nanoparticles as labels for heterogeneous, chip-based DNA detection”. Fritzsche, Wolfgang and Taton, T. Andrew. (2003). *Nanotechnology*, vol. 14, No. 12, pp. R63-R73.
- [95] “Drug delivery systems: Entering the mainstream”. Allen, Teresa M. and Cullis, Pieter R. (2004). *Science*, vol. 303, No. 5665 (March), pp. 1818-1822.

- [96] “Core-shell magnetite nanoparticles surface encapsulated with smart stimuli-responsive polymer: Synthesis, characterization, and LCST of viable drug-targeting delivery system”. Zhang, J. L.; Srivastava, R. S. and Misra, R. D. K. (2007). *Langmuir*, vol. 23, No.11, pp. 6342-6351.
- [97] “Protective coating of superparamagnetic iron oxide nanoparticles”. Kim, Do Kyung.; Mikhaylova, Maria; Zhang, Yu and Muhammed, Mamoun (2003). *Chemistry of Materials*, vol. 15, No. 8 (March), pp. 1617-1627.
- [98] “Colloidal stability of magnetite/poly(lactic acid) core/Shell nanoparticles”. Gómez-Lopera, Salvador; Arias, José L.; Gallardo, Visitación and Delgado, Ángel V. (2006). *Langmuir*, vol. 22, pp. 2816-2821.
- [99] “Thermoresponsive transport through ordered mesoporous silica/PNIPAAm copolymer membranes and microspheres”. Fu, Qiang; Rama Rao, G. V.; Ward, Timothy L.; Lu, Yunfeng; and Lopez, Gabriel P. (2007). *Langmuir*, vol. 23, No. 1, pp. 170-174.
- [100] “Methylene blue-containing silica-coated magnetic particles: A potential magnetic carrier for photodynamic therapy”. Tada, Dayane B.; Vono, Lucas L. R.; Duarte, Evandro L.; Itri, Rosangela; Kiyohara, Pedro K.; Baptista, Maurício S. and Ross, Liane M. (2007). *Langmuir*, vol. 23, pp. 8194-8199.
- [101] “Interlayer interactions in epitaxial oxide growth: FeO on Pt(111)”. Kim, Y. J.; Westphal, C.; Ynzunza, R. X.; Galloway, H. C.; Salmeron, M.; Van Hove, M. A. and Fadley, C. S. (1997). *Physical Review B*, vol. 55, No. 20 (May), pp. R13448-R13451.
- [102] “Presentation of a new magnetic field therapy system for the treatment of human solid tumors with magnetic fluid hyperthermia”. Jordan, Andreas; Scholz, Regina; Maier-Hauff, Klaus; Johannsen, Manfred; Wust, Peter; Nadobny, Jacek; Schirra, Hermann; Schmidt, Helmut; Deger, Serdar; Loening, Stefan; Lanksch, Wolfgang and Felix, Roland. (2001). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 225, No. 1-2, pp. 118-126.
- [103] “First-principles study of the polar (111) surface of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>”. Zhu, L.; Yao, K. L. and Liu, Z. L. (2006). *Physical Review B*, vol. 74, No. 3, pp. 035409-1 - 035409-10.
- [104] “Room temperatura deposition of magnetite thin films on organic substrate”. Arisi, E.; Bergenti I.; Cavallini, M.; Murgia, M.; Riminucci, A.; Ruani, G. and Dediu, V. (2007). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 316, No. 2, pp. 410-412.
- [105] <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/637106?lang=es&region=ES>. SIGMA-ALDRICH.
- [106] “Measurement of Young’s modulus of nanocrystalline ferrites with spinel structures by atomic forcé acoustic microscopy”. E. Kester, U. Rabe, L. Presmanes, Ph. Tailhades, W. Arnold. *Journal of Phisics and Chemistry of Solids* 61 (2000) 1275-1284. Elsevier.
- [107] “A key time point for cell growth and magnetosome synthesis of *Magnetospirillum gryphiswaldense* based on real-time analysis of physiological factors”. Jing Yang,

- ShuqiLi, XiuliangHuang, TaoTang, WeizhongJiang, TongweiZhang and YingLi. 2013. Frontiers in Microbiology. Original Research Article.*
- [108] Review “Formation of magnetite by bacteria and its application”. Atsushi Arakaki, Hidekazu Nakazawa, Michiko Nemoto, Tetsushi Mori and Tadashi Matsunaga. Department of Biotechnology, Tokyo University of Agriculture and Technology. *J. R. Soc. Interface* (2008) 5, 977–999. Published online 17 June 2008
- [109] “Magnetocapacidad en nanopartículas de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>”. S. Yáñez-Vilar, M. Sánchez-Andújar, S. Castro-García, J. Mira, J. Rivas, M. A. Señarís-Rodríguez. 2010 *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* (V. 49, 1, 81-88).
- [110] “Magnetic and microwave absorbing properties of magnetite–thermoplastic natural rubber nanocomposites”. Ing Kong, Sahrin HjAhmada, Mustaffa HjAbdullah, David Hui, Ahmad Nazlim Yusoff, Dwi Puryanti. 2010. ELSEVIER. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322 (2010) 3401–3409.
- [111] “Simulation of Magnetic Hysteresis in Pseudo-single-domain Grains of Magnetite”. W. Williams, David J. Dunlop. 1995. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. B3, Pages 3859-3871, March 10.
- [112] “Properties of magnetite nanoparticles synthesized through a novel chemical route”. Deepa Thapa y col. (2004) Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai 400 005, India
- [113] “Magnetism in nanometer-thick magnetite”. Juan de la Figuera, Mateo Montti, Benito Santos y col. (2012) CSIC. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- [114] “Magnetosome formation in prokaryotes”. Bazylinski, D. A. & Frankel, R. B. 2004. *Nat. Rev. Microbiol.* 2, 217–230. (doi:10.1038/nrmicro842)
- [115] “Rock magnetism: fundamentals and frontiers. Cambridge studies in magnetism”. Dunlop, D. J. & Özdemir, O. 1997. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [116] “Crystal-size and shape distributions of magnetite from uncultured magnetotactic bacteria as a potential biomarker”. Arató, B., Sza’nyi, Z., Flies, C., Schuler, D., Frankel, R. B., Buseck, P. R. & Po’sfai, M. 2005. *Am. Min.* 90, 1233–1240. (doi:10.2138/am.2005.1778)
- [117] “Critical superparamagnetic/single-domain grain sizes in interacting magnetite particles: implications for magnetosome crystals”. Adrian R. Muxworthy, Wyn Williams. 2008. *Interface. Journal of the Royal Society. J. R. Soc. Interface* (2009) 6, 1207 – 1212 (Published online 16 December 2008).
- [118] “Critical singledomain/multidomain grain-sizes in non-interacting and interacting elongated magnetite particles: implications for magnetosomes”. Muxworthy, A. R. & Williams, W. 2006. *J. Geophys. Res.* 111, B12S12. (doi:10.1029/2006JB004588)
- [119] “Theoretical singledomain grain size range in magnetite and titanomagnetite”. Butler, R. F. & Banerjee, S. K. 1975. *J. Geophys. Res.* 80, 4049–4058. (doi:10.1029/JB080i029 p04049)

[120] *“Source of funding in experimental studies of mobile phone use on health: Update of systematic review”*. Lotte E. van Nierop, Martin Rösli, Matthias Egger, Anke Huss, ELSEVIER. *C. R. Physique* 11 (2010) 622–627