

Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología

www.elsevier.es/rot



INVESTIGACIÓN

Modulación del crecimiento de columnas escolióticas en animales de experimentación mediante el uso de barras de metal inteligente

J.M. Sánchez-Márquez*, F.J. Sánchez Pérez-Grueso, N. Fernández-Baíllo, E. Gil-Garay y S. Antuña-Antuña

Unidad de Raquis, Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología, Hospital Universitario La Paz, Madrid, España

Recibido el 27 de mayo de 2013; aceptado el 1 de julio de 2013

Disponible en Internet el 10 de septiembre de 2013

PALABRAS CLAVE

Escoliosis experimental;
Corrección escoliosis;
Metales con memoria de forma

Resumen

Objetivo: Creación de un modelo experimental de escoliosis estructurada en ratas para evaluar la eficacia de los metales con memoria de forma para corregir gradualmente la deformidad a lo largo del tiempo.

Material y método: Se generó una escoliosis experimental en ratas de 3 semanas mediante una sutura entre escápula y pelvis izquierdas durante 8 semanas, tras lo cual fueron aleatorizadas en 2 grupos: control, en los que se cortó la sutura, y nitinol, en los que además se implantó un alambre recto con memoria de forma anclado a la columna. Se realizaron radiografías seriadas para determinar la eficacia del nitinol en la corrección de la escoliosis. En un segundo tiempo, evaluamos los cambios histológicos a nivel del cuerpo vertebral apical y discos adyacentes pre y poscorrección.

Resultados: Se indujo una cifoescoliosis progresiva media de $81,5^\circ$. En el grupo control, tras cortar la sutura, se produjo una reducción inicial de la deformidad pero luego permaneció estable a lo largo del tiempo (54° a las 2 semanas). En el grupo nitinol se observó una reducción progresiva del valor angular de la escoliosis, hasta $8,7^\circ$ de media a las 2 semanas. El acunamiento del cuerpo vertebral apical y de los discos adyacentes se corregía parcialmente tras 2 semanas de corrección de la deformidad.

Conclusión: En este modelo de escoliosis, un alambre recto de nitinol anclado a la columna ha demostrado eficacia para la corrección gradual de la cifoescoliosis, y de los cambios estructurales asociados a la misma.

© 2013 SECOT. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: jm.sanchez.marquez@gmail.com (J.M. Sánchez-Márquez).

KEYWORDS

Experimental scoliosis;
Scoliosis correction;
Shape-memory metals

Modulation of scoliotic spine growth in experimental animals using intelligent metal bars**Abstract**

Objective: To create an experimental structural scoliosis model in mice to evaluate the efficacy of shape-memory metals to gradually correct the deformity over time.

Material and method: Experimental scoliosis was generated in 3 week-old mice by means of a suture between the left scapula and pelvis for 8 weeks. They were then randomised into two groups: a control group, in which the suture was cut, and another, in those that also had a Nitinol straight memory-wire implant fixed to the column. Serial x-rays were performed to determine the efficacy of the Nitinol in the correction of the scoliosis. In a second time, the histological changes at apical vertical body level and the adjacent discs were evaluated pre- and post-correction.

Results: A mean 81.5° kyphoscoliosis was gradually induced. In the control group, after cutting the suture, an initial reduction in the deformity was observed, but later it remained stable throughout the time (54° at two weeks). In the Nitinol group, a gradual reduction was observed in the scoliosis angle value, to a mean of 8.7° at two weeks. The curvature of the apical vertebral body and adjacent discs were partially corrected after two weeks of correcting the deformity.

Conclusion: This scoliosis model has demonstrated the efficacy of a straight Nitinol wire fixed to the spinal column in the gradual correction of kyphoscoliosis and in the changes in its adjacent structures.

© 2013 SECOT. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Introducción

La escoliosis es una deformidad compleja de la columna que frecuentemente requiere tratamiento para controlar la progresión de la misma durante el crecimiento. El tratamiento se limita básicamente al uso de corsés y a la cirugía. El tratamiento con corsés es no invasivo y preserva el crecimiento de la columna vertebral, pero tiene resultados modestos en el control de la curva y un impacto psicosocial negativo que puede afectar al cumplimiento del tratamiento por parte del paciente¹⁻³. El tratamiento quirúrgico mediante una artrodesis vertebral instrumentada tiene buenos resultados en la corrección de la deformidad, pero se trata de una cirugía muy invasiva, con riesgos asociados a la corrección instantánea de la deformidad y a la biomecánica alterada de una columna vertebral fusionada, ya que la pérdida del potencial de crecimiento puede llevar a una disminución significativa de la altura del tronco y afectar negativamente al desarrollo pulmonar. Los inconvenientes del tratamiento quirúrgico de la escoliosis promueven un interés creciente hacia el desarrollo de nuevas estrategias para manejar la escoliosis grave en niños jóvenes sin fusión vertebral. Las técnicas sin fusión tienen ventajas teóricas sobre la artrodesis vertebral, entre las que están la preservación del potencial de crecimiento, de movilidad y función de la columna⁴, consiguiendo buenos resultados clínicos durante el procedimiento inicial y primeros retensados, pero van perdiendo eficacia a lo largo del tiempo⁵.

Entre los «metales inteligentes» se encuentra el nitinol, formado por una aleación al 50% del níquel y titanio, que tiene las propiedades de superelasticidad (actúa como un resorte) y de memoria de forma (tiene la capacidad de ser deformable cuando se enfría y después recuperar la forma original cuando se calienta). Estas propiedades de las aleaciones de níquel-titanio junto con la buena

biocompatibilidad le hacen un material interesante para novedosas aplicaciones en el campo biomédico, especialmente para la corrección de deformidades^{6,7}.

Este proyecto pretende abrir una línea de investigación para evitar complicaciones y morbilidad asociada al tratamiento quirúrgico actual de la escoliosis, aprovechando las propiedades de los metales con memoria de forma. Para ello nos planteamos 3 objetivos: 1) crear una escoliosis estructurada en la columna vertebral de animales de experimentación, a partir de un modelo previamente contrastado; 2) conseguir una corrección gradual de la deformidad previamente generada mediante la implantación de un alambre con memoria de forma, y 3) analizar los cambios estructurales que se producen en los cuerpos vertebrales y los discos intervertebrales tras la generación y tras la corrección de la escoliosis.

Material y método

Fase 1: fase de estudio radiográfico comparativo durante la modulación del crecimiento vertebral mediante la utilización de metales con memoria de forma.

Se utilizaron 23 ratas machos de la raza Sprague-Dawley con edades entre 20 y 22 días. Este protocolo fue aprobado por el Comité Ético de Experimentación Animal de la Universidad Autónoma de Madrid.

Generación de la deformidad: para crear la cifoescoliosis se utilizó una modificación del método descrito por Sarwark et al.⁸. Bajo anestesia general mediante la inyección intraperitoneal de una dilución de ketamina, xilacina y atropina, se realizaron radiografías dorsoventrales y laterales de la columna. Se rasuró el dorso de los animales y se aplicó clorhexidina al 4% para la limpieza del área a intervenir. Se utilizó profilaxis antibiótica con amoxicilina-clavulánico

y protección ocular con Oculos® pomada. La inducción de la escoliosis se realizó mediante una sutura asimétrica entre escápula y pelvis izquierdas. Para ello, se realizaron 2 incisiones de 1 cm en el área interescapular y en la base de la cola. Utilizando una sutura no absorbible del n.º 0 (Prolene®, Ethicon Inc), se realizó un punto de sutura doble en el ángulo inferior de la escápula, pasando nuevamente la sutura abrazando el cuello de la escápula. Ambos extremos de la sutura se pasaron subcutáneamente a la segunda incisión en la base de la cola. Con el extremo de la sutura con aguja se hizo un punto doble rodeando la articulación sacroiliaca izquierda. Al anudar la sutura se producía una escoliosis de convexidad derecha instantánea. Las heridas se suturaron con seda 3/0 y se realizaron radiografías dorsoventral y lateral. Las ratas se dejaron crecer con esta sutura durante 8 semanas.

Para el control del dolor se administró meloxicam por vía subcutánea (3 mg/kg/día) durante las primeras 48 h.

Cada 2 semanas, las ratas eran anestesiadas mediante la inyección intraperitoneal de ketamina, xilacina y atropina para realizar radiografías dorsoventrales y laterales. Utilizando el método de Cobb se medían los valores angulares de cifosis y escoliosis.

Corrección de la deformidad: a las 8 semanas de la realización de la sutura, los animales fueron aleatorizados en 2 grupos: nitinol (n=9) y control (n=9). En el grupo control se cortó la sutura de Prolene® a través de una incisión de 1 cm entre las 2 incisiones previas bajo anestesia general. En el grupo nitinol, a través de una incisión longitudinal posterior, se cortó la sutura y se implantó un alambre de níquel-titanio (NeoSentalloy®, 0,018'' × 0,018'' F100, GAC International Inc, Japón) a lo largo de la concavidad, desde la vértebra límite superior a la vértebra límite inferior, en función de la radiografía preoperatoria.

La fijación del alambre a la columna se consiguió mediante la realización de 2 agujeros en la apófisis espinosa, utilizando un microtaladro, en las 2 vértebras límites inferiores y en 2 vértebras en el ápex. Hacer agujeros en las espinosas de las 2 vértebras límite superiores era imposible dado que la apófisis espinosa a este nivel es muy fina y, por tanto, se rompían fácilmente. A este nivel se hacía un anillo con alambre de 0,2 mm de acero entre la apófisis espinosa y la apófisis transversa.

Un alambre de acero de 0,2 mm se pasaba a través de los orificios creados en la espinosa, entre los cuales se colocaba de forma longitudinal el alambre de nitinol. Al apretar los alambres de acero se conseguía un buen anclaje el alambre de nitinol (fig. 1), pero no apretamos excesivamente para permitir el movimiento entre la columna y el alambre de nitinol.

Tras la cirugía, se administraron buprenorfina (0,05 mg/kg/día) subcutáneamente para control del dolor y amoxicilina-clavulánico (150 mg/kg/día) por vía intramuscular durante 3 días para prevenir la infección de la herida quirúrgica y del tracto urinario. Durante la duración del experimento, los animales fueron supervisados diariamente por el veterinario del centro de estabulación.

Se obtuvieron radiografías de los animales en el postoperatorio inmediato, a las 24 h, 72 h, 1 semana y 2 semanas bajo anestesia general. Se estudiaron los valores angulares de la cifosis y la lordosis mediante el método de Cobb.

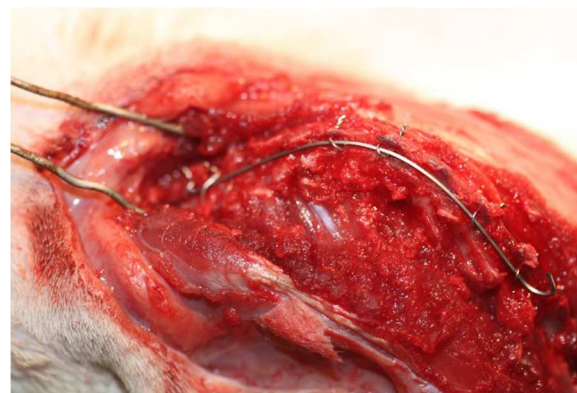


Figura 1 Fotografía de la columna vertebral de una rata con escoliosis previamente generada, con un alambre de nitinol anclado a las apófisis espinosas.

Fase 2: fase de estudio histológico comparativo tras la generación y tras la corrección gradual de la escoliosis con metales con memoria de forma.

En esta segunda fase del estudio, se analizan, mediante parámetros cuantitativos, los cambios estructurales que se producen en la vértebra ápex de la deformidad (acuñamiento vertebral) y en los discos adyacentes (acuñamiento de los discos), tras la generación de la escoliosis y tras la corrección de la misma. Se utilizaron 15 ratas machos de la raza S-D con edades entre 20 y 22 días. En todas ellas se reprodujo el mismo modelo experimental de escoliosis descrito en la fase 1 de estudio radiográfico, mediante la realización de una sutura entre la escápula y la pelvis izquierdas. Las ratas se mantienen con la sutura durante 8 semanas, momento en que se realizan radiografías dorsoventral y lateral de cada animal, y se aleatorizan en 2 grupos: control y nitinol. En ese momento, se realizó el segundo procedimiento quirúrgico para cortar la sutura e implantar el alambre de níquel-titanio. A las 2 semanas de la segunda cirugía se procede al sacrificio de los animales mediante inhalación de monóxido de carbono en cámara hermética y a la extracción de la columna vertebral, en una pieza que incluye las regiones torácica y lumbar. Este fragmento se introduce en formol neutro tamponado al 4% durante 48 h. Tras eliminar la mayor parte de tejidos blandos paravertebrales y con la ayuda de la radiografía, se selecciona la vértebra ápex de la deformidad, con un bisturí se corta el fragmento de columna que incluye vértebra apical, discos intervertebrales cefálico y caudal a la vértebra ápex y mitad de los cuerpos vertebrales adyacentes. Este fragmento se introduce en formol neutro tamponado al 4% y se procede al estudio histológico. Tras la descalcificación mediante la inmersión en Cal-Rite® durante 72 h a temperatura ambiente, se realiza el tallado de las piezas mediante la realización de un corte en el plano coronal en la parte central del cuerpo vertebral con bisturí, tras lo cual se procede a la inclusión en parafina para formar un bloque se será cortado con microtomo manual en cortes de 5 micras de grosor. Las secciones obtenidas se colocan en la preparación y se procede a la tinción de hematoxilina-eosina.

Los parámetros histológicos estudiados son la angulación del cuerpo vertebral apical y de los discos adyacentes, así como la longitud de los lados cóncavo y convexo de cuerpo

Tabla 1 Valores angulares (media e intervalo de confianza) de la escoliosis y cifosis generada durante la primera fase mediante la sutura de escápula a pelvis

	Preop	Postinm	2 semanas	4 semanas	6 semanas	8 semanas
Escoliosis	0	35,5 (31,7-39,2)	46,2 (42,5-50)	66,6 (62,9-70,3)	72,7 (69-76,4)	81,5 (78-85)
Cifosis	47 (42,5-51,5)	57,5 (53-62)	69,1 (64,6-73,6)	81,9 (77,4-86,4)	89,8 (85,3-94,3)	97,5 (94-101)

y discos. Para la angulación se ha tomado como referencia la línea que forma la placa terminal, y para las longitudes el punto de unión entre la placa terminal y el anillo fibroso. La angulación se mide mediante el software Surgimap Spine® (Nemaris Inc.) y para las longitudes se utilizó la escala micrométrica del microscopio óptico.

Método estadístico

El análisis estadístico se realizó con el programa SPSS versión 11.5; para todos los test se utiliza un nivel de significación de 0,05 y contraste bilateral. Las variables con evolución temporal se analizaron mediante el test Anova de medidas repetidas junto con el test de Greenhouse-Geisser. Para explorar las posibles diferencias entre momentos 2 a 2 se utilizó el test a posteriori de Bonferroni. Las comparaciones entre variables cuantitativas continuas se realizaron mediante pruebas no paramétricas con el test de la U de Mann-Whitney.

Resultados

Fase 1: fase de estudio radiográfico comparativo durante la modulación del crecimiento vertebral mediante la utilización de metales con memoria de forma⁹.

Creación de la deformidad: durante el periodo inicial de sutura asimétrica, se generó una curva cifoesciolótica convexa a la derecha en la región toracolumbar en todas las ratas excepto en 3, con características radiográficas de escoliosis estructurada, como la traslación de la vértebra apical de la línea vertical sacra, el acunamiento de los cuerpos vertebrales y la rotación a nivel del ápex (fig. 2).

Las radiografías iniciales mostraron una columna recta en cada animal. Tras la sutura se generó una escoliosis media de 35,5° que progresó hasta 81,5° de media a las 8 semanas.

En el plano lateral, todas las ratas tenían un perfil sagital normal, con 47° de cifosis media antes de la sutura. Tras la sutura, la cifosis media fue de 57,5°; que progresó hasta 97,5° a las 8 semanas (tabla 1). La progresión de la deformidad en ambos planos fue estadísticamente significativa.

En 3 animales no se consiguió generar escoliosis debido al aflojamiento de la sutura en 2 animales y a un fenómeno de «cut-out» de la sutura a nivel de la escápula. Dos ratas murieron en el postoperatorio inmediato de la cirugía inicial para generación de escoliosis debido a hipotermia y sangrado excesivo.

Corrección de la deformidad: las ratas del grupo nitinol demostraron una mayor corrección global de la cifoescoliosis que las ratas del grupo control durante el periodo de tratamiento. Tras aleatorizar los animales, no se observaron diferencias estadísticamente significativas en los valores de

la cifosis ($p = 0,52$) y de la escoliosis ($p = 0,23$) entre los animales del grupo nitinol y del grupo control.

En el grupo nitinol, el valor medio de la escoliosis inicial fue de 79,3° (IC: 73,9-84,7) y de la escoliosis final de 8,7° (IC: 3,3-14,1). Se observó una corrección gradual a lo largo del tiempo (tabla 2). En el grupo control, la escoliosis media inicial era de 84° (IC: 76,3-91,6) y la escoliosis final de 54,3° (IC: 46,6-70); en este grupo se observó una disminución inicial de la escoliosis tras cortar la sutura, pero a diferencia del grupo nitinol, la deformidad permanecía estable a lo largo del tiempo tras la reducción inicial de la curva, observándose diferencias muy significativas entre los grupos ($p < 0,001$).

Ya desde el primer momento, la corrección de la escoliosis tras cortar la sutura e implantar el alambre de nitinol difería entre ambos grupos. En el grupo nitinol la escoliosis corrigió desde 79,3° hasta 51,5° de media (27,8 de corrección) tras implantar el alambre de níquel-titanio y cortar la sutura, mientras que la escoliosis media en el grupo control

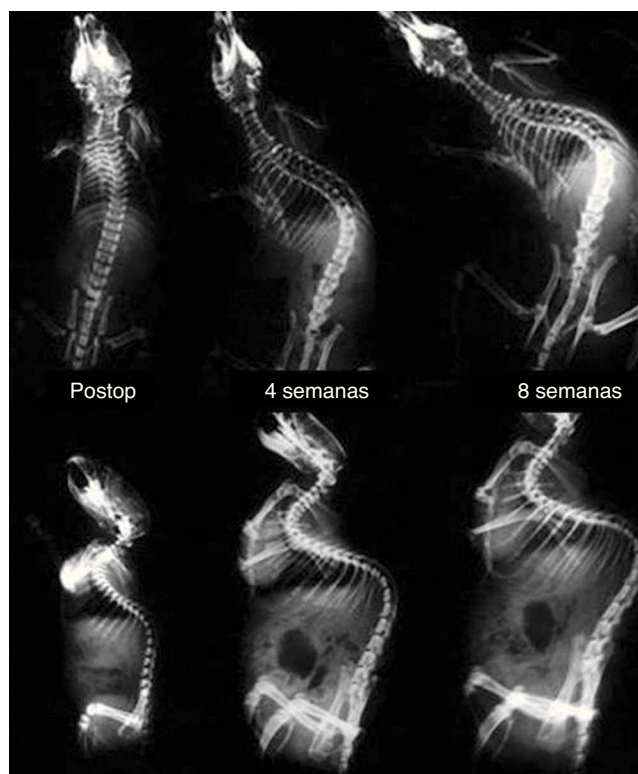


Figura 2 Radiografías dorsoventrales y laterales seriadas de una rata durante la fase de generación de escoliosis, en el postoperatorio inmediato tras la sutura de escápula a pelvis, a las 4 semanas y 8 semanas poscirugía. Nótese la inducción gradual de la cifoescoliosis.

Tabla 2 Valores angulares (media e intervalo de confianza) de la escoliosis durante la corrección mediante la implantación de un alambre de nitinol anclado a la columna, comparativamente entre grupo nitinol y grupo control

Escoliosis	Pre	Postinm	24 h	72 h	1 semana	2 semanas
Nitinol	79,3 (73,9-84,7)	51,6 (46,1-57)	32,4 (27-37,9)	27,9 (22,5-33,3)	21,5 (16,1-27)	8,7 (3,3-14,1)
Control	84 (78,6-89,4)	60,2 (54,8-65,6)	58,6 (53,2-64)	57,2 (51,8-62,6)	55,7 (50,3-61,2)	54,3 (48,9-59,7)

corrigió desde 84° hasta 60,2° (23,8 de corrección) tras solo cortar la sutura.

Durante las 2 semanas que duró el periodo de corrección, las ratas del grupo nitinol corrigieron gradualmente 42,8° adicionales de media, mientras que los animales del grupo control demostraron una corrección media de 6° (fig. 3). Las diferencias entre ambos grupos eran significativas ($p < 0,001$) (tabla 2).

En el plano sagital, las ratas del grupo nitinol demostraron mayor corrección de la cifosis que las ratas del grupo control (fig. 4). El valor medio de la cifosis en el grupo control tras la aleatorización era de 96,3° (IC: 90,4-102,2) y corrigió hasta 75,3° (IC: 69,4-81,2) tras cortar la sutura e implantar el alambre, y hasta 51,7° de media (IC: 45,8-57,6) a las 2 semanas tras la cirugía correctiva. La corrección de la cifosis en el grupo control fue menor; el valor medio de la cifosis inicial era de 99° (IC: 93-104,9) que corrigió hasta 83° (IC: 77-88,9) de media tras la liberación de la sutura y hasta 71,1° (IC: 65,2-77) a las 2 semanas (tabla 3). Las diferencias fueron estadísticamente significativas ($p < 0,001$).

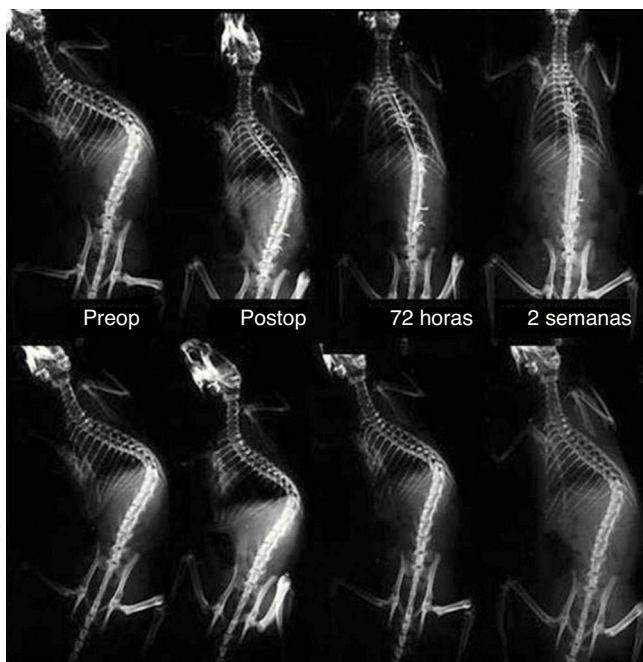


Figura 3 Radiografías dorsoventrales seriadas, comparativamente entre grupo nitinol (parte superior) y grupo control (parte inferior), antes de implantar el alambre de nitinol, en el posoperatorio inmediato, a las 72 h y a las 2 semanas poscirugía. Nótese la corrección gradual de la escoliosis en el grupo nitinol a lo largo de las 2 semanas de tratamiento, mientras que en el grupo control se produce una reducción inicial de la deformidad pero luego permanece estable a lo largo del seguimiento.

Ninguna rata murió durante la cirugía correctora ni durante el seguimiento.

Fase 2: fase de estudio histológico comparativo tras la generación y tras la corrección gradual de la escoliosis con metales con memoria de forma.

En la figura 5 podemos observar las diferencias entre 2 preparaciones histológicas; la de la izquierda pertenece a una rata del grupo control y la de la derecha a una rata del grupo nitinol. A simple vista, se pueden observar las diferencias en la angulación del cuerpo vertebral y de los discos intervertebrales adyacentes entre ambos grupos. En la imagen del grupo control se puede observar un acuñamiento del cuerpo vertebral y de los discos adyacentes, es decir, se pierde el paralelismo entre los platillos vertebrales. En el grupo nitinol, tras corregir la deformidad, se observa que la angulación de los cuerpos vertebrales y de los discos es menor, lo que indica que durante la corrección de la deformidad también se corrigen parcialmente los cambios histológicos que se generaron al inducir la cifoescoliosis.

Tras la aleatorización de los animales, los 2 grupos eran homogéneos, con un valor medio del ángulo de Cobb de 65,33° en el grupo nitinol y de 67,5° en el grupo control ($p = 0,485$).

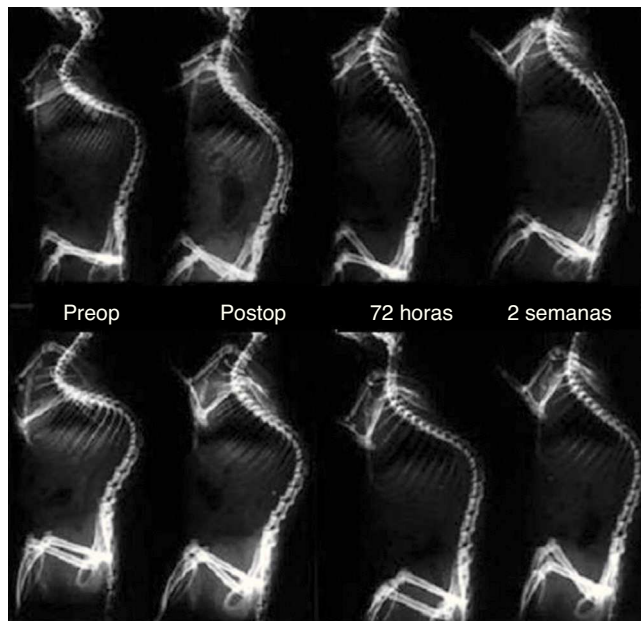


Figura 4 Radiografías laterales seriadas, comparativamente entre grupo nitinol (parte superior) y grupo control (parte inferior), antes de implantar el alambre de nitinol, en el posoperatorio inmediato, a las 72 h y a las 2 semanas poscirugía. Obsérvese una mayor corrección de la cifosis en el grupo nitinol que en el grupo control.

Tabla 3 Valores angulares (media e intervalo de confianza) de la cifosis durante la corrección mediante la implantación de un alambre de nitinol anclado a la columna, comparativamente entre nitinol y grupo control

Cifosis	Preop	Postinm	24 h	72 h	1 semana	2 semanas
Nitinol	96,3 (90,4-102,2)	75,3 (69,4-81,2)	61,3 (55,4-67,2)	58,4 (52,5-64,3)	53,6 (47,7-59,5)	51,7 (45,8-57,6)
Control	99 (93-104,9)	83 (77-88,9)	78,1 (72,2-84)	72,7 (66,8-78,7)	73,1 (67,2-79)	71,1 (65,2-77)

Tabla 4 Medidas de la angulación (en grados) y de la ratio resultante de la división de la longitud del lado convexo y del lado cóncavo, a nivel del cuerpo vertebral apical y de los discos intervertebrales cefálico y caudal en los grupos control y Nitinol

Histología	Angulac CV	Ratio lados CV	Angulac DCEF	Ratio lados DCEF	Angulac DCAU	Ratio DCAU
Nitinol	6,67 (0,38-12)	1,036 (1,02-1,06)	3,33 (0,54-6,1)	1,1 (1,02-1,18)	3,17 (1,36-4,97)	1,07 (1,04-1,10)
Control	9,67 (3,14-16,2)	1,044 (1,02-1,07)	8,83 (6,2-11,4)	1,29 (1,19-1,40)	8,83 (6,6-11,08)	1,22 (1,14-1,30)
	p = 0,748	p = 0,61	p = 0,009	p = 0,002	p = 0,002	p = 0,002

En la [tabla 4](#) están representados los resultados de la angulación y de la ratio resultante de la división de la longitud del lado convexo entre la longitud del lado cóncavo, a nivel del cuerpo vertebral, y de los discos intervertebrales adyacentes.

Se observa que la longitud media del lado convexo del cuerpo vertebral es mayor que la del lado cóncavo en ambos grupos, lo que se traduce en una angulación del cuerpo vertebral y en una ratio mayor de 1. En el grupo control, la angulación media del cuerpo vertebral es de 9,67° y la ratio es de 1,044, mientras que en el grupo nitinol la angulación media es de 6,67° y la ratio es de 1,036. Las diferencias observadas entre ambos grupos a nivel de los parámetros del cuerpo vertebral no son estadísticamente significativas.

Estas diferencias son más evidentes a nivel de los discos intervertebrales que en el cuerpo vertebral apical. En el disco intervertebral cefálico a la vértebra apical, las angulaciones de los discos son de 8,83° en el grupo control y de 3,33° en el grupo nitinol ($p=0,009$), mientras que la ratio de la longitud de lados es de 1,29 y 1,1, respectivamente

($p=0,002$). En el disco caudal a la vértebra apical, las angulaciones de los discos son de 8,83° en el grupo control y de 3,17° en el grupo nitinol ($p=0,002$), mientras que la ratio de la longitud de los lados es de 1,22 y 1,07, respectivamente ($p=0,002$). Por tanto, la longitud del lado convexo de ambos discos intervertebrales es mayor que la del lado cóncavo, lo que se traduce en una angulación del disco intervertebral y una ratio mayor de 1. Pero, tras la corrección de la deformidad, se produce una reducción de la angulación y de la ratio, siendo estas diferencias estadísticamente significativas.

Discusión

El tratamiento quirúrgico habitual de la escoliosis, la artrodesis vertebral posterior instrumentada, permite conseguir una corrección importante e instantánea de la deformidad gracias a una serie de maniobras realizadas por el cirujano junto con la ayuda de las instrumentaciones vertebrales modernas que permiten aplicar grandes fuerzas a las vértebras. Pero estas técnicas tienen un potencial riesgo de lesión neurológica debido a la corrección instantánea de la deformidad que provocaría una isquemia medular o durante la colocación de implantes en la columna por daño directo. Además, la fusión de la columna vertebral afecta negativamente al desarrollo del tronco y de los pulmones.

Con el desarrollo de los «metales inteligentes», gracias a sus propiedades de superelasticidad y memoria de forma, se introduce una nueva filosofía de tratamiento: una corrección gradual y progresiva en el tiempo, al mantener la columna permanentemente sometida a fuerzas correctoras.

El implante utilizado en este estudio es un alambre recto de ortodoncia de níquel y titanio que aplica una fuerza de flexión de 100 g. La situación inicial es la del alambre por debajo de su temperatura de transición (32 °C), en la fase martensita. En esta fase, el alambre presenta poca resistencia y se deforma fácilmente, por lo que su anclaje a la columna resulta muy fácil. Cuando el alambre se calienta por encima de 32 °C, cambia a la fase austenita, recuperando su forma y rigidez originales. Si existe una limitación a la recuperación de su forma, el alambre transmitirá una fuerza correctora constante.

En el estudio presentado, el alambre con memoria de forma es capaz de inducir una corrección gradual de la

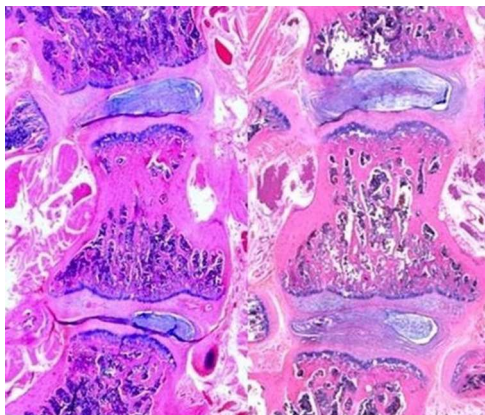


Figura 5 Fotografía de 2 preparaciones histológicas; el corte de la izquierda pertenece a una rata del grupo control (tras generar la escoliosis); el corte de la derecha pertenece a una rata del grupo nitinol (tras corregir la deformidad). Obsérvese la diferencia en la angulación del cuerpo vertebral apical y discos intervertebrales adyacentes entre ambos grupos.

escoliosis a lo largo del tiempo, no instantáneamente, sin fusión, debido al comportamiento plástico de la columna cuando se mantiene bajo la aplicación de una fuerza permanente. Además, es capaz de producir una corrección parcial de los cambios estructurales en vértebras y discos intervertebrales que se producen al generar la escoliosis. Esta estrategia tiene la ventaja teórica de evitar el riesgo de lesión neurológica asociado a la corrección instantánea y preservar el crecimiento de la columna vertebral. La principal diferencia de nuestro estudio con otros trabajos es la capacidad de inducir una corrección gradual, no solo durante la cirugía y el calentamiento de la barra, sino a lo largo del periodo postoperatorio. Los resultados preliminares de la fase de estudio radiográfico de este trabajo han sido previamente publicados⁹ por el mismo grupo de autores.

No son muchos los autores que han investigado las ventajas de los metales con memoria de forma en la corrección de la escoliosis. El primer intento fue realizado en Alemania¹⁰. Un alambre de nitinol se fijó en el lado convexo de un modelo de 8 vértebras de plástico con forma curvada. Al calentarse, el alambre se acortaba y el modelo plástico se enderezaba. Veldhuizen et al.¹¹ diseñaron un dispositivo consistente en una barra con memoria de forma con forma programada curva anclado a la columna de un cadáver con ganchos y tornillos pediculares; al calentar la barra a 50°C produjo una curva escoliótica de 45°.

Sanders et al.¹² utilizaron 6 cabras con escoliosis experimental previamente generada que fue instrumentada con una barra de 6 mm de diámetro de nitinol. Al activar la barra la escoliosis, se corrigió. Las curvas medían 41° de media antes de la instrumentación, 33° de media tras colocar la barra y 11° tras calentar la barra, pero no analizaron si existía una corrección posterior al calentamiento de la barra, a lo largo del tiempo. Un estudio comparable se realizó en monos¹³, en el que 2 barras con memoria de forma se anclaron a la columna con alambres transespinosos. Se obtuvo una buena corrección instantánea de la escoliosis previamente generada, pero no se consiguió corrección extra y gradual tras la cirugía.

Diferentes autores han utilizado barras de nitinol con forma curvilínea para generar escoliosis en animales sanos. Wever et al.¹⁴ usaron una barra de nitinol curvada para doblar progresivamente la columna de 6 cerdos, anclada a las vértebras mediante tornillos pediculares en T12, L2 y L4. Consiguieron generar una escoliosis de 40° de media en las radiografías del postoperatorio inmediato, que permaneció constante durante el seguimiento.

Existen varios estudios¹⁵⁻¹⁷ realizados por el mismo grupo de autores que evalúan la eficacia de la colocación de grapas vertebrales vía anterior, con memoria de forma, para corregir la escoliosis previamente creada en cabras. Los resultados demostraron una pobre capacidad de las grapas para la corrección de la deformidad.

La única aplicación de las barras de nitinol en humanos que conocemos es la que realizan Wang et al.^{18,19} como una herramienta temporal intraoperatoria. Tras colocar tornillos pediculares como puntos de anclaje en la columna de pacientes con escoliosis idiopática del adolescente, utilizan una barra de nitinol anclada a los tornillos que al calentarla tiende a recuperar su forma rectilínea original, actuando como un elemento de corrección temporal que en el mismo

acto quirúrgico la sustituye por barras convencionales. Ellos demostraron que el uso de estas barras temporales reducía el tiempo quirúrgico y la pérdida de sangre, y mejoraban la corrección conseguida con respecto a cuándo utilizaban solo barras tradicionales.

Durante la segunda fase del estudio, observamos que la longitud del lado convexo del cuerpo vertebral y de los discos intervertebrales adyacentes es mayor que la del lado cóncavo. Es decir, al generar la escoliosis experimental se produce una serie de cambios estructurales en los cuerpos vertebrales y discos intervertebrales que revierten tras la corrección de la deformidad, aunque las diferencias preposcorrección son estadísticamente significativas a nivel de los discos. Esta observación nos lleva a pensar que los discos intervertebrales tienen una mayor capacidad de acomodación a las fuerzas correctoras que el cuerpo vertebral, con una reversibilidad más rápida de sus cambios estructurales. Estos cambios histológicos también fueron observados por Sarwark et al.⁸, y establecieron que a mayor magnitud de la deformidad generada mayores eran también los cambios estructurales en las vértebras y los discos intervertebrales.

Tras la realización de este trabajo y la observación de los resultados obtenidos, pensamos que los metales con memoria de forma pueden tener una potencial aplicación futura en el tratamiento de la escoliosis, en el desarrollo de una nueva filosofía de corrección gradual a lo largo del tiempo, debido a la interacción de las fuerzas correctoras que genera el alambre de NiTi y las propiedades plásticas de la columna vertebral.

Nivel de evidencia

Nivel de evidencia I.

Responsabilidades éticas

Protección de personas y animales. Los autores declaran que los procedimientos seguidos se conformaron a las normas éticas del comité de experimentación humana responsable y de acuerdo con la Asociación Médica Mundial y la Declaración de Helsinki.

Confidencialidad de los datos. Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

Derecho a la privacidad y consentimiento informado. Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

Financiación

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo económico de la Sociedad Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología, a través de las becas de investigación de la Fundación SECOT del año 2010.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

- Noonan K, Dolan L, Jacobson W, Weinstein SL. Long-term psychosocial characteristics of patients treated for idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthop*. 1997;7:712-7.
- Fallstrom K, Cochran T, Nachemson A. Long-term effects on personality development in patients with adolescent idiopathic scoliosis. *Spine*. 1986;16:395-401.
- Climent J, Sanchez J. Impact of the type of brace on the quality of life of adolescents with spine deformities. *Spine*. 1999;24:1903-8.
- Braun JT, Olgivie JW, Akyuz E, Brodke DS, Bachus KN. Fusionless scoliosis correction using a chape memory alloy staple in the anterior thoracic spine of the immature goat. *Spine*. 2004;2:1980-9.
- Sánchez Márquez JM, Sánchez Pérez-Grueso FJ, Fernández-Baillo N, García Fernández A. Barras de crecimiento en escoliosis de inicio precoz ¿Permiten realmente el control de la deformidad y el crecimiento vertebral y torácico. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol*. 2013;57:178-85.
- Machado LG, Savi MA. Medical applications of shape memory alloys. *Braz J Med Biol Res*. 2003;36:683-91.
- Stoeckel D, Pelton A, Duerig T. Self-expanding nitinol stents: material and design considerations. *Eur Radiol*. 2004;14:292-301.
- Sarwark JF, Dabney KW, Salzman SK, Wakabayashi T, Kitadai HK, Beauchamp JT, et al. Experimental scoliosis in the rat. I. Methodology, anatomic features and neurologic characterization. *Spine*. 1988;13:466-71.
- Sánchez Márquez JM, Sánchez Pérez-Grueso FJ, Fernández-Baillo N, Gil Garay E. Gradual scoliosis correction over time with shape-memory metal: a preliminary report of an experimental study. *Scoliosis*. 2012;7:20.
- Baumgart F, Bensmann G, Haasters J. Zur dwyer-shen skoliose-noperation mittels drahten ausegierungen. *Arch Orthop Trauma Surg*. 1978;91:67-75.
- Veldhuizen AG, Sanders MM, Cool JC. A scoliosis correction device based on memory metal. *Med Eng Phys*. 1997;19:171-9.
- Sanders JO, Sanders AE, More R, Ashman RB. A preliminary investigation of shape memory alloys in the surgical correction of scoliosis. *Spine*. 1993;18:1640-6.
- Matsumoto K, Tajima N, Kuwahara S. Correction of scoliosis with shape-memory alloy. *J Jpn Orthop Assoc*. 1993;67:267-74.
- Wever DJ, Wlstrodt JA, Veldhuizen AG, Horn JR. Scoliosis correction with shape-memory metal: results of an experimental study. *Eur Spine J*. 2002;11:100-6.
- Braun JT, Hines JL, Akyuz E, Vallera C, Olgivie JW. Relative versus absolute modulation of growth in the fusionless treatment of experimental scoliosis. *Spine*. 2006;31:1776-82.
- Braun JT, Hoffman M, Akyuz E, Olgivie JW, Brodke DS, Bachus KN. Mechanical modulation of vertebral growth in the fusionless treatment of progressive scoliosis in a experimental model. *Spine*. 2006;31:1314-20.
- Braun JY, Akyuz E, Olgivie JW, Bachus KN. The efficacy and integrity of shape memory alloy staples and bone anchors with ligament tethers in the fusionless treatment of experimental scoliosis. *J Bone Joint Surg*. 2005;87:A2038-51.
- Wang Y, Zheng G, Zhang X, Zhang Y, Xiao S, Wang Z. Temporary use of shape memory spinal rod in the treatment of scoliosis. *Eur Spine J*. 2011;20:118-22.
- Wang Y, Zheng G, Zhang X, Zhang Y, Xiao S, Wang Z. Comparative analysis between shape memory alloy-based correction and traditional correction technique in pedicle screws constructs for treating severe scoliosis. *Eur Spine J*. 2010;19:394-9.