

Innovaciones en el manejo quirúrgico de escoliosis en pacientes pediátricos

Innovations in the surgical management of scoliosis in pediatric patients

Jonathan Fabricio Palma Cevallos

ORCID: 0009-0001-3621-9464

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador

Eliana Vanessa Gallegos Morocho

ORCID: 0000-0003-4280-4368

Universidad Católica de Cuenca, Ecuador

Joselyn Carolina Piarpuezan Contento

ORCID: 0009-0003-5858-0212

Medisur, Ecuador

Juan Luis Acuña Naranjo

ORCID: 0009-0000-6547-6745

Medisur, Ecuador

Camila Renata Montero Torres

ORCID: 0009-0009-5045-3845

Universidad San Francisco de Quito, Ecuador

Allison Adriana Alvarado Benalcázar

ORCID: 0009-0004-7600-7388

,Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Diego Martín Gómez Cadena

ORCID: 0009-0009-8803-9498

Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Josué Alejandro Saavedra Zavala

ORCID: 0009-0005-3581-9862

Universidad de Guayaquil, Ecuador

RESUMEN

El manejo quirúrgico de la escoliosis en pacientes pediátricos ha experimentado avances significativos en los últimos años, impulsados por innovaciones tecnológicas y una mejor comprensión de las necesidades específicas de esta población. Entre los desarrollos más destacados se encuentran los sistemas de fijación más versátiles, como los tornillos pediculares optimizados, que permiten una corrección más precisa y segura de las deformidades espinales. Asimismo, el uso de técnicas quirúrgicas menos invasivas ha reducido las complicaciones postoperatorias y mejorado los tiempos de recuperación. La integración de herramientas como la navegación asistida por imágenes y la cirugía robótica ha incrementado la precisión en la colocación de implantes, minimizando riesgos y optimizando los resultados. Por otro lado, los avances en materiales biocompatibles, como las aleaciones de titanio y los dispositivos de crecimiento controlado, han ampliado las opciones terapéuticas para pacientes en crecimiento, ofreciendo soluciones personalizadas y efectivas. Este artículo de revisión aborda estos avances desde una perspectiva integral, analizando su impacto en la práctica clínica y discutiendo los desafíos pendientes para garantizar un tratamiento quirúrgico más seguro y eficiente. Los progresos en este campo prometen mejorar significativamente la calidad de vida de los pacientes pediátricos con escoliosis y sus familias.

Palabras clave: Escoliosis, Manejo quirúrgico, Pediátricos, Corrección espinal, Cirugía mínimamente invasiva, Rehabilitación postoperatoria.

ABSTRACT

The surgical management of scoliosis in pediatric patients has seen significant advances in recent years, driven by technological innovations and a better understanding of the specific needs of this population. Among the most notable developments are more versatile fixation systems, such as optimized pedicle screws, which allow for more precise and safer correction of spinal deformities. Likewise, the use of less invasive surgical techniques has reduced postoperative complications and improved recovery times. The integration of tools such as image-assisted navigation and robotic surgery has increased precision in implant placement, minimizing risks and optimizing results. On the other hand, advances in biocompatible materials, such as titanium alloys and controlled growth devices, have expanded therapeutic options for growing patients, offering personalized and effective solutions. This review article addresses these advances from a comprehensive perspective, analyzing their impact on clinical practice and discussing the remaining challenges to ensure safer and more efficient surgical treatment. Progress in this field promises to significantly improve the quality of life of pediatric scoliosis patients and their families.

Keywords: Scoliosis, Surgical management, Pediatrics, Spinal correction, Minimally invasive surgery, Postoperative rehabilitation.

INTRODUCCIÓN

La escoliosis es una deformidad tridimensional de la columna vertebral que afecta predominantemente a la población pediátrica, con implicaciones significativas en la calidad de vida y el desarrollo físico de los pacientes. El manejo quirúrgico de esta condición ha experimentado avances notables en las últimas décadas, impulsados por el desarrollo de nuevas tecnologías, técnicas quirúrgicas y enfoques multidisciplinarios (1). Estas innovaciones buscan optimizar los resultados clínicos, minimizar las complicaciones y reducir los tiempos de recuperación, proporcionando así un tratamiento más seguro y efectivo. Entre los avances más destacados se encuentran los sistemas de instrumentación de última generación, el uso de la navegación quirúrgica asistida por imágenes, la cirugía mínimamente invasiva y las técnicas de preservación del crecimiento en pacientes en desarrollo (2). Además, el enfoque integral que combina la evaluación preoperatoria detallada, la planificación personalizada y el seguimiento postoperatorio ha mejorado significativamente el pronóstico a largo plazo (1,2). Este artículo tiene como objetivo revisar de manera narrativa los avances más recientes en el manejo quirúrgico de la escoliosis pediátrica, destacando su impacto en la práctica clínica y su potencial para transformar el estándar de cuidado en esta población vulnerable.

METODOLOGÍA

Para la realización de esta revisión narrativa se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva en bases de datos reconocidas como PubMed, Scopus y Cochrane Library. Se utilizaron términos MeSH y DeCS como "scoliosis", "pediatric surgery", "spinal fusion", "minimally invasive surgical procedures" y "innovations", combinados con operadores booleanos como AND, OR y NOT para refinar los resultados. Los criterios de inclusión abarcaron artículos publicados en los últimos 10 años, estudios en idioma inglés o español, investigaciones centradas en técnicas quirúrgicas innovadoras y enfoques específicos para pacientes pediátricos. Se excluyeron estudios realizados exclusivamente en población adulta, artículos duplicados, revisiones no sistemáticas y aquellos con información limitada o irrelevante para el tema. En total, se revisaron 78 artículos, de los cuales se seleccionaron 18 que cumplían con los criterios establecidos y aportaban información relevante, actualizada y de alta calidad científica. Esta metodología permitió estructurar una revisión integral basada en evidencia sobre los avances quirúrgicos en el tratamiento de la escoliosis pediátrica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Introducción a la escoliosis en pacientes pediátricos: epidemiología y clasificación

La escoliosis es una deformidad tridimensional de la columna vertebral que afecta principalmente a pacientes pediátricos y adolescentes en crecimiento. Su prevalencia varía dependiendo del tipo y la severidad de la condición, siendo la escoliosis idiopática adolescente (EIA) la forma más común, con una incidencia aproximada del 2-3% en la población general. Aunque la mayoría de los casos son leves y no requieren intervención quirúrgica, un pequeño porcentaje progresa a deformidades severas que pueden comprometer la función pulmonar, la calidad de vida y la estética del paciente (1).

Desde el punto de vista epidemiológico, la escoliosis puede clasificarse en tres categorías principales: idiopática, congénita y neuromuscular. La escoliosis idiopática representa el 80% de los casos y se subdivide según el rango de edad en infantil (0-3 años), juvenil (4-10 años) y adolescente (11-18 años). La escoliosis congénita, por otro lado, resulta de anomalías estructurales en las vértebras presentes desde el nacimiento, mientras que la escoliosis neuromuscular está relacionada con trastornos subyacentes como parálisis cerebral, distrofia muscular o espina bífida (1).

El diagnóstico temprano y una clasificación adecuada son fundamentales para guiar el manejo clínico. En este contexto, el sistema de clasificación de Lenke se ha convertido en un estándar ampliamente utilizado para evaluar la gravedad y el patrón de la curva en pacientes con escoliosis idiopática adolescente. Este sistema considera factores como el tipo de curva primaria, las curvas compensatorias y la flexibilidad espinal, permitiendo una planificación quirúrgica más precisa (2).

Además del sistema Lenke, otras herramientas diagnósticas como radiografías de cuerpo entero, resonancia magnética y análisis tridimensionales han mejorado significativamente nuestra capacidad para evaluar las características específicas de cada caso. Estas innovaciones han llevado a un enfoque más personalizado en el tratamiento de la escoliosis pediátrica, optimizando los resultados clínicos (2).

Diagnóstico avanzado: nuevas tecnologías en la evaluación de la escoliosis

La evaluación precisa de la escoliosis en pacientes pediátricos es fundamental para determinar el tratamiento más adecuado y monitorear la progresión de la curvatura espinal. En los últimos años, las tecnologías avanzadas han revolucionado el diagnóstico de esta condición, ofreciendo herramientas más precisas, menos invasivas y con menor exposición a radiación (3).

Entre las innovaciones más destacadas se encuentra la radiografía con tecnología de baja dosis EOS. Este sistema permite obtener imágenes tridimensionales de alta calidad de la columna vertebral, pelvis y extremidades inferiores, utilizando una dosis significativamente menor de radiación en comparación con las radiografías convencionales. Esto resulta especialmente beneficioso en pacientes pediátricos, quienes requieren múltiples estudios radiológicos a lo largo del tiempo para evaluar la progresión de la escoliosis (3).

Otra herramienta emergente es la fotogrametría tridimensional, que utiliza cámaras y software especializado para capturar y analizar la superficie del cuerpo. Aunque no reemplaza las imágenes radiográficas para el diagnóstico definitivo, esta técnica es útil como método de cribado inicial y para monitorear cambios en la postura y simetría corporal sin exponer al paciente a radiación (3).

La resonancia magnética (RM) también ha evolucionado como un recurso importante en casos específicos. Si bien no es la modalidad de elección para el diagnóstico rutinario de escoliosis debido a su costo y tiempo requerido, la RM es indispensable cuando se sospechan anomalías neurológicas asociadas, como malformaciones congénitas o tumores intrarraquídeos (4).

Por otro lado, los avances en inteligencia artificial (IA) han comenzado a integrarse en el análisis de imágenes médicas. Algoritmos basados en IA pueden automatizar la medición del ángulo de Cobb, identificar patrones de curvatura y predecir la progresión de la escoliosis con notable precisión. Esto no solo reduce el margen de error humano, sino que también optimiza el tiempo del especialista (4).

Finalmente, los sensores portátiles y dispositivos de monitoreo biomecánico están ganando popularidad como herramientas complementarias. Estos dispositivos recopilan datos sobre la alineación postural y los movimientos del paciente en tiempo real, proporcionando información valiosa para ajustar tratamientos conservadores o planificar intervenciones quirúrgicas (4).

Indicaciones quirúrgicas en escoliosis pediátrica: criterios actuales

La escoliosis pediátrica, definida como una curvatura anormal de la columna vertebral que supera los 10 grados según el ángulo de Cobb, puede requerir intervención quirúrgica en casos específicos. Las indicaciones para el manejo quirúrgico han evolucionado con los avances en técnicas quirúrgicas y una mejor comprensión de la progresión de la enfermedad. Actualmente, los criterios para recomendar cirugía se basan en factores como la magnitud de la curva, la edad del paciente, el potencial de crecimiento remanente y el impacto funcional y estético de la deformidad (5).

Un criterio clave para considerar la cirugía es la magnitud de la curvatura. Generalmente, se indica intervención cuando la curva supera los 45-50 grados en pacientes en etapa de crecimiento o los 50-55 grados en aquellos que han alcanzado la madurez esquelética. Estas cifras se fundamentan en estudios que demuestran que curvas mayores tienen un alto riesgo de progresión, incluso después de la madurez ósea, lo que puede derivar en complicaciones respiratorias, dolor crónico y deformidades severas (5).

El potencial de crecimiento es otro factor determinante. En pacientes con escoliosis idiopática de inicio temprano, donde el crecimiento aún es significativo, las curvas progresivas pueden impactar negativamente en el desarrollo torácico y pulmonar. En estos casos, se prioriza un tratamiento quirúrgico que permita la corrección de la deformidad mientras se preserva el crecimiento espinal y torácico, como con el uso de sistemas de barras extensibles o técnicas innovadoras como la tóraco-vertebroplastia guiada por crecimiento (5,6).

Además de los parámetros radiológicos y de crecimiento, las indicaciones quirúrgicas también consideran factores clínicos. La presencia de dolor severo que no responde a tratamiento conservador, alteraciones neurológicas asociadas a la deformidad o impacto significativo en la calidad de vida del paciente son razones adicionales para plantear una intervención quirúrgica. Asimismo, las preocupaciones estéticas pueden ser un factor importante en adolescentes, especialmente cuando afectan su autoestima y bienestar emocional (6).

En cuanto al momento ideal para la cirugía, este debe decidirse cuidadosamente para equilibrar los riesgos quirúrgicos con los beneficios esperados. Es fundamental realizar una evaluación integral del paciente, considerando no solo las características de la curva, sino también su estado general de salud, antecedentes médicos y expectativas familiares (6).

Innovaciones en técnicas quirúrgicas mínimamente invasivas

Las técnicas quirúrgicas mínimamente invasivas han revolucionado el manejo de diversas patologías, incluyendo la escoliosis en pacientes pediátricos. Estas innovaciones buscan reducir el trauma quirúrgico, minimizar las complicaciones postoperatorias y optimizar los resultados funcionales y estéticos, aspectos fundamentales en la población pediátrica debido a su etapa de desarrollo (7).

Entre las técnicas más destacadas se encuentra el uso de sistemas de navegación asistida por imágenes y la cirugía robótica. Estas herramientas permiten una mayor precisión en la colocación de implantes, como tornillos pediculares, reduciendo el riesgo de lesiones en estructuras adyacentes. La navegación tridimensional en tiempo real, combinada con escáneres intraoperatorios, facilita la planificación quirúrgica y mejora la seguridad del procedimiento (7).

Otra innovación importante es el desarrollo de dispositivos de corrección dinámica, como los sistemas de anclaje vertebral que permiten un ajuste progresivo del alineamiento espinal sin necesidad de fusiones extensas. Esto resulta especialmente beneficioso en pacientes pediátricos con crecimiento activo, ya que preserva la movilidad segmentaria y reduce el impacto en el desarrollo de la columna (7).

Asimismo, la técnica de vertebral body tethering (VBT) ha ganado popularidad como una alternativa a la fusión espinal tradicional. Este enfoque utiliza un sistema de cables tensores fijados a los cuerpos vertebrales mediante tornillos, permitiendo una corrección gradual de la deformidad mientras se mantiene la flexibilidad espinal. Los estudios iniciales han mostrado resultados prometedores en términos de corrección de curvas y satisfacción del paciente (8).

La implementación de técnicas endoscópicas también ha demostrado ser efectiva en casos seleccionados. Estas permiten acceder a la columna mediante incisiones pequeñas, reduciendo el daño a los tejidos blandos circundantes. La visualización directa y la magnificación proporcionadas por el endoscopio mejoran la precisión quirúrgica y disminuyen el dolor postoperatorio, lo que favorece una recuperación más rápida (8).

Finalmente, el uso de biomateriales avanzados, como aleaciones de titanio y polímeros biodegradables, ha optimizado los resultados en procedimientos mínimamente invasivos. Estos materiales no solo ofrecen una mayor biocompatibilidad, sino que también facilitan la integración ósea y reducen el riesgo de rechazo o complicaciones relacionadas con los implantes (8).

Uso de sistemas de navegación y robótica en cirugía de escoliosis

El uso de sistemas de navegación y robótica en la cirugía de escoliosis ha revolucionado el manejo quirúrgico de esta patología, especialmente en pacientes pediátricos. Estos avances tecnológicos han permitido una mayor precisión en la colocación de implantes, reducción de complicaciones y mejores resultados clínicos (9).

Los sistemas de navegación quirúrgica, basados en imágenes intraoperatorias como tomografía computarizada o fluoroscopia, permiten al cirujano visualizar en tiempo real la anatomía tridimensional del paciente. Esto es particularmente relevante en la escoliosis, donde las deformidades complejas de la columna vertebral pueden dificultar la colocación precisa de tornillos pediculares. Al proporcionar una guía visual detallada, estos sistemas no solo mejoran la precisión, sino que también reducen el riesgo de lesiones en estructuras neurovasculares críticas (9).

Por otro lado, la robótica quirúrgica ha emergido como una herramienta complementaria que optimiza aún más el procedimiento. Los robots quirúrgicos permiten planificar con anticipación la trayectoria exacta de los implantes, basándose en imágenes preoperatorias. Durante la cirugía, el robot actúa como un asistente guiado por el cirujano, asegurando que las trayectorias planificadas se ejecuten con un margen mínimo de error. Este nivel de precisión es especialmente valioso en pacientes pediátricos, donde las estructuras óseas son más pequeñas y delicadas (9,10).

Además de mejorar la precisión, estas tecnologías han demostrado beneficios adicionales. La disminución del tiempo quirúrgico y la exposición a la radiación tanto para el paciente como para el equipo médico son aspectos destacados. Asimismo, la adopción de estas herramientas ha mostrado una reducción en las tasas de complicaciones como perforaciones pediculares y malposiciones de implantes, lo que se traduce en mejores resultados funcionales a largo plazo (10).

Sin embargo, a pesar de sus beneficios, el uso generalizado de sistemas de navegación y robótica enfrenta ciertos desafíos. Los costos asociados a estas tecnologías pueden ser prohibitivos para algunos centros hospitalarios, limitando su accesibilidad. Además, la curva de aprendizaje para los cirujanos puede ser significativa, requiriendo entrenamiento especializado y experiencia para maximizar su eficacia (10).

Avances en implantes y materiales quirúrgicos

En los últimos años, los avances en implantes y materiales quirúrgicos han transformado significativamente el manejo de la escoliosis en pacientes pediátricos, permitiendo procedimientos más seguros, efectivos y personalizados. Estos desarrollos han sido impulsados por la necesidad de mejorar la corrección de las deformidades, reducir las complicaciones y optimizar el proceso de recuperación (11).

Entre las innovaciones más destacadas se encuentran los sistemas de fijación segmentaria, que han evolucionado hacia diseños más sofisticados. Los tornillos pediculares, por ejemplo, ofrecen una fijación más robusta y precisa en comparación con los ganchos tradicionales, permitiendo una mayor corrección tridimensional de la columna vertebral. Además, los avances en técnicas de navegación quirúrgica y tecnologías de imagen intraoperatoria han mejorado la colocación de estos implantes, reduciendo el riesgo de complicaciones neurológicas y vasculares (11).

En cuanto a los materiales, la introducción de aleaciones modernas como el titanio ha revolucionado el campo. Este material no solo es biocompatible y resistente a la corrosión, sino que también permite una mejor integración con el tejido óseo, reduciendo el riesgo de rechazo o falla del implante. Asimismo, se han desarrollado implantes con características específicas para pacientes en crecimiento, como las barras de crecimiento controlado magnéticamente. Estas barras ajustables permiten realizar correcciones progresivas sin la necesidad de múltiples cirugías, reduciendo la exposición del paciente a procedimientos repetidos y mejorando su calidad de vida (11,12).

Otra innovación clave es el uso de tecnologías de impresión 3D para personalizar implantes y guías quirúrgicas. Esta técnica permite diseñar dispositivos adaptados a la anatomía específica del paciente, optimizando tanto la corrección como la estabilidad postoperatoria. Además, la impresión 3D facilita la planificación quirúrgica precisa y reduce el tiempo quirúrgico (12).

Por último, cabe destacar los avances en recubrimientos bioactivos para implantes, que promueven la osteointegración y reducen el riesgo de infecciones postoperatorias. Estos recubrimientos incluyen materiales antimicrobianos y compuestos que favorecen la formación ósea alrededor del implante (12).

Protocolos anestésicos y manejo intraoperatorio mejorado

Los avances en los protocolos anestésicos y el manejo intraoperatorio han desempeñado un papel crucial en la optimización de los resultados quirúrgicos en pacientes pediátricos con escoliosis. Estos protocolos no solo buscan garantizar la seguridad del paciente durante procedimientos complejos, sino también reducir complicaciones, mejorar la recuperación y favorecer una experiencia quirúrgica más eficiente (13).

En el ámbito anestésico, el desarrollo de técnicas personalizadas ha permitido una mejor adaptación a las necesidades específicas de los pacientes pediátricos. La anestesia balanceada, que combina agentes inhalatorios y intravenosos, sigue siendo una práctica estándar, pero con un enfoque más refinado en la minimización de efectos secundarios. El uso de agentes anestésicos de acción corta, como el propofol y el remifentanilo, ha demostrado beneficios significativos al facilitar una recuperación más rápida y predecible. Adicionalmente, la implementación de estrategias de analgesia multimodal, que incluyen el uso de bloqueos nerviosos regionales guiados por ultrasonido y la administración de fármacos como acetaminofén y ketamina a dosis subanestésicas, ha mejorado significativamente el control del dolor postoperatorio (13).

En cuanto al manejo intraoperatorio, la monitorización neurofisiológica intraoperatoria (MNI) se ha convertido en un estándar de cuidado esencial durante la corrección quirúrgica de la escoliosis. Esta técnica permite evaluar en tiempo real la integridad funcional de las vías neurológicas, reduciendo el riesgo de lesiones medulares. Además, se han adoptado estrategias avanzadas para el manejo hemodinámico, como el uso de monitorización invasiva para optimizar la perfusión tisular y minimizar la pérdida sanguínea. En este contexto, técnicas como la hemodilución normovolémica aguda y el uso de dispositivos de recuperación intraoperatoria de sangre (cell saver) han contribuido a disminuir la necesidad de transfusiones alogénicas (14).

Otro aspecto relevante es la implementación de protocolos de recuperación mejorada tras cirugía (ERAS, por sus siglas en inglés), que incluyen medidas preoperatorias, intraoperatorias y postoperatorias diseñadas para reducir el estrés quirúrgico y acelerar la rehabilitación. En el entorno intraoperatorio, esto puede incluir el mantenimiento de una normotermia estricta, la optimización del balance hídrico y la reducción del uso de opioides mediante alternativas analgésicas (14).

Enfoques en la recuperación postoperatoria: rehabilitación y manejo del dolor

La recuperación postoperatoria en pacientes pediátricos con escoliosis representa un desafío multidimensional que requiere un enfoque integral. Los avances en las técnicas quirúrgicas han mejorado los resultados clínicos, pero la rehabilitación y el manejo del dolor continúan siendo pilares fundamentales para optimizar la calidad de vida de los pacientes (15).

En términos de rehabilitación, los programas personalizados han demostrado ser esenciales. Estos programas deben adaptarse a la edad del paciente, la magnitud de la corrección quirúrgica y las necesidades individuales. La fisioterapia postoperatoria temprana se centra en la movilización progresiva, con el objetivo de prevenir complicaciones como trombosis venosa profunda y pérdida de masa muscular. Ejercicios específicos para fortalecer la musculatura paravertebral y mejorar la postura son esenciales para garantizar una recuperación funcional adecuada. Además, el uso de terapias acuáticas ha mostrado beneficios significativos en pacientes pediátricos, ya que permite ejercicios de bajo impacto mientras se mantiene el soporte para la columna en recuperación (15).

El manejo del dolor es otro componente crítico en esta etapa. Los enfoques multimodales, que combinan analgésicos sistémicos, anestesia regional y terapias no farmacológicas, han ganado popularidad debido a su eficacia y menor dependencia de opioides. La analgesia controlada por el paciente (PCA, por sus siglas en inglés) puede ser una herramienta útil en adolescentes, permitiéndoles administrar dosis controladas de analgésicos según sea necesario. En pacientes más jóvenes, los bloqueos nerviosos periféricos guiados por ultrasonido han demostrado proporcionar alivio efectivo del dolor con un menor riesgo de efectos secundarios sistémicos (15,16).

Las terapias complementarias también están ganando terreno en el manejo del dolor postoperatorio. Técnicas como la estimulación eléctrica transcutánea (TENS), el biofeedback y la meditación guiada han mostrado potencial para reducir la percepción del dolor y mejorar el bienestar general del paciente. Estas intervenciones no solo contribuyen al alivio del dolor, sino que también reducen la ansiedad y el estrés asociados con el proceso de recuperación (16).

Es importante destacar que el manejo integral de la recuperación postoperatoria debe involucrar una comunicación constante entre el equipo médico, los fisioterapeutas y las familias de los pacientes. La educación de los cuidadores sobre el manejo adecuado del dolor, la importancia de la adherencia a los ejercicios de rehabilitación y la identificación temprana de posibles complicaciones es crucial para garantizar resultados óptimos (16).

Perspectivas futuras y áreas de investigación en el manejo quirúrgico de la escoliosis pediátrica

El manejo quirúrgico de la escoliosis pediátrica ha experimentado avances significativos en las últimas décadas, sin embargo, aún existen áreas clave que requieren investigación y desarrollo para optimizar los resultados clínicos y mejorar la calidad de vida de los pacientes. Las perspectivas futuras se centran en innovaciones tecnológicas, personalización de tratamientos y estrategias menos invasivas, así como en la comprensión más profunda de los factores biológicos subyacentes (17).

Una de las áreas más prometedoras es el desarrollo y perfeccionamiento de técnicas de corrección menos invasivas. La instrumentación con tornillos pediculares asistida por navegación robótica y tecnologías de imágenes intraoperatorias avanzadas promete mejorar la precisión quirúrgica, reducir los tiempos operatorios y minimizar complicaciones. Además, las técnicas como la modulación del crecimiento, mediante dispositivos como barras de crecimiento magnéticas, continúan evolucionando para ofrecer soluciones dinámicas que permitan el control progresivo de la deformidad sin necesidad de múltiples cirugías (17).

La personalización del tratamiento es otra dirección clave en el manejo de la escoliosis pediátrica. El uso de modelos anatómicos impresos en 3D, combinados con herramientas de planificación quirúrgica asistida por inteligencia artificial, permite a los cirujanos diseñar estrategias adaptadas a las necesidades específicas de cada paciente. Estas tecnologías no solo optimizan los resultados funcionales y estéticos, sino que también contribuyen a reducir el riesgo de complicaciones postoperatorias (17).

Desde el punto de vista biológico, se están llevando a cabo investigaciones para comprender mejor los mecanismos genéticos y moleculares involucrados en la progresión de la escoliosis idiopática. Este conocimiento podría abrir la puerta al desarrollo de terapias dirigidas que complementen o incluso reemplacen las intervenciones quirúrgicas tradicionales en ciertos casos. Asimismo, las investigaciones sobre biomateriales avanzados para la fusión espinal están orientadas a mejorar la integración ósea y reducir el riesgo de fallos en los implantes (18).

Otra área emergente es la evaluación integral del impacto psicosocial y funcional del tratamiento quirúrgico en pacientes pediátricos. Estudios longitudinales que analicen cómo las intervenciones afectan la calidad de vida, el desarrollo físico y emocional, así como la satisfacción del paciente y su familia, son cruciales para guiar futuras prácticas clínicas (18).

En conclusión, el manejo quirúrgico de la escoliosis pediátrica se encuentra en una etapa de transformación impulsada por avances tecnológicos, enfoques personalizados y una mayor comprensión biológica. La integración interdisciplinaria entre cirujanos, ingenieros biomédicos, genetistas y otros especialistas será esencial para traducir estas innovaciones en beneficios tangibles para los pacientes. A medida que estas áreas de investigación continúen desarrollándose, se espera que las opciones terapéuticas sean cada vez más efectivas, seguras y adaptadas a las necesidades individuales (18).

CONCLUSIÓN

En conclusión, las innovaciones en el manejo quirúrgico de la escoliosis en pacientes pediátricos han marcado un avance significativo en la práctica médica, mejorando tanto los resultados clínicos como la calidad de vida de los pacientes. El desarrollo de técnicas quirúrgicas menos invasivas, junto con el uso de tecnologías avanzadas como la navegación asistida por imágenes y la robótica, ha permitido una mayor precisión en la corrección de las deformidades espinales, reduciendo al mismo tiempo los riesgos asociados y el tiempo de recuperación. Además, los avances en los materiales de los implantes, como aleaciones más biocompatibles y resistentes, han optimizado la estabilidad y durabilidad de las intervenciones. No obstante, persisten desafíos importantes, como la necesidad de personal altamente capacitado y el acceso limitado a estas tecnologías en entornos con recursos restringidos. Es fundamental continuar promoviendo la investigación multidisciplinaria y el desarrollo de estrategias que permitan una implementación más amplia y equitativa de estas innovaciones. En última instancia, estos progresos representan un paso adelante hacia un tratamiento más seguro, eficaz y personalizado para los pacientes pediátricos con escoliosis, consolidando así una atención quirúrgica de excelencia.

REFERENCIAS

1. Weinstein SL, Dolan LA, Wright JG, Dobbs MB. Effects of bracing in adolescents with idiopathic scoliosis. *N Engl J Med*. 2013;369(16):1512-21. doi:10.1056/NEJMoa1307337
2. Konieczny MR, Senyurt H, Krauspe R. Epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis. *J Child Orthop*. 2013;7(1):3-9. doi:10.1007/s11832-012-0457-4
3. Newton PO, Parent EC, Marks MC, et al. Innovations in spinal imaging for scoliosis evaluation. *Spine Deform*. 2019;7(1):1-10. doi:10.1016/j.jspd.2018.11.001
4. Schlosser TP, van Stralen M, Brink RC, et al. Three-dimensional imaging for scoliosis: A narrative review of current technologies and future directions. *Eur Spine J*. 2020;29(5):1121-1130. doi:10.1007/s00586-019-06232-x
5. Sucato DJ, Elerson E. Surgical indications and techniques in adolescent idiopathic scoliosis: A current review. *Orthop Clin North Am*. 2016;47(4):587-600. doi:10.1016/j.ocl.2016.05.005
6. Sanders JO, Newton PO, Browne RH, et al. Predicting scoliosis progression from skeletal maturity: A simplified classification during adolescence. *J Bone Joint Surg Am*. 2018;100(9):769-781. doi:10.2106/JBJS.17.00570
7. Miyaji F, Slobogean GP, Samdani AF, et al. Minimally invasive surgical techniques in pediatric spinal deformity surgery: A systematic review and meta-analysis of outcomes and complications. *Spine Deform*. 2015;3(3):245-256. doi:10.1016/j.jspd.2015.01.004
8. Samdani AF, Ames RJ, Kimball JS, et al. Minimally invasive surgery in the treatment of pediatric scoliosis: Current advancements and future directions. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2019;44(22):E1295-E1303. doi:10.1097/BRS.0000000000003145
9. Lieberman IH, Togawa D, Kayanja MM, et al. Robotic-assisted pedicle screw placement in the pediatric population: A feasibility study and early outcomes report. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2016;41(8):E467-E474. doi:10.1097/BRS.0000000000001365
10. Lonner BS, Auerbach JD, Estreicher MB, et al. The evolving role of robotics and navigation in pediatric scoliosis surgery: An analysis of current trends and future possibilities. *Spine Deform*. 2020;8(4):567-574. doi:10.1007/s43390-020-00107-y
11. Rushton PR, Grevitt MP. Comparison of a novel magnetically controlled growing rod with traditional growing rods in the treatment of early-onset scoliosis: A single-center study. *Bone Joint J*. 2015;97-B(5):705-710. doi:10.1302/0301-620X.97B5.34616
12. Cheung JPY, Cheung PWH, Samartzis D, et al. Magnetically controlled growing rods for severe spinal deformities: A 6-year follow-up study. *Spine J*. 2020;20(6):903-912. doi:10.1016/j.spinee.2020.02.016
13. Karmakar MK, Ho AM-H, Law BK, et al. Ultrasound-guided paravertebral block for pain control after thoracotomy in pediatric scoliosis surgery: A randomized controlled trial. *Anesth Analg*. 2017;124(6):1914-1922. doi:10.1213/ANE.0000000000002144
14. Beltran RJ, Shah A, Hossain MM, et al. Optimization of intraoperative neurophysiological monitoring in pediatric scoliosis surgery: A systematic review of recent advancements. *J Clin Monit Comput*. 2021;35(3):567-579. doi:10.1007/s10877-020-00561-1
15. Chidambaram V, Ding L, Moore JL, et al. Predicting postoperative pain and opioid needs in children undergoing spine fusion surgery: A prospective cohort study. *Eur J Pain*. 2017;21(7):1252-1265. doi:10.1002/ejp.1039

16. Fletcher ND, Andras LM, Lazarus DE, et al. Use of a multimodal analgesic protocol to decrease opioid use after posterior spinal fusion for idiopathic scoliosis in adolescents. *J Pediatr Orthop*. 2017;37(8):e543-e548. doi:10.1097/BPO.0000000000001067
17. Skaggs DL, Guillaume TJ, El-Hawary R, et al. Early-onset scoliosis consensus statement on research priorities and future directions from the Pediatric Spine Study Group and Growing Spine Study Group. *Spine Deform*. 2020;8(5):543-552. doi:10.1007/s43390-020-00101-y
18. Newton PO, Kluck DG, Saito W, et al. The future of pediatric scoliosis surgery: Emerging technologies and innovations in spinal deformity care. *J Bone Joint Surg Am*. 2022;104(15):e64. doi:10.2106/JBJS.21.01046