

Modificaciones fisarias en el conejo inducidas por campos electromagnéticos

G. L. GARCÉS* y R. DE CASTRO MORALEJA**

* Instituto Canario de Cirugía Ortopédica y Traumatología (Clínica San Roque). Departamento de Ciencias Clínicas. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

** Servicio de Traumatología y Cirugía Ortopédica. Hospital General de Lanzarote.

Resumen.—Se efectúa un estudio experimental para valorar los efectos de campos electromagnéticos de dos intensidades diferentes (2,4 y 10 Gauss) sobre la fisis de huesos largos. Se emplearon 45 conejos de 4 semanas divididos en tres grupos de 15 animales, a los que se colocó unas bobinas de Helmholtz en la rodilla derecha durante ocho horas diarias. Cinco animales de cada grupo fueron estimulados (subgrupo testigo). El primer grupo se sacrificó tras cuatro semanas, el segundo tras 12 semanas y el tercero llevó las bobinas durante 12 semanas y luego se sacrificó 12 semanas después para comprobar la duración de los efectos de la corriente. Los resultados demuestran que la diferencia en longitud entre los huesos estimulados y sus contralaterales fue mayor en el subgrupo sometido a 10 Gauss, aunque en ningún caso superior al 2,5%. La altura fisaria fue mayor en los huesos estimulados que en sus contralaterales, aunque no se apreciaron otras diferencias histológicas. No obstante, el cierre de la fisis se retrasó en todos los huesos estimulados con 10 Gauss y evolucionó normalmente en el resto. Los huesos de los subgrupos testigo no mostraron diferencias entre ellos.

PHYSYSEAL CHANGES INDUCED IN THE RABBIT BY ELECTROMAGNETIC FIELDS

Summary.—This study was carried out to compare the effects of two different electromagnetic fields (2,4 and 10 Gauss) on the growth plate of long bones. Forty five 4-week-old rabbits were divided in three groups of 15 animals each. All of them wore two Helmholtz coils on their right knee for 8 hours daily and then were sacrificed, the first after for 4 weeks, the second one after 12 weeks and the third one after 24 weeks. In this last group the coils were removed after 12 weeks and the animals allowed to live other 12 weeks to study the evolution of the growth plate after cesation of the stimulation. In each group, animals were not stimulated (sham subgroup). Results showed a greater difference in length in those bones stimulated with 10 Gauss, in respect to their contralateral, than the other subgroups. However these differences were less than 2,5% of the total length of the bone. Growth plate height of stimulated bones was greater than their contralateral in all subgroups with no other remarkable histological differences. Closure of the growth plate was delayed in the 10 Gauss stimulated bones but not in the rest. No differences were found among bones of sham subgroups at any time.

INTRODUCCIÓN

El efecto osteoinductor demostrado por los campos eléctricos y electromagnéticos mediante diversas experiencias clínicas durante los últimos de-

cenios ha servido de base para proponer la hipótesis de que estos campos podrían, en determinadas condiciones, ser utilizados para alterar el crecimiento de los huesos jóvenes.

En este sentido, aunque la experiencia es amplia, los resultados publicados no son homogéneos, fundamentalmente debido a la gran variedad de métodos utilizados (diferentes tipos de campos, voltajes, electrodos, tiempos de aplicación, etc.). Entre los estudios efectuados con animales vivos

Correspondencia:
DR. GERARDO L. GARCÉS
D. Pío Coronado, 164
35012 Las Palmas



Figura 1. Radiografía de un conejo con las bobinas de Helmholtz colocadas alrededor de su rodilla derecha.

aplicando corrientes eléctricas o electromagnéticas, la mayoría señala la ausencia de efecto sobre el crecimiento longitudinal de los huesos (1-5), si bien algunos autores manifiestan que se produce estimulación de la longitud ósea (6, 7) y otros que el resultado es una disminución del crecimiento óseo (1, 8).

Desde el punto de vista estructural, se ha observado engrosamiento de la placa fisaria tras la aplicación de corrientes eléctricas (3, 4, 6, 8) y ausencia de efecto después de estimulación con corriente electromagnética (5), aunque los tiempos de aplicación de las corrientes en estos trabajos han sido muy cortos. Por otra parte, trabajos en los que se aplicó corriente eléctrica continua han demostrado la presencia de deformidades residuales a nivel de las epífisis estimuladas (1, 7).

A fin de comprobar los efectos de las corrientes electromagnéticas sobre el cartílago fisario vivo, en

este trabajo se efectúa un estudio comparativo empleando dos tipos distintos de intensidades de campo durante diversos períodos de aplicación.

MATERIAL Y MÉTODOS

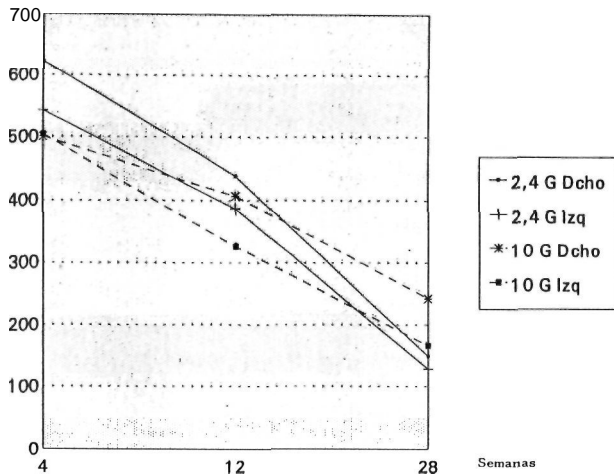
Para producir las corrientes electromagnéticas se fabricaron cuatro generadores dotados de gran estabilidad (2%) y muy bajo porcentaje de distorsión (0,02%). La corriente se aplicó mediante bobinas de Helmholtz de modo que variando el número de espiras de las mismas y la intensidad de corriente, se asegurase una intensidad del campo magnético de 2,4 Gauss y 10 Gauss según interesase. La señal utilizada fue de tipo sinusoidal, con punto de inflexión en la línea isoeléctrica. La señal se ajustó mediante un osciloscopio Philips modelo PM3226 de doble canal.

Se utilizaron 45 conejos de raza neozelandesa de 4 semanas de edad y alrededor de 250 grs. de peso. A todos se les colocó las bobinas de Helmholtz a ambos lados de la rodilla derecha durante ocho horas diarias, mientras estaban aislados en una celda especial para evitar que se retirasen las bobinas (fig. 1). La comida y bebida fue *ad libitum*.

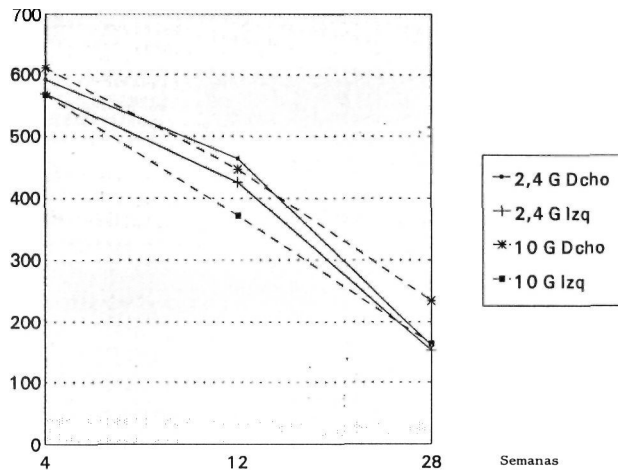
Los animales fueron divididos en tres grupos de 15 individuos cada uno. En el primer grupo las bobinas se mantuvieron durante 4 semanas y fue sacrificado a continuación. En el segundo grupo las bobinas fueron colocadas durante 12 semanas, procediéndose luego al sacrificio de los animales. En el tercer grupo se mantuvieron igualmente 12 semanas pero luego se retiraron y se permitió vivir a los animales otras 12 semanas para comprobar la duración del efecto de las corrientes. Cada grupo fue dividido a su vez en tres subgrupos de 5 animales cada uno. El subgrupo 1 recibió una estimulación de 2,4 Gauss, el subgrupo 2 una estimulación de 10 Gauss y el subgrupo 3 fue mantenido con las bobinas colocadas pero sin conectarlas a la corriente, por lo que sirvió de subgrupo control en cada grupo.

Una vez sacrificados los animales los fémures y tibias fueron despojados de partes blandas y radiografiados en condiciones estandarizadas. Posteriormente fueron medidos con un calibrador tipo Vernier con capacidad discriminadora de 0,05 mm en tres ocasiones y la media tomada como valor útil (el error de observación fue de 0,1 mm). Las medidas se tomaron desde la punta del trocánter mayor hasta el cóndilo interno en los fémures y desde la región interespinal de la meseta tibial proximal a la punta del maleólo interno para las tibias.

Una vez efectuadas las medidas, los huesos fueron descalcificados en solución de Schmorl y sus extremos procesados según técnica habitual hasta inclusión en parafina. Los cortes microscópicos fueron teñidos con hematoxilina-eosina, y con Azul alcian para determinar la presencia cualitativa de glicosaminoglicanos. La altura de las capas de los cartílagos fisarios fue medida según el método fotográfico propuesto por Garcés y Jiménez (9). Los estudios estadísticos se realizaron aplicando la *t* de Student para muestras pareadas o no pareadas según correspondiese.



Gráfica 1. Evolución de la altura fisaria femoral, expresada en micras, de los grupos estimulados.



Gráfica 2. Evolución de la altura fisaria tibial, expresada en micras, de los grupos estimulados.

RESULTADOS

El estudio radiológico no mostró diferencias entre los distintos grupos, ni entre los huesos estimulados y sus controles, con respecto a la morfología, densidad ósea aparente o angulaciones. En cuanto a la longitud ósea, en el primer grupo las diferencias entre los huesos estimulados con 2,4 Gauss y sus controles y los huesos del subgrupo testigo no alcanzaron el 0,9% (diferencias no significativas). Los fémures estimulados con 10 Gauss fueron un 1,1% más largos que sus contralaterales ($p < 0,05$), mientras que las tibias sólo fueron el 0,5% más largas que las no estimuladas (diferencias no significativas).

En el segundo grupo, al cabo de doce semanas del inicio de la experiencia, los fémures y tibias estimulados con 2,4 Gauss fueron 1,9% y 1% respectivamente, más largos que sus contralaterales (diferencias no significativas). Los fémures estimulados con 10 Gauss fueron un 2% más largos que sus contralaterales (diferencias no significativas) y las tibias un 2,5% más largas que las suyas ($p < 0,05$). No se apreciaron diferencias en la longitud de los huesos del subgrupo testigo. En el tercer grupo los fémures estimulados con 2,4 Gauss fueron un 1,9% más largos que sus controles y las tibias un 0,2% más que los suyos (diferencias no significativas). Los fémures y tibias estimuladas mediante 10 Gauss fueron un 0,6% y 1% más largos, respectivamente, que sus contralaterales ($p < 0,05$). Tampoco hubo diferencias en la longitud de los huesos del subgrupo testigo.

La altura fisaria en los fémures estimulados con 2,4 Gauss fue mayor que la de sus contralaterales

un 13% (n.s.) tras 4 semanas, un 12% ($p < 0,05$) después de 12 semanas y un 14% (n.s.) al final de la experiencia. Tras aplicación de 10 Gauss la altura fue mayor en las fisis de los fémures estimulados un 1% (n.s.), 20% (n.s.) y 32% ($p < 0,01$) respectivamente durante los tres períodos (Gráfica 1). La altura fisaria de las tibias estimuladas fue mayor que la de sus contralaterales en todos los casos: un 4% en el primer grupo (n.s.), un 9% en el segundo (n.s.) y 5% en el tercero (n.s.), tras estimulación con 2,4 Gauss, y un 7% (n.s.), 17% ($p < 0,05$) y 30% ($p < 0,001$) respectivamente después de la aplicación de 10 Gauss (Gráfica 2). El estudio histológico no mostró diferencias remarcables entre las fisis de los huesos estimulados y sus controles, ni entre ellas, en los grupos primero y segundo. En el tercer grupo, las fisis estimuladas con 2,4 Gauss mostraron una morfología muy similar a sus contralaterales y a la de los huesos controles no tratados. Las estimuladas con 10 Gauss, sin embargo, mostraron una mayor celularidad, incluso en la capa germinativa. Dicha celularidad mantenía la disposición columnar típica de los cartílagos aún fértiles (fig. 2). La tinción del Azul alcian mostró características muy similares a las descritas para la hematoxilina-eosina. Así, durante los dos primeros períodos estudiados no se apreciaron diferencias entre las fisis estimuladas y sus controles, ni entre las placas fisarias de los distintos subgrupos entre sí. Por el contrario, en el tercer grupo la captación del azul fue más homogénea y abundante en las fisis estimuladas, tanto a nivel de la capa proliferativa como en los halos pericelulares de la capa hipertrófica. Aunque no pudo ser cuantificado, la coloración azul fue más abundante en las fisis estimuladas con 10 Gauss que en las sometidas a 2,4

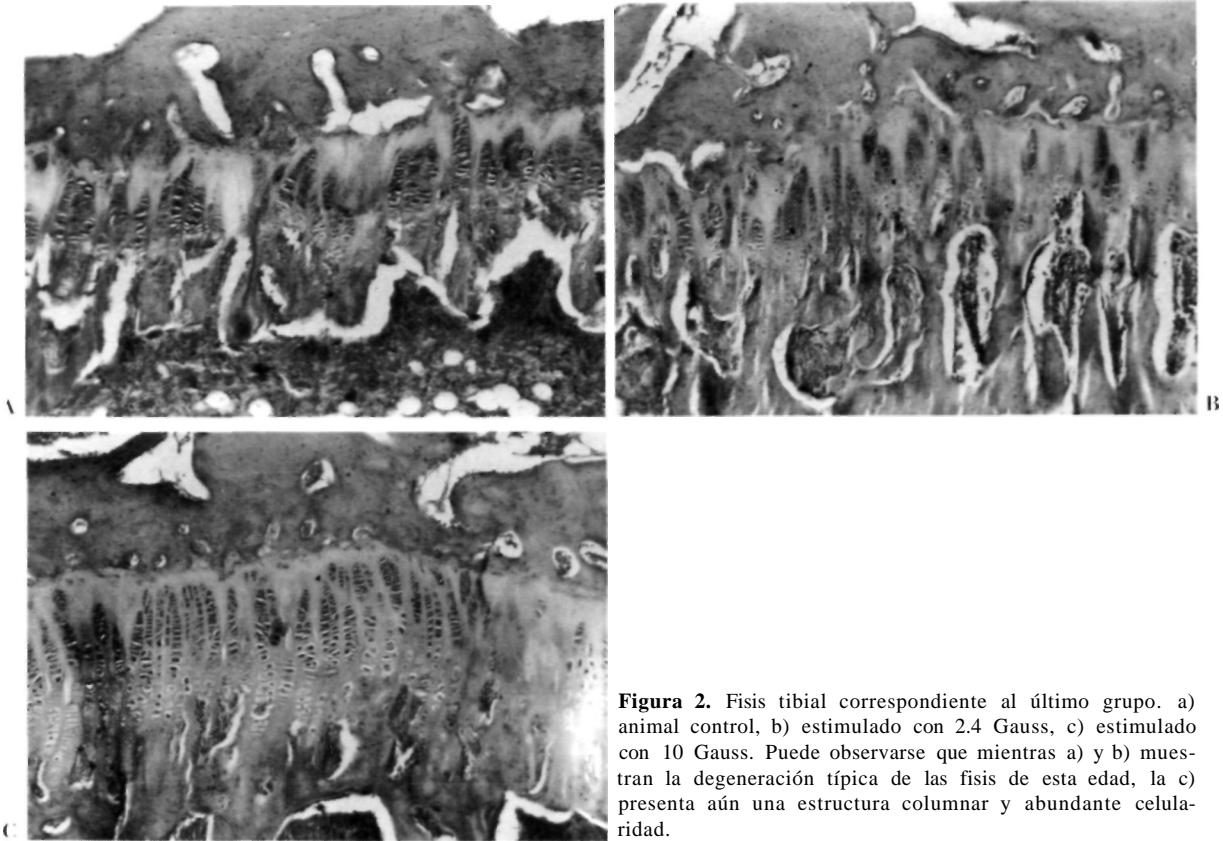


Figura 2. Fisis tibial correspondiente al último grupo. a) animal control, b) estimulado con 2.4 Gauss, c) estimulado con 10 Gauss. Puede observarse que mientras a) y b) muestran la degeneración típica de las fisis de esta edad, la c) presenta aún una estructura columnar y abundante celularidad.

Gauss, especialmente en lo referente a la subsistencia intercelular.

DISCUSIÓN

Se han realizado diversos trabajos experimentales y clínicos para descubrir una conexión entre la electricidad y algunas funciones propias del hueso como la regeneración y crecimiento. La gran mayoría de resultados indica que los campos eléctricos o sus variantes como los campos magnéticos o electromagnéticos son capaces, por sí mismos, de modificar la respuesta ósea a determinados estímulos. No obstante, hasta la fecha no ha podido determinarse el nexo de unión que sirve para transformar un estímulo físico en una orden biológica. Por otra parte, es difícil encontrar en la literatura dos trabajos en los que se hayan utilizado los mismos medios de estimulación y parámetros de estudio, por lo que no pueden extraerse conclusiones extrapolables.

Los resultados de nuestro estudio sugieren que la influencia de los campos electromagnéticos sobre la actividad fisaria está mediatizada por la intensidad de corriente. La mayor longitud observada en los huesos estimulados con la máxima intensidad de campo, comparativamente con los otros subgru-

pos, fue, no obstante, de escasa entidad. Otras experiencias utilizando campos electromagnéticos para estimular el crecimiento óseo en animales vivos han fracasado (10, 11), incluso empleándolos como coadyuvante de condrodiastasis (12).

Nuestro estudio sugiere, igualmente, que los campos electromagnéticos dan lugar a modificaciones en las fisis estimuladas. Aunque las diferencias no fueron significativas en todos los casos, es evidente que la altura fisaria se incrementó progresivamente, incluso tras suspender la aplicación de la corriente, tanto en las tibias como en los fémures, y que este incremento fue mayor en los huesos estimulados con 10 Gauss. El aumento de la altura del cartílago de crecimiento ha sido reportado tras aplicación de corriente eléctrica continua (3-6, 8) y tras aplicación de corrientes electromagnéticas durante 14 días (5). Asimismo se ha comprobado in vitro que estas corrientes estimulan la proliferación de los condrocitos fisarios (13). Las deformidades de los cóndilos femorales reportadas por otros autores tras la aplicación de corrientes eléctricas (1, 6) no fueron observadas en nuestros animales.

Las diferencias mostradas por las fisis de nuestros animales tras la tinción del azul alcian sugie-

ren que las corrientes electromagnéticas inducen una mayor síntesis de glicosaminoglicanos por el cartílago de crecimiento. Este hecho ha sido observado igualmente en cultivos de condrocitos fisarios (13). Aunque no es cuantificable, se hizo evidente la presencia en nuestros animales de más azul en las fisis estimuladas con 10 Gauss, persistiendo su distribución homogénea en los animales de este subgrupo en el período de máximo seguimiento. Ello, junto con el mantenimiento de la estructura fisaria en los animales de este subgrupo, induce a pensar que a determinadas intensidades de campo, las corrientes electromagnéticas pueden retrasar el cierre del cartílago de crecimiento.

Tras nuestro estudio no pueden alcanzarse conclusiones definitivas. Parece evidente que la

intensidad lograda dentro del campo electromagnético condicionará los efectos del mismo sobre la fisis. Otros estudios han demostrado que el campo eléctrico efectivo, más que su máximo valor, es el parámetro más importante para el estímulo de la osteogénesis (14) y que la estimulación intermitente es más efectiva que la continua (13). Es importante tener en cuenta, igualmente, que el aumento de la temperatura alrededor de los electrodos puede condicionar los efectos observados y falsear las conclusiones (11). Aunque la estimulación del crecimiento óseo longitudinal es un campo de interés creciente, el alto número de variables inmersas en el mismo demuestra que aún queda mucho camino por recorrer en su investigación.

Bibliografía

1. **Abraham E, Gluek L, Stearns M.** The long term effect of electrical stimulation on longitudinal bone growth. *Orthop Trans* 1985; 9: 300.
2. **Armstrong P, Brighton C.** Failure of the rabbit tibial growth plate to respond to the long-term application of a capacitively-coupled electrical field. *J Orthop Res* 1986; 4: 446-451.
3. **Sato O, Akai M.** Effect of direct-current stimulation on the growth plate. In vivo study with rabbits. *Arch Orthop Trauma Surg* 1990; 109: 9-13.
4. **Takei N, Akai M.** Effect of direct current stimulation on triradiate physeal cartilage. In vivo study in young rabbits. *Arch Orthop Trauma Surg* 1993; 112: 159-62.
5. **Wilmot JJ, Chiego DJ Jr, Carlson DS, Hanks CT, Moskwa JJ.** Autoradiographic study of the effects of pulsed electromagnetic fields on bone and cartilage growth in juvenile rats. *Arch Oral Biol* 1993; 38: 67-74.
6. **Forgon M, Vámhidy V, Kellényi L.** Bone growth accelerated by stimulation of the epiphyseal plate with electric current. *Arch Orthop Trauma Surg* 1985; 104: 121-124.
7. **Cieszynski T.** Equalization of asymmetric extremities in children using electric fields. *J Bioelectricity* 1987; 6: 205-212.
8. **Genbun Y.** The effects of electrical stimulation on epiphyseal cartilage. *Nippon Ika Daigaku Zasshi* 1991; 58: 21-8.
9. **Garcés G, Jiménez J.** Estudio histomorfométrico de la fisis tibial de ratas sometidas a stress emocional crónico. *Rev Ortop Traum* 1990; 34IB: 81-83.
10. **Smith R, Nagel D.** Effects of pulsing electromagnetic fields on bone growth and articular cartilage. *Clin Orthop* 1983; 181: 277-282.
11. **Coulton LA, Barker AT.** The effect of low-frequency pulsed magnetic fields on chick embryonic growth. *Phys Med Biol* 1991; 36: 369-81.
12. **van Roermund PM, ter Haar Romeny BM, Hoekstra A, Sehoonderwoert GJ, Brandt CJ, van der Steen SP, Roelofs JM, Scholten F, Visser WJ, Renooij W.** Bone growth and remodeling after distraction epiphysiolysis of the proximal tibia of the rabbit. Effect of electromagnetic stimulation. *Clin Orthop* 1991; 266: 304-12.
13. **Sakai A, Suzuki K, Nakamura T, Norimura T, Tsuchiya T.** Effects of pulsing electromagnetic fields on cultured cartilage cells. *Int Orthop* 1991; 15: 341-6.
14. **Gupta TD, Jain VK, Tandon PN.** Comparative study of bone growth by pulsed electromagnetic fields. *Med Biol Eng Comput* 1991; 29: 113-20.