



Universidad
Católica de
Valencia
San Vicente Mártir

**Corrección de la escoliosis idiopática del
adolescente mediante tornillos pediculares
sin fusión posterior en pacientes inmaduros.
Restauración de la morfología vertebral normal y
retirada de la instrumentación una vez alcanzada la
madurez ósea**

Tesis para el grado de Doctor en medicina clínica.

Presentada por:

Gonzalo Mariscal Ruiz-Rico

Dirigida por:

Prof. Dr. Carlos Barrios Pitarque

Dr. Jesús Burgos Flores

Valencia, 2023

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Católica de Valencia San Vicente Mártir y, en particular, al Dr. Carlos Barrios Pitarque por su apoyo y orientación durante el desarrollo de mi tesis. Su conocimiento y dedicación han sido fundamentales para el éxito de este trabajo.

Además, quiero dedicar un agradecimiento muy especial a Patricia, quien ha sido mi compañera de vida y mi apoyo incondicional durante todo este proceso. Gracias por tu paciencia y tu comprensión, y por haberme dado la motivación necesaria para llevar a cabo este proyecto.

Por último, quiero dedicar este trabajo a mi familia, quienes me han dado su amor, apoyo y comprensión incondicionales durante todo este proceso. Gracias por ser mi fuente de inspiración y motivación constante.

No quiero dejar de mencionar a nuestros pacientes, cuyo compromiso y confianza son la razón de ser de nuestra labor médica. Gracias por permitirme ser parte de su cuidado y por enseñarme la importancia de una atención médica integral.

Resumen

Introducción:

Las técnicas actuales de modulación del crecimiento vertebral anterior mediante grapado o fijación del cuerpo vertebral proporcionan una corrección incompleta e impredecible de la deformidad, además de las desventajas de la toracotomía necesaria. Recientemente se han confirmado pruebas experimentales de la modulación del crecimiento de las placas epifisarias vertebrales mediante un abordaje posterior con tornillos pediculares.

Objetivo:

El objetivo de este estudio fue valorar de la capacidad correctora de una técnica sin fusión vertebral con un abordaje posterior utilizando tornillos pediculares en pacientes con AIS.

Métodos:

Se trata de un análisis retrospectivo de datos recogidos prospectivamente. Una serie de 36 pacientes con AIS (Risser 3 o menor) fueron sometidos a corrección quirúrgica de sus deformidades mediante tornillos pediculares posteriores sin fusión. La instrumentación se retiró una vez avanzada la madurez esquelética. La mayoría de los casos presentaban curvas principales torácicas de Lenke-1. La corrección de la curva coronal y sagital se evaluó mediante radiografías convencionales en bipedestación antes y después de la operación, antes de retirar la instrumentación, inmediatamente después de retirarla y a los 2 años de seguimiento tras la operación de retirada. También se calculó una relación de acuñamiento coronal (WR) entre la altura de la vértebra del ápex en los lados cóncavo y convexo de la curva principal (MC). El rango de movimiento (ROM) de la columna toracolumbar y la calidad de vida a través del SRS-22 también se evaluaron inicialmente y en el seguimiento final (61,0±5,7 meses).

Resultados:

El ángulo de Cobb coronal medio preoperatorio de las curvas MC fue de $53,7^\circ \pm 7,5^\circ$ (IC 95%: 50,7-56,6°) y se corrigió a $5,5^\circ \pm 7,5^\circ$ (89,7%) inmediatamente después de la operación. Antes de retirar la instrumentación, se produjo una pérdida de corrección de 3,4° y otros 2,8° adicionales justo después de la retirada. En la revisión a los 2 años tras la retirada de los implantes, la MC media era de 13,1°, lo que supone una corrección del 75,4% de la curva inicial. La cifosis T5-T12 mostró una mejora

significativa, pasando de un ángulo medio de $19,0^\circ$ (IC 95%: 13,3-24,8) a $27,1^\circ$ (IC 95%: 20,1-26,1) dos años después de la retirada de los implantes (aumento del 29,9%) ($p < 0,05$). Antes de la intervención quirúrgica, el WR era de $0,71 \pm 0,06$, y dos años después de la retirada, la WR era de $0,98 \pm 0,08$ ($p < 0,001$), lo que indica que el acuñamiento en la vértebra del ápex se había corregido casi por completo. Al final del seguimiento, el ROM sagital medio del segmento T12-S1 era de $51,2 \pm 21,0^\circ$. Las puntuaciones del SRS-22 mejoraron de $3,31 \pm 0,25$ en el preoperatorio a $3,68 \pm 0,25$ en la evaluación final ($p < 0,001$).

Conclusiones:

En conclusión, un abordaje posterior sin fusión utilizando tornillos pediculares corrigió las curvas principales escolióticas de forma satisfactoria y permitió la retirada de la instrumentación una vez alcanzada la madurez ósea. Al final del seguimiento se observó un ROM aceptable de los segmentos previamente instrumentados inferiores y un aumento de la calidad de vida.

Palabras Clave:

Técnica sin fusión, instrumentación posterior, Escoliosis idiopática del adolescente, modulación vertebral, Estabilización con tornillos pediculares, relación de acuñamiento coronal.

Abstract

Introduction:

Current techniques of anterior vertebral growth modulation by vertebral body stapling or tethering provide an incomplete and unpredictable correction of the deformity, in addition to the disadvantages of the required thoracotomy. Recently, experimental evidence of growth modulation of vertebral epiphyseal plates using a posterior approach with pedicle screws was confirmed.

Objectives:

This study aimed to report the corrective ability of a fusionless technique using a posterior approach without fusion in adolescent idiopathic scoliosis (AIS) patients.

Methods:

This was a retrospective analysis of prospectively collected data. A series of 36 patients with AIS (Risser 3 or less) underwent surgical correction of their deformities using posterior pedicle screws without fusion. Instrumentation was removed once the maturity stage advanced, with almost complete fusion of the iliac apophysis. Most cases had main thoracic Lenke-1 curves. Coronal and sagittal curve correction was assessed by conventional standing radiographs pre- and postoperatively, before instrumentation removal, immediately after removal, and at the 2-year follow-up after removal surgery. The coronal wedging ratio (WR) was also calculated between the height of the apex vertebra on the concave and convex sides of the main curve (MC). The range of motion (ROM) of the thoracolumbar spine and quality of life through the SRS-22 were also assessed initially and at the final follow-up (61.0 ± 5.7).

Results:

The mean preoperative coronal Cobb angle of the MC curves was $53.7^\circ \pm 7.5^\circ$ (95% CI: 50.7–56.6°) and was corrected to $5.5^\circ \pm 7.5^\circ$ (89.7%) immediately postoperatively. Before removal of the instrumentation, there was a loss of correction of 3.4° and another additional 2.8° just after removal. In the 2-year check-up after removal of the implants, the mean MC was 13.1° , which is a 75.4% correction of the initial curve. T5–T12 kyphosis showed a significant improvement from a mean angle of 19.0° (95% CI: 13.3–24.8) to 27.1° (95% CI: 20.1–26.1) 2 years after implant removal (29.9% increase) ($p < 0.05$). Before surgery, the WR was 0.71 ± 0.06 , and 2 years after removal, the WR was 0.98 ± 0.08 ($p < 0.001$), indicating that the wedging at the apex vertebra was almost completely corrected. At the end of follow-up, the mean sagittal ROM of

the T12-S1 segment was $51.2 \pm 21.0^\circ$. The SRS-22 scores improved from 3.31 ± 0.25 preoperatively to 3.68 ± 0.25 at the final assessment ($p < 0.001$).

Conclusion:

In conclusion, a fusionless posterior approach using common all-pedicle screws correctly constructed satisfactory scoliotic main curves and permitted instrumentation removal once bone maturity was reached. An acceptable ROM of the previously lower instrumented segments was observed, with an increased quality of life.

Keywords:

Fusionless technique, posterior instrumentation, Adolescent idiopathic scoliosis, vertebral modulation, Pedicle screw stabilization, coronal wedging ratio.

Índice

Agradecimientos	05
Resumen	07
Abstract	09
Índice	12
Abreviaciones	14
Leyenda de tablas	15
Leyenda de figuras	16
1. Introducción	21
1.1. Embriología de la columna vertebral	24
1.2. Escoliosis de inicio temprano o “early onset scoliosis”	25
1.3. Escoliosis	27
1.3.1. Escoliosis idiopática del adolescente	28
1.3.1.1. Diagnóstico escoliosis idiopática del adolescente	28
1.3.1.2. Clasificación de la escoliosis idiopática del adolescente.....	29
1.3.1.3. Tratamiento conservador de la escoliosis idiopática del adolescente	32
1.3.1.4. Tratamiento quirúrgico de la escoliosis idiopática del adolescente	33
1.3.1.4.1. Instrumentación y artrodesis de la deformidad por vía posterior, anterior o por ambas.	33
1.3.1.4.2. Procedimientos sin fusión vertebral, mediante modulación vertebral aplicándose fuerzas sobre los cartílagos de crecimiento de las vértebras afectadas	36
1.3.1.4.3. Procedimientos sin fusión vertebral desde posterior utilizando tornillos pediculares.....	38
2. Hipótesis	41
3. Objetivos	45

4. Material y métodos	49
4.1. Diseño	50
4.2. Tamaño muestral	50
4.3. Participantes	50
4.4. Aspectos éticos	51
4.5. Intervención	51
7.5.1. Colocación de la instrumentación pedicular.....	51
7.5.2. Moldeado de Barras.....	52
7.5.3. Secuencia de corrección de la escoliosis.....	53
7.5.4. Modificaciones adicionales	57
4.6. Variables	58
4.7. Análisis Estadístico	60
5. Resultados	61
5.1. Características demográficas y antropométricas de los pacientes	62
5.2. Resultados radiológicos	65
5.3. Desequilibrio	68
5.4. Rotación vertebral	70
5.5. Rango de movimiento sagital de la transición toracolumbar y la columna lumbar	71
5.6. Modulaci3n vertebral	73
5.7. Calidad de vida	75
6. Discusi3n	79
7. Conclusiones	85
8. Referencias bibliogr3ficas	89
9. Anexos	97

Abreviaciones

AIS: Adolescent idiopathic scoliosis.

AVBT: Anclaje anterior del cuerpo vertebral.

BPC: Buena práctica clínica.

CSVL: Línea vertical sacra central.

DS: Desviación estándar.

EIA: Escoliosis idiopática del adolescente.

GEER: Grupo Español de Enfermedades del Raquis.

GPVM: Growing posterior vertebral modulation.

IC: Intervalos de confianza.

MC: Curva principal.

PDDC: Posterior Dynamic Deformity Correction.

RM: Resonancia magnética.

ROM: Rango de movimiento.

SD: Standard deviation.

SRS-22: Scoliosis Research Society-22.

T: Torácica.

TC: Tomografía computarizada.

TL: Toracolumbar.

WR: Acuñaamiento coronal.

Leyenda de tablas

Tabla 1. Clasificación tipos de escoliosis de inicio temprano o “early onset scoliosis” (EOS).

Tabla 2. Perfil clínico y características de los pacientes.

Tabla 3. Vértebra instrumentada superior e inferior en los dos tipos de curvas.

Tabla 4. Evolución del plano coronal y sagital de la curva principal en las diferentes etapas de seguimiento.

Tabla 5. Evolución del desequilibrio en el plano anteroposteior.

Tabla 6. Evolución del desequilibrio en el plano lateral.

Tabla 7. Valores del rango de movimiento (flexión y extensión) según los niveles toracolumbar y lumbar.

Tabla 8. Modulación vertebral analizada en el ápex vertebral utilizando la relación de cuña (WR).

Tabla 9. Cambio en el cuestionario SRS-22 según la ubicación de la deformidad y la madurez esquelética.

Tabla 10. Cambios de los dominios del SRS-22 antes y después del seguimiento.

Leyenda de las Figuras

Figura 1: Clasificación de Lenke para la escoliosis idiopática del adolescente. Clasificación de Lenke para la escoliosis idiopática del adolescente es una figura que representa un sistema de clasificación para la evaluación y tratamiento de la escoliosis idiopática en adolescentes. La figura muestra seis tipos principales de escoliosis idiopática que se subdividen en tres subtipos cada uno. Este sistema de clasificación se basa en la medición de la curvatura de la columna vertebral en tres planos: coronal, sagital y axial. La figura es una herramienta útil para los cirujanos en la evaluación y tratamiento de la escoliosis idiopática del adolescente, ya que ayuda a determinar el tipo y gravedad de la curvatura, el mejor tratamiento para el paciente y a predecir el resultado del tratamiento y la progresión de la curvatura. (Foto tomada de Lenke LG, Betz RR, Harms J, Bridwell KH, Clements DH, Lowe TG, Blanke K. Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am.* 2001 Aug;83(8):1169-81. PMID: 11507125) (22).

Figura 2: Cirugía de escoliosis idiopática mediante artrodesis vía posterior. La figura muestra una vista posterior de la columna, con los tornillos pediculares colocados en las vértebras afectadas. La técnica utilizada en esta cirugía es la artrodesis, que implica la fusión de la columna para corregir la curvatura (Donada por el Dr. Burgos Flores).

Figura 3: Abordaje quirúrgico de la columna torácica mediante toracotomía doble: Representa una técnica quirúrgica para acceder a la columna torácica. La figura muestra una vista frontal del tórax abierto, con las costillas expuestas y los músculos retirados para acceder a la columna. La técnica utilizada en esta cirugía es la toracotomía doble, que implica hacer dos incisiones en el tórax para acceder a la columna vertebral. Esta técnica se utiliza para tratar lesiones y enfermedades de la columna torácica (Foto tomada de Liljenqvist U, Halm H, Bullmann V. Spontaneous lumbar curve correction in selective anterior instrumentation and fusion of idiopathic thoracic scoliosis of Lenke type C. *Eur Spine J.* 2013 Mar;22 Suppl 2(Suppl2):S138-48. doi: 10.1007/s00586-012-2299-7. Epub 2012 Apr 25. PMID: 22531898; PMCID:PMC3616460) (31).

Figura 4: “Anterior vertebral body tethering” representa una técnica quirúrgica utilizada para tratar la escoliosis idiopática en niños y adolescentes. La figura muestra una vista frontal de la columna vertebral, con el dispositivo de anclaje en el cuerpo vertebral de la vértebra superior e inferior. La técnica utilizada en esta cirugía es la “tethering” vertebral, que implica la colocación de un dispositivo de anclaje en el cuerpo vertebral de la vértebra superior e inferior de la curvatura. El dispositivo está hecho de un material especial que permite la flexibilidad de la columna vertebral, pero también proporciona soporte y estabilización para corregir la curvatura.

Figura 5: Modulación vertebral posterior en estudios experimentales con animales: La técnica de modulación vertebral posterior se utiliza en estudios experimentales con animales para evaluar la respuesta de la columna vertebral a la aplicación de fuerzas mecánicas controladas. Esta figura muestra la colocación de dispositivos de fijación en la parte posterior de la columna vertebral para permitir la aplicación de diferentes niveles de fuerza y la medición de la respuesta de la columna vertebral a estas fuerzas. La técnica de modulación vertebral posterior es importante para comprender mejor la biomecánica de la columna vertebral y para desarrollar tratamientos más efectivos para trastornos de la columna vertebral en humanos. (Foto tomada de Lonner BS, Auerbach JD, Estreicher MB, Betz RR, Crawford AH, Lenke LG, Newton PO. Pulmonary function changes after various anterior approaches in the treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *J Spinal Disord Tech.* 2009;22(8):551-8) (50).

Figura 6: Modulación vertebral posterior con PDDC-ApiFix Ltd.: Recientemente, se desarrolló una técnica de modulación vertebral posterior llamada “Posterior Dynamic Deformity Correction” (PDDC) por la empresa ApiFix Ltd., con sede en Misgav, Israel. Esta figura muestra la aplicación de la técnica de PDDC con dispositivos de fijación en la parte posterior de la columna vertebral para permitir la corrección dinámica de la curvatura de la columna vertebral. La técnica de PDDC es una técnica prometedora para el tratamiento de trastornos de la columna vertebral en humanos y se espera que sea una alternativa menos invasiva a la cirugía tradicional de escoliosis. (Foto tomada de Floman Y, El-Hawary R, Lonner BS, Betz RR, Arnin U. Vertebral growth modulation by posterior dynamic deformity correction device in skeletally immature patients with moderate adolescent idiopathic scoliosis. *Spine Deform.* 2021 Jan;9(1):149-153. doi: 10.1007/s43390-020-00189-z. Epub 2020 Aug 21. PMID: 32827087; PMCID: PMC7775858.) (48).

Figura 7: Imagen quirúrgica intraoperatoria que muestra la colocación de tornillos pediculares bilateralmente en todos los niveles a instrumental, utilizando la técnica de manos libres y con previo control neurofisiológico del trayecto del tornillo. Además, se realizó estimulación neurofisiológica de los tornillos una vez posicionados para garantizar su correcta colocación (Donada por el Dr. Burgos Flores).

Figura 8: Imagen de fluoroscopia intraoperatoria que evidencia la correcta colocación de los tornillos pediculares en los planos anteroposterior y lateral (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

Figura 9: Imagen intraoperatoria que ilustra los tornillos pediculares y las barras tras la corrección de la deformidad, logrando una alineación adecuada de la columna vertebral (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

Figura 10: Imagen de comprobación mediante fluoroscopia de la instrumentación tras la corrección de la deformidad, verificando la correcta colocación de los elementos de fijación (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

Figura 11: Modulación vertebral conseguida mediante el procedimiento: Esta imagen muestra la modulación vertebral conseguida mediante un procedimiento específico. La técnica utilizada en este procedimiento permitió la modulación de la curvatura de la columna vertebral para corregir una deformidad. La imagen muestra la columna vertebral antes y después del procedimiento, con una notable mejoría en la alineación de la columna vertebral y una reducción en la curvatura. Esta imagen es una herramienta visual importante para ayudar a los médicos y pacientes a comprender mejor los resultados del procedimiento y la efectividad de la técnica utilizada para la corrección de trastornos de la columna vertebral.

Figura 12: Paciente con escoliosis idiopática con Risser avanzado. Se procede a retirada del material (Donada por el Dr. Burgos Flores).

Figura 13: Paciente con escoliosis idiopática con Risser avanzado. Se procede a retirada del material (Donada por el Dr. Burgos Flores).

Figura 14: Movilidad lumbar en flexo-extensión máxima T12-S1 para el estudio de la amplitud de movimiento toracolumbar (Donada por el Dr. Burgos Flores).

Figura 15: Cálculo del Wedging Ratio (WR) en una columna vertebral afectada por escoliosis. Esta figura ilustra el cálculo del Wedging Ratio (WR) en una columna vertebral afectada por escoliosis. El WR es una medida utilizada para evaluar la modulación del apex vertebral en la curvatura de la columna vertebral. Se calcula dividiendo la altura de la concavidad por la altura de la convexidad en el punto más agudo de la curvatura. Un mayor WR indica una mayor modulación del ápex vertebral y una mayor deformidad de la columna vertebral.

Figura 16: Wedging ratio (WR) mostrado en una radiografía anteroposterior. En la figura, se muestra la medición del WR en una columna vertebral afectada por escoliosis, donde la altura de la concavidad es menor que la altura de la convexidad en el apex de la curvatura (Donada por el Dr. Burgos Flores).

Figura 17: Una niña de 13 años y dos meses con AIS Lenke tipo 1BN (50°/36°) con Risser 1 (A) e hipocifosis torácica de 13°(F), fue tratada quirúrgicamente mediante un abordaje posterior realizando una instrumentación de T3-L4 sin fusión con una ligera hipercorrección de ambas curvas (B). Tres años y dos meses después de la intervención quirúrgica inicial y justo antes de la retirada de la instrumentación, las curvas

principal y compensatoria permanecieron sin cambios hacia el lado opuesto de las curvas iniciales (C). La radiografía después de la retirada de los implantes vertebrales muestra la mínima escoliosis residual hacia el lado opuesto de las curvas que existían antes del tratamiento quirúrgico (D). Estas curvas escolióticas mínimas permanecieron sin cambios en la última radiografía tomada dos años después de la retirada de la instrumentación (E). En cuanto al plano sagital, la radiografía postoperatoria después de la corrección quirúrgica demostró un aumento en la hipocifosis previa (G), que permaneció sin cambios en la radiografía previa a la retirada de la instrumentación (H), después de su retirada (I) y en el último seguimiento radiográfico dos años después de la retirada de la instrumentación (J) (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

Figura 18: Una niña de 14 años y once meses con AIS Lenke tipo 5 (17/36/57), con cifosis T10-L2 (+16°) y Risser 3 (A y F). Se realizó una instrumentación posterior con tornillos pediculares de T4-L5 (B y G), logrando la corrección de la curva toracolumbar y torácica (B). En el plano sagital, también se verificó la corrección de la cifosis de transición toracolumbar (G). Los valores angulares coronales y sagitales permanecieron sin cambios hasta la retirada de la instrumentación vertebral (C y H) y en el estudio radiográfico después de la retirada de los implantes (D e I). En el último control radiográfico, dos años después de la retirada de la instrumentación, la escoliosis torácica (E) y los valores angulares vertebrales sagitales permanecieron sin cambios (J) (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

Figura 19: Corrección de la curva coronal principal durante el seguimiento. Se observó una corrección del 89,7% después de la cirugía y una corrección del 75,4% se logró a los dos años de seguimiento.

Figura 20: Valor angular de la cifosis torácica desde T2 a T12.

Figura 21: El desequilibrio anteroposterior de columna consiste en una traslación anormal en el plano sagital de la columna vertebral. Se define como la distancia horizontal entre la línea de plomo que cae del centro del cuerpo vertebral C7 y el centro del cuerpo S1. El desequilibrio lateral de columna se refiere a un desplazamiento anómalo en el plano coronal o frontal de la columna. Se mide como la distancia perpendicular entre una línea central vertical que pasa por el centro del sacro y el centro del cuerpo de C7. La figura muestra la medición del desequilibrio anteroposterior y el lateral. (Imágenes obtenidas de <https://radiopaedia.org/articles/coronal-balance>)

Figura 22: El método de Perdriolle permite cuantificar la rotación de una vértebra utilizando radiografías simples. Se basa en medir el ángulo formado entre una línea que une el centro de la vértebra con el borde posterior y otra línea desde el centro de la vértebra hasta el punto más lateral del pedículo en la proyección oblicua.

Este ángulo de rotación se mide con un transportador o torsiómetro diseñado por Perdriolle. Valores mayores a 10° en el ángulo de Perdriolle se consideran anormales y sugieren una rotación vertebral excesiva (Imagen obtenida de <https://www.science-direct.com/science/article/abs/pii/S1286935X04705304>).

Figura 23: Rotación vertebral según Perdriolle según el tipo de curva (toracolumbar y torácica).

Figura 24: Niña de 14 años con AIS tipo 1CN Lenke (Cobb de 54°) que se sometió a cirugía de corrección con instrumentación T3-L3. Las imágenes muestran radiografías sagitales de la columna lumbar en extensión máxima y flexión después de la retirada de los implantes (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

Figura 25: Análisis del rango de movimiento (ROM) toracolumbar y torácico durante la flexión y extensión dividido por segmento dos años después de la retirada de los implantes.

Figura 26: Modulación de la vértebra apical antes de la cirugía y después de la retirada de los implantes. El wedging ratio pasó de 0,75 a 0,96 (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

Figura 27: Resultados del cuestionario SRS-22 según la ubicación de la curva. Se demostró una mejora en muchos de los dominios evaluados. Las curvas torácicas mejoraron en la mayoría de los campos del cuestionario en comparación con las curvas toracolumbares.

Figura 28: Resultados del cuestionario SRS-22 según el grado de madurez esquelética. Se observó una mejora significativa en casi todos los dominios estudiados.



1. Introducción

En la corrección quirúrgica de la escoliosis idiopática adolescente, la fusión vertebral es un procedimiento común utilizado para corregir la deformidad vertebral. Esta técnica implica la colocación de injertos óseos en el espacio entre las vértebras afectadas, con el objetivo de promover la fusión espinal. Los injertos óseos pueden ser tomados del propio paciente (autoinjerto) o de un donante (aloinjerto). Después de reducir la deformidad alineando las vértebras, se fijan en su posición correcta utilizando instrumentos quirúrgicos, realizando posteriormente la fusión con injertos óseos. La fusión vertebral es una técnica efectiva para corregir la escoliosis y prevenir la progresión de la deformidad, pero puede limitar la movilidad de la columna y aumentar el estrés en las vértebras adyacentes, lo que puede llevar a problemas a largo plazo. Por esta razón, se han desarrollado técnicas alternativas, como la modulación vertebral, que buscan corregir la deformidad sin fusionar las vértebras.

La modulación vertebral, aplica fuerzas correctivas para modular el crecimiento de las placas epifisarias vertebrales mediante implantes. La modulación vertebral se basa en la Ley de Hueter-Volkman, que establece que la aplicación de fuerzas compresivas reduce el crecimiento óseo mientras que las fuerzas de distracción opuestas aumentan el crecimiento óseo. Estas fuerzas se pueden aplicar a la columna escoliótica con el objetivo de restaurar la morfología vertebral normal.

Existen dos técnicas principales de modulación vertebral dependiendo del abordaje quirúrgico. En la técnica anterior, el abordaje se realiza por vía anterior y las fuerzas de corrección se aplican mediante la instrumentación de las vértebras afectadas. Una de las modalidades consiste en la colocación de tornillos-grapas bicorticales en el cuerpo vertebral de cada nivel, aprovechando la fuerza de tracción de los mismos para lograr la reducción de la curva. La otra técnica es posterior e instrumenta las vértebras a través de un abordaje dorsolumbar, colocando barras y tornillos que permiten ejercer fuerzas de compresión/distracción y así modular la columna hasta su alineamiento.

El grapado del cuerpo vertebral es una técnica que utiliza grapas metálicas para comprimir la concavidad de los cuerpos vertebrales y descomprimir la convexidad, lo que reduce la tasa de crecimiento de la vértebra convexa y permite que la vértebra cóncava crezca más. Por otro lado, la técnica de anclaje utiliza tornillos pediculares y un cable flexible que se coloca a través de las apófisis transversas de las vértebras y se tensa para corregir la curvatura.

En ambas técnicas, se aplican principalmente fuerzas compresivas para disminuir el crecimiento vertebral de la convexidad. Estas técnicas permiten la corrección de la deformidad sin fusionar las vértebras, lo que puede tener ventajas en términos de movilidad de la columna y prevención de problemas a largo plazo asociados con la fusión vertebral.

En el segundo tipo de modulación vertebral, las fuerzas correctivas se aplican posteriormente mediante implantes ubicados en los pedículos vertebrales. Esta técnica se utiliza para corregir curvas más grandes y complejas. Los implantes se colocan en la columna mediante un abordaje posterior y se utilizan para aplicar fuerzas de distracción para corregir la curvatura de la columna. Esta técnica puede ser más invasiva que la modulación vertebral anterior, pero puede ser más efectiva para corregir deformidades más grandes y complejas.

Todas estas limitaciones y consecuencias negativas provocadas por el uso de las técnicas actuales de tratamiento de la escoliosis idiopática del adolescente, junto a la inexistencia de alteraciones patológicas en las numerosas y amplias placas de crecimiento de los cuerpos vertebrales y la constatación experimental de la modulación vertebral por efecto de la contracción muscular nos estimularon a desarrollar una técnica quirúrgica para la corrección completa de la deformidad escoliótica mediante modulación vertebral posterior, manteniendo la movilidad vertebral siguiendo a la corrección quirúrgica de esta deformidad vertebral.

La columna inmadura tiene cartílagos de crecimiento fisarios que se sitúan en toda la superficie de los dos platillos terminales de cada cuerpo vertebral lo que representa una extensa área fisaria a lo largo de la columna que contribuyen significativamente al crecimiento vertebral y que son subsidiarios de ser influidas por efectos de fuerzas de presión o distracción aplicadas mediante tornillos pediculares, consiguiéndose de esta manera la modulación vertebral y la corrección de la deformidad.

La técnica quirúrgica que analizaremos pertenece al segundo grupo de procedimientos quirúrgicos para la corrección de la escoliosis idiopática del adolescente mediante modulación fisaria vertebral. Dentro de este grupo se incluye en el subgrupo de técnicas quirúrgicas donde las fuerzas modulantes se aplican desde posterior usando tornillos pediculares.

En esta técnica realizamos la corrección completa de la escoliosis utilizando una metodología quirúrgica posterior, reproducible y, con la que se consigue la corrección de las curvas escolióticas y para ello se usa el mayor número de implantes posibles para conseguir la corrección máxima. Con esta técnica no se realiza artrodesis del área vertebral instrumentada y esta instrumentación se retira cuando se alcanza la maduración ósea. Con la retirada de la instrumentación se recupera la movilidad vertebral y se evitan las importantes complicaciones derivadas de las fusiones vertebrales extensas que se usan con las técnicas convencionales.

1.1. Embriología de la columna vertebral

La columna vertebral es una estructura compleja y vital del cuerpo humano que proporciona soporte y protección a la médula espinal y permite el movimiento y la flexibilidad del tronco. Durante el desarrollo embrionario, la columna vertebral se forma a partir de la segmentación y diferenciación de la placa del mesodermo paraxial, también conocida como somitos, que se forman a ambos lados del tubo neural (1,2). Las escoliosis congénitas pueden producirse por defectos en este proceso de formación o segmentación que ocurren entre la tercera y octava semana de gestación. Los somitos se forman en etapas tempranas del desarrollo embrionario y se generan de manera secuencial a lo largo del eje craneocaudal. En los seres humanos, se forman alrededor de 42-44 pares de somitos, que se distribuyen en regiones específicas del cuerpo y dan lugar a estructuras diferentes (1,2). En la región del cuello y la cabeza, se forman siete somitos, que dan lugar a los músculos del cuello y la cabeza. En la región torácica, se forman 12 pares de somitos, que dan lugar a las costillas, los músculos intercostales y los músculos de la pared abdominal. En la región lumbar, se forman cinco pares de somitos, que dan lugar a los músculos de la espalda y la pared abdominal. En la región sacra, se forman cinco pares de somitos, que se fusionan para formar el hueso sacro. En la región coccígea, se forman varios somitos, que dan lugar al hueso coccígeo (1,2).

Cada somito se divide en tres partes distintas: el dermomiótomo dorsal, el esclerotomo ventral y el miotomo intermedio. El dermomiótomo dorsal da lugar a la dermis de la piel y los músculos de la espalda, el esclerotomo ventral da lugar al cartílago y los huesos de la columna, y el miotomo intermedio da lugar a los músculos de la pared abdominal (1,2). La segmentación de los somitos comienza en el día 20 del desarrollo embrionario y se completa alrededor del día 30. Durante este proceso, los somitos se dividen en unidades repetitivas llamadas somatmeros, que dan lugar a segmentos individuales de la columna (1,2). La formación de la columna comienza con la diferenciación de los somitos en esclerotomos ventrales, que dan lugar a las vértebras y los discos intervertebrales. Cada esclerotomo se divide en dos partes: una parte ventral, que forma el cuerpo vertebral y el anillo epifisario, y una parte dorsal, que forma el arco neural y las apófisis espinosas y transversas (3). A medida que los esclerotomos se diferencian, las células mesenquimales del tejido conectivo circundante se condensan para formar el proceso de la costilla y los músculos de la pared torácica. En la región cervical, los esclerotomos se diferencian en vértebras más pequeñas, mientras que en la región lumbar, se diferencian en vértebras más grandes y robustas para soportar la carga del cuerpo (3). La formación del disco intervertebral comienza en la etapa fetal temprana y se completa en la adolescencia. El disco intervertebral se forma a partir del mesénquima del esclerotomo ventral y consiste en un núcleo pulposo central y un anillo fibroso periférico (4). Durante la for-

mación de la columna, también se desarrollan las estructuras nerviosas asociadas, incluyendo la médula espinal y las raíces nerviosas. La médula espinal se forma a partir del tubo neural y se extiende a lo largo de la columna, desde el cerebro hasta el nivel de la segunda vértebra lumbar. Las raíces nerviosas emergen de la médula espinal a través de los agujeros intervertebrales y se conectan con los músculos y los órganos del cuerpo (5).

1.2. Escoliosis e inicio temprano o “early onset scoliosis”

La escoliosis de inicio temprano se refiere a la aparición de la deformidad antes de los 10 años de edad, y representa una forma particularmente grave de la enfermedad (5). Las características principales de escoliosis de inicio temprano se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación tipos de escoliosis de inicio temprano o “early onset scoliosis” (EOS).

Tipo de EOS	Características
Escoliosis congénita	Se produce debido a problemas en el desarrollo fetal y se presenta al nacer o poco después. Puede ser causada por una hemivértebra (una vértebra incompleta), una fusión de vértebras o una rotación anormal de la columna.
Escoliosis neuromuscular	Se produce en pacientes con trastornos neuromusculares, como la parálisis cerebral, la distrofia muscular y la espina bífida. La debilidad muscular y la falta de control pueden causar curvaturas anormales en la columna.



Escoliosis idiopática infantil	Se produce en niños menores de 3 años y se caracteriza por una curvatura lateral de la columna de más de 10 grados. La causa es desconocida y puede ser más difícil de tratar que la escoliosis idiopática en la adolescencia debido al mayor riesgo de progresión y deformidad.
Escoliosis sindrómica	Se presenta en pacientes con trastornos genéticos o síndromes, como el síndrome de Marfan, el síndrome de Ehlers-Danlos y el síndrome de Down. La deformidad de la columna es una de las características de los trastornos o síndromes.
Escoliosis post-infecciosa	Se produce después de una infección de la columna, como la tuberculosis o una infección. La curvatura de la columna puede ser causada por la destrucción de los discos intervertebrales y las vértebras.
Escoliosis juvenil	La escoliosis juvenil se presenta generalmente después de los 4 años y antes de la pubertad. La causa exacta de la escoliosis juvenil es desconocida en la mayoría de los casos.

1.3. Escoliosis

La escoliosis es una deformidad tridimensional de la columna que se caracteriza por una curvatura lateral de más de 10 grados. Esta deformidad puede ser de inicio temprano o tardío, dependiendo de la edad de inicio (6,7). La escoliosis idiopática se divide en tres tipos principales: infantil, juvenil y adolescente temprana. La escoliosis infantil se refiere a la aparición de la deformidad antes de los 3 años de edad, mientras que la escoliosis juvenil se refiere a la aparición de la deformidad entre los 3 y los 10 años de edad. La escoliosis adolescente se refiere a la aparición de la deformidad entre los 10 y los 13 años de edad (6,7). La escoliosis infantil es la forma más rara de escoliosis idiopática y representa menos del 1% de los casos de escoliosis. Esta forma de escoliosis es más común en niños y se presenta con una curvatura lateral de la columna que se desarrolla rápidamente en las primeras semanas o meses de vida (8,9). La escoliosis juvenil es la forma más común de escoliosis de inicio temprano y representa alrededor del 10% de los casos de escoliosis. Esta forma de escoliosis es más común en niñas y se presenta con una curvatura lateral de la columna que se desarrolla lentamente durante varios años. La escoliosis juvenil se asocia con una mayor probabilidad de progresión de la curva (10,11). La escoliosis idiopática del adolescente es la forma más común de escoliosis representa aproximadamente el 80% de los casos de escoliosis. Esta forma de escoliosis se presenta con una curvatura lateral de la columna que se desarrolla lentamente durante varios años, pero antes de la pubertad. La escoliosis adolescente temprana es más común en niñas y se asocia con una mayor probabilidad de progresión de la curva (10,11).

El tratamiento de la escoliosis de inicio temprano depende del tipo y la gravedad de la deformidad. En general, el tratamiento de la escoliosis de inicio temprano se enfoca en frenar la progresión de la curva y prevenir complicaciones a largo plazo, como la insuficiencia respiratoria. El tratamiento puede incluir el uso de corsés ortopédicos, la fisioterapia y la cirugía en casos graves (6,12).

1.3.1 Escoliosis idiopática del adolescente

La escoliosis idiopática del adolescente (EIA) es una deformidad de la columna que se caracteriza por una curvatura lateral de más de 10 grados en el plano anteroposterior. Según el consenso actual, la EIA se define como una curvatura lateral de la columna de más de 10 grados, con una edad de inicio entre 10 y 18 años, sin una causa conocida y sin anomalías neuromusculares, congénitas o traumáticas (10-12). La EIA es una afección ortopédica común en la población adolescente, con una prevalencia que varía entre el 1% y el 3%. La EIA es más común en niñas que en niños, con una relación de 9:1 (13-14). Aunque la causa de la EIA es desconocida, se han identificado varios factores de riesgo que pueden contribuir a su desarrollo. Los factores de riesgo incluyen la genética, la edad, el sexo, el crecimiento rápido, el bajo peso al nacer, la postura y el estilo de vida (15-16). La EIA se presenta como una curvatura lateral de la columna que se desarrolla lentamente durante varios años, generalmente entre las edades de 10 y 18 años. La curvatura puede ser en forma de “S” o de “C” y está asociada con otros cambios en la columna, como la rotación y la inclinación (17-18).

1.3.1.1. Diagnóstico escoliosis idiopática del adolescente

El diagnóstico de la EIA se basa en la evaluación clínica y radiológica. La evaluación clínica incluye una historia clínica detallada y un examen físico completo. Durante la historia clínica, el médico puede indagar sobre los síntomas del paciente, como dolor de espalda, fatiga y debilidad muscular. También se pueden preguntar sobre la historia familiar de escoliosis y otros trastornos ortopédicos. Durante el examen físico, el médico puede evaluar la postura, la marcha y la movilidad de la columna. También se puede medir la altura de los hombros, la pelvis y las piernas para detectar cualquier asimetría. (10,13)

El diagnóstico radiológico de la EIA se realiza mediante radiografías simples de columna. Las radiografías se realizan en dos proyecciones, lateral y anteroposterior, y se evalúan las curvaturas de la columna en ambas proyecciones. El ángulo de Cobb se utiliza para medir la magnitud de la curvatura y se define como el ángulo formado por las líneas trazadas a lo largo de los bordes superiores e inferiores de las vértebras más curvas de la columna. También se pueden utilizar las inclinaciones o “bending” que valoran la flexibilidad de la curva (18-19). Además de las radiografías, se pueden utilizar otras pruebas de imagen para evaluar la EIA, como la resonancia magnética (RM) y la tomografía computarizada (TC). La RM se utiliza para evaluar las estructuras blandas de la columna, como los discos intervertebrales y los ligamentos, y puede ser útil para detectar anomalías que no son visibles en las radiografías. El TC se utiliza

para evaluar la estructura ósea de la columna y puede ser útil para detectar anomalías óseas que pueden contribuir a la curvatura de la columna (20-21).

1.3.1.2. Clasificación de la escoliosis idiopática del adolescente

La deformidad se clasifica acorde a la clasificación de Lenke (22) (Figura 1). La clasificación de Lenke es un sistema de clasificación utilizado para categorizar la EIA en subtipos específicos. Esta clasificación se basa en la forma de la curvatura de la columna y en la ubicación de la curvatura en la columna. La clasificación de Lenke es útil para guiar la planificación del tratamiento y para predecir el resultado del tratamiento en pacientes con EIA (21-22). La clasificación de Lenke se basa en la medición del ángulo de Cobb en las radiografías de la columna vertebral. El ángulo de Cobb se mide trazando líneas paralelas a los bordes superiores e inferiores de las vértebras más inclinadas de la columna vertebral. El ángulo de Cobb se utiliza para determinar la magnitud de la curvatura y para clasificar la curvatura en una de las categorías de la clasificación de Lenke. (22). La clasificación de Lenke ha demostrado ser útil para guiar la planificación del tratamiento en pacientes con EIA. La clasificación de Lenke también se utiliza para predecir el resultado del tratamiento en pacientes con EIA y seleccionar el tipo de tratamiento adecuado para cada paciente (22). La clasificación de Lenke ha sido objeto de críticas por su complejidad y su dificultad para aplicarse en la práctica clínica. Algunos estudios han sugerido que la clasificación de Lenke puede no ser adecuada para todos los casos de EIA y que pueden ser necesarias otras clasificaciones para casos complejos o inusuales (21).

El sistema de clasificación de Lenke (22) está organizado según el tipo de curva (1-6) con un modificador torácico sagital (-, N o +) y un modificador de la columna lumbar (A, B, C). Las curvas estructurales se definen como aquellas que mantienen una desviación mayor a 25° durante la prueba denominada “bending test”, consistente en inclinar lateralmente al paciente hacia ambos lados para evaluar la flexibilidad de posibles curvaturas y diferenciar las estructurales de las no estructurales. Cuando hay múltiples curvas, la curva mayor se define como la curva más grande; sin embargo, las curvas menores pueden seguir definiéndose como estructurales. La base de este sistema de clasificación era determinar qué niveles vertebrales eran apropiados para una artrodesis. Los tipos de curvas se basan en la localización. Las curvas torácicas tienen un vértice desde T2 hasta el disco T11/T12. Las curvas toracolumbares tienen un vértice desde T12 hasta L1, mientras que las curvas lumbares tienen un vértice desde el disco L1/L2 hasta L4:

- El tipo 1 es una curva torácica principal. También puede haber curvas menores proximales torácicas y toracolumbares/lumbares no estructurales.
- El tipo 2 es una curva torácica doble con una curva estructural menor proximal y una curva torácica principal. También puede haber una curva toracolumbar/lumbar no estructural y menor.
- El tipo 3 es también una doble curva mayor con la curva torácica principal como curva mayor. Sin embargo, la segunda curva se encuentra en la región lumbar y ambas curvas son estructurales.
- El tipo 4 es una curva mayor triple con curvas estructurales en las regiones torácica proximal, torácica principal y TL/L. Una vez más, la curva torácica es la principal.
- El tipo 5 es una única curva estructural en la región toracolumbar/lumbar rodeada por dos curvas menores no estructurales.
- El tipo 6 es una curva doble toracolumbar/lumbar-torácica principal. La toracolumbar/lumbar es la curva mayor, pero la curva torácica también es estructural.

Los modificadores lumbares tipo A, B y C se utilizan para describir la relación entre la línea vertical sacra central (CSVL) y el vértice de la curva lumbar (Fig. 1). El tipo A tiene la línea entre los pedículos del vértice lumbar. En el Tipo B, el CSVL toca el cuerpo vertebral apical. En el tipo C, el CSVL es completamente medial al cuerpo vertebral. El modificador sagital torácico describe la cifosis torácica de T5 a T12. Menos de 10° de cifosis se designa con “-”, > 40° de cifosis un “+”, y “N” (normal) es la cifosis en el rango de 10° a 40°.

Curve type				
Type	Proximal thoracic	Main thoracic	Thoracolumbar/lumbar	Description
1	Nonstructural	Structural (major)	Nonstructural	Main thoracic (MT)
2	Structural	Structural (major)	Nonstructural	Double thoracic (MT)
3	Nonstructural	Structural (major)	Structural	Double major (DM)
4	Structural	Structural (major)	Structural (major)	Triple major (TM) ⁶
5	Nonstructural	Nonstructural	Structural (major)	Thoracolumbar/lumbar (TLL)
6	Nonstructural	Structural	Structural (major)	Thoracolumbar/lumbar-main thoracic (TL/L-MT)

Structural criteria

(Minor curves)

Proximal thoracic – Side bending Cobb $\geq 25^\circ$
– T2-T5 kyphosis $\geq 20^\circ$

Main thoracic – Side bending Cobb $\geq 25^\circ$
– T10-L2 kyphosis $\geq 20^\circ$

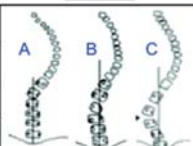
Thoracolumbar/lumbar – Side bending Cobb $\geq 25^\circ$
– T10-L2 kyphosis $\geq 20^\circ$

Location of apex

(SRS definition)

Curve	Apex
Thoracic	T2-T11/12 disk
Thoracolumbar	T12-L1
Thoracolumbar/lumbar	L1/2 disk-L4

Modifiers

Lumbar spine modifier	CSVL to lumbar apex		Thoracic sagittal profile T5-T12	
A	CSVL between pedicles		- (hypo)	$<10^\circ$
B	CSVL touches apical body(ies)		N (normal)	$10^\circ-40^\circ$
C	CSVL completely medial		+ (hyper)	$>10^\circ$

Curve type (1-6) + lumbar spine modifier (A, B, C) + thoracic sagittal modifier (-, N, +)
Classification (eg, 1B+): _____

Figura 1: Clasificación de Lenke para la escoliosis idiopática del adolescente. Clasificación de Lenke para la escoliosis idiopática del adolescente es una figura que representa un sistema de clasificación para la evaluación y tratamiento de la escoliosis idiopática en adolescentes. La figura muestra seis tipos principales de escoliosis idiopática que se subdividen en tres subtipos cada uno. Este sistema de clasificación se basa en la medición de la curvatura de la columna vertebral en tres planos: coronal, sagital y axial. La figura es una herramienta útil para los cirujanos en la evaluación y tratamiento de la escoliosis idiopática del adolescente, ya que ayuda a determinar el tipo y gravedad de la curvatura, el mejor tratamiento para el paciente y a predecir el resultado del tratamiento y la progresión de la curvatura. (Foto tomada de Lenke LG, Betz RR, Harms J, Bridwell KH, Clements DH, Lowe TG, Blanke K. Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis. J Bone Joint Surg Am. 2001 Aug;83(8):1169-81. PMID: 11507125) (22).

La fiabilidad del sistema lenke oscila entre 0,5 y 0,97, pero tiene algunas limitaciones: La gran variedad de patrones de curva (42 patrones), la necesidad de realizar telerradiografías de flexión lateral, además del aumento de las curvas “rule-breaker” en los tipos 3, 4 y 6 (22).

1.3.1.3 Tratamiento conservador de la escoliosis idiopática del adolescente

El tratamiento conservador es una opción para pacientes con curvaturas leves a moderadas o pacientes que no son candidatos para la cirugía. La observación es una opción de tratamiento para pacientes con curvaturas leves que no progresan rápidamente. Un estudio retrospectivo evaluó la eficacia de la observación en pacientes con curvaturas leves de la columna vertebral. Los resultados del estudio indicaron que la mayoría de los pacientes con curvaturas menores de 20 grados no experimentaron progresión de la curvatura y no requirieron tratamiento adicional (14). La fisioterapia es otra opción de tratamiento conservador para pacientes con EIA. Un estudio evaluó la eficacia de la fisioterapia en pacientes con EIA. Los resultados del estudio indicaron que la fisioterapia fue capaz de mejorar la función respiratoria en pacientes con EIA (23). El uso de corsés o férulas es una opción de tratamiento conservador para pacientes con curvaturas moderadas de la columna. Los resultados indican que los corsés son capaces de reducir la progresión de la curvatura de la columna (24). También se han empleado otras terapias como la terapia de tracción, acupuntura, terapia de masaje o yoga o quiropráctica con resultados positivos sobre los pacientes (25-29).

Las técnicas actuales de corrección quirúrgica de la escoliosis idiopática del adolescente tratan de corregir la deformidad vertebral y estética y evitar la progresión de la escoliosis. Actualmente existen los siguientes grupos de procedimientos quirúrgicos:

1.3.1.4. Tratamiento quirúrgico de la escoliosis idiopática del adolescente

1.3.1.4.1 Instrumentación y artrodesis de la deformidad por vía posterior, anterior o por ambas.

La fusión posterior fue descrita por primera vez por Harrington en 1962. Este método produce la pérdida de movilidad de segmentos significativos de la columna que dan lugar a incrementos de estrés en los niveles móviles remanentes especialmente en los adyacentes al área fusionada que producen degeneración discal y se ha demostrado que no mejora la restricción respiratoria preoperatoria que tienen estos pacientes con escoliosis, originan complicaciones derivadas del uso de extensas instrumentaciones que se mantienen toda la vida en el interior del organismo (30).

La corrección anterior en AIS debe considerarse en deformidades torácicas y lumbares únicas con curvaturas compensatorias flexibles. Se trata de curvaturas de tipo 1 y 5 según la clasificación de Lenke. El paciente ideal para la fusión anterior instrumentada es la curva torácica única (Lenke tipo 1 A-C) con hipocifosis pronunciada (T5-12 modificador sagital-o N). Dado que la corrección anterior incluye un acortamiento de la columna anterior de la columna vertebral y, por lo tanto, es cifógena, no debe aplicarse en casos principalmente hipercifóticos (poco frecuentes), ni en niños muy pequeños que tienden a desarrollar hipercifosis durante el crecimiento posterior debido al anclaje anterior.

En la columna lumbar, la indicación de corrección quirúrgica se da con un ángulo de 35 a 40 grados. Las curvas de Lenke tipo 5 son ideales para la fusión anterior instrumentada, ya que la longitud de la fusión es más corta que en la corrección posterior y la derotación es más eficaz (31).

Abordaje posterior

El abordaje posterior de la columna es el abordaje más común en la cirugía ortopédica para la escoliosis idiopática. El paciente se coloca en decúbito prono, cuidando la posición de brazos y codos para evitar presionar el plexo braquial. Es fundamental mantener la lordosis lumbar para conseguir la relación sagital adecuada de la columna. Además, se aconseja no exceder los 90° de abducción del hombro para prevenir el estiramiento del plexo braquial. Si la fusión se extiende hacia la columna lumbar, rodilla y muslo deben elevarse para preservar la lordosis lumbar (32-34).

Tras la preparación de la piel y la incisión, se expone la columna separando el tejido de las apófisis espinosas. La incisión alcanza el nivel de la apófisis espinosa y los

bordes de la piel se retraen con un retractor. Se controla la hemorragia con bisturí eléctrico y se continúa exponiendo la columna a lo largo de las apófisis transversas en ambos lados, coagulando la rama de la arteria segmentaria adyacente a cada faceta. Finalmente, se expone toda la columna, se retira el tejido y se prepara la columna para la fusión (32-34).

Fusión facetaria e injerto

Para la fusión facetaria generalmente se requiere injerto óseo, que puede obtenerse de dos fuentes principales:

Autoinjerto: Se realiza una incisión a nivel de la cresta ilíaca del propio paciente, que se utilizará para extraer el injerto óseo autógeno de esta zona. Si la incisión original en la espalda se extiende lo suficiente distal a la columna lumbar, la cresta ilíaca puede ser expuesta mediante disección subcutánea a través de la misma incisión. El cartílago que recubre la cresta ilíaca posterior se ensancha y se divide en dos. El hueso ilíaco se expone subperióticamente. Debe evitarse cuidadosamente el nervio glúteo superior, que se origina en la escotadura ciática, durante la extracción del injerto. Se obtienen tiras corticales y hueso esponjoso del ilion.

Aloinjerto: El aloinjerto proviene usualmente de un banco de tejidos y ha sido procesado para eliminar componentes inmunogénicos y celulares que podrían provocar rechazo. Las ventajas del aloinjerto incluyen evitar la morbilidad de un segundo sitio quirúrgico y la posibilidad de obtener mayor volumen de injerto. Su desventaja es el riesgo, aunque bajo, de transmisión de enfermedades y reacciones inmunológicas.

Instrumentación

La instrumentación espinal debe ser lo suficientemente resistente para soportar cargas en todas las direcciones y al mismo tiempo ser rentable. Aunque hay numerosos implantes disponibles, ninguno cumple con todos los criterios ideales, y no existe un dispositivo único que sea la mejor opción para todos los cirujanos o pacientes. En 1962, Harrington introdujo el primer sistema efectivo para corregir la escoliosis. Durante más de 30 años, el uso de barras de distracción de Harrington junto con fusión posterior e inmovilización mediante yeso o corsé durante 6 a 9 meses ha sido el tratamiento quirúrgico estándar para la escoliosis idiopática (34).

Los sistemas de instrumentación segmentaria posterior con múltiples ganchos, guías sublaminares o tornillos pediculares han reemplazado en gran medida al sistema de Harrington. Este tipo de instrumentación segmentaria posterior ofrece múltiples puntos de corrección en la columna y emplea compresión, tracción y rotación a través

de una sola barra. Estos sistemas brindan una mejor corrección en el plano coronal y un mayor control en el plano sagital. A medida que el dispositivo se extiende hacia la parte inferior de la columna lumbar, reduce la cifosis torácica y controla la lordosis lumbar. El uso de tornillos pediculares proporciona mayor estabilidad en el plano transversal (rotación vertebral) y, por lo general, estos sistemas tienen tasas más bajas de fallos y roturas (34).

Corrección

Se pueden emplear diversos métodos y técnicas en la corrección de la escoliosis. Al aplicar presión en el lado convexo de la curva lumbar, se corrige la escoliosis y se permite la curación o preservación de la lordosis lumbar. La maniobra de derotación clásica de Cotrel-Dubouset se realiza conectando una barra cóncava a cada punto de fijación y luego girando la barra en el plano sagital. Esta maniobra global de derotación provoca una traslación lateral de la vértebra apical o reposicionamiento del ápex de la curva *in situ*. Otro método de tratamiento es la el moldeado *in situ*. La deformidad en la escoliosis puede corregirse utilizando la herramienta de doblado adecuada en el área de contorno en los planos coronal y sagital. Generalmente, se aplica suficiente compresión y tracción para completar la corrección. Gracias al uso de tornillos pediculares en la columna torácica, también se puede lograr la corrección de la rotación vertebral de forma directa (36,37).

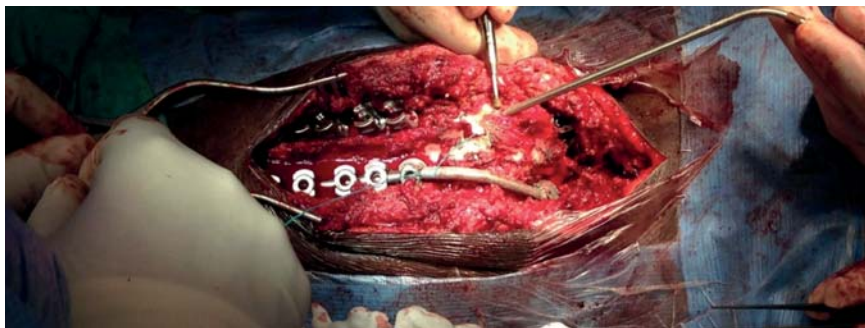


Figura 2: Cirugía de escoliosis idiopática mediante artrodesis vía posterior. La figura muestra una vista posterior de la columna, con los tornillos pediculares colocados en las vértebras afectadas. La técnica utilizada en esta cirugía es la artrodesis, que implica la fusión de la columna para corregir la curvatura (Donada por el Dr. Burgos Flores).

1.3.1.4.2 Procedimientos sin fusión vertebral, mediante modulación vertebral aplicándose fuerzas sobre los cartílagos de crecimiento de las vértebras afectadas

En el primer tipo las fuerzas modulantes vertebrales se aplican en la parte anterior de la vertebra. Para aplicar esta técnica quirúrgica se utilizan dos métodos diferentes. La primera mediante grapas colocadas a ambos lados de los discos intervertebrales en la convexidad de la escoliosis y la segunda mediante un sistema de tensión que usa tornillos en cada cuerpo vertebral unidos por una cinta elástica. En ambos se aplican fuerzas compresoras que limitan el crecimiento vertebral en ese lado (42). La indicación más aceptada para el anclaje anterior del cuerpo vertebral (AVBT) son los pacientes esqueléticamente inmaduros (Risser ≤ 2 o Sanders ≤ 5) con curvas entre 30° y 65° (43).

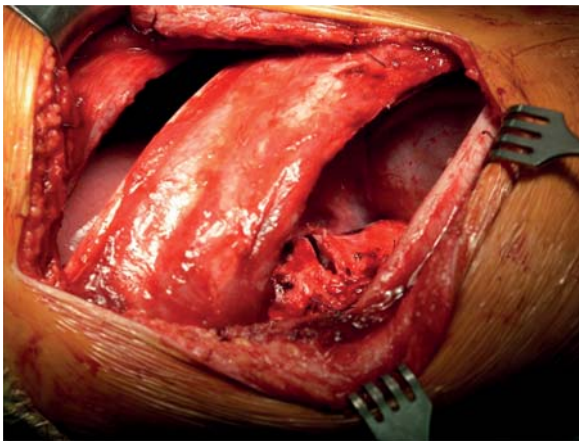


Figura 3: Abordaje quirúrgico de la columna torácica mediante toracotomía doble: Representa una técnica quirúrgica para acceder a la columna torácica. La figura muestra una vista frontal del tórax abierto, con las costillas expuestas y los músculos retirados para acceder a la columna. La técnica utilizada en esta cirugía es la toracotomía doble, que implica hacer dos incisiones en el tórax para acceder a la columna vertebral. Esta técnica se utiliza para tratar lesiones y enfermedades de la columna torácica (Foto tomada de Liljenqvist U, Halm H, Bullmann V. Spontaneous lumbar curve correction in selective anterior instrumentation and fusion of idiopathic thoracic scoliosis of Lenke type C. Eur Spine J. 2013 Mar;22 Suppl 2(Suppl 2):S138-48. doi: 10.1007/s00586-012-2299-7. Epub 2012 Apr 25. PMID: 22531898; PMCID: PMC3616460) (31).

Los inconvenientes de estas dos metódicas son sus limitaciones a pacientes muy inmaduros, a los casos sin hipercifosis, solo aplicable a curvas flexibles poco severas, la necesidad de realizarlas por vía anterior obligando a la apertura de las cavidades torácicas, abdominal o ambas con incremento de la morbilidad, la incompleta corrección de la deformidad escoliótica, y conseguir resultados poco previsibles. Además de todo lo reseñado existen dos problemas no desdeñables: La limitación de la movilidad discal de los niveles fijados con grapas o tornillos que comprometerán el futuro funcional de estos discos y las consecuencias de dejar implantes metálicos en cavidades orgánicas y en el interior del organismo (44). Además, este tratamiento quirúrgico no está exento de posibles complicaciones, como la sobrecorrección, la rotura del anclaje y la reintervención. La mayoría de los estudios disponibles sobre este procedimiento son series clínicas que informan de resultados heterogéneos (43).

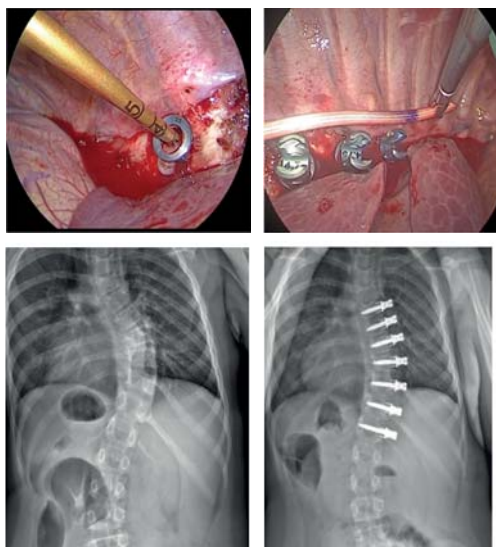


Figura 4: “Anterior vertebral body tethering” representa una técnica quirúrgica utilizada para tratar la escoliosis idiopática en niños y adolescentes. La figura muestra una vista frontal de la columna vertebral, con el dispositivo de anclaje en el cuerpo vertebral de la vértebra superior e inferior. La técnica utilizada en esta cirugía es la “tethering” vertebral, que implica la colocación de un dispositivo de anclaje en el cuerpo vertebral de la vértebra superior e inferior de la curva. El dispositivo está hecho de un material especial que permite la flexibilidad de la columna vertebral, pero también proporciona soporte y estabilización para corregir la curvatura.

Durante la cirugía, se realiza una pequeña incisión en la parte anterior del abdomen para acceder a la columna vertebral. Se colocan los dispositivos de anclaje en las vértebras afectadas y se ajustan para corregir la curvatura. (Foto tomada de Parent S, Shen J. Anterior Vertebral Body Growth-Modulation Tethering in Idiopathic Scoliosis: Surgical Technique. *J Am Acad Orthop Surg.* 2020 Sep 1;28(17):693-699. doi: 10.5435/JAAOS-D-19-00849. PMID: 32618681.) (38).

1.3.1.4.3 Procedimientos sin fusión vertebral desde posterior utilizando tornillos pediculares

El segundo tipo de modulación vertebral se realiza desde posterior utilizando tornillos pediculares. Este método se ha demostrado experimentalmente que produce modulación vertebral en los tres planos anteroposterior, lateral y axial (35-47) (Figura 5 y 6). La aplicación a la clínica humana de la modulación vertebral posterior es reciente y se nomina como Posterior Dynamic Deformity Correction (PDDC-ApiFix Ltd., Misgav, Israel) (Figura 7) (48) y en la publicación donde se presenta se constató la modulación vertebral en el plano anteroposterior utilizando tornillos pediculares en la concavidad de la escoliosis y promoviendo la modulación mediante distracción en la concavidad, al contrario de los sistemas previos que se aplicaban mediante compresión en la convexidad (49).

Esta metódica quirúrgica tiene cuatro aspectos cuestionables derivados de utilizar para la corrección de la escoliosis un mínimo número de implantes en los extremos de la curva y solo en el lado de la concavidad:

- El primero se relaciona con la corrección insuficiente de la escoliosis. El uso de implantes solo en los extremos de la curva o solo en la concavidad imposibilita la corrección adecuada de la deformidad en todos los planos.
- Además, en el plano sagital la aplicación de las fuerzas correctoras de la escoliosis solamente en los extremos produce hipocifosis torácica, agravando esta deformidad que presentan muchos de estos pacientes. Esta hipocifosis se ha constatado que se asocia a restricción respiratoria, por lo que la restricción respiratoria podría verse agravada con este método de tratamiento.
- Debido a la escasa capacidad de corregir la rotación vertebral con esta técnica quirúrgica, la deformidad estética, no es posible mejorarla con esta técnica, siendo la corrección estética una causa fundamental por la que se tratan quirúrgicamente estos pacientes.
- El último aspecto cuestionable de esta técnica se refiere al mantenimiento de la corrección conseguida inicialmente. Teniendo en cuenta las grandes sollicitaciones mecánicas gravitatorias y funcionales a las que se ven sometidos los pocos implantes utilizados pueden dar lugar a frecuentes movilizaciones y consecuentemente a pérdidas de la corrección inicial.

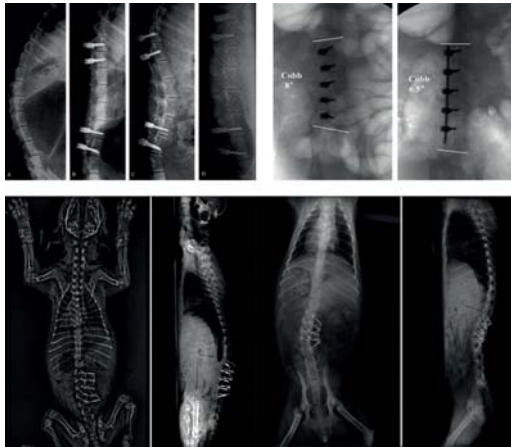


Figura 5: Modulación vertebral posterior en estudios experimentales con animales: La técnica de modulación vertebral posterior se utiliza en estudios experimentales con animales para evaluar la respuesta de la columna vertebral a la aplicación de fuerzas mecánicas controladas. Esta figura muestra la colocación de dispositivos de fijación en la parte posterior de la columna vertebral para permitir la aplicación de diferentes niveles de fuerza y la medición de la respuesta de la columna vertebral a estas fuerzas. La técnica de modulación vertebral posterior es importante para comprender mejor la biomecánica de la columna vertebral y para desarrollar tratamientos más efectivos para trastornos de la columna vertebral en humanos. (Foto tomada de Lonner BS, Auerbach JD, Estreicher MB, Betz RR, Crawford AH, Lenke LG, Newton PO. Pulmonary function changes after various anterior approaches in the treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *J Spinal Disord Tech.* 2009;22(8):551-8) (50).

cánica de la columna vertebral y para desarrollar tratamientos más efectivos para trastornos de la columna vertebral en humanos. (Foto tomada de Lonner BS, Auerbach JD, Estreicher MB, Betz RR, Crawford AH, Lenke LG, Newton PO. Pulmonary function changes after various anterior approaches in the treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *J Spinal Disord Tech.* 2009;22(8):551-8) (50).

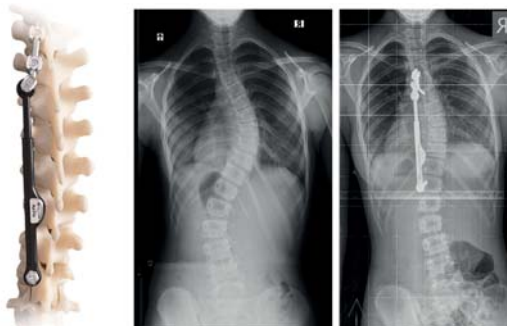


Figura 6: Modulación vertebral posterior con PDDC-ApiFix Ltd.: Recientemente, se desarrolló una técnica de modulación vertebral posterior llamada "Posterior Dynamic Deformity Correction" (PDDC) por la empresa ApiFix Ltd., con sede en Misgav, Israel. Esta figura muestra la aplicación de la técnica de PDDC con dispositivos de fijación en la parte posterior de la columna vertebral para permitir la corrección dinámica de

la curvatura de la columna vertebral. La técnica de PDDC es una técnica prometedora para el tratamiento de trastornos de la columna vertebral en humanos y se espera que sea una alternativa menos invasiva a la cirugía tradicional de escoliosis. (Foto tomada de Floman Y, El-Hawary R, Lonner BS, Betz RR, Arnin U. Vertebral growth modulation by posterior dynamic deformity correction device in skeletally immature patients with moderate adolescent idiopathic scoliosis. *Spine Deform.* 2021 Jan;9(1):149-153. doi: 10.1007/s43390-020-00189-z. Epub 2020 Aug 21. PMID: 32827087; PMCID: PMC7775858.) (48).



2. Hipótesis

La hipótesis planteada fue que la corrección de la escoliosis mediante tornillos pediculares sin fusión posterior en pacientes inmaduros permitiría la restauración de la morfología vertebral normal y la retirada de la instrumentación una vez que se alcanza la madurez ósea. Además, esta técnica sería capaz de corregir de forma efectiva la escoliosis idiopática del adolescente manteniendo la movilidad de la columna vertebral afectada por la deformidad sin que exista una pérdida significativa de la corrección una vez retirada la instrumentación cuando la madurez esquelética es alcanzada. También, se esperaría un aumento de la calidad de vida y funcionalidad de los pacientes al restaurar el rango de movimiento de los niveles inferiores a la instrumentación toracolumbares.



3. Objetivos

El objetivo principal fue:

1. Evaluar la eficacia correctora de una técnica quirúrgica sin fusión posterior mediante tornillos pediculares en pacientes inmaduros con escoliosis idiopática adolescente y retirando la instrumentación una vez que se alcanza la madurez ósea.

Los objetivos secundarios fueron:

1. Valorar la restauración de la morfología vertebral normal al final del seguimiento.
2. Evaluar la estabilidad de la corrección de la curvatura vertebral tras la retirada de la instrumentación una vez alcanzada la madurez esquelética.
3. Valorar si tras la retirada de la instrumentación existía una mejora del rango del movimiento de los niveles inferiores instrumentados.
4. Analizar la calidad de vida y funcionalidad de los pacientes antes y después de todo el procedimiento.



4. Material y métodos

4.1. Diseño

Se llevó a cabo un estudio retrospectivo sobre una serie longitudinal de pacientes con escoliosis idiopática del adolescente tratados quirúrgicamente utilizando una técnica quirúrgica sin fusión, posterior, mediante tornillos pediculares en pacientes inmaduros con escoliosis idiopática adolescente y retirando la instrumentación una vez que se alcanza la madurez ósea.

4.2. Tamaño muestral

El tamaño de la muestra se estimó para detectar una diferencia entre dos medias utilizando la pérdida en la intensidad de la curva en grados Cobb como la variable más pertinente. Se consideró clínicamente relevante una diferencia superior a 5°. Para tener un poder de detección del 80 %, y suponiendo una varianza de 45° y un nivel de significancia bilateral de 0,050, el tamaño de muestra mínimo requerido fue de 28 pacientes. Sin incluir una estimación del 10% de posibles pérdidas.

4.3. Participantes

Se incluyeron en este estudio 36 pacientes adolescentes con diagnóstico de escoliosis idiopática del adolescente, que cumplieran los siguientes criterios de inclusión: Pacientes esqueléticamente inmaduros con signo de Risser 3 o inferior que presentaban una curva Cobb mayor o igual a 45° en el plano coronal, medida en radiografía. Ambos sexos, sin enfermedades asociadas que pudiesen condicionar la escoliosis, y que no habían recibido tratamiento quirúrgico previo.

Se excluyeron de este estudio los casos con cartílago trirradiado abierto, curvas mayores de 70° en el plano coronal con evidencia de rigidez y/o progresión documentada, o aquellos que no completaron la evaluación radiológica, médica y/o las escalas funcionales durante el seguimiento.

4.4. Aspectos éticos

A todas las integrantes de los estudios y a sus padres/tutores se les explicó de forma verbal y por escrito el proceso quirúrgico al cual se iban a someter. Todos los pacientes y padres o tutores leyeron y firmaron los consentimientos informados oportunos. Estos consentimientos informados que incluyen tanto el asentimiento de los menores de 18 años como el consentimiento de los padres o tutores son los aprobados por la Sociedad Española de Columna Vertebral (Grupo Español de Enfermedades del Raquis -GEER) (Anexo 1) y que se utilizan comúnmente en muchos Servicios de Cirugía de Columna de España. De igual manera, se les informó sobre la realización de fotografías a lo largo del proceso, las cuales preservarán la identidad. Toda la información relacionada con el estudio fue recogida de forma anónima, siendo estrictamente confidencial, y siguiendo las leyes y normas de protección de datos de la vigente legislación española (Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal, publicada el 6 de diciembre de 2018 en el BOE nº 294). Los trabajos se realizaron siguiendo las recomendaciones europeas de buena práctica clínica (BPC) y los principios de la declaración de Helsinki de la Asamblea Médica Mundial revisada en 2013 para estudios clínicos en humanos. El tratamiento aplicado a los pacientes se realizó siguiendo las normas deontológicas propuestas por la Sociedad Española de Columna Vertebral. Todos los participantes del estudio y sus padres fueron informados sobre el procedimiento quirúrgico y dieron su consentimiento por escrito. El trabajo se realizó siguiendo las recomendaciones europeas de buena práctica clínica y los principios de la Declaración de Helsinki de la Asamblea Médica Mundial revisada en 2013 para estudios clínicos en humanos. El tratamiento aplicado a los pacientes se realizó siguiendo los estándares deontológicos propuestos por la Sociedad Española de Columna Vertebral. Este estudio fue aprobado por el comité ético de nuestra institución (UCV/2021-2022/109) (Anexo 2).

4.5. Intervención

Siempre se utilizó la misma técnica quirúrgica para conseguir la corrección máxima en los tres planos. Esta técnica es reproducible y posibilita las correcciones individuales de cada uno de los tres planos con maniobras quirúrgicas mínimas hasta conseguir el resultado que considere idóneo el cirujano. La técnica quirúrgica consistió en:

- Bajo anestesia general, con el paciente de decúbito prono y con monitorización neurofisiológica, realizada siempre por dos cirujanos expertos, por vía posterior se expusieron de manera convencional los niveles a instrumentar sin lesionar los elementos ligamentosos vertebrales ni las capsulas articulares. Siempre se trató de lesionar mínimamente las estructuras anatómicas.

4.5.1. Colocación de la instrumentación pedicular:

- A continuación, se colocaron tornillos pediculares de distal a proximal bilateralmente en todos los niveles a instrumentar con la técnica de manos libres, control neurofisiológico del trayecto del tornillo previa a su inserción y estimulación neurofisiológica de los tornillos una vez posicionados (Fig. 7 y 8).



Figura 7: Imagen quirúrgica intraoperatoria que muestra la colocación de tornillos pediculares bilateralmente en todos los niveles a instrumentar, utilizando la técnica de manos libres y con previo control neurofisiológico del trayecto del tornillo. Además, se observa moldeado *in situ* de la barra. Se realizó estimulación neurofisiológica de los tornillos una vez posicionados para garantizar su correcta colocación.



Figura 8: Imagen de fluoroscopia intraoperatoria que evidencia la correcta colocación de los tornillos pediculares en los planos anteroposterior y lateral (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

-
- En todos los casos se colocan uñas de transversa en ambos lados en el nivel proximal de instrumentación. En el extremo proximal de la convexidad, después de colocar una uña de transversa se colocaban dos tornillos poliaxiales de tulipa larga y en los dos niveles distales de este lado también se insertaron siempre dos tornillos poliaxiales de tulipa larga. En el centro de la convexidad se alternaron tornillos uniplanares cefalocaudales con tornillos poliaxiales de tulipa larga para facilitar la introducción de la barra premoldeada sin gestos forzados y evitar en lo posible el grifado de la barra para su introducción en las tulipas. Si la escoliosis no era rígida se pudieron usar más tornillos poliaxiales de tulipa larga que facilitaron la colocación de la barra premoldeada sin necesidad de grifar excesivamente los tornillos.
 - En la concavidad de todas las curvas se usaron tornillos poliaxiales de tulipa larga en todos los niveles.
 - Una vez colocados todos los tornillos con la técnica de manos libres se controló neurofisiológicamente y radioscópicamente su situación correcta.

4.5.2. Moldeado de Barras:

- En todos los casos se usaron barras de cromo-cobalto.
- Se moldearon las barras solamente en el plano lateral y de manera asimétrica, con ápex en el centro de la columna torácica dando mayor cifosis torácica y mayor lordosis lumbar a la barra de la concavidad torácica y menor cifosis y lordosis a la barra de la convexidad.
- A la barra de la concavidad se aplicó lordosis justamente en los dos centímetros del extremo proximal de la barra para facilitar su colocación en la uña y en los implantes proximales evitando los “pull-out” en este nivel. La barra de la convexidad se moldeó dando una altura de tres centímetros en el ápex de la columna torácica y de seis centímetros en el ápex de la barra de la convexidad. La parte de las barras que se implantaron en la columna lumbar se moldearon dando mayor lordosis a la barra de la convexidad que a la barra de la concavidad para corregir la rotación escoliótica.
- En el moldeo de barra hay que tener en cuenta los siguientes aspectos: Si se trataba de una hipocifosis torácica se moldeó dando mayor cifosis a las dos barras incrementándose la altura máxima uno o dos centímetros manteniendo la asimetría inicial. En los casos de hipercifosis se disminuyó la altura máxima en ambas barras uno o dos centímetros. Si se trataba de un caso de rotación vertebral severa se incrementó la diferencia de altura máxima entre las dos barras en uno o dos centímetros.

4.5.3. Secuencia de la corrección de la escoliosis:

1º Colocación de la barra de la convexidad:

Se colocó la barra en los tornillos de proximal a distal. Una vez introducida la barra en la uña y en los primeros dos tornillos se cerraron las tuercas para mantener la posición correcta de la barra y a continuación se introduce la barra en el resto de los tornillos de proximal a distal poniendo todas las tuercas, pero sin completar el cierre. Una vez colocada la barra de la convexidad, si es necesario para corregir completamente el plano anteroposterior, se hizo grifado progresivo de la barra guiándonos del alineamiento de las apófisis espinosas, tratando de mantener el ángulo cifótico que se dio a la barra y para ello si es necesario que el grifado se haga con las manos ligeramente bajas.

2º Colocación de la barra de la concavidad:

En este momento se colocó la barra de la concavidad, que era la más cifótica. Se introdujo la barra en los tres implantes proximales y en los tres distales y se cierran completamente las tuercas de estos implantes dejando fija esta barra en los extremos en la posición correcta y evitando con el cierre el “deslizamiento” distal de la barra con la consiguiente pérdida de corrección de la rotación y del plano lateral.

3º Corrección del plano lateral y la rotación:

A continuación, mediante el atornillado progresivo de las tuercas de los tornillos centrales de la concavidad se descendió la barra sobre los tornillos desde los extremos hacia el centro mediante el atornillado progresivo, sucesivo y corto de todas las tuercas evitando de esta manera las sollicitaciones de “pull-out” sobre un solo implante. Con este proceder es excepcional el arrancamiento de los tornillos y se consiguió la corrección del plano lateral y de la rotación hasta al nivel planificado. Finalmente se apretaron todos los tornillos de la concavidad.

4º Corrección de la escoliosis secundaria:

Cuando existían dobles curvas, se procedía primero a corregir la curva principal siguiendo el procedimiento descrito. A continuación, se abordaba la segunda curva utilizando la misma metodología. En este caso, se dejaban sin apretar los tornillos colocados en la convexidad de la curva secundaria. Se iniciaba el cierre progresivo de los tornillos comenzando por el extremo distal en la concavidad, aplicando también una tracción controlada mediante el atornillado secuencial del resto de tornillos fijados en dicha barra de instrumentación. De este modo se lograba corregir también la curva secundaria de forma paulatina y controlada.

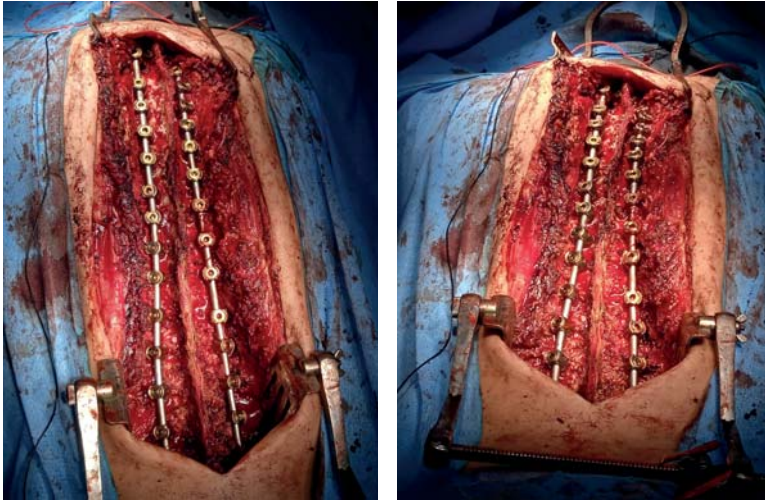


Figura 9: Imagen intraoperatoria que ilustra los tornillos pediculares y las barras tras la corrección de la deformidad, logrando una alineación adecuada de la columna vertebral (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

5º Comprobación radiológica de la corrección obtenida:

Tras la constatación radiológica de la corrección adecuada de los tres planos se procede al cierre de las tuercas de los tornillos de la convexidad de proximal a distal y con ello se concluye esta fase (Fig. 10).



Figura 10: Imagen de comprobación mediante fluoroscopia de la instrumentación tras la corrección de la deformidad, verificando la correcta colocación de los elementos de fijación (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

6º Retirada de la instrumentación

Siempre se retiraron las instrumentaciones cuando los pacientes alcanzaban un Risser 5 con áreas amplias de fusión de la apófisis iliaca. Para ser incluidos en este estudio todos los casos deberán tener un seguimiento superior a dos años siguiendo a la retirada de la instrumentación (Fig. 11 y 12).

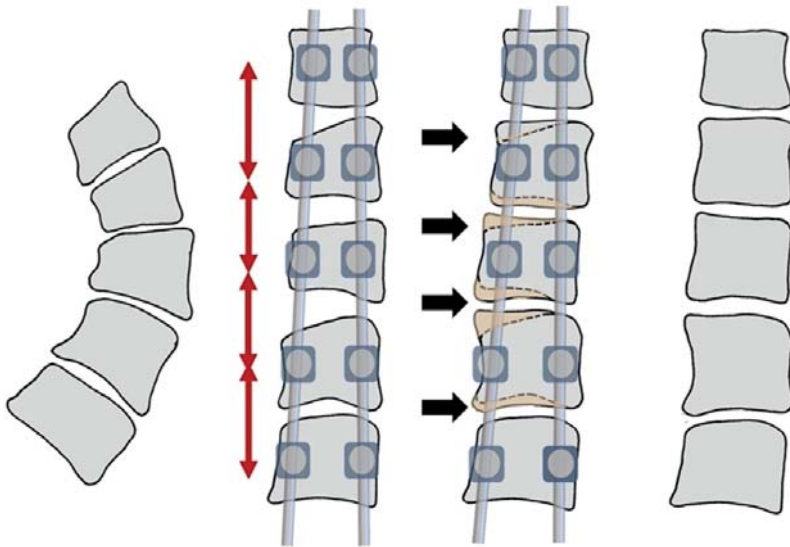


Figura 11: Modulación vertebral conseguida mediante el procedimiento: Esta imagen muestra la modulación vertebral conseguida mediante un procedimiento específico. La técnica utilizada en este procedimiento permitió la modulación de la curvatura de la columna vertebral para corregir una deformidad. La imagen muestra la columna vertebral antes y después del procedimiento, con una notable mejora en la alineación de la columna vertebral y una reducción en la curvatura. Esta imagen es una herramienta visual importante para ayudar a los médicos y pacientes a comprender mejor los resultados del procedimiento y la efectividad de la técnica utilizada para la corrección de trastornos de la columna vertebral.

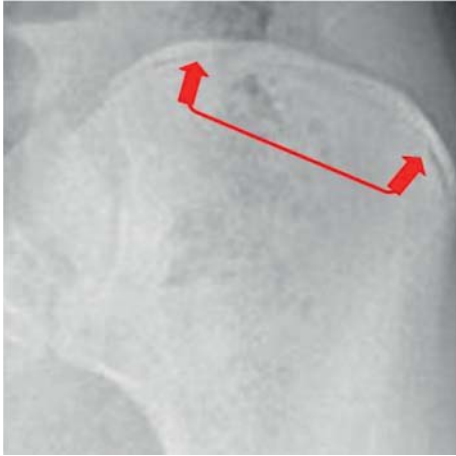


Figura 12: Paciente con escoliosis idiopática con Risser avanzado. Se procede a retirada del material (Donada por el Dr. Burgos Flores).

4.5.4. Modificaciones adicionales

1. Corrección del plano anteroposterior.

Sobre la barra de la concavidad se aflojaron las tuercas de los tornillos centrales excepto las tres de los dos extremos y a continuación mediante grifado de la barra de la convexidad se corrigió el plano anteroposterior hasta el nivel deseado. Tras el cierre progresivo de todos los tornillos de la concavidad y de la convexidad de proximal a distal se realizó la comprobación radiológica final.

2. Corrección del plano lateral.

Se retiraron las tuercas de los tornillos centrales de la concavidad para evitar el "pull-out" al hacer el grifado de la barra, manteniendo cerrados los tres implantes de los extremos. Se retiraron las tres tuercas centrales del ápex de la cifosis de la barra de la convexidad y a continuación mediante grifado simétrico de la barra de la convexidad y de la concavidad se incrementó la cifosis o la lordosis hasta el nivel deseado manteniendo la asimetría lateral previas de ambas barras. Para terminar, se cerraron los tornillos de la concavidad sobre las barras y a continuación los de la convexidad de proximal a distal, realizándose la revisión radiológica final.

3. Corrección de la rotación:

Se procedió como se hizo para la corrección del plano lateral retirando las tuercas de los tornillos centrales de la barra de la concavidad y de la convexidad, con grifado de ambas barras, pero en esta situación disminuyendo ligeramente la cifosis de la

barra de la convexidad y aumentando la curva cifótica de la barra de la concavidad. Finalmente se realiza el cierre de las tuercas de los tornillos según se describió previamente y se concluyó con la revisión radiológica.

4.6. Variables

Se analizaron los siguientes parámetros en cada paciente: edad, sexo, peso, altura, estadio de Tanner, menarquia antes de la cirugía y edad de la menarquia. Se analizaron teleradiografías anteroposterior y laterales preoperatorias, inmediatamente después de la corrección, antes de la retirada de la instrumentación de los implantes, inmediatamente después de la retirada de la instrumentación y un mínimo de dos años después de la retirada del implante. Se obtuvieron los siguientes parámetros en estas teleradiografías (Fig. 13 y 14): estadio de Risser, lado de la escoliosis, tipo de Lenke, grados de Cobb coronal de las curvas, vértebras limitantes, grados de rotación de Perdriolle (solo en radiografías preoperatorias y finales) y desequilibrio vertebral coronal en las radiografías anteroposteriores

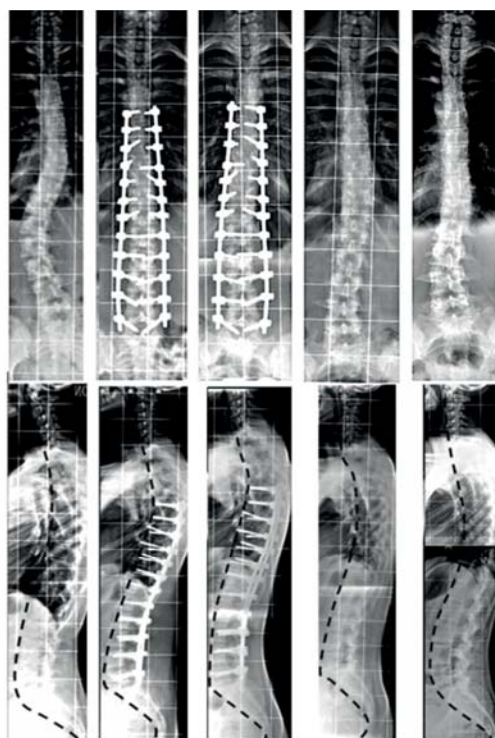


Figura 13: Paciente con escoliosis idiopática con Risser avanzado. Se procede a retirada del material (Donada por el Dr. Burgos Flores).

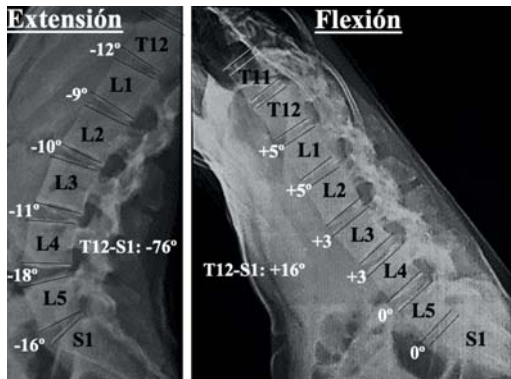


Figura 14. Movilidad lumbar en flexo-extensión máxima T12-S1 para el estudio de la amplitud de movimiento toracolumbar (Donada por el Dr. Burgos Flores).

La modulación del ápex vertebral en las radiografías anteroposteriores preoperatorias y finales se cuantificó midiendo la altura de la concavidad y la convexidad, así como la relación entre ambas alturas y el “wedging ratio” (WR, por sus siglas en inglés) en un dibujo (Fig. 15 y 16).

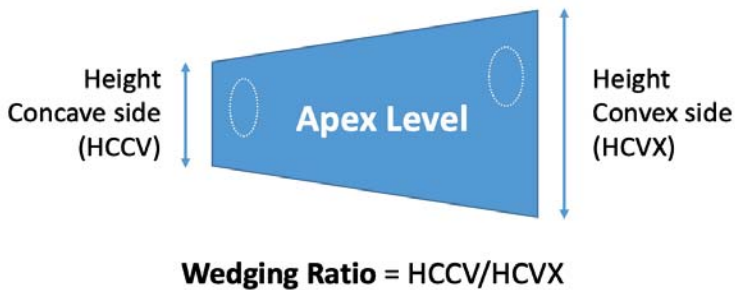


Figura 15. Cálculo del Wedging Ratio (WR) en una columna vertebral afectada por escoliosis. Esta figura ilustra el cálculo del Wedging Ratio (WR) en una columna vertebral afectada por escoliosis. El WR es una medida utilizada para evaluar la modulación del ápex vertebral en la curvatura de la columna vertebral. Se calcula dividiendo la altura de la concavidad por la altura de la convexidad en el punto más agudo de la curvatura. Un mayor WR indica una mayor modulación del ápex vertebral y una mayor deformidad de la columna vertebral.

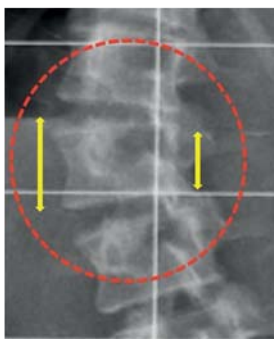


Figura 16. Wedging ratio (WR) mostrado en una radiografía anteroposterior. En la figura, se muestra la medición del WR en una columna vertebral afectada por escoliosis, donde la altura de la concavidad es menor que la altura de la convexidad en el ápex de la curvatura (Donada por el Dr. Burgos Flores).

En las radiografías anteroposteriores, se registraron las vértebras instrumentadas proximales y distales, así como el número de pedículos instrumentados en cada caso. En las radiografías laterales, se estudió la cifosis torácica T2-T12, la lordosis lumbar T12-S1 y el desequilibrio sagital. Dos años después de la retirada de la instrumentación, se tomaron radiografías laterales de la columna lumbosacra en máxima flexión y extensión en posición de pie con el objetivo de analizar la movilidad de los segmentos lumbares. Se evaluaron los cuestionarios SRS-22 (Anexo 3) preoperatorios y al final del estudio. El cuestionario SRS-22 es un instrumento autoadministrado de calidad de vida relacionada con la salud que se utiliza para evaluar la función física y psicosocial de los pacientes con trastornos de la columna vertebral, en particular la escoliosis idiopática del adolescente. Consta de 22 preguntas que se dividen en cinco dominios: función, dolor, autoimagen/apariencia, salud mental y satisfacción con el tratamiento. El cuestionario SRS-22 ha demostrado ser una herramienta válida y fiable para evaluar la calidad de vida relacionada con la salud en pacientes con trastornos de la columna, y se ha utilizado ampliamente en la investigación y la práctica clínica. El cuestionario se ha traducido a varios idiomas y se ha utilizado en diversos entornos culturales. Su uso permite a clínicos e investigadores evaluar el impacto de los trastornos de la columna en la vida diaria de los pacientes y valorar la eficacia de diversas modalidades de tratamiento.

4.7. Análisis estadístico

Se describió a toda la cohorte en términos de características demográficas y métricas quirúrgicas utilizando desviación estándar y medias. La evolución de la corrección quirúrgica durante todo el período postoperatorio, especialmente después de la retirada de la instrumentación, se analizó utilizando la prueba de Wilcoxon. Se compararon dos grupos de curvas, torácicas y toracolumbares/lumbares, tratando de encontrar diferencias en los resultados finales. Se compararon los pacientes que presentaron Risser 0-1 con aquellos que presentaron Risser 2-3. Para la comparación entre variables no apareadas (tipo de Risser 0-1 versus Risser 2-3 o los tipos de curva se empleó la prueba U de Mann-Whitney. El análisis estadístico se realizó con el paquete SPSS 24.0 (IBM, Chicago, IL, EE. UU.). Se consideró estadísticamente significativo un valor de $p < 0,05$.



5. Resultados

5.1. Características demográficas y antropométricas de los pacientes

De los 36 casos incluidos, solo 2 (5,5%) eran niños. Un total de 9 de las 34 niñas (26,4%) aún no habían tenido su primera menstruación. En cuanto a los criterios de Lenke (22), 13 curvas se clasificaron como tipo 1A, 3 como tipo 1B, 8 como tipo 1C, 1 como tipo 2, 1 como tipo 3, 7 como tipo 5 y 3 como tipo 6. Del total de las curvas torácicas principales, el 82% eran derechas. Todas las curvas izquierdas eran toracolumbares o lumbares.

La Tabla 2 muestra las principales características de los pacientes en cuanto a edad, perfil antropométrico, madurez y particularidades de la curva de toda la muestra, discriminadas por dos grupos de tipos de curvas. La única diferencia entre las curvas torácicas y toracolumbares/lumbares era el nivel del ápex.

La Tabla 3 muestra las vértebras instrumentadas superior e inferior en los dos tipos de curvas. En 10 de los 36 casos, uno o dos tornillos pediculares no se instrumentaron debido a razones técnicas. No hubo complicaciones neurológicas en esta serie. Sin embargo, durante el primer período postoperatorio, hubo dos casos de derrame pleural y después de la retirada de la instrumentación se observaron 4 seromas en la herida. El período medio de seguimiento desde la instrumentación hasta la retirada de los implantes fue de $31,0 \pm 5,8$ meses (rango: 22-42) (Fig. 17 y 18).

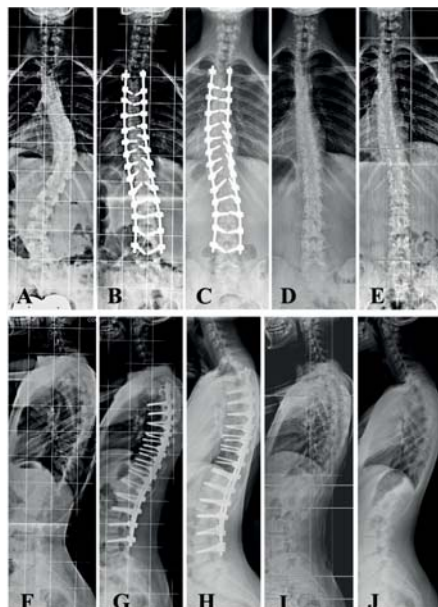


Figura 17. Una niña de 13 años y dos meses con AIS Lenke tipo 1BN ($50^\circ/36^\circ$) con Risser 1 (A) e hipocifosis torácica de 13° (F), fue tratada quirúrgicamente mediante un abordaje posterior realizando una instrumentación de T3-L4 sin fusión con una ligera hipercorrección de ambas curvas (B). Tres años y dos meses después de la intervención quirúrgica inicial y justo antes de la retirada de la instrumentación, las curvas principal y compensatoria permanecieron sin cambios hacia el lado opuesto de las curvas iniciales (C). La radiografía después de la retirada de los implantes vertebrales muestra la mínima escoliosis residual hacia el lado opuesto de las curvas que existían antes del tratamiento quirúrgico (D). Estas curvas escolióticas mínimas permanecieron sin cambios en la última radiografía tomada dos años después de la retirada de la instrumentación (E). En cuanto al plano sagital, la radiografía postoperatoria después de la corrección quirúrgica demostró un aumento

en la hipocifosis previa (G), que permaneció sin cambios en la radiografía previa a la retirada de la instrumentación (H), después de su retirada (I) y en el último seguimiento radiográfico dos años después de la retirada de la instrumentación (J) (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

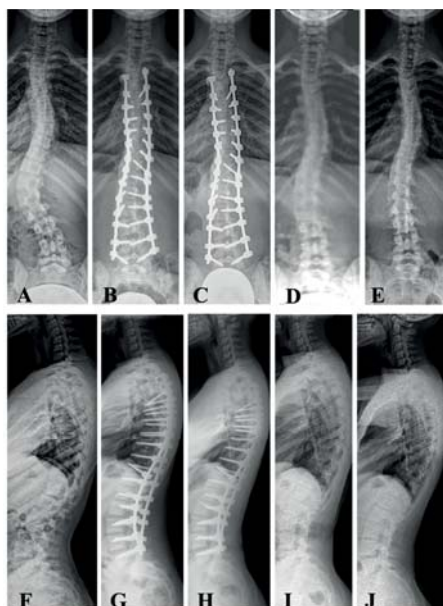


Figura 18. Una niña de 14 años y once meses con AIS Lenke tipo 5 (17/36/57), con cifosis T10-L2 (+16°) y Risser 3 (A y F). Se realizó una instrumentación posterior con tornillos pediculares de T4-L5 (B y G), logrando la corrección de la curva toracolumbar y torácica (B). En el plano sagital, también se verificó la corrección de la cifosis de transición toracolumbar (G). Los valores angulares coronales y sagitales permanecieron sin cambios hasta la retirada de la instrumentación vertebral (C y H) y en el estudio radiográfico después de la retirada de los implantes (D e I). En el último control radiográfico, dos años después de la retirada de la instrumentación, la escoliosis torácica (E) y los valores angulares vertebrales sagitales permanecieron sin cambios (J) (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

Tabla 2. Perfil clínico y características de los pacientes.

Características	Muestra completa Media \pm SD (95% IC)	Lenke 1,2,3 Media \pm SD (95% IC)	Lenke 5, 6 Media \pm SD (95% IC)	Z (p-value)
Edad (años)	13,5 \pm 1,3 (13,0-14,0)	13,5 \pm 2,0 (13,1-14,0)	13,5 \pm 1,0 (11,6-15,4)	0,398 (0,690)
Peso (kg)	47,8 \pm 9,4 (44,2-51,4)	47,3 \pm 9,9 (42,7-51,8)	49,5 \pm 7,6 (42,4-56,5)	1,274 (0,203)
Estatura (cm)	158,1 \pm 8,6 (154,7-161,4)	158,4 \pm 7,6 (154,9-161,8)	157,1 \pm 11,7 (146,3-167,9)	0,345 (0,730)
Tanner	2,4 \pm 0,8 (2,1-2,7)	2,4 \pm 0,7 (2,1-2,8)	2,3 \pm 0,9 (1,4-3,1)	0,268 (0,789)
Risser	1,2 \pm 1,3 (0,7-1,7)	1,2 \pm 1,6 (0,1-2,7)	1,2 \pm 1,2 (0,7-1,8)	0,028 (0,978)
Curva principal (Cobb)	53,7 \pm 7,5 (50,7-56,6)	54,3 \pm 6,7 (51,2-57,3)	52,0 \pm 10,1 (42,6-61,3)	1,595 (0,111)
Curva compensatoria (Cobb)	20,4 \pm 8,6 (17,1-23,7)	18,6 \pm 6,6 (15,6-21,6)	25,8 \pm 11,8 (14,9-36,7)	1,965 (0,051)
Ápex	9,2 \pm 2,9 (8,1-10,4)	7,7 \pm 1,5 (7,1-8,4)	13,7 \pm 0,9 (12,8-14,6)	4,176 (0,000)
Rotación axial (°)	20,4 \pm 8,6 (17,1-23,7)	18,6 \pm 6,6 (15,6-21,6)	25,8-11,8 (14,9-36,7)	1,569 (0,117)
Desequilibrio coronal (mm)	5,8 \pm 19,1 (-1,7-13,4)	2,3 \pm 14,5 (-4,9-8,9)	18,0 \pm 28,6 (-11,9-47,9)	1,832 (0,067)
Desequilibrio lateral (mm)	25,6 \pm 29,5 (-5,27-56,6)	30,0 \pm 32,9 (15,0-45,0)	25,6 \pm 29,4 (-5,27-56,6)	0,234 (0,815)

Tabla 3. Vértebra instrumentada superior e inferior en los dos tipos de curvas.

	Nivel	Torácica (n=26)	Toracolumbar/ Lumbar (n=10)
Superior	T1	1	3
	T2	13	5
	T3	10	-
	T4	2	-
	T6	-	1
	T10	-	1
Inferior	L3	10	-
	L4	16	3
	L5	-	2

5.2. Resultados radiológicos

Teniendo en cuenta toda la serie (Tabla 4), el análisis de la evolución de la curva principal mostró un valor angular promedio preoperatorio de $53,7^\circ \pm 7,50$, que cambió en la radiografía inmediatamente después del tratamiento quirúrgico a un valor angular promedio de $5,5^\circ \pm 3,7^\circ$ (89,7%). Este valor angular de escoliosis en el período postoperatorio inmediato después de la retirada de la instrumentación se convirtió en un valor angular de $8,9^\circ$; el valor de la escoliosis final fue de $13,1^\circ$ en un seguimiento medio de $29,8 \pm 5,7$ meses después de la retirada, lo que representó una corrección del 75,4% con respecto a la curva inicial. Los resultados de este parámetro fueron similares en la escoliosis torácica y la escoliosis toracolumbar y lumbar (Fig. 19).

Tabla 4. Evolución del plano coronal y sagital de la curva principal en las diferentes etapas de seguimiento.

Características	Muestra completa Media \pm SD (95% IC)	Lenke 1,2,3 Media \pm SD (95% IC)	Lenke 5, 6 Media \pm SD (95% IC)	Z (p-value)
Curva principal (Cobb)				
Inicial	53,7 \pm 7,5 (50,7-56,6)	54,3 \pm 6,7 (51,2-57,3)	52,0 \pm 10,1 (42,6-61,3)	1,595 (0,111)
Postoperatoria	5,5 \pm 3,7 (4,1-6,9)	4,7 \pm 3,5 (3,1-6,3)	7,8 \pm 3,6 (4,5-11,2)	2,232 (0,026)
Antes de la retirada	8,9 \pm 2,7 (7,1-9,4)	8,3 \pm 2,6 (7,1-9,5)	10,7 \pm 2,1 (8,7-12,7)	1,199 (0,046)
Después de la retirada	11,1 \pm 2,5 (10,1-12,1)	10,3 \pm 2,3 (12,1-11,4)	13,2 \pm 1,2 (12,1-14,4)	2,934 (0,003)
Final (2 años tras la retirada)	13,1 \pm 2,9 (11,9-14,2)	12,2 \pm 2,8 (10,9-13,4)	15,8 \pm 1,3 (14,6-17,1)	3,485 (0,000)
Cifosis T2-T12 (Cobb)				
Inicial	19,0 \pm 13,1 (13,8-24,2)	18,5 \pm 13,8 (12,3-24,9)	20,5 \pm 10,9 (9,0-31,9)	0,554 (0,579)
Postoperatoria	26,1 \pm 4,7 (22,2-27,9)	26,5 \pm 4,7 (24,3-28,7)	24,8 \pm 4,8 (20,4-29,3)	0,306 (0,760)
Antes de la retirada	25,7 \pm 3,3 (24,5-27,1)	25,7 \pm 2,6 (24,5-26,9)	26,0 \pm 5,2 (21,2-30,8)	0,214 (0,831)
Después de la retirada	26,9 \pm 3,5 (25,5-28,3)	26,8 \pm 3,6 (25,2-28,5)	27,1 \pm 3,5 (23,9-30,4)	0,346 (0,729)
Final (2 años tras la retirada)	27,1 \pm 3,8 (11,9-14,2)	27,0 \pm 3,8 (25,3-28,8)	27,4 \pm 3,6 (24,0-30,8)	0,640 (0,522)

Lordosis lumbar T12-S1 (Cobb)				
Inicial	55,5 ± 10,3 (51,5-59,6)	56,6 ± 10,8 (51,7-61,5)	51,8 ± 8,1 (43,3-60,4)	0,906 (0,365)
Postoperatoria	55,2 ± 7,8 (52,2-58,2)	56,4 ± 8,5 (52,5-60,2)	51,7 ± 3,8 (48,2-55,2)	0,0586 (0,558)
Antes de la retirada	56,0 ± 6,8 (53,4-58,7)	56,9 ± 7,6 (53,4-60,3)	53,4 ± 3,0 (50,6-56,2)	0,267 (0,790)
Después de la retirada	56,7 ± 5,6 (54,5-58,9)	57,4 ± 6,1 (54,6-60,1)	54,7 ± 3,8 (51,2-58,2)	0,748 (0,455)
Final (2 años tras la retirada)	56,9 ± 6,0 (54,6-59,3)	57,5 ± 6,6 (54,5-60,5)	55,3 ± 3,8 (51,8-58,8)	0,426 (0,670)

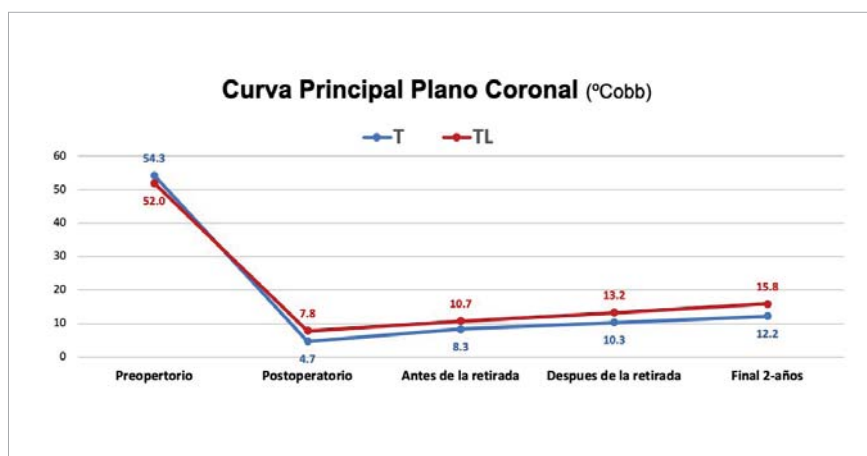


Figura 19: Corrección de la curva coronal principal durante el seguimiento. Se observó una corrección del 89,7% después de la cirugía y una corrección del 75,4% se logró a los dos años de seguimiento.

En cuanto al plano lateral, el valor angular promedio preoperatorio de la cifosis torácica de T2 a T12 fue de 19° y aumentó a un valor angular final de 27,1° en el estudio radiográfico más de dos años después de la retirada de la instrumentación, lo que representó un aumento de la cifosis del 29,9%. No existieron diferencias en el comportamiento de las curvas torácicas y toracolumbares (Fig. 20). En cuanto a la lordosis lumbar, no hubo cambios antes de la cirugía y 2 años después de la retirada de los implantes (Tabla 4).

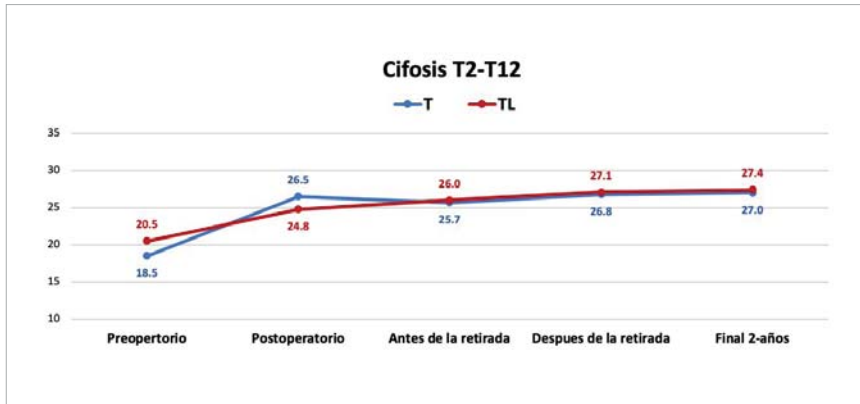


Figura 20: Valor angular de la cifosis torácica desde T2 a T12.

5.3. Desequilibrio

Los resultados respecto al desequilibrio anteroposterior se muestran en la Tabla 5 (Figura 21). Existieron diferencias significativas postoperatorias y antes de la retirada del implante entre los pacientes con curvas Lenke 1 vs Lenke 5-6. Respecto al desequilibrio lateral (Tabla 5) no existieron diferencias significativas entre los diferentes tipos de curva Lenke. Cuando se hicieron subgrupos según el tipo de curva, se observó que los pacientes con curvas torácicas presentaron mayor desequilibrio anteroposterior respecto a las curvas toracolumbares. En cambio, el desequilibrio lateral fue mayor en las curvas toracolumbares (Tabla 6).

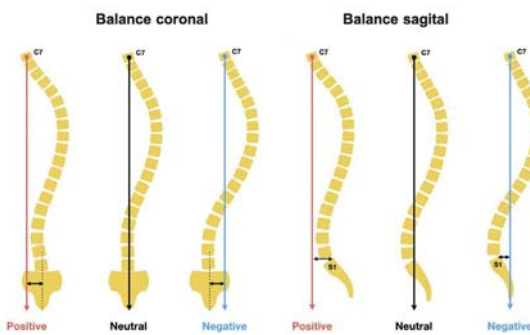


Figura 21: El desequilibrio anteroposterior de columna consiste en una traslación anormal en el plano sagital de la columna vertebral. Se define como la distancia horizontal entre la línea de plomo que cae del centro del cuerpo vertebral C7 y el centro del cuerpo S1. El desequilibrio lateral de columna se refiere a un desplazamiento anómalo en el plano coronal o frontal de la columna. Se mide como la distancia perpendicular

entre una línea central vertical que pasa por el centro del sacro y el centro del cuerpo de C7. La figura muestra la medición del desequilibrio anteroposterior y el lateral. (Imágenes obtenidas de <https://radiopaedia.org/articulos/coronal-balance>).

Tabla 5. Evolución del desequilibrio en el plano anteroposterior.

Desequilibrio anteroposterior	Muestra completa Media \pm SD (95% IC)	Lenke 1,2,3 Media \pm SD (95% IC)	Lenke 5, 6 Media \pm SD (95% IC)	Z (p-value)
Inicial	5,8 \pm 19,1 (-1,7-13,4)	2,3 \pm 14,5 (-4,9-8,9)	18,0 \pm 28,6 (-11,9-47,9)	1,832 (0,067)
Postoperatoria	-3,6 \pm 14,8 (-9,3-2,2)	0,1 \pm 12,8 (-5,8-5,9)	-14,4 \pm 16,1 (-29,3-0,5)	2,010 (0,044)
Antes de la retirada	-1,9 \pm 12,6 (-6,9-3,1)	1,1 \pm 10,2 (-9,3-2,2)	-10,4 \pm 15,7 (-25,0-4,2)	2,150 (0,032)
Después de la retirada	4,1 \pm 12,8 (-0,9-9,2)	5,8 \pm 9,3 (-6,9-3,1)	-0,7 \pm 19,9 (-19,2-17,7)	1,187 (0,245)
Final (2 años tras la retirada)	3,9 \pm 9,1 (0,3-7,6)	6,3 \pm 9,4 (-0,9-9,2)	6,2 \pm 9,4 (1,7-10,8)	2,669 (0,008)

Tabla 6. Evolución del desequilibrio en el plano lateral.

Desequilibrio lateral	Muestra completa Media \pm SD (95% IC)	Lenke 1,2,3 Media \pm SD (95% IC)	Lenke 5, 6 Media \pm SD (95% IC)	Z (p-value)
Inicial	28,9 \pm 31,7 (16,5-41,6)	30,0 \pm 32,9 (15,0-45,0)	25,6 \pm 29,4 (-5,27-56,6)	0,234 (0,815)
Postoperatoria	22,3 \pm 35,9 (8,4-36,2)	28,3 \pm 33,9 (12,8-43,7)	51,7 \pm 3,8 (48,2-55,2)	1,703 (0,089)
Antes de la retirada	20,8 \pm 31,1 (8,7-32,9)	27,8 \pm 26,2 (15,9-39,8)	-0,2 \pm 37,0 (-34,5-33,9)	1,847 (0,065)
Después de la retirada	19,6 \pm 26,8 (9,2-30,0)	22,5 \pm 28,9 (9,3-35,7)	10,8 \pm 17,9 (-5,8-27,5)	1,214 (0,225)
Final (2 años tras la retirada)	16,0 \pm 24,1 (6,7-25,4)	20,0 \pm 18,7 (11,5-28,6)	4,0 \pm 34,9 (-28,3-36,4)	1,195 (0,232)

5.4. Rotación vertebral

En cuanto a la rotación vertebral según Perdriolle, se muestra la evolución en las Figuras 22 y 23. La rotación de la deformidad mejoró tras la cirugía de forma significativa. Esta corrección se mantuvo hasta el final del seguimiento. Las curvas toracolumbares presentaron mayor rotación al inicio del estudio. No existieron diferencias entre los grupos toracolumbar y torácico durante y al final del seguimiento.

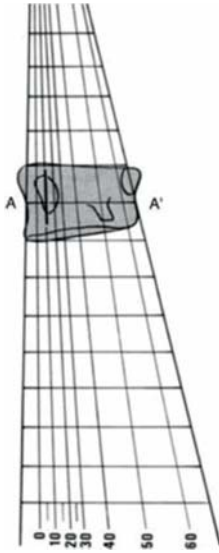


Figura 22: El método de Perdriolle permite cuantificar la rotación de una vértebra utilizando radiografías simples. Se basa en medir el ángulo formado entre una línea que une el centro de la vértebra con el borde posterior y otra línea desde el centro de la vértebra hasta el punto más lateral del pedículo en la proyección oblicua. Este ángulo de rotación se mide con un transportador o torsiómetro diseñado por Perdriolle. Valores mayores a 10° en el ángulo de Perdriolle se consideran anormales y sugieren una rotación vertebral excesiva (Imagen obtenida de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1286935X04705304>).

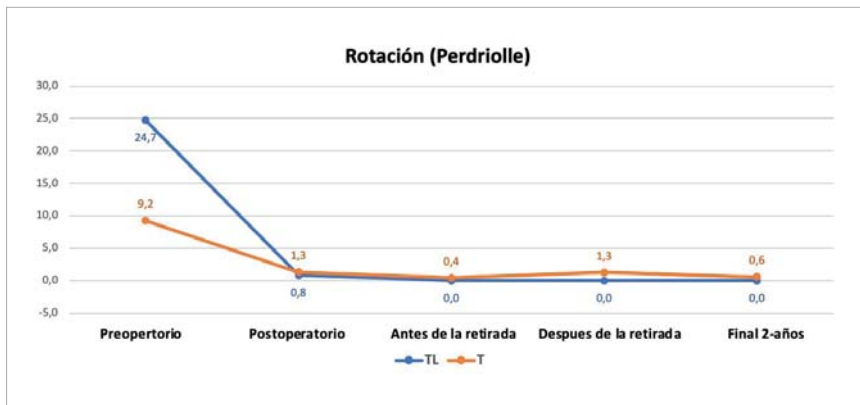


Figura 23: Rotación vertebral según Perdriolle según el tipo de curva (toracolumbar y torácica).

5.5. Rango de movimiento sagital de la transición toracolumbar y la columna lumbar

Dos años después de la retirada de los implantes, se logró un rango de movimiento (ROM) satisfactorio en todos los segmentos lumbares analizados (Fig. 24 y 25). El ROM sagital promedio final del segmento T12-S1 fue de $51,2 \pm 21,0^\circ$. En el nivel L3-L4 de las curvas torácicas, el ROM promedio fue de 28° . Además, en 13 de 23 casos se instrumentó este nivel durante más de 2 años. En las curvas toracolumbares, el ROM promedio en el nivel L4-L5 fue de $27,5^\circ$, aunque cinco de los siete casos fueron temporalmente instrumentados. En estas últimas curvas, el segmento con el ROM más bajo fue L1-L2, que correspondía al nivel del ápex, que suele ser el más rígido.

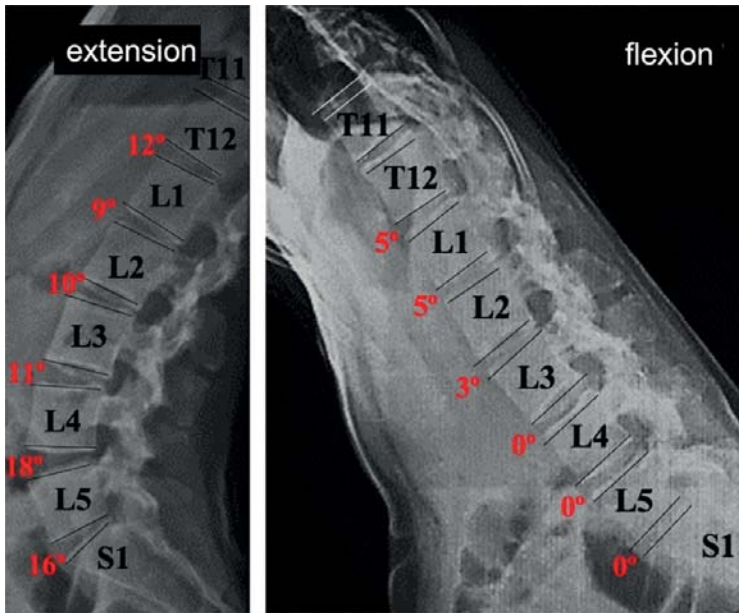


Figura 24: Niña de 14 años con AIS tipo 1CN Lenke (Cobb de 54°) que se sometió a cirugía de corrección con instrumentación T3-L3. Las imágenes muestran radiografías sagitales de la columna lumbar en extensión máxima y flexión después de la retirada de los implantes (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

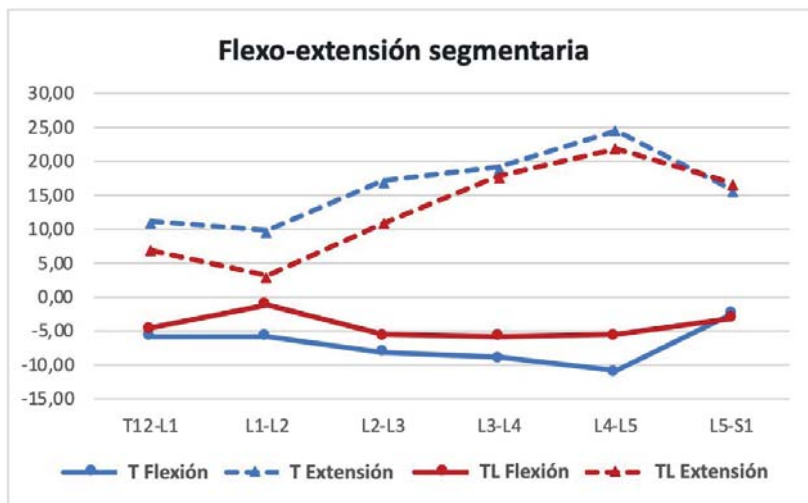


Figura 25: Análisis del rango de movimiento (ROM) toracolumbar y torácico durante la flexión y extensión dividido por segmento dos años después de la retirada de los implantes.

Cuando se analizó el ROM (flexo-extensión) según el estadio de maduración según Risser, se observó que los pacientes con Risser maduro mostraban mayor extensión lumbar total respecto a los Risser inmaduros ($97,87 \pm 18,73$ maduros vs $32,5 \pm 87,74$ inmaduros). En cuanto al tipo de curva, no existieron diferencias significativas respecto al ROM ni en la flexión ni extensión (Table 7).

Tabla 7. Valores del rango de movimiento (flexión y extensión) según los niveles toracolumbar y lumbar.

Segmento	Tipo de curva	Flexión media	Extensión media	ROM
L5-S1	Torácica	2,64	12,00	14,64
	Toracolumbar	2,25	-3,00	-0,75
	Total	2,53	8,00	10,53
L4-L5	Torácica	11,18	17,00	28,18
	Toracolumbar	4,75	-1,00	3,75
	Total	9,47	12,20	21,67

L3-L4	Torácica	9,00	13,27	22,27
	Toracolumbar	5,25	3,00	8,25
	Total	8,00	10,53	18,53
L2-L3	Torácica	7,82	9,36	17,18
	Toracolumbar	6,00	0,50	6,50
	Total	7,33	7,00	14,33
L1-L2	Torácica	5,42	9,90	15,32
	Toracolumbar	5,00	2,25	7,25
	Total	5,31	7,71	13,03
T12-L1	Torácica	5,00	8,82	13,82
	Toracolumbar	6,00	4,75	10,75
	Total	5,25	7,73	12,98
Total, T12-S1	Torácica	38,33	66,18	104,52
	Toracolumbar	29,25	87,00	116,25
	Total	36,06	71,73	107,80

5.6. Modulación vertebral

Se analizó la modulación del crecimiento vertebral de las placas epifisarias en el ápex vertebral mediante el “wedging ratio” (WR), que es el resultado de la altura de la concavidad vertebral dividida por la altura de la convexidad. Los resultados generales mostraron que se restauró casi por completo la forma rectangular del cuerpo vertebral del ápex, con la concavidad alcanzando la misma altura que la convexidad (Tabla 8, Fig. 26). Se encontró una mayor corrección de las curvas toracolumbares y lumbares que en la escoliosis torácica. También se encontró una mayor corrección en pacientes más inmaduros.

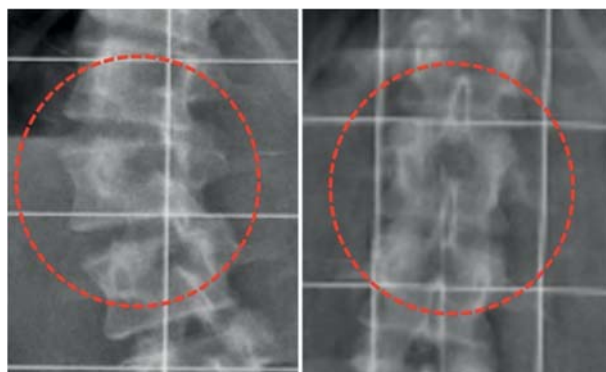


Figura 26: Modulación de la vértebra apical antes de la cirugía y después de la retirada de los implantes. El wedging ratio pasó de 0,75 a 0,96 (Donadas por el Dr. Burgos Flores).

Tabla 8. Modulación vertebral analizada en el ápex vertebral utilizando la relación de cuña (WR).

Características	Inicial Media \pm SD (95% IC)	Final Media \pm SD (95% IC)	Z (p-value)
Serie completa	0,70 \pm 0,05 (0,67-0,74)	0,98 \pm 0,08 (0,94-1,03)	3,408 (0,001)
Tipo de curva			
Torácica	0,70 \pm 0,07 (0,65-0,75)	0,95 \pm 0,05 (0,91-0,99)	2,666 (0,008)
Toracolumbar/ Lumbar	0,70 \pm 0,04 (0,66-0,75)	1,03 \pm 0,10 (0,92-1,14)	2,201 (0,028)
Madurez esquelética			
Risser 0-1	0,70 \pm 0,06 (0,65-0,75)	1,00 \pm 0,09 (0,93-1,07)	2,666 (0,008)
Risser 2-3	0,72 \pm 0,06 (0,66-0,78)	0,95 \pm 0,06 (0,89-1,01)	2,201 (0,028)

5.7. Calidad de vida

Los resultados del cuestionario SRS-22 demostraron que esta técnica produce una mejora en muchos de los dominios estudiados (Fig. 27). En el caso de las curvas torácicas, el aumento en las puntuaciones fue estadísticamente significativo en los dominios de función ($p < 0,01$), autoimagen ($p < 0,01$) y salud mental ($p < 0,001$) (Tabla 9). En las curvas toracolumbares, la mejora solo fue significativa en el dominio de salud mental ($p < 0,05$).

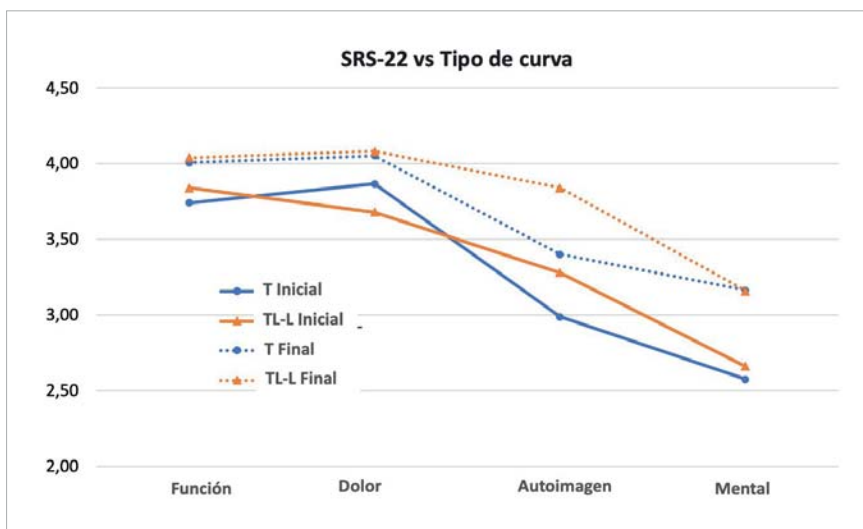


Figura 27: Resultados del cuestionario SRS-22 según la ubicación de la curva. Se demostró una mejora en muchos de los dominios evaluados. Las curvas torácicas mejoraron en la mayoría de los campos del cuestionario en comparación con las curvas toracolumbares.

Tabla 9. Cambio en el cuestionario SRS-22 según la ubicación de la deformidad y la madurez esquelética.

Cambio en el SRS-22				
	Función	Dolor	Autoimagen	Salud mental
Torácico				
Media ± DS	0,26 ± 0,29	0,18 ± 0,37	0,41 ± 0,44	0,58 ± 0,18
Z (p)*	2,691 (0,007)	1,876 (0,061)	3,025 (0,002)	3,573 (0,000)
Toracolumbar				
Media ± DS	0,20 ± 0,31	0,40 ± 0,31	0,56 ± 0,48	0,50 ± 0,17
Z (p)*	1,289 (0,197)	1,826 (0,068)	1,826 (0,068)	2,060 (0,039)
Risser 0-1				
Media ± DS	0,33 ± 0,35	0,22 ± 0,34	0,54 ± 0,50	0,36 ± 0,38
Z (p)*	2,099 (0,036)	1,706 (0,088)	2,530 (0,011)	2,448 (0,014)
Risser 2-3				
Media ± DS	0,17 ± 0,20	0,25 ± 0,40	0,56 ± 0,25	0,57 ± 0,07
Z (p)*	2,201 (0,028)	1,841 (0,066)	2,829 (0,005)	2,980 (0,003)

Cuando se estratificaron los resultados del cuestionario SRS-22 según el grado de madurez esquelética (Fig. 28), se pudo observar una mejora relevante en casi todos los dominios estudiados (Tabla 9). En el caso de pacientes inmaduros (Risser 0-1), los aumentos en las puntuaciones fueron estadísticamente significativos en los dominios de función ($p < 0,05$), autoimagen ($p < 0,05$) y salud mental ($p < 0,01$). En pacientes con un grado de madurez ósea Risser 2-3, la mejora también fue significativa en estos tres dominios, incluyendo función ($p < 0,05$), autoimagen ($p < 0,05$) y salud mental ($p < 0,01$).

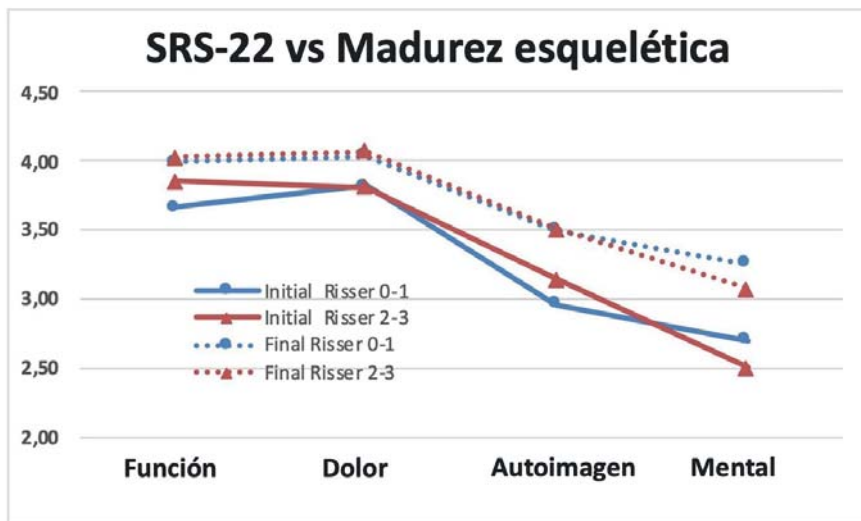


Figura 28: Resultados del cuestionario SRS-22 según el grado de madurez esquelética. Se observó una mejora significativa en casi todos los dominios estudiados.

En el seguimiento final, 33/36 pacientes (91,6%) afirmaron estar muy satisfechos o satisfechos. Cuando se les preguntó si se someterían al mismo procedimiento de nuevo, 35/36 pacientes (97,3%) estaban seguros o probablemente seguros de que volverían a recibir este tratamiento, y solo uno tenía dudas. Debido a que el dominio satisfacción solo puede valorarse tras la intervención o al final del seguimiento, solo se muestra el resultado al final del seguimiento. En la escala SRS-22, el dominio satisfacción fue de $4,27 \pm 0,67$.

En cuanto al SRS-22 global, existió una mejoría significativa al final del seguimiento de los subdominios de la escala SRS-22 función, dolor y mental. No existieron diferencias respecto al subdominio self-autoimagen (Tabla 10). No existieron diferencias cuando se analizaron los resultados por subgrupos según el tipo de curva o la madurez esquelética.

Tabla 10. Cambios de los dominios del SRS-22 antes y después del seguimiento.

Dominio SRS-22	Media ± DS	P-Valor
Función antes	3,74 ± 0,35	0,022
Función después	4,01 ± 0,19	
Dolor antes	3,87 ± 0,46	0,015
Dolor después	4,05 ± 0,32	
Mental antes	2,58 ± 0,29	0,000
Mental después	3,16 ± 0,24	
Autoimagen antes	2,99 ± 0,35	1,000
Autoimagen después	3,40±0,27	



6. Discusión

Las técnicas quirúrgicas convencionales para la corrección de la escoliosis idiopática del adolescente implican la fusión de extensos segmentos vertebrales. La inmovilización definitiva de grandes segmentos vertebrales aumenta las tensiones mecánicas en los segmentos adyacentes no fusionados con consecuencias negativas a largo plazo (50). Además, estos pacientes jóvenes tienen que convivir con la presencia de implantes metálicos internos de alta densidad, lo que también tiene importantes consecuencias a largo plazo (51,52). La fusión no mejora la restricción respiratoria preoperatoria (53) y limita la funcionalidad respiratoria de la columna torácica (54).

En la última década, las técnicas de modulación vertebral, tanto anteriores como posteriores, se han expandido. Las técnicas de modulación vertebral anterior se realizan a través de abordajes torácicos con una pérdida significativa de continuidad torácica y consecuencias negativas en la función respiratoria (55,56). Estas técnicas producen correcciones impredecibles y con frecuencia insuficientes de la escoliosis; no aplican fuerzas adecuadas de manera bilateral ni de manera guiada. Dejan los discos involucrados en la modulación en posiciones no fisiológicas y la instrumentación permanente limita la movilidad del disco y compromete la futura funcionalidad vertebral, dañando los discos involucrados en la modulación.

El sistema de modulación vertebral posterior recientemente publicado (57) demostró que modula el plano anteroposterior usando tornillos pediculares en los extremos de la concavidad mediante distracción. Este sistema presenta ciertos problemas debido al número mínimo de implantes utilizados para corregir esta deformidad tridimensional; se obtiene una corrección parcial solo del plano anteroposterior y las fuerzas correctivas aplicadas tienen un efecto lordótico con consecuencias similares al uso del método de Harrington, que resultó en síndrome de espalda plana (58).

No encontramos ningún estudio clínico previo en la literatura donde se haya utilizado la modulación vertebral bilateral mediante tornillos pediculares para lograr la corrección completa de la escoliosis con preservación del movimiento vertebral una vez que se retiraron los implantes cuando los pacientes no tuvieron que usar implantes metálicos durante toda la vida. GPVM logra correcciones máximas sin comprometer la funcionalidad espinal, sin mantener implantes metálicos en el cuerpo y evita las consecuencias negativas de los abordajes de la cavidad torácica. La viabilidad de la instrumentación vertebral larga para la corrección o deformidad espinal sin fusión y, por lo tanto, la preservación del movimiento una vez que se retiraron los implantes ya ha sido demostrada en fracturas vertebrales (59). En estos casos, la extracción de implantes suele ser un procedimiento seguro y proporciona una alta satisfacción del paciente con una calidad de vida bastante buena. Después de la fusión exitosa de fracturas toracolumbares tratadas con instrumentación de largos segmentos, se ha encontrado que la extracción de implantes es beneficiosa en términos de mitigación del dolor y la discapacidad. Además, se ha demostrado que la restauración del mo-

vimiento segmentario después de la extracción de los constructos de tornillos pediculares contribuye a la mejora clínica en las fracturas toracolumbares sin fusión (60).

Los cuerpos vertebrales tienen placas fisarias más grandes y extensas en el cuerpo anterior, con la mayor capacidad de modulación en este área. Los tornillos pediculares aplican fuerzas correctivas desde la parte posterior a lo largo de toda la vértebra, siendo más fuertes en la parte anterior de la vértebra. Esta mayor fuerza aumenta las fuerzas correctivas en los extremos anteriores de los tornillos, que es donde la deformidad vertebral es más fuerte y se necesitan más las exigencias de corrección.

Esta técnica de modulación vertebral posterior se considera “guiada” porque, a diferencia de las otras técnicas de modulación descritas, se realiza con un control completo y predecible de la modulación vertebral. A diferencia de otras técnicas, la corrección se logra inicialmente, dejando la columna vertebral en una posición corregida y permitiendo el crecimiento en cuerpos vertebrales altos. Con esta técnica, el control del crecimiento vertebral es completo; se realiza desde los dos pedículos en todos los segmentos vertebrales de la deformidad, con las fuerzas correctivas moduladoras apropiadas a la concavidad y convexidad en cada nivel, logrando una corrección completa y recuperación de la morfología vertebral normal. Cuando se logra la corrección morfológica completa, las fuerzas moduladoras correctivas dejan de ejercer su influencia.

Existe una relación directa entre la intensidad de las fuerzas de compresión y distracción en las placas de crecimiento con la velocidad de modulación, como se ha verificado experimentalmente (61). La disminución progresiva de las presiones de modulación en las placas de crecimiento a medida que se produce la corrección de la deformidad vertebral podría causar que la corrección inicial sea más intensa y más rápida, ya que las fuerzas correctivas en la fisis vertebral son mayores. Estas altas fuerzas moduladoras iniciales disminuyen progresivamente y se ralentizan hasta que desaparecen cuando se ha alcanzado la corrección guiada del implante, lo que corresponde al punto donde no hay presión asimétrica en la fisis.

Es lógico aplicar una menor densidad de implantes en casos de escoliosis menos severas y más flexibles donde las tensiones mecánicas requeridas para corregir la deformidad serían menores. Sin embargo, se deben mantener los mismos estándares para lograr una corrección completa de la escoliosis y aplicar las fuerzas moduladoras correctas. Se deben utilizar implantes bilaterales cercanos a las placas fisarias para permitir una aplicación más efectiva de las fuerzas moduladoras y lograr la máxima corrección, siempre teniendo en cuenta que se debe corregir y modular una deformidad vertebral tridimensional. Las curvas menores también deben ser instrumentadas para evitar su progresión y los desequilibrios vertebrales que ocurren cuando se corrige completamente la curva principal (62).

La técnica quirúrgica utilizada fue el abordaje convencional abierto porque las técnicas mínimamente invasiva aumentarían significativamente el tiempo quirúrgico y la incidencia de mala posición de los tornillos pediculares en estos pacientes. Esto podría haber aumentado la morbilidad de este nuevo método, lo que dificultaría lograr una serie homogénea al incluir un mayor número de variables difíciles de controlar. No obstante, sería recomendable aplicar esta técnica con un abordaje mínimamente invasivo o percutáneo en lugar del abordaje convencional abierto, considerando que uno de los objetivos prioritarios de este método de tratamiento es la recuperación del rango de movimiento vertebral después de la extracción del implante (58,62).

En cuanto a la selección de pacientes incluidos en este estudio, todos los casos presentaban escoliosis idiopática del adolescente con ángulos de Cobb mayores de 45° de todos los tipos Lenke, lo que nos permitió determinar si la modulación espinal guiada debe aplicarse a todos los tipos de deformidades. El límite de madurez ósea fue Risser igual o menor que 3 basado en un tiempo mínimo restante de crecimiento mayor a dieciocho meses para que la corrección completa de la deformidad mediante modulación vertebral guiada sea efectiva. Los pacientes incluidos en este estudio presentaron una escoliosis no severa y fueron seleccionados intencionalmente ya que una escoliosis más severa requiere osteotomías de Ponte para lograr una corrección completa de la deformidad. Las osteotomías de Ponte requieren realizar una fusión en los niveles donde se realizan las osteotomías y, por lo tanto, no se pudieron incluir en el estudio.

La retirada de la instrumentación se realizó en todos los casos cuando los pacientes alcanzaron un Risser 4 con fusión de la mayor parte del proceso ilíaco para evitar la posibilidad de aumentar la escoliosis residual después de la extracción del implante. La razón de esto fue evitar el crecimiento de rebote observado en otras ubicaciones anatómicas después de la extracción de los implantes de crecimiento guiado (59). Este fenómeno se puede prevenir manteniendo los implantes hasta que completen la maduración ósea.

En la evaluación de la modulación vertebral guiada mediante el WR en la vértebra ápex de la escoliosis se ha demostrado la eficacia de este método de cuantificación de la modulación vertebral y los resultados satisfactorios de nuestro método. Además, la rotación vertebral mejoró de forma significativa, aunque, evaluar la rotación de forma más precisa habría requerido el uso repetido de tomografías computarizadas con una dosis de radiación inaceptable para los pacientes involucrados en el estudio.

En el estudio actual, se realizó el análisis de la movilidad en flexión-extensión de la columna lumbosacra al final del seguimiento para evaluar si el abordaje posterior convencional abierto de la columna lumbar y la inmovilización instrumental produjeron

limitaciones significativas en la movilidad en flexión-extensión. Aunque este análisis es complicado debido a que el mayor porcentaje de movilidad lumbar se encuentra en los últimos niveles lumbares, estos se dejaron sin restricciones en la mayoría de los casos de esta serie. Este estudio demostró en todos los casos la transición de lordosis en extensión a cifosis en flexión en todos los niveles lumbares.

A partir de los resultados obtenidos en SRS-22, se puede inferir que la esta técnica mejora la imagen corporal, la salud mental, el dolor y la funcionalidad de estos pacientes incluso después de dos intervenciones quirúrgicas. La indicación de esta técnica se puede extender a curvas menos severas con un mal pronóstico, reemplazando el uso de corsés debido a su efectividad limitada. En estos casos, la deformidad es más flexible, lo que hace que la técnica sea menos exigente y permita una instrumentación menos agresiva. En el futuro, la indicación de esta técnica también se puede extender a la escoliosis infantil y juvenil y a otras etiologías en las que no haya alteraciones fisarias que dificulten la realización de esta técnica. Incluso algunas escoliosis congénitas podrían ser susceptibles de tratamiento con modulación vertebral guiada actuando sobre la misma fisis que produce la deformidad escoliótica en estos casos.

Nuestro objetivo al trabajar con niños que sufren de escoliosis idiopática grave es restaurar la morfología y funcionalidad normales. Nuestra técnica no difiere mucho de otras técnicas que intentan lograr la corrección de la deformidad vertebral, pero no incorpora la fusión y, por otro lado, es más exigente, ya que dejar cierta deformidad residual puede inducir a la recaída.

Por otro lado, se puede argumentar que esta técnica utilizó una alta densidad de instrumentación y requiere una corrección más exigente que otras técnicas porque requiere la instrumentación de un mayor número de niveles vertebrales y un mayor número de tornillos pediculares. Sin embargo, la corrección completa de la escoliosis es más exigente para el cirujano, y la técnica quirúrgica presentada aquí es fácil y logra la corrección necesaria en el plano anteroposterior mediante un golpeteo progresivo de la barra de convexidad. La corrección de los otros dos planos se logra bajando la barra de concavidad a través del apriete progresivo de los tornillos en la barra sin agregar ningún gesto accesorio.

A pesar de algunas limitaciones, el presente estudio ha logrado obtener resultados homogéneos, lo que contribuye a fortalecer la validez de los hallazgos. La muestra de pacientes fue relativamente limitada, lo cual podría restringir la generalización de los resultados a una población más amplia. No obstante, la ausencia de revisiones dos años después de la extracción del implante aporta confianza en cuanto a la sostenibilidad de los resultados en etapas posteriores, aunque los pacientes continúan siendo sometidos a revisiones periódicas para un seguimiento a largo plazo.

En términos de fortalezas, es importante destacar que este estudio se considera pionero en su campo, careciendo de estudios recientes o comparables en la literatura científica. Además, el largo periodo de seguimiento incluido en la investigación proporciona una perspectiva exhaustiva y profunda de los resultados a lo largo del tiempo.

Para futuras investigaciones, se recomienda ampliar el tamaño muestral con el fin de mejorar la representatividad y la confiabilidad de los resultados. Asimismo, sería beneficioso incluir una gama más amplia de cuestionarios de calidad de vida y medidas subjetivas para obtener una evaluación más completa de los efectos del tratamiento. La comparación con un grupo control también sería esencial para establecer comparaciones significativas y evaluar la eficacia del tratamiento en relación con otras opciones disponibles.

En cuanto a las direcciones futuras de la investigación, se sugiere considerar la disminución de la indicación del tratamiento a curvas menos severas, lo que permitiría explorar su eficacia en una población más diversa. Además, sería valioso investigar el uso de abordajes mínimamente invasivos, técnicas de navegación o robótica para mejorar la precisión y los resultados del tratamiento. Además, expandir el alcance del estudio para incluir otros tipos de escoliosis abriría nuevas perspectivas sobre las opciones de tratamiento para diferentes subgrupos de pacientes.



7. Conclusiones

En respuesta al objetivo principal:

1. Los resultados del estudio demostraron que la técnica quirúrgica sin fusión posterior mediante tornillos pediculares en pacientes inmaduros con escoliosis idiopática adolescente y retirando la instrumentación una vez que se alcanza la madurez ósea es una técnica eficaz para corregir las curvas principales de escoliosis en pacientes con una madurez ósea de Risser 3 o inferior. Este hallazgo indica que la técnica presentada puede ser una alternativa viable a los métodos de fusión vertebral tradicionales.

En respuesta a los objetivos secundarios:

1. La técnica planteada permitió la restauración de la morfología vertebral al final del seguimiento valorada mediante el “wedging ratio” aumentando el crecimiento vertebral en la parte de la concavidad y limitándolo en la parte de la convexidad.
2. Esta técnica, además, no mostró una pérdida significativa de la corrección de la deformidad una vez retirados los implantes. Este hecho confirma que una vez alcanzada la madurez esquelética la retirada de la instrumentación no está asociada con una pérdida de la corrección.
3. Por otro lado, el rango de movimiento valorando flexo-extensión de la columna toracolumbar, es decir, los segmentos inferiores a la instrumentación presentaron un aumento significativo del rango de movimiento.
4. Por último, la funcionalidad, el dolor, la autoimagen, la salud mental y la satisfacción valoradas mediante el cuestionario SRS-22 aumentaron al final del seguimiento.

A pesar de los resultados prometedores obtenidos en este estudio, se consideró que se necesitan más estudios para confirmar la eficacia y seguridad a largo plazo de esta técnica y evaluar su potencial para otros tipos de escoliosis. Estos estudios deberían involucrar a una población más amplia de pacientes y tener un seguimiento a largo plazo para evaluar la sostenibilidad de los resultados. Sin embargo, los hallazgos actuales sugieren que esta técnica sin fusión utilizando tornillos pediculares puede ser una técnica prometedora y segura para el tratamiento de la escoliosis en pacientes con AIS.



8. Referencias bibliográficas

1. Pourquié O. The segmentation clock: converting embryonic time into spatial pattern. *Science*. 2003;301(5631):328-30.
2. Marks DS, Qaimkhani SA. The natural history of congenital scoliosis and kyphosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2009;34(17):1751-5.
3. O’Rahilly R, Müller F. Developmental stages in human embryos: revised and new measurements. *Cells Tissues Organs*. 2010;192(2):73-84.
4. Risbud MV, Shapiro IM. Role of cytokines in intervertebral disc degeneration: pain and disc content. *Nat Rev Rheumatol*. 2014;10(1):44-56.
5. Yang S, Andras LM, Redding GJ, Skaggs DL. Early-Onset Scoliosis: A Review of History, Current Treatment, and Future Directions. *Pediatrics*. 2016;137(1).
6. Konieczny MR, Senyurt H, Krauspe R. Epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis. *J Child Orthop*. 2013;7(1):3-9.
7. Mackel CE, Jada A, Samdani AF, Stephen JH, Bennett JT, Baaj AA, et al. A comprehensive review of the diagnosis and management of congenital scoliosis. *Childs Nerv Syst*. 2018;34(11):2155-2171.
8. Lincoln TL. Infantile idiopathic scoliosis. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)*. 2007;36(11):586-90.
9. Abel MF. Infantile idiopathic scoliosis. *J Neurosurg Spine*. 2009;11(1):1-2.
10. Weinstein SL, Dolan LA, Cheng JC, Danielsson A, Morcuende JA. Adolescent idiopathic scoliosis. *Lancet*. 2008;371(9623):1527-37.
11. Reamy BV, Slakey JB. Adolescent idiopathic scoliosis: review and current concepts. *Am Fam Physician*. 2001;64(1):111-6.
12. Negrini S, Donzelli S, Aulisa AG, Czaprowski D, Schreiber S, de Mauroy JC, et al. 2016 SOSORT guidelines: orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth. *Scoliosis Spinal Disord*. 2018;13:3.
13. Altaf F, Gibson A, Dannawi Z, Noordeen H. Adolescent idiopathic scoliosis. *BMJ*. 2013;346:f2508.

-
14. Asher MA, Burton DC. Adolescent idiopathic scoliosis: natural history and long term treatment effects. *Scoliosis*. 2006;1(1):2.
 15. Wang WJ, Yeung HY, Chu WC, Tang NL, Lee KM, Qiu Y, et al. Top theories for the etiopathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis. *J Pediatr Orthop*. 2011;31(1 Suppl):S14-27.
 16. Sun X, Xie Y, Kong Q, Xu X, Huan L, Zhang B, et al. Segmental Characteristics of Main Thoracic Curves in Patients with Severe Adolescent Idiopathic Scoliosis. *World Neurosurg*. 2018;119:e174-e179.
 17. Kuroki H. Brace Treatment for Adolescent Idiopathic Scoliosis. *J Clin Med*. 2018;7(6):136.
 18. Burwell RG, Dangerfield PH, Moulton A, Grivas TB. Adolescent idiopathic scoliosis (AIS), environment, exposome and epigenetics: a molecular perspective of postnatal normal spinal growth and the etiopathogenesis of AIS with consideration of a network approach and possible implications for medical therapy. *Scoliosis*. 2011;6(1):26.
 19. Ceballos Laita L, Tejedor Cubillo C, Mingo Gómez T, Jiménez Del Barrio S. Effects of corrective, therapeutic exercise techniques on adolescent idiopathic scoliosis. A systematic review. *Arch Argent Pediatr*. 2018;116(4):e582-e589.
 20. Kouwenhoven JW, Castelein RM. The pathogenesis of adolescent idiopathic scoliosis: review of the literature. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2008;33(26):2898-908.
 21. Mitchell SL, Heyer JH, Baldwin KD, Greenhill DA, Flynn JM, Anari JB. Preoperative MRI Reliably Predicts Pedicle Dimensions on Intraoperative CT Images in Structural Main Thoracic Curves in Patients With Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2022;47(17):1221-1226.
 22. Lenke LG, Betz RR, Harms J, Bridwell KH, Clements DH, Lowe TG, et al. Adolescent idiopathic scoliosis: a new classification to determine extent of spinal arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am*. 2001;83-A(8):1169-81.
 23. Romano M, Minozzi S, Bettany-Saltikov J, Zaina F, Chockalingam N, Kotwicki T, et al. Exercises for adolescent idiopathic scoliosis. *Cochrane Database Syst Rev*. 2012;2012(8):CD007837.

24. Emans JB, Kaelin A, Bancel P, Hall JE, Miller ME. The Boston bracing system for idiopathic scoliosis. Follow-up results in 295 patients. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1986;11(8):792-801.
25. de Mauroy J, Weiss H, Aulisa A, Aulisa L, Brox J, Durmala J, et al. 7th SOSORT consensus paper: conservative treatment of idiopathic & Scheuermann's kyphosis. *Scoliosis*. 2010;5:9.
26. Choi SK, Jo HR, Park SH, Sung WS, Keum DH, Kim EJ. The effectiveness and safety of acupuncture for scoliosis: A protocol for systematic review and/or meta-analysis. *Medicine (Baltimore)*. 2020;99(50):e23238.
27. Villafañe JH, Silva GB, Dughera A. Manipulative and rehabilitative therapy as a treatment of idiopathic scoliosis without psychological sequelae: a case report. *J Chiropr Med*. 2012;11(2):109-14.
28. Fishman LM, Groessl EJ, Sherman KJ. Serial case reporting yoga for idiopathic and degenerative scoliosis. *Glob Adv Health Med*. 2014;3(5):16-21.
29. Morningstar MW, Woggon D, Lawrence G. Scoliosis treatment using a combination of manipulative and rehabilitative therapy: a retrospective case series. *BMC Musculoskelet Disord*. 2004;5(1):32.
30. Carreon LY, Sanders JO, Diab M, Sturm PF, Sucato DJ, Spinal Deformity Study Group. Patient satisfaction after surgical correction of adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2011;36(12):965-8.
31. Liljenqvist U, Halm H, Bullmann V. Spontaneous lumbar curve correction in selective anterior instrumentation and fusion of idiopathic thoracic scoliosis of Lenke type C. *Eur Spine J*. 2013;22 Suppl 2:S138-48.
32. Boucher HH. A method of spinal fusion. *J Bone Joint Surg Br*. 1959 May;41-B(2):248-59.
33. Roy-Camille R, Saillant G, Mazel C. Internal fixation of the lumbar spine with pedicle screw plating. *Clin Orthop Relat Res*. 1986;(203):7-17.
34. Suk SI, Kim WJ. Pedicle screw fixation for thoracic scoliosis. In: Brown CW, editor. *Spinal instrumentation techniques*. Rosemont: Scoliosis Research Society; 1998.

-
35. Goldstein LA. Treatment of idiopathic scoliosis by Harrington instrumentation and fusion with fresh autogenous iliac bone grafts. *J Bone Joint Surg Am.* 1969;51(2):209-22.
 36. Bridwell KH, McAllister JW, Betz RR, Huss G, Clancy M, Schoenecker PL. Coronal decompensation produced by Cotrel-Dubousset "derotation" maneuver for idiopathic right thoracic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976).* 1991;16(7):769-77.
 37. Labelle H, Dansereau J, Bellefleur C, de Guise J, Rivard CH, Poitras B. Perioperative three-dimensional correction of idiopathic scoliosis with the Cotrel-Dubousset procedure. *Spine (Phila Pa 1976).* 1995;20(12):1406-9.
 38. Hueter C. Anatomische studien an den extremitaetengelenken neugeborener und erwachsener. *Virchows Arch Pathol Anat Physiol.* 1862;25:572-599.
 39. Volkmann R. Verletzungen und krankheiten der bewegungsorgane. In: Billroth, vPa, editor. *Handbuch der allgemeinen und speciellen chirurgie Bd II Teil I.* Ferdinand Enke; Stuttgart: 1862.
 40. Stokes IA, Spence H, Aronsson DD, Kilmer N. Mechanical modulation of vertebral body growth. Implications for scoliosis progression. *Spine (Phila Pa 1976).* 1996;21:1162-1167
 41. Mehlman CT, Araghi A, Roy DR. Hyphenated history: The Hueter- Volkmann law. *Am J Orthop (Belle Mead NJ).* 1997;26:798-800.
 42. Jain V, Lykissas M, Trobisch P, Wall EJ, Newton PO, Sturm PF, et al. Surgical aspects of spinal growth modulation in scoliosis correction. *Instr Course Lect.* 2014;63:335.
 43. Mariscal G, Morales J, Pérez S, Rubio-Belmar PA, Bovea-Marco M, Bas JL, et al. Meta-analysis on the efficacy and safety of anterior vertebral body tethering in adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J.* 2023;32(1):140-148.
 44. Parent S, Shen J. Anterior Vertebral Body Growth- Modulation Tethering in Idiopathic Scoliosis: Surgical Technique. *Am Acad Orthop Surg.* 2020;28:693-9.
 45. Lowe TG, Wilson L, Chien JT, Line BG, Klopp L, Wheeler D, et al. A posterior tether for fusionless modulation of sagittal plane growth in a sheep model. *Spine (Phila Pa 1976).* 2005;30(17 Suppl):S69-74.

46. Liu J, Li Z, Shen J, Xue X. Spinal growth modulation with posterior unilateral elastic tether in immature swine model. *Spine J.* 2015;15(1):138-45.
47. Zhang HY, Li QY, Wu ZH, Zhao Y, Qiu GX. Lumbar Scoliosis Induction in Juvenile Dogs by Three-dimensional Modulation of Spinal Growth Using Nickel-Titanium Coil Springs. *Chin Med J (Engl).* 2017;130(21):2579-2584.
48. Yizhar Floman, Ron El-Hawary, Baron S, Lonner, Randal R. Betz, Uri Arnin. Vertebral growth modulation by posterior dynamic deformity correction device in skeletally immature patients with moderate adolescent idiopathic scoliosis. *Spine Deformity.* 2021;9:149–153.
49. Barrios C, Lloris JM, Alonso J, Maruenda B, Burgos J, Llombart-Blanco R, et al. Novel porcine experimental model of severe progressive thoracic scoliosis with compensatory curves induced by interpedicular bent rigid temporary tethering. *J Orthop Res.* 2018;36(1):174-182.
50. Kepler CK, Meredith DS, Green DW, Widmann RF. Long-term outcomes after posterior spine fusion for adolescent idiopathic scoliosis. *Opin Pediatr.* 2012;24(1):68-75.
51. del Rio J, Beguiristain J, Duart J. Metal levels in corrosion of spinal implants. *Eur Spine J.* 2007;16(7):1055-61.
52. Mathew SE, Xie Y, Bagheri L, Claton LE, Chu L, Badreldin A, et al. Serum Ion Levels Elevated in Pediatric Patients With Metal Implants? *J Pediatr Orthop.* 2022;42(3):162-168.
53. Lorente A, Barrios C, Burgos J, Hevia E, Fernández-Pineda L, Lorente R, et al. Cardiorespiratory Function Does Not Improve 2 Years After Posterior Surgical Correction of Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Spine. (Phila Pa 1976).* 2017;42(18):1391-1397.
54. Burgos J, Barrios C, Mariscal G, Lorente A, Lorente R. Non-uniform Segmental Range of Motion of the Thoracic Spine During Maximal Inspiration and Exhalation in Healthy Subjects. *Front Med (Lausanne).* 2021;8:699357.
55. Namboothiri S, Kumar R, Menon KV. Early changes in pulmonary function following thoracotomy for scoliosis correction: the effect of size of incision. *Eur Spine J.* 2005;14(2):144-8.

-
- 56.** Lonner BS, Auerbach JD, Estreicher MB, Betz RR, Crawford AH, Lenke LG, et al. Pulmonary function changes after various anterior approaches in the treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *J Spinal Disord Tech.* 2009;22(8):551-8.
- 57.** Lowe TG, Wilson L, Chien JT, Line BG, Klopp L, Wheeler D, et al. A posterior tether for fusionless modulation of sagittal plane growth in a sheep model. *Spine (Phila Pa 1976).* 2005;30:S69-74.
- 58.** Sarwahi V, Horn JJ, Kulkarni PM, Wollowick AL, Lo Y, Gambassi M, et al. Minimally Invasive Surgery in Patients With Adolescent Idiopathic Scoliosis: Is it Better than the Standard Approach? A 2-Year Follow-up Study. *Clin Spine Surg* 2016;29(8):331-40.
- 59.** Si G, Li T, Wang Y, Liu X, Li C, Yu M. Minimally invasive surgery versus standard posterior approach for Lenke Type 1-4 adolescent idiopathic scoliosis: a multi-center, retrospective study. *Eu. Spine J.* 2021;30(3):706-713.
- 60.** Yukawa Y, Matsumoto T, Kollor H, Minamide A, Hashizume H, Yamada H, et al. Local Sagittal Alignment of the Lumbar Spine and Range of Motion in 627 Asymptomatic Subjects: Age-Related Changes and Sex-Based Differences. *Asian Spine J.* 2019;3(4):663-671.
- 61.** Betz RR, Kim J, D'Andrea LP, Mulcahey MJ, Balsara RK, Clements DH. An innovative technique of vertebral body stapling for the treatment of patients with adolescent idiopathic scoliosis: A feasibility, safety, and utility study. *Spine.* 2003;28(20):S255-65.
- 62.** Choi KJ, Lee S, Park MS, Sung KH. Rebound phenomenon and its risk factors after hemiepiphysiodesis using tension band plate in children with coronal angular deformity. *BMC Musculoskelet Disord* 2022;23(1):339.



9. Anexos

Anexo 1. Consentimientos informados Grupo Español de Estudio en Raquis (GEER).



CONSENTIMIENTO INFORMADO CIRUGÍA DE LA DEFORMIDAD VERTEBRAL

Usted tiene derecho a conocer el procedimiento al que va a ser sometido y las complicaciones más frecuentes que pueden ocurrir. Este documento intenta explicar todas estas cuestiones; léalo atentamente y consulte con su médico todas las dudas que se le planteen. Le recordamos que, por imperativo legal, tendrá que firmar, usted o su representante legal, familiar o persona vinculada de hecho, el Consentimiento Informado para que podamos realizarle dicho procedimiento/tratamiento.

PACIENTE

Yo, D./Dña.....de..... años de edad,
DNI....., con domicilio en

REPRESENTANTE LEGAL, FAMILIAR O PERSONA VINCULADA DE HECHO

Yo, D./Dña.....de..... años de edad,
con domicilio en.....
DNI....., en calidad de.....del paciente.

Previamente a la entrega de este documento he sido informado verbalmente de forma satisfactoria por el Dr./Dra....., colegiado de los siguientes puntos: qué es, cómo se realiza, para qué sirve, los riesgos existentes, posibles molestias o complicaciones y alternativas al procedimiento.

Se me recuerdan las siguientes **cuestiones**:

1. PREOPERATORIO

Antes de la cirugía será necesario realizarle algunas pruebas diagnósticas, como son: una analítica y un electrocardiograma; Y/o las pruebas que el servicio de anestesia considere necesarias en función de sus características individuales.

Le indicaremos desde qué hora debe permanecer en ayunas.

2. DESCRIPCION DEL PROCEDIMIENTO

Por haber sido diagnosticado de

y habiendo agotado otras alternativas, se le recomienda realizar el siguiente procedimiento

El objetivo de la cirugía es la corregir de la deformidad, proteger los elementos neurológicos (médula y/o raíces nerviosas), mantener la zona de la columna afectada en una posición correcta y/o evitar su progresión (ya que dicha progresión podría producir lesiones neurológicas más serias o dolor incapacitante).

Para la fijación de las vértebras afectadas se utilizan implantes metálicos (instrumentación vertebral). Para conseguir una fusión vertebral se asocia injerto óseo (generalmente local, de la cresta ilíaca o del banco de huesos), o sustitutos óseos.

La instrumentación y la fusión vertebral se realiza generalmente por vía posterior, pero en determinados casos puede ser necesario realizar una doble vía de abordaje (anterior y posterior) en el mismo acto operatorio o en distintos días.

En ocasiones se realiza una artrodesis llamada circunferencial, que consiste en la fusión tanto de la parte anterior como de la posterior de la vértebra (realizándose generalmente todo el acto por vía posterior).

Otras veces, se requieren gestos más agresivos, llamados osteotomías vertebrales (de mayor o menor magnitud) encaminadas a conseguir una mayor corrección.

Las únicas alternativas a esta cirugía sería continuar con tratamiento analgésico o rehabilitador para paliar sus molestias.

La cirugía requiere de la disección de algunos músculos y ligamentos, así como la manipulación de huesos. Por todo ello, es común la presencia de dolor y hematoma en la zona que tiende a mejorar con el tiempo y el tratamiento.

He sido informado y autorizo sobre la posibilidad de que se utilice material biológico autólogo o heterólogo, incluyendo derivados hemáticos, en caso de que mi procedimiento terapéutico/diagnóstico así lo precise, tanto durante el acto quirúrgico como en el postoperatorio.

Si surgiera alguna **situación imprevista urgente**, que precisara de la realización de algún procedimiento distinto de los que he sido informado, autorizo al equipo médico para realizarlo.

3. DESCRIPCIÓN DE RIESGOS

-La intervención se realiza bajo anestesia general, con los riesgos inherentes a la misma de los que le informará el Servicio de Anestesia.

-Por la propia técnica operatoria y por la situación vital de cada paciente (diabetes, hipertensión, edad avanzada, obesidad, anemia, alteraciones cardiológicas...) cualquier cirugía lleva implícita una serie de complicaciones comunes que, junto con las específicas de esta intervención son infrecuentes y, pueden considerarse leves (hematomas, infecciones superficiales, tromboflebitis, dehiscencias de heridas, luxación de los componentes,...) y graves, hasta un 2-3% (infecciones profundas, lesiones vasculares y nerviosas, hematomas profundos, embolia grasa o pulmonar, fuga de líquido cefalorraquídeo, parálisis o alteraciones de la función sexual, etc.). Excepcionalmente estas complicaciones graves pueden comprometer la vida del paciente.

-Las complicaciones derivadas de la posición quirúrgica como compresiones oculares, compresión de nervios periféricos, etc.

-Los riesgos específicos de la intervención son las lesiones neurológicas que, aunque excepcionales, son a veces graves (alteraciones motoras o sensitivas, síndrome de cola de caballo, disfunciones sexuales). Para disminuir la incidencia de estas complicaciones generalmente se realiza la monitorización neurofisiológica intraoperatoria, a cargo de especialistas en esta materia. De la necesidad de su uso, en cada caso particular, será informado por su cirujano.

-Otros riesgos específicos de la cirugía de corrección de la columna vertebral son: la recidiva de la deformidad o la persistencia de dolor residual en la zona operada y en la zona de toma del injerto. Así mismo, existe la posibilidad de la aparición de deformidades adyacentes a la zona intervenida (superior o inferior) que pueden requerir una nueva cirugía. El porcentaje global de riesgos en la corrección de una deformidad del adolescente se estima entorno al 10%. En la deformidad del adulto pueden ascender al 25-30%. Existe la posibilidad de reintervención entorno al 25% en adultos.

-En el caso de la utilización de injerto óseo de banco de tejidos /o derivados hemáticos, existe la remota posibilidad de transmisión de enfermedades virales.

-Entre los riesgos asociados al procedimiento figura también la posibilidad de fallo de la instrumentación, la malposición o la movilización de los implantes, que pueden requerir una reintervención.

-También existe la posibilidad de fracaso de la artrodesis, cuya causa más frecuente es la no unión o pseudoartrosis del injerto óseo. El tabaco es un elemento de riesgo constatado estadísticamente, por lo que se aconseja dejar o reducir el hábito tabáquico al menos dos o tres meses antes. En el caso de suceder esta complicación puede requerirse nueva cirugía para aportar más injerto óseo y revisar la instrumentación vertebral.

4. CONCLUSIÓN

Mediante la firma del presente documento **declaro que** he sido amplia y satisfactoriamente informado/a de forma oral, en un lenguaje claro y sencillo. **QUE** he leído este documento, he comprendido y estoy conforme con las explicaciones en cuanto a los fines, alternativas, métodos, inconvenientes y posibles complicaciones, así como del pronóstico. **QUE** dicha información ha sido realizada y se me ha permitido aclarar cualquier duda, así como los riesgos y complicaciones que por mi situación actual pudieran surgir, tales como:

.....

Así mismo, he entendido y acepto que durante el procedimiento/tratamiento se podrán realizar fotografías o grabar imágenes y obtener datos clínicos. Estos se podrán

conservar, transmitir y utilizar con fines científicos y/o de docencia en sesiones clínicas, juntas facultativas, conferencias, congresos, publicaciones médicas y actos científicos, sin que en las mismas figure identidad alguna del paciente.

Por ello **doy mi consentimiento** para que se proceda a la realización de dicho procedimiento diagnóstico o quirúrgico. (Art. 10.6 Ley General de Sanidad). También comprendo que, en cualquier momento y sin necesidad de dar ninguna explicación, puedo revocar el Consentimiento que ahora presto.

1. Relativo al paciente:

Y para que así conste, enterado y conforme firmo el presente original.

D./D.^a _____ con D.N.I. . _____
Firma del paciente Fecha: / /

2. Relativo al médico (cirujano):

Dr./Dra. _____, con N^o Colegiado _____, ha informado al paciente y/o al tutor o familiar del objeto y naturaleza de la intervención que se le va a realizar explicándole los riesgos, complicaciones y alternativas posibles.
Firma del médico Fecha: / /

3. Relativo a los familiares y tutores:

El paciente D./Dña. _____ no tiene capacidad para decidir en este momento.
D./D.^a _____ con D.N.I. _____
y en calidad de _____ he sido informado/a suficientemente de la intervención que se le va a realizar. Por ello, doy expresamente mi consentimiento. Mi aceptación es voluntaria y puedo retirar este consentimiento cuando lo crea oportuno.
Firma del tutor o familiar Fecha: / /

4. Revocación:

D./D.ª con D.N.I. o en su caso,
ya que no tiene capacidad para decidir en este momento D./D.ª.
con D.N.I. y en calidad de..... REVOCO el consentimiento
prestado en fecha de:.....y no deseo proseguir el tratamiento, que
doy con esta fecha por finalizado, conociendo, por haber sido informado de ello, de las
consecuencias de dicha decisión.

Firma del paciente, tutor o familiar Fecha: / /

Asimismo, he entendido y acepto que durante el procedimiento/tratamiento se podrán realizar fotografías o grabar imágenes que luego se conservarán y se podrán transmitir con fines científicos y/o de docencia y utilizar en sesiones clínicas, juntas facultativas, conferencias, congresos, publicaciones médicas y actos científicos, sin que en las mismas figure identidad alguna del paciente. También comprendo que, en cualquier momento y sin necesidad de dar ninguna explicación, puedo revocar el Consentimiento que ahora presto. Por ello, manifiesto que me considero satisfecho/a con la información recibida y que comprendo la indicación y los riesgos de este procedimiento/tratamiento.

Acepto No acepto

Anexo 2. Aceptación comité de ética.



INFORME DEL COMITÉ DE ÉTICA DE LA INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALENCIA SAN VICENTE MÁRTIR (CEI).

Dra. Mar Aranda Jurado, Secretaria del Comité de Ética de la Investigación de la Universidad Católica de Valencia San Vicente Mártir

Certifico que:

Ha tenido entrada en la reunión del Comité de Ética de la Investigación (CEI) de la Universidad Católica de Valencia San Vicente Mártir en su reunión extraordinaria, de fecha **27 de enero de 2022**, la solicitud de evaluación del proyecto de investigación, relacionado a continuación:

Título: **“Modulación vertebral posterior guiada: técnica de corrección de la escoliosis idiopática del adolescente preservando la movilidad vertebral”.**

Código del proyecto: **UCV/2021-2022/109**

Investigador Principal: **Dr. Jesús Burgos Flores y Dr. Carlos Barrios Pitarque**

El Comité de Ética de la Investigación ha acordado **informar favorablemente el mismo.**

Valencia, 23 de febrero de 2022.

MARIA MAR
ARANDA|
JURADO

Firmado digitalmente por MARIA MAR|ARANDA|JURADO
Nombre de reconocimiento (DN):
cn=MARIA MAR|ARANDA|JURADO,
serialNumber=52648490H,
givenName=MARIA MAR,
sn=ARANDA, JURADO,
ou=CIUDADANOS, o=ACCV, c=ES
Fecha: 2022.02.23 13:43:24 +01'00'

Mar Aranda Jurado
Secretaria del Comité de Ética de la Investigación

Anexo 3. Formulario SRS-22.



CUESTIONARIO DE SALUD SRS - 22

Este cuestionario está diseñado para valorar el estado de su espalda. Es importante que usted mismo responda a las diferentes preguntas y señale la respuesta más adecuada a cada pregunta.

1) ¿Cuánto dolor ha tenido en los últimos 6 meses?

A Ninguno

B Ligero

C Regular

D Moderado

E Intenso

2) ¿Cuánto dolor ha tenido en el último mes?

A Ninguno

B Ligero

C Regular

D Moderado

E Intenso

3) Durante los últimos 6 meses, ¿cuánto tiempo estuvo muy nervioso?

A Nunca

B Sólo alguna vez

C Algunas veces

D Casi siempre

E Siempre

4) Si tuviera que pasar el resto de su vida con la espalda como la tiene ahora, ¿cómo se sentiría?

A Muy contento

B Bastante contento

C Ni contento ni descontento

D Bastante descontento

E Muy descontento

5) ¿Cuál es su nivel de actividad actual?

- A Permanentemente en cama**
- B No realiza prácticamente ninguna actividad**
- C Tareas ligeras y deportes ligeros**
- D Tareas moderadas y deportes moderados**
- E Actividad incompleta**

6) ¿Cómo te queda la ropa?

- A Muy bien**
- B Bien**
- C Aceptable**
- D Mal**
- E Muy mal**

7) Durante los últimos 6 meses, ¿se sintió tan bajo de moral que nada podía animarle?

- A Siempre**
- B Casi siempre**
- C Algunas veces**
- D Solo alguna vez**
- E Nunca**

8) ¿Tiene dolor de espalda en reposo?

- A Siempre**
- B Casi siempre**
- C Algunas veces**
- D Solo alguna vez**
- E Nunca**

9) ¿Cuál es su nivel actual de actividad laboral o escolar?

- A 100% de lo normal**
- B 75% de lo normal**
- C 50% de lo normal**
- D 25% de lo normal**
- E 0% de lo normal**



10) ¿Cómo describiría el aspecto de su cuerpo, sin tener en cuenta el de la cara y extremidades?

A Muy bueno

B Bueno

C Regular

D Malo

E Muy malo

11) ¿Toma medicamentos para su espalda?

A Ninguno

B Calmantes suaves 1 vez a la semana o menos

C Calmantes suaves a diario

D Calmantes fuertes 1 vez a la semana o menos

E Calmantes fuertes a diario

12) ¿Le limita la espalda la capacidad para realizar sus actividades habituales por casa?

A Nunca

B Sólo alguna vez

C Algunas veces

D Casi siempre

E Siempre

13) ¿Durante los últimos 6 meses, cuánto tiempo se sintió calmado y tranquilo?

A Siempre

B Casi siempre

C Algunas veces

D Solo alguna vez

E Nunca

14) ¿Cree que el estado de su espalda influye en sus relaciones personales?

A Nada

B Un poco

C Regular

D Bastante

E Mucho

15) ¿Usted o su familia tienen limitaciones económicas por su espalda?

A Mucho

B Bastante

C Regular

D Un poco

E Nada

16) ¿En los últimos 6 meses se ha sentido desanimado y triste?

A Nunca

B Sólo alguna vez

C Algunas veces

D Casi siempre

E Siempre

17) ¿En los últimos 3 meses, cuántos días ha faltado al trabajo o al colegio debido a su dolor de espalda?

A 0

B 1

C 2

D 3

E 4 ó más

18) ¿Le dificulta la situación de su espalda salir de casa con sus amigos o su familia?

A Nunca

B Sólo alguna vez

C Algunas veces

D Casi siempre

E Siempre

19) ¿Se siente atractivo con el estado actual de su espalda?

A Sí, mucho

B Sí, bastante

C Ni atractivo/ni poco atractivo

D No, no demasiado

E En absoluto



20) ¿Durante los últimos 6 meses, cuanto tiempo se sintió feliz?

- A Nunca**
- B Sólo alguna vez**
- C Algunas veces**
- D Casi siempre**
- E Siempre**

21) ¿Está satisfecho con los resultados del tratamiento?

- A Completamente satisfecho**
- B Bastante satisfecho**
- C Indiferente**
- D Bastante insatisfecho**
- E Totalmente insatisfecho**

22) ¿Aceptaría el mismo tratamiento otra vez si estuviera en la misma situación?

- A Si, sin duda**
- B Probablemente sí**
- C No estoy seguro/a**
- D Probablemente no**
- E No, sin duda**

Anexo 4. Presentaciones en congresos “30th International Meeting on Advanced Spine Techniques” y EPOS

101. GUIDED POSTERIOR VERTEBRAL MODULATION (GPVM): A NEW FUSIONLESS TECHNIQUE FOR CORRECTION OF ADOLESCENT IDIOPATHIC SCOLIOSIS

Gonzalo Mariscal, MD; Jesus Burgos Flores, MD; Luis Miguel Anton Rodrialvarez, MD; Eduardo Hevia, MD; Carlos Barrios, PhD

Hypothesis

The correction of adolescent idiopathic scoliosis by posterior vertebral modulation using pedicle screws achieves complete correction of the deformity, maintaining the vertebral mobility of the spine once the instrumentation is removed and without significant loss of correction.

Design

Retrospective analysis of prospectively collected data.

Introduction

Current techniques of anterior vertebral growth modulation by vertebral body stapling or tethering provide only an incomplete and unpredictable correction of the deformity in addition to the disadvantages of the required thoracotomy. The purpose of this study was to report the correction ability of a vertebral modulation technique throughout a posterior approach without fusion in AIS patients.

Methods

A series of 36 AIS patients (Risser 3 or less) underwent surgical correction by posterior pedicle screws without fusion. Instrumentation was removed once the maturity stage was advanced. Most of the cases were main thoracic Lenke-1 curves. Coronal and sagittal curve correction was assessed by conventional standing X-rays at pre and postoperative, before instrumentation removal, just post removal (3-years follow-up), and 2-years follow-up after the removal surgery. A coronal wedging ratio (WR) was also calculated between the height of the apex vertebra at the concave and the convex side of the main curve (MC).

Results

Mean preoperative coronal Cobb of the MC was 53.7 ± 7.5 (95% CI: 50.7-56.6) and was corrected to 5.5 ± 7.5 (89.7%). Before removal of the instrumentation, there was a loss of correction of 3.4° . In the 2-year check-up after removal of the implants the mean MC was 13.1° . T5-T12 kyphosis showed a significant improvement from a mean angle of 19.0°

(95% CI: 13.3-24.8) to 27.1° (95% CI: 20.1-26.1) 2 years after implants removal (29.9% increase) ($p < 0.05$). Before surgery, WR was 0.71 ± 0.06 , and 2 years after removal WR was 0.98 ± 0.08 ($p < 0.001$). At last follow-up, the mean sagittal ROM of the T12-S1 segment was $51.2 \pm 21.0^\circ$. SRS-22 scores improved from 3.31 ± 0.25 to 3.68 ± 0.25 at final assessment ($p < 0.001$).

Conclusion

Vertebral growth modulation through a fusionless posterior approach using pedicle screws correct satisfactory scoliotic main curves in AIS patients. After removal of the instrumentation, there was a non-significant loss of correction. This technique permits conservation of an acceptable ROM of the lower instrumented segments.

103. CHANGE OF CERVICAL SAGITTAL ALIGNMENT AFTER SURGERY FOR ADOLESCENT IDIOPATHIC SCOLIOSIS (AIS): COMPARISON OF VERTEBRAL BODY TETHERING (VBT) VERSUS POSTERIOR SPINAL FUSION (PSF)

Fares Ani, MD; Nathan S. Kim, BS; Aonicha Burapachaisri, BS; Julianna Bono, BS; Kimberly Ashayeri, MD; Constance Maglaras, PhD; Brooke K. O'Connell, MS; Abel De Varona Cocero, BS; Tina Raman, MD; Themistocles S. Protopsaltis, MD; Juan Carlos Rodriguez-Olaverri, MD

Hypothesis

Cervical sagittal alignment parameters following VBT for correction of AIS are similar to what is observed following PSF.

Design

Multi-center retrospective review.

Introduction

PSF constructs have been shown to improve cervical deformity however, to date, these relationships have not been described in patients treated with VBT.

Methods

AIS correction surgeries with LIV in the lumbar spine from 2013 to 2021 with pre and 2-year postop standing full body plain films available were included. Patients were grouped as VBT or fusion. Outcome measures: Age, height, weight, BMI, Risser score, LIV and levels instrumented. Radiographic analysis included pre and postop C2 to C7 sagittal vertical axis (SVA), cervical lordosis angle (CL), T1 slope and thoracic kyphosis (TK). Measures were compared using independent samples t-tests; significance set at $p < 0.05$.



Scoliosis Research Society

Recognizes

Gonzalo Mariscal, MD

As a Presenting Author for the E-Point Presentation

Poster 101. Guided Posterior Vertebral Modulation (GPVM): A new Fusionless Technique for Correction of Adolescent Idiopathic Scoliosis

30th International Meeting on Advanced Spine Techniques
March 22-24, 2023

Serena S. Hu, MD
SRS President



Article

Fusionless All-Pedicle Screws for Posterior Deformity Correction in AIS Immature Patients Permit the Restoration of Normal Vertebral Morphology and Removal of the Instrumentation Once Bone Maturity Is Reached

Jesús Burgos ^{1,*}, Gonzalo Mariscal ², Luis Miguel Antón-Rodríguez ^{3,4}, Ignacio Sanpera ⁴, Eduardo Hevia ⁵, Vicente García ⁶ and Carlos Barrios ⁷

- ¹ Spine Unit, Hospital Viamed Fuensanta, 28027 Madrid, Spain
 - ² School of Doctorate, Valencia Catholic University, 46001 Valencia, Spain; gonzalo.mariscal@mail.ucv.es
 - ³ Pediatric Orthopedics, Ramon y Cajal Hospital, 28034 Madrid, Spain
 - ⁴ Pediatric Orthopedics, Hospital Son Espases, 07198 Palma de Mallorca, Spain
 - ⁵ Spine Unit, Hospital La Fraternidad-Muprespa, 28036 Madrid, Spain
 - ⁶ Sección de Cirugía de Columna, Hospital Universitario Araba, 01009 Vitoria, Spain
 - ⁷ Institute for Research on Musculoskeletal Disorders, Valencia Catholic University, 46001 Valencia, Spain
- * Correspondence: jburgosflores@hotmail.com; Tel.: +34-649615489

Abstract: The aim of this study was to report the restoration of normal vertebral morphology and the absence of curve progression after the removal of instrumentation in AIS patients that underwent posterior correction of the deformity by a common all-screws construct without fusion. A series of 36 AIS immature patients (Risser 3 or less) were included in the study. Instrumentation was removed once the maturity stage was complete (Risser 5). The curve correction was assessed pre- and postoperatively, before instrumentation removal, directly post-removal, and more than two years after instrumentation was removed. Epiphyseal vertebral growth modulation was assessed by the coronal wedging ratio (WR) at the apical level of the main curve (MC). The mean preoperative coronal Cobb was corrected from $53.7^\circ \pm 7.5$ to $5.5^\circ \pm 7.5^\circ$ (89.7%) at the immediate postop. After implant removal (31.0 ± 5.8 months), the MC was 13.1° . T5–T12 kyphosis showed significant improvement from 19.0° before curve correction to 27.1° after implant removal ($p < 0.05$). Before surgery, the WR was 0.71 ± 0.06 , and after removal, 0.98 ± 0.08 ($p < 0.001$). At the end of the follow-up, the mean sagittal range of motion (ROM) of the T12–S1 segment was $51.2 \pm 21.0^\circ$. The SRS-22 scores improved from 3.31 ± 0.25 preoperatively to 3.68 ± 0.25 at the final assessment ($p < 0.001$). In conclusion, a fusionless posterior approach using common all-pedicle screws correctly constructed satisfactory scoliotic main curves and permitted the removal of instrumentation once bone maturity was reached. The final correction was highly satisfactory, and an acceptable ROM of the previously lower instrumented segments was observed.

Keywords: fusionless technique; posterior instrumentation; adolescent idiopathic scoliosis; vertebral modulation; pedicle screw stabilization; coronal wedging ratio



Citation: Burgos, J.; Mariscal, G.; Antón-Rodríguez, L.M.; Sanpera, I.; Hevia, E.; García, V.; Barrios, C. Fusionless All-Pedicle Screws for Posterior Deformity Correction in AIS Immature Patients Permit the Restoration of Normal Vertebral Morphology and Removal of the Instrumentation Once Bone Maturity Is Reached. *J. Clin. Med.* **2023**, *12*, 2408. <https://doi.org/10.3390/jcm12062408>

Academic Editor: Laura Scaramuzzo

Received: 8 March 2023
Revised: 15 March 2023
Accepted: 17 March 2023
Published: 21 March 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Current techniques for the surgical correction of adolescent idiopathic scoliosis are focused on correcting vertebral deformity and preventing its progression. Two surgical procedures have been developed to achieve these goals. The first involves the instrumental correction and fusion of the affected vertebral segment. The second, based on vertebral modulation, applies corrective forces to modulate the growth of vertebral epiphyseal plates by means of implants [1].

Vertebral growth modulation is based on the Hueter–Volkman Law [2], according to which the application of compressive forces causes the slowing of physal bone growth,

and opposite distraction forces increase bone growth. These forces can be applied to the scoliotic spine with the aim of restoring normal vertebral morphology [3,4].

There are two types of vertebral modulation, which can be differentiated by the surgical approach and where the implants are placed to produce the corrective forces. In the first, the approach and the corrective forces are applied in the anterior part of the vertebrae, placing the implants in the convexity of the vertebral bodies. For this type of anterior modulation, there are two methods: vertebral body stapling [5] and tethering [6]. In both techniques, primarily compressive forces are applied to decrease the vertebral growth of the convexity. In the second type of vertebral modulation, the corrective forces are applied posteriorly by implants located in the vertebral pedicles. This method has been experimentally demonstrated to produce vertebral modulation [7–9]. There is also recent clinical evidence showing vertebral modulation using distracting forces through pedicle screws located at the ends of the concavity [10].

In this study, we report the restoration of normal vertebral morphology and the absence of curve progression after the removal of instrumentation in AIS patients who underwent posterior correction of the deformity by a common bilateral all-screws construct without fusion. The initial correction surgery was performed when the disease was immature (Risser 0–3). Once bone maturation was achieved, the vertebral instrumentation was removed to restore the mobility of all vertebral segments, particularly at the thoracolumbar junction and lumbar segments.

2. Materials and Methods

2.1. Design

A retrospective study was carried out on a longitudinal series of patients with adolescent idiopathic scoliosis treated surgically using a fusionless posterior vertebral modulation system, as described below. All study participants and their parents were informed about the surgical procedure and provided written consent. The work was conducted following the European recommendations of good clinical practice and the principles of the Helsinki declaration of the World Medical Assembly, revised in 2013 for clinical studies in humans. The treatment applied to the patients was performed following the deontological standards proposed by the Spanish Spine Society. This study was approved by the ethical committee of our institution (UCV/2021-2022/109).

2.2. Participants

A total of thirty-six skeletally immature patients with adolescent idiopathic scoliosis were included in the study. The inclusion criteria were adolescents with idiopathic scoliosis, skeletally immature (Risser's sign 3 or lower), with flexible curves greater than 45° Cobb. Patients with open tri-radiate cartilage, those with severe rigid curves, and cases that did not meet all the parameters analyzed in this investigation were excluded from this study.

2.3. Intervention

In all cases, a conventional surgical technique was used for scoliosis correction via a posterior approach, placing pedicle screws in necessary quantities in the area to be instrumented. The instrumentation was introduced to end proximally and distally in the horizontal vertebrae or with an angulation of less than 10° with respect to the horizontal in the anteroposterior teleradiograph. The study included only scoliosis that was corrected to less than 10° Cobb in the immediate postoperative radiography, or hypercorrected to less than 10° on the opposite side.

The same pedicle-screw technique was applied consistently to achieve maximum correction in all three planes. This technique is well-validated and has been internationally standardized, allowing individual correction of each of the three planes with minimal surgical maneuvers. The following is a brief description of the technique:

Two senior surgeons performed the surgery, with the patient under general anesthesia in a prone position and with neurophysiological monitoring. The levels to be instrumented

were exposed in a conventional manner through a posterior approach without injuring the vertebral ligamentous elements or the facet joint capsules. Titanium pedicle screws were placed bilaterally from distal to proximal at all levels to be instrumented, using the free-hand technique. Neurophysiological control of the screw trajectory was always performed prior to insertion and t-EMG screw stimulation was applied once positioned.

In all cases, transverse hooks were placed on both sides at the proximal level of instrumentation to avoid tension forces at the transitional area, as many practitioners do. Two long tulip polyaxial screws were also placed at the convexity proximal level, and two long tulip polyaxial screws were inserted at the distal level. In the middle of the convexity, uniplanar cephalocaudal screws were alternated with long polyaxial screws to facilitate the insertion of the pre-contoured rod without complete tapping of the rod into the tulips. In more flexible curves, it was possible to use more polyaxial screws with a longer tulip which facilitated the insertion of the pre-contoured rod. In the concavity of the curves, long polyaxial screws were used at all levels.

In all cases, cobalt–chrome rods were used. The rods were molded only in the sagittal plane and asymmetrically, giving greater thoracic kyphosis and greater lumbar lordosis to the thoracic concavity rod and less kyphosis and lordosis to the rod in the convexity. Lordosis was applied to the concavity rod just two centimeters from the proximal end of the rod in order to facilitate placement into the hooks and proximal implants, avoiding pull-outs at this level. The concavity and convexity rods were bent asymmetrically, giving more height to the concave rod. Removal of the instrumentation was accomplished when at least Risser IV was achieved, ensuring that all patients were skeletally mature at the time of implant removal.

2.4. Outcomes

The following parameters were analyzed in each patient: age, gender, weight, height, Tanner stage, menarche before surgery, and age at menarche. Anteroposterior and lateral telerradiographs were analyzed preoperatively, immediately postoperatively after correction, prior to the instrumentation removal of the implants, immediately after instrumentation removal, and a minimum of two years after implant removal. The following parameters were obtained in these telerradiographs: Risser stage, side of scoliosis, Lenke type, coronal Cobb degrees of curves, limiting vertebrae, Perdriolle degrees (preoperative and final radiographs only), and coronal vertebral imbalance in the anteroposterior X-rays.

The restoration of the vertebral morphology was quantified at the apical vertebra in the preoperative and final anteroposterior radiographs by measuring the wedging ratio (WR): the relation between the height of the concavity and convexity (Figure 1).

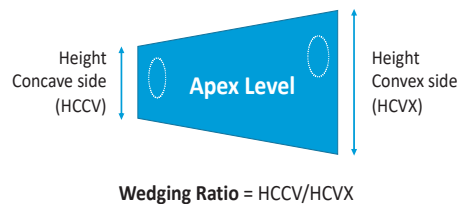


Figure 1. The wedging ratio (WR) represents the effect on the vertebral morphology of the growth of the concave epiphyseal plate at the apical vertebra, and is calculated by the ratio between the height of the concavity and convexity.

In the anteroposterior X-rays, the proximal and distal instrumented vertebrae and the number of instrumented pedicles were recorded in each case. In the lateral X-rays, T2–T12 thoracic kyphosis, T12–S1 lumbar lordosis, and sagittal imbalance were observed.

Two years after removal of the instrumentation, lateral radiographs of the lumbosacral spine in maximum flexion and extension were taken in the standing position, with the objective of analyzing the mobility of the lumbar segments that were included in the posterior stabilization. Thoracic range of motion (T1–T12) after the removal of implants was not considered, due to its limited physiologic value in AIS patients before surgery ($1.1 \pm 1.5^\circ$ Cobb) and low impact on the whole sagittal ROM of the spine (4.8%) [11].

SRS-22 questionnaires were assessed preoperatively and at the end of the study. The SRS-22 was administered by the medical team responsible for the treatment of the patients at the time of check-up at the outpatient clinic. Similar instructions were given to all the participants.

2.5. Statistical Analysis

The entire cohort was described in terms of demographics and surgical metrics using standard deviation and means. The evolution of surgical correction throughout the postoperative period, especially after the removal of instrumentation, was analyzed using the Wilcoxon test. Two groups of curves, including thoracic and thoracolumbar/lumbar, were compared in order to identify differences in the final results. Patients exhibiting Risser 0–1 were compared with those showing Risser 2–3. Statistical analysis was performed with the SPSS 24.0 package (IBM, Chicago, IL, USA). A value of $p < 0.05$ was considered statistically significant.

3. Results

3.1. Baseline Data

Out of the 36 cases included, only two (5.5%) were boys. A total of nine of the 34 girls (26.4%) were still premenarchal. Concerning Lenke criteria [12], 13 curves were classified as type 1A, three type 1B, eight type 1C, one type 2, one type 3, seven type 5s, and three type 6. Of the main thoracic curves, 82% were right-sided. All the left-sided curves were thoracolumbar or lumbar. Table 1 shows the main characteristics of the patients regarding age, anthropometric profile, maturity, and curve particularities for the whole sample and for the two groups of curve types. The sole difference between thoracic and thoracolumbar/lumbar curves was obviously found at the apex level. Table 2 shows the upper and lower instrumented vertebra in the two types of curves. In 10 of the 36 cases, one or two pedicle screws were not instrumented for technical reasons. There were no neurological complications in this series. However, there were two cases of pleural effusion during the first post-op period, and four wound seromas were noted after removal of the instrumentation. The mean follow-up period from instrumentation to removal of the implants was 31.0 ± 5.8 months (range: 22–42) (Figures 2 and 3).

Table 1. Clinical profile and characteristics of the curves.

	Whole Sample $n = 36$ Mean \pm SD (95%IC)	Lenke 1,2,3 $n = 26$ Mean \pm SD (95%IC)	Lenke 5,6 $n = 10$ Mean \pm SD (95%IC)	Z (p)
Age (yr.)	13.5 \pm 1.3 (13.0–14.0)	13.5 \pm 2.0 (13.1–14.0)	13.5 \pm 1.0 (11.6–15.4)	0.398 (0.690)
Weight (kg)	47.8 \pm 9.4 (44.2–51.4)	47.3 \pm 9.9 (42.7–51.8)	49.5 \pm 7.6 (42.4–56.5)	1.274 (0.203)
Stature (cm)	158.1 \pm 8.6 (154.7–161.4)	158.4 \pm 7.6 (154.9–161.8)	157.1 \pm 11.7 (146.3–167.9)	0.345 (0.730)
Tanner	2.4 \pm 0.8 (2.1–2.7)	2.4 \pm 0.7 (2.1–2.8)	2.3 \pm 0.9 (1.4–3.1)	0.268 (0.789)
Risser	1.2 \pm 1.3 (0.7–1.7)	1.2 \pm 1.6 (0.1–2.7)	1.2 \pm 1.2 (0.7–1.8)	0.028 (0.978)
Main curve (Cobb $^\circ$)	53.7 \pm 7.5 (50.7–56.6)	54.3 \pm 6.7 (51.2–57.3)	52.0 \pm 10.1 (42.6–61.3)	1.595 (0.111)

Table 1. Cont.

	Whole Sample <i>n</i> = 36 Mean ± SD (95%IC)	Lenke 1,2,3 <i>n</i> = 26 Mean ± SD (95%IC)	Lenke 5,6 <i>n</i> = 10 Mean ± SD (95%IC)	Z (p)
Compensatory curve (Cobb°)	20.4 ± 8.6 (17.1–23.7)	18.6 ± 6.6 (15.6–21.6)	25.8 ± 11.8 (14.9–36.7)	0.051
Apex (thoracic level)	9.2 ± 2.9 (8.1–10.4)	7.7 ± 1.5 (7.1–8.4)	13.7 ± 0.9 (12.8–14.6)	4.176 (0.000)
Axial rotation (°)	20.4 ± 8.6 (17.1–23.7)	18.6 ± 6.6 (15.6–21.6)	25.8 ± 11.8 (14.9–36.7)	1.569 (0.117)
Coronal disequilibrium (mm)	5.8 ± 19.1 (–1.7–13.4)	2.3 ± 14.5 (–4.9–8.9)	18.0 ± 28.6 (–11.9–47.9)	1.832 (0.067)
Lateral disequilibrium (mm)	25.6 ± 29.5 (–5.27–56.6)	30.0 ± 32.9 (15.0–45.0)	25.6 ± 29.4 (–5.27–56.6)	0.234 (0.815)

Table 2. Upper and lower instrumented vertebra in the two types of curves.

Level	Thoracic (<i>n</i> = 26)	Thoracolumbar/Lumbar (<i>n</i> = 10)
Superior		
T1	1	3
T2	13	5
T3	10	-
T4	2	-
T6	-	1
T10	-	1
Inferior		
L3	10	-
L4	16	3
L5	-	2

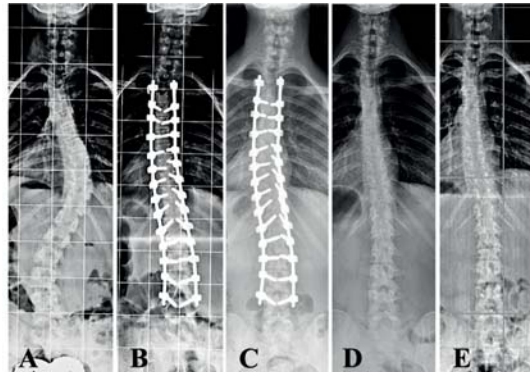


Figure 2. Cont.

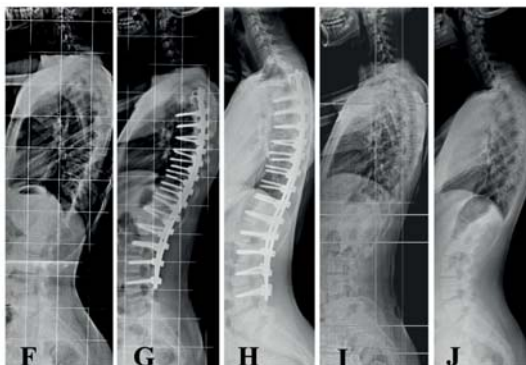


Figure 2. A 13-year-and-2-month-old girl with Lenke type 1BN AIS ($50^\circ/36^\circ$) with Risser 1 (A) and thoracic hypokyphosis of 13° (F), was surgically treated by a posterior approach involving T3-L4 instrumentation without fusion with slight hypercorrection of both curves (B). Three years and two months after the initial surgical intervention and just before the removal of instrumentation, the main and compensatory curves remained unchanged towards the opposite side of the initial curves (C). The radiograph after removal of the vertebral implants shows minimal residual scoliosis towards the opposite side of the curves that existed before surgical treatment (D). These minimal scoliotic curves remained unchanged on the last radiograph, taken two years after the removal of the instrumentation (E). Concerning the sagittal plane, the postoperative radiograph after surgical correction demonstrated an increase in previous hypokyphosis (G), which remained unchanged in the radiograph prior to removal of the instrumentation (H), after its removal (I), and in the last X-ray check-up two years after instrument removal (J).

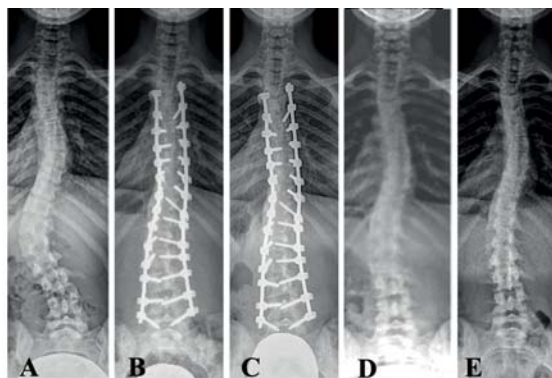


Figure 3. Cont.

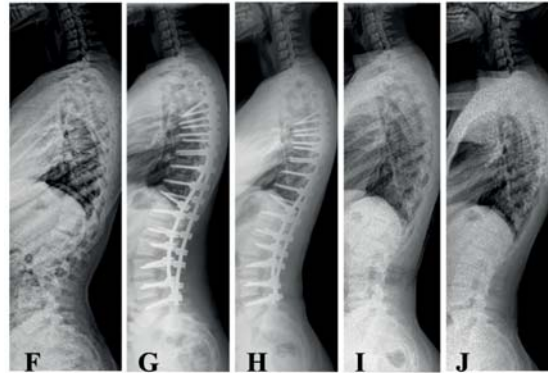


Figure 3. A 14-year-and-11-month-old girl with Lenke type 5 AIS (17/36/57), with T10-L2 kyphosis (+16°) and Risser 3 (A,F). Posterior pedicle instrumentation T4-L5 (B,G) was performed, achieving correction of the thoracolumbar and thoracic curve (B). In the sagittal plane, the correction of the thoracolumbar transit kyphosis (G) was also verified. The coronal and sagittal angular values remained unchanged until the removal of the vertebral instrumentation (C,H) and in the radiographic study after the removal of the implants (D,I). In the last radiographic control, two years after the instrumentation, the thoracic scoliosis (E) and the sagittal vertebral angular values remained unchanged (J).

3.2. Radiological Outcomes

Taking into consideration the whole series (Table 3), the analysis of the evolution of the main curve showed a mean preoperative angular value of $53.7^\circ \pm 7.50$, which changed to a mean angular value of $5.5^\circ \pm 3.7^\circ$ (89.7%) in the immediate postoperative radiograph after surgical treatment. This angular value of scoliosis in the immediate postoperative period after the removal of the instrumentation became an angular value of 8.9° degrees; the value of the final scoliosis was 13.1° at a mean follow-up of 29.8 ± 5.7 months after removal, which represented a 75.4% correction with respect to the initial curve. The results for this parameter were similar in thoracic scoliosis and thoracolumbar and lumbar scoliosis (Figure 4).

Table 3. Evolution of coronal and sagittal plane of the main curve along the different stages of follow-up.

	Whole Sample Mean \pm SD (95%IC)	Lenke 1, 2, 3 (Thoracic) Mean \pm SD (95%IC)	Lenke 5, 6 (Lumbar) Mean \pm SD (95%IC)	Z (p)
Main Curve (Cobb)				
Initial	53.7 \pm 7.5 (50.7–56.6)	54.3 \pm 6.7 (51.2–57.3)	52.0 \pm 10.1 (42.6–61.3)	1.595 (0.111)
Postop	5.5 \pm 3.7 (4.1–6.9)	4.7 \pm 3.5 (3.1–6.3)	7.8 \pm 3.6 (4.5–11.2)	2.232 (0.026)
Before removal	8.9 \pm 2.7 (7.1–9.4)	8.3 \pm 2.6 (7.1–9.5)	10.7 \pm 2.1 (8.7–12.7)	1.199 (0.046)
After removal	11.1 \pm 2.5 (10.1–12.1)	10.3 \pm 2.3 (12.1–11.4)	13.2 \pm 1.2 (12.1–14.4)	2.934 (0.003)
Final (2 years post-removal)	13.1 \pm 2.9 (11.9–14.2)	12.2 \pm 2.8 (10.9–13.4)	15.8 \pm 1.3 (14.6–17.1)	3.485 (0.000)

Table 3. Cont.

	Whole Sample Mean ± SD (95%IC)	Lenke 1, 2, 3 (Thoracic) Mean ± SD (95%IC)	Lenke 5, 6 (Lumbar) Mean ± SD (95%IC)	Z (p)
T2-T12 Kyphosis (Cobb)				
Initial	19.0 ± 13.1 (13.8–24.2)	18.5 ± 13.8 (12.3–24.9)	20.5 ± 10.9 (9.0–31.9)	0.554 (0.579)
Postop	26.1 ± 4.7 (22.2–27.9)	26.5 ± 4.7 (24.3–28.7)	24.8 ± 4.8 (20.4–29.3)	0.306 (0.760)
Before removal	25.7 ± 3.3 (24.5–27.1)	25.7 ± 2.6 (24.5–26.9)	26.0 ± 5.2 (21.2–30.8)	0.214 (0.831)
After removal	26.9 ± 3.5 (25.5–28.3)	26.8 ± 3.6 (25.2–28.5)	27.1 ± 3.5 (23.9–30.4)	0.346 (0.729)
Final (2 years post-removal)	27.1 ± 3.8 (11.9–14.2)	27.0 ± 3.8 (25.3–28.8)	27.4 ± 3.6 (24.0–30.8)	0.640 (0.522)
Lumbar lordosis T12-S1 (Cobb)				
Initial	55.5 ± 10.3 (51.5–59.6)	56.6 ± 10.8 (51.7–61.5)	51.8 ± 8.1 (43.3–60.4)	0.906 (0.365)
Postop	55.2 ± 7.8 (52.2–58.2)	56.4 ± 8.5 (52.5–60.2)	51.7 ± 3.8 (48.2–55.2)	0.586 (0.558)
Before removal	56.0 ± 6.8 (53.4–58.7)	56.9 ± 7.6 (53.4–60.3)	53.4 ± 3.0 (50.6–56.2)	0.267 (0.790)
After removal	56.7 ± 5.6 (54.5–58.9)	57.4 ± 6.1 (54.6–60.1)	54.7 ± 3.8 (51.2–58.2)	0.748 (0.455)
Final (2 years post-removal)	56.9 ± 6.0 (54.6–59.3)	57.5 ± 6.6 (54.5–60.5)	55.3 ± 3.8 (51.8–58.8)	0.426 (0.670)

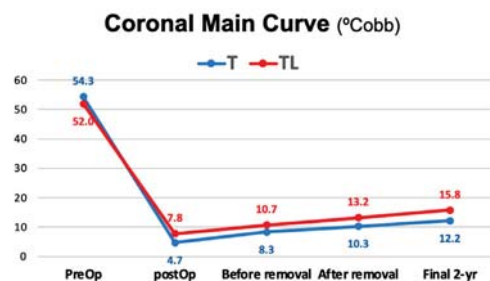


Figure 4. Correction of the main coronal curve during follow-up. A correction of 89.7% was achieved after surgery, and a 75.4% correction was achieved at two years' follow-up.

Regarding the lateral plane, the mean preoperative angular value of the thoracic kyphosis from T2 to T12 was 19° and increased to a final angular value of 27.1° in the radiographic study more than two years after the removal of the instrumentation, representing an 29.9% increase in kyphosis. There were no differences in the behavior of thoracic and thoracolumbar curves (Figure 5). Regarding lumbar lordosis, there were no changes before surgery nor two years after the removal of the implants (Table 3).

3.3. Sagittal ROM of the Thoracolumbar Transition and Lumbar Spine

Two years after the removal of implants, there was a satisfactory ROM in all analyzed lumbar segments (Figures 6 and 7). The final mean sagittal ROM of the T12-S1 segment was 51.2 ± 21.0°. At the L3-L4 level of the thoracic curves, the average ROM was 28° in addition to that of 13 out of 23 cases; instrumentation at this level was maintained for more than 2 years. In the thoracolumbar curves, the average ROM at the L4-L5 level was 27.5°, although five of seven cases were temporarily instrumented. In these curves, the segment

with the lower ROM was the L1–L2 that corresponded to the apex level, which is usually the most rigid.

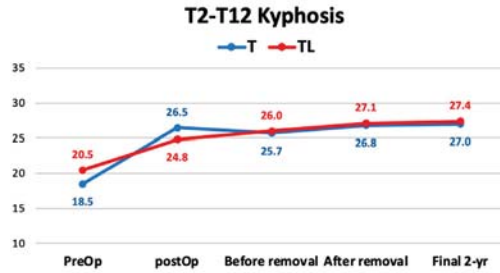


Figure 5. Angular value of the thoracic kyphosis from T2 to T12.

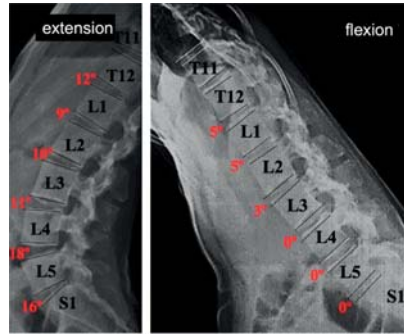


Figure 6. Fourteen-year-old girl with AIS type 1CN Lenke (54° Cobb) who underwent correction surgery with T3–L3 instrumentation. The images show the sagittal X-rays of the lumbar spine in maximal extension and flexion after removal of the implants.

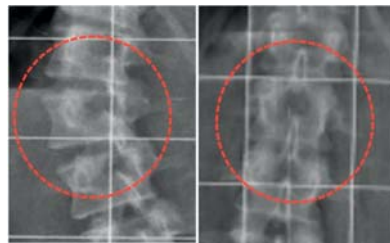


Figure 7. Modulation of the apical vertebra before surgery and after the removal of implants. The wedging ratio increased from 0.75 to 0.96.

3.4. Vertebral Modulation

The vertebral growth modulation of the epiphyseal plates was analyzed in the vertebral apex according to the WR, which is the result of the height of the vertebral concavity divided by the height of the convexity. The overall results showed that the rectangular shape of the vertebral body of the apex was almost completely restored, with concavity reaching the same height as convexity (Table 4, Figure 8). A greater correction of the thoracolumbar and lumbar curves was found than in thoracic scoliosis. A greater correction was also found in more immature patients.

Table 4. Vertebral modulation analyzed at the vertebral apex using the wedging ratio.

	Initial	Final	Z (p)
Whole series	0.70 ± 0.05 (0.67–0.74)	0.98 ± 0.08 (0.94–1.03)	3.408 (0.001)
Type of curve			
Thoracic	0.70 ± 0.07 (0.65–0.75)	0.95 ± 0.05 (0.91–0.99)	2.666 (0.008)
Thoracolumbar/Lumbar	0.70 ± 0.04 (0.66–0.75)	1.03 ± 0.10 (0.92–1.14)	2.201 (0.028)
Skeletal maturity			
Risser 0–1	0.70 ± 0.06 (0.65–0.75)	1.00 ± 0.09 (0.93–1.07)	2.666 (0.008)
Risser 2–3	0.72 ± 0.06 (0.66–0.78)	0.95 ± 0.06 (0.89–1.01)	2.201 (0.028)

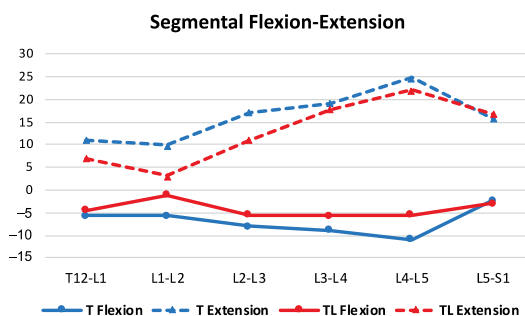


Figure 8. Analysis of thoracolumbar and thoracic ROM during flexion and extension for different segments, two years after implant removal.

3.5. Quality of Life

The results of the SRS22 questionnaire demonstrate that this technique produces an improvement in many of the studied domains (Figure 9). For the thoracic curves, the increase in scores was statistically significant in the domains of function ($p < 0.01$), self-image ($p < 0.01$), and mental health ($p < 0.001$) (Table 5), while for the thoracolumbar curves, the improvement was only significant in the mental health domain ($p < 0.05$).

When the results of the SRS22 questionnaire were stratified according to the degree of skeletal maturity (Figure 10), relevant improvements could also be observed in almost all the domains studied (Table 5). For immature patients (Risser 0–1), the increases in scores were statistically significant in the domains of function ($p < 0.05$), self-image ($p < 0.05$), and mental health ($p < 0.01$). In patients with Risser bone-maturity grade 2–3, the improvement was also significant in these three domains, including function ($p < 0.05$), self-image ($p < 0.05$), and mental health ($p < 0.01$).

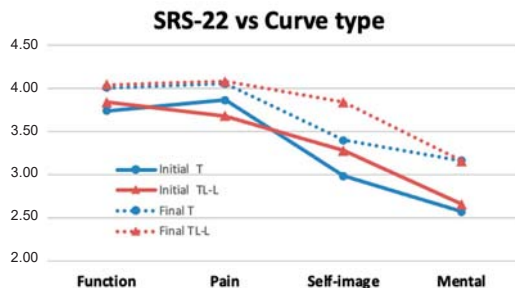


Figure 9. Results of the SRS-22 questionnaire according to curve location. Improvements were demonstrated in many of the tested domains. In most fields of the questionnaire, the thoracic curves improved further than the thoracolumbar curves.

Table 5. Change in SRS-22 according to the deformity location and skeletal maturity.

	Change in SRS-22			
	Function	Pain	Self-Image	Mental Health
Thoracic				
Mean ± SD	0.26 ± 0.29	0.18 ± 0.37	0.41 ± 0.44	0.58 ± 0.18
Z (p)	2.691 (0.007)	1.876 (0.061)	3.025 (0.002)	3.573 (0.000)
Thoracolumbar				
Mean ± SD	0.20 ± 0.31	0.40 ± 0.31	0.56 ± 0.48	0.50 ± 0.17
Z (p)	1.289 (0.197)	1.826 (0.068)	1.826 (0.068)	2.060 (0.039)
Risser 0–1				
Mean ± SD	0.33 ± 0.35	0.22 ± 0.34	0.54 ± 0.50	0.36 ± 0.38
Z (p)	2.099 (0.036)	1.706 (0.088)	2.530 (0.011)	2.448 (0.014)
Risser 2–3				
Mean ± SD	0.17 ± 0.20	0.25 ± 0.40	0.56 ± 0.25	0.57 ± 0.07
Z (p)	2.201 (0.028)	1.841 (0.066)	2.829 (0.005)	2.980 (0.003)

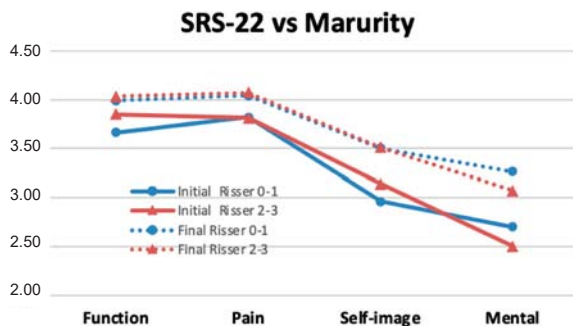


Figure 10. Results of the SRS-22 questionnaire according to the degree of skeletal maturity. A significant improvement was observed in almost all the studied domains.

At the final follow-up, 33/36 patients (91.6%) stated they were either very satisfied or satisfied. When patients were asked whether they would have the same procedure again, 35/36 patients (97.3%) were definitely or probably sure that they would have this treatment again, and only one was doubtful.

4. Discussion

Conventional surgical techniques for the correction of adolescent idiopathic scoliosis involve the fusion of extensive vertebral segments. The definitive immobilization of large vertebral segments increases mechanical stress on adjacent unfused segments, with negative long-term consequences [13]. In addition, these instrumented young patients must live with high-density metallic implants inside their bodies which may condition significant long-term consequences [14,15]. Fusion does not improve preoperative respiratory restriction [16], and it limits the functionality of the thoracolumbar transition and lumbar spine, as some levels of these segments are frequently involved in fusion surgery [17].

Over the past decade, vertebral modulation techniques, both anterior and posterior, have expanded. Anterior vertebral modulation techniques are performed through thoracic approaches, with the significant loss of thoracic continuity and negative consequences on respiratory function [18,19]. These techniques produce unpredictable and frequently insufficient corrections of scoliosis: they do not apply adequate forces bilaterally, nor in a guided manner, and they leave the discs involved in modulation in non-physiological positions, as permanent instrumentation limits disc mobility and compromises future vertebral functionality while also damaging the discs.

The recently published posterior modulation system [10] has been demonstrated to modulate the anteroposterior plane by distraction, using pedicle screws at the ends of the concavity. This system raises certain issues that are related to the minimal number of implants used to correct the three-dimensional deformity; it obtains only partial correction of the anteroposterior plane, and the corrective forces that are applied have a lordotic effect.

We found no previous clinical study reported in the literature describing the restoration of vertebral morphology where the posterior correction of the spinal deformity used only pedicle screws. Studies have not been published to show the effect of implant removal after the complete correction of scoliosis, avoiding the need for an individual to wear metallic implants throughout their entire life. The current study assessed these issues, including the preservation of vertebral motion once the implants were removed.

In immature patients, conventional posterior vertebral stabilization using all-pedicle screws permitted, by itself, the growth of the epiphyseal plates, particularly at the concave distracted side. In contrast with other techniques, complete correction was achieved initially by leaving the spine in a corrected position and allowing higher growth of the vertebral bodies (Figure 11).

It seems logical to apply a lower density of implants seems in cases of less severe and more flexible scoliosis, where the mechanical stresses required to correct the deformity would be lower. However, the concept should be maintained in order to achieve the complete correction of scoliosis and to apply the correct modulating forces. Bilateral implants close to the physéal plates should preferably be used to enable more effective application of distraction forces at the convex side and to achieve maximum correction, always keeping in mind the necessity to correct and modulate a three-dimensional vertebral deformity. Minor curves should also be instrumented, to avoid their progression and the vertebral imbalances that occur when the main curve is completely corrected [20].

The surgical technique used in the current series was the conventional posterior open approach, because mini-invasive techniques would significantly increase the surgical time and the incidence of pedicle-screw malposition in these patients. This could increase the morbidity associated with this new method, by including a greater number of variables that are difficult to control and so making it difficult to achieve a homogeneous series. Nevertheless, it would be advisable to apply pedicle screws using a mini-invasive or percutaneous approach instead of the conventional open approach, considering that our

priority objectives include avoiding damage to muscle and ligament tissue and aiding the recovery of a vertebral range of motion after implant removal [21,22]. In the current study, the lumbar ROM after removal of the implants was similar to that reported in healthy subjects [23].

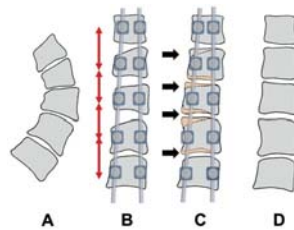


Figure 11. Illustration showing the growth modulation induced by the correction of scoliosis, and posterior stabilization using pedicle screws and rods. (A) original curve; (B) correction of the major curve with standard techniques using pedicle screws and rods (see red arrows showing distraction forces applied to the intervertebral spaces on the concave side); vertebral wedging was initially maintained at the apical segments; (C) the restoration of the apical vertebral shape was achieved by the growth of the epiphyseal plate on the concave side (see arrows) due to distraction of the intervertebral space, while the growth of the convex side was blocked by the lack of distraction made by the pedicle screws on that side; (D) the final result after the removal of the instrumentation, showing an almost normal vertebral shape. In the figure, the placement of the transverse hooks at the proximal upper vertebra was not included, because this was not essential for the growth-modulation technique.

Regarding the selection of patients included in this study, all cases were adolescent idiopathic scoliosis with more than 45° Cobb for all Lenke types, and this allowed us to observe whether vertebral epiphyseal growth was present in all types of deformity. The limit of bone maturation was a Risser value equal to or less than three, based on a minimum remaining time of growth greater than 18 months so that full correction of the deformity could be effected. The patients included in this study had non-severe scoliosis, and were intentionally selected as more severe scoliosis requires Ponte osteotomies to achieve complete correction of the deformity. Ponte osteotomies are required to enable fusion at the levels where osteotomies are performed, and therefore such cases could not be included in the study.

Removal of the instrumentation was conducted in all cases when patients reached Risser 5 pelvic maturity with complete fusion of the iliac process, to avoid the possibility of increasing residual scoliosis after the removal of the implant. The rationale of this was to avoid the rebound growth observed in other anatomical locations after the removal of guided growth implants [24]. This phenomenon can be prevented by maintaining the implants until bone maturation is complete [24].

The assessment of vertebral epiphyseal growth using the wedging ratio (WR) in the apex vertebra of scoliosis demonstrated the ability of this method to quantify vertebral growth after surgical correction of scoliosis. Although criticism could be raised because the rotation was not assessed, the wedging of vertebrae at the apex could not be explained simply by rotation. An accurate assessment of rotation would have required the repeated use of CT scans, with an unacceptable radiation dosage for the patients involved in the study.

In the current study, the analysis of the flexion–extension mobility of the thoracolumbar transition and lumbar spine was intended to evaluate whether the conventional posterior open approach to the lumbar spine and instrumental immobilization produced a significant limitation of flexion–extension mobility. However, this analysis is complicated because the

greatest percentage of lumbar mobility is in the lowest lumbar levels, and these were left unrestricted in most of the cases in this series. This study demonstrated transition from lordosis in extension to kyphosis in flexion, at all lumbar levels in all cases.

From the results obtained in SRS22, it can be inferred that the body image, mental health, pain, and functionality of these patients improved even after two surgical interventions.

The limitation of posterior stabilization without fusion is that it cannot be applied to severe curves of more than 75°, which require Ponte osteotomies for the complete correction of the deformity, implying the fusion of that segment. Therefore, removal of the implants cannot be carried out in these areas. Another limitation is the state of bone maturation of the patients. Those with Risser values higher than three are not suitable for this surgery, because of the limited remaining growth of the epiphyseal plates for the restoration of vertebral body morphology. Furthermore, patients that still have the triradiate cartilage open are also unsuitable for the application of this new technique, because they need a long period until the removal of the instrumentation can be performed. A prolonged period retaining the instrumentation implies a high risk of limitation to the final mobility of the spine, by paraspinous fibrosis or ankylosis of the facet joints.

Posterior stabilization using all-pedicle screws without fusion could probably be extended to less severe curves that have poor prognosis, replacing the use of a brace due to the latter's limited effectiveness. In these cases, the deformity is more flexible, making the technique less demanding and likely to allow less aggressive instrumentation. In the future, indication for posterior stabilization without fusion could also be extended to infantile and juvenile scoliosis and other curve etiologies in which there are no physal alterations.

Our goal is to restore normal vertebral morphology and functionality in children suffering from idiopathic scoliosis. With fusionless posterior stabilization, we obtained correction of the deformity that seems comparable to other surgical methods that are currently in use, with the advantage of preserving the range of motion in the whole lumbar spine. The procedure described here does not differ grossly from other fusion techniques that have attempted to achieve correction of spinal deformity using a posterior approach. The main difference of this procedure compared with the traditional fusion technique is that it does not imply fusion: the posterior approach is less traumatic, is performed without injuring the vertebral ligamentous elements, the facet joints are not injured, no bone decortication is conducted, and no bone graft is applied.

It could be argued that fusionless posterior stabilization requires a high density of implants and demands a more exigent correction than conventional posterior fusion, because it requires the instrumentation of a greater number of vertebral levels and a greater number of pedicle screws. In the case of residual deformity, the progression of curves could occur. It should also be stated that the complete correction of scoliosis is challenging for the surgeon, while the surgical technique presented here is similar to posterior fusion techniques.

Although the number of patients in this study was limited, all cases were followed for more than two years after implant removal, and very homogenous results were obtained, giving validity to the study. In addition, the fact that no relapse occurred during follow-up makes it highly unlikely that this will occur at a later stage, particularly after the vertebral body morphology has been restored. Nevertheless, patients remain under periodical review.

5. Conclusions

In summary, epiphyseal vertebral growth on the concave side was observed after the correction of scoliotic main curves in AIS patients with Risser 3 bone maturity or less. Curves can be corrected initially through the use of the fusionless posterior approach with conventional all-pedicle screws. Following the restoration of the normal vertebral morphology, the removal of the instrumentation can be performed more than two years after the corrective surgery, once the final bone maturity is reached. Finally, we observed highly satisfactory correction without significant loss of correction during two years of

follow-up. This technique permits the conservation of an acceptable ROM in the lower instrumented segments and a final satisfactory correction of spinal deformity.

Author Contributions: Contributor Roles: conceptualization: J.B., G.M., L.M.A.-R., I.S., E.H., V.G. and C.B.; data curation: J.B., G.M., L.M.A.-R., I.S., E.H., V.G. and C.B.; formal analysis: J.B., G.M., L.M.A.-R., I.S., E.H., V.G. and C.B.; investigation: J.B., G.M., L.M.A.-R., I.S., E.H., V.G. and C.B.; methodology: J.B., G.M., L.M.A.-R., I.S., E.H., V.G. and C.B.; project administration: J.B., G.M., L.M.A.-R., I.S., E.H., V.G. and C.B.; software: J.B., G.M. and C.B.; supervision: J.B. and C.B.; validation: J.B., G.M., L.M.A.-R., I.S., E.H., V.G. and C.B.; visualization: J.B., G.M., L.M.A.-R., I.S., E.H., V.G. and C.B.; writing—original draft: J.B., G.M., L.M.A.-R., I.S., E.H., V.G. and C.B.; writing—review and editing: J.B., G.M., L.M.A.-R., I.S., E.H., V.G. and C.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board of Valencia Catholic University (UCV/2021-2022/109).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study. Written informed consent has been obtained from the patient(s) to publish this paper.

Data Availability Statement: All the data generated or analyzed during this study are included in this published article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Jain, V.; Lykissas, M.; Trobisch, P.; Wall, E.J.; Newton, P.O.; Sturm, P.F.; Cahill, P.J.; Bylski-Austrow, D.I. Surgical aspects of spinal growth modulation in scoliosis correction. *Instr. Course. Lect.* **2014**, *63*, 335–344. [\[PubMed\]](#)
2. Hueter, C. Anatomische studien an den extremitaetengelenken neugeborener und erwachsener. *Virchows. Arch. Pathol. Anat. Physiol.* **1862**, *25*, 572–599. [\[CrossRef\]](#)
3. Mehlman, C.T.; Araghi, A.; Roy, D.R. Hyphenated history: The Hueter-Volkman law. *Am. J. Orthop.* **1997**, *26*, 798–800. [\[PubMed\]](#)
4. Stokes, I.A.; Spence, H.; Aronsson, D.D.; Kilmer, N. Mechanical modulation of vertebral body growth. Implications for scoliosis progression. *Spine* **1996**, *21*, 1162–1167. [\[CrossRef\]](#)
5. Betz, R.R.; Kim, J.; D'Andrea, L.P.; Mulcahey, M.J.; Balsara, R.K.; Clements, D.H. An innovative technique of vertebral body stapling for the treatment of patients with adolescent idiopathic scoliosis: A feasibility, safety, and utility study. *Spine* **2003**, *28*, S255–S265. [\[CrossRef\]](#)
6. Samdani, A.F.; Ames, R.J.; Kimball, J.S.; Pahys, J.M.; Grewal, H.; Pelletier, G.J.; Betz, R.R. Anterior vertebral body tethering for immature adolescent idiopathic scoliosis: One-year results on the first 32 patients. *Eur. Spine J.* **2015**, *24*, 1533–1539. [\[CrossRef\]](#)
7. Lowe, T.G.; Wilson, L.; Chien, J.T.; Line, B.G.; Klipp, L.; Wheeler, D.; Molz, F. A posterior tether for fusionless modulation of sagittal plane growth in a sheep model. *Spine* **2005**, *30* (Suppl. 17), S69–S74. [\[CrossRef\]](#)
8. Liu, J.; Li, Z.; Shen, J.; Xue, X. Spinal growth modulation with posterior unilateral elastic tether in immature swine model. *Spine J.* **2015**, *15*, 138–145. [\[CrossRef\]](#)
9. Zhang, H.Y.; Li, Q.Y.; Wu, Z.H.; Zhao, Y.; Qiu, G.X. Lumbar Scoliosis Induction in Juvenile Dogs by Three-dimensional Modulation of Spinal Growth Using Nickel-Titanium Coil Springs. *Chin. Med. J.* **2017**, *130*, 2579–2584. [\[CrossRef\]](#)
10. Floman, Y.; El-Hawary, R.; Lonner, B.S.; Betz, R.R.; Armin, U. Vertebral growth modulation by posterior dynamic deformity correction device in skeletally immature patients with moderate adolescent idiopathic scoliosis. *Spine Deform.* **2021**, *9*, 149–153. [\[CrossRef\]](#)
11. Burgos, J.; Barrios, C.; Hevia, E.; Antón-Rodríguez, L.M. Abolition of Sagittal T7-T10 Dynamics During Forced Ventilation in Lenke 1A AIS Patients as Compared to Healthy Subjects. An Underlying Factor of the Respiratory Limitation in AIS. In Proceedings of the 53rd SRS Annual Meeting & Course, Bologna, Italy, 10–13 October 2018.
12. Lenke, L.G.; Betz, R.R.; Harms, J.; Bridwell, K.H.; Clements, D.H.; Lowe, T.G.; Blanke, K. Adolescent idiopathic scoliosis: A new classification to determine extent of spinal arthrodesis. *J. Bone Joint Surg. Am.* **2001**, *83*, 1169–1181. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
13. Kepler, C.K.; Meredith, D.S.; Green, D.W.; Widmann, R.F. Long-term outcomes after posterior spine fusion for adolescent idiopathic scoliosis. *Opin. Pediatr.* **2012**, *24*, 68–75. [\[CrossRef\]](#)
14. del Rio, J.; Beguiristain, J.; Duart, J. Metal levels in corrosion of spinal implants. *Eur. Spine J.* **2007**, *16*, 1055–1061. [\[CrossRef\]](#)
15. Mathew, S.E.; Xie, Y.; Bagheri, L.; Claton, L.E.; Chu, L.; Badreldin, A.; Abdel, M.P.; van Wijnen, A.J.; Haft, G.F.; Milbrandt, T.A.; et al. Serum Ion Levels Elevated in Pediatric Patients With Metal Implants? *J. Pediatr. Orthop.* **2022**, *42*, 162–168. [\[CrossRef\]](#)

16. Lorente, A.; Barrios, C.; Burgos, J.; Hevia, E.; Fernández-Pineda, L.; Lorente, R.; Rosa, B.; Pérez-Encinas, C. Cardiorespiratory Function Does Not Improve 2 Years After Posterior Surgical Correction of Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Spine* **2017**, *42*, 1391–1397. [[CrossRef](#)]
17. Burgos, J.; Barrios, C.; Mariscal, G.; Lorente, A.; Lorente, R. Non-uniform Segmental Range of Motion of the Thoracic Spine During Maximal Inspiration and Exhalation in Healthy Subjects. *Front. Med.* **2021**, *8*, 699357. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
18. Namboothiri, S.; Kumar, R.; Menon, K.V. Early changes in pulmonary function following thoracotomy for scoliosis correction: The effect of size of incision. *Eur. Spine J.* **2005**, *14*, 144–148. [[CrossRef](#)]
19. Lonner, B.S.; Auerbach, J.D.; Estreicher, M.B.; Betz, R.R.; Crawford, A.H.; Lenke, L.G.; Newton, P.O. Pulmonary function changes after various anterior approaches in the treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *J. Spinal. Disord. Tech.* **2009**, *22*, 551–558. [[CrossRef](#)]
20. Ritzman, T.F.; Upasani, V.V.; Bastrom, T.P.; Betz, R.R.; Lonner, B.S.; Newton, P.O. Comparison of compensatory curve spontaneous derotation after selective thoracic or lumbar fusions in adolescent idiopathic scoliosis. *Spine* **2008**, *33*, 2643–2647. [[CrossRef](#)]
21. Sarwahi, V.; Horn, J.J.; Kulkarni, P.M.; Wollowick, A.L.; Lo, Y.; Gambassi, M.; Amaral, T.D. Minimally Invasive Surgery in Patients With Adolescent Idiopathic Scoliosis: Is it Better than the Standard Approach? A 2-Year Follow-up Study. *Clin. Spine Surg.* **2016**, *29*, 331–340. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
22. Si, G.; Li, T.; Wang, Y.; Liu, X.; Li, C.; Yu, M. Minimally invasive surgery versus standard posterior approach for Lenke Type 1–4 adolescent idiopathic scoliosis: A multicenter, retrospective study. *Eur. Spine J.* **2021**, *30*, 706–713. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Yukawa, Y.; Matsumoto, T.; Kollor, H.; Minamide, A.; Hashizume, H.; Yamada, H.; Kato, F. Local Sagittal Alignment of the Lumbar Spine and Range of Motion in 627 Asymptomatic Subjects: Age-Related Changes and Sex-Based Differences. *Asian Spine J.* **2019**, *13*, 663–671. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Choi, K.J.; Lee, S.; Park, M.S.; Sung, K.H. Rebound phenomenon and its risk factors after hemiepiphysiodesis using tension band plate in children with coronal angular deformity. *BMC Musculoskelet. Disord.* **2022**, *23*, 339. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

