

Investigación Clínica

Fijación lumbar posterior empleando el sistema de imagen quirúrgica O-arm: experiencia inicial

Julián Castro Castro^{a,*}, Jon Rodino Padín^b, Alfonso Pinzón Millán^a,
Jesús Patricio Agulleiro Díaz^c, Juan Manuel Villa Fernández^c y Ana Pastor Zapata^a

^a Servicio de Neurocirugía, Complejo Hospitalario Universitario de Ourense, Ourense, España

^b Servicio de Traumatología, Hospital Comarcal da Barbanza, Ribeira, A Coruña, España

^c Servicio de Neurocirugía, Hospital Clínico Universitario de Santiago, Santiago de Compostela, A Coruña, España

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 29 de febrero de 2012

Aceptado el 10 de septiembre de 2012

On-line el 13 de diciembre de 2012

Palabras clave:

Cirugía raquídea

Columna lumbar

Navegación

O-arm

Tornillos pediculares

R E S U M E N

Objetivo: La fijación con tornillos transpediculares en la columna lumbar es una técnica ampliamente aceptada para el tratamiento de patología traumática y degenerativa. Las complicaciones de la instrumentación espinal pueden ser graves. Sobrepassar caudal o medialmente la cortical del pedículo puede provocar lesiones nerviosas o durotomías incidentales.

La cirugía guiada por imagen computarizada ha demostrado tasas más altas de precisión en la colocación de tornillos transpediculares comparada con la fluoroscopia convencional.

El O-arm tiene la capacidad de obtener imágenes similares a la tomografía computarizada (TC) y realizar reconstrucciones multiplanares.

En este estudio evaluamos una cohorte de pacientes en los que se realizó fijación lumbar posterior con tornillos transpediculares empleando el sistema de imagen quirúrgica O-arm. **Métodos:** Se realizó un estudio retrospectivo de 40 casos consecutivos de fijación lumbar posterior empleando el O-arm. La población a estudio incluía 14 hombres y 26 mujeres. El rango de edad iba de 39 a 85 años, con una media de edad de 63,78 años.

Veintiún pacientes presentaban estenosis del canal degenerativa (52,5%) y 19 espondilolistesis (47,5%). Se obtuvieron imágenes con TC intraoperatoria. Se recoge el tiempo medio de intervención y la media de tiempo por tornillo.

Resultados: Un total de 252 tornillos fueron colocados empleando el sistema de navegación con O-arm, con una media de 6,3 tornillos por paciente (4-10). Basándonos en la imagen de TC intraoperatorio, se recolocaron 3 tornillos, lo que representa una precisión del 98,81%. La duración media de la intervención fue de 157,2 (90-240) min, y el tiempo medio de colocación por tornillo fue de 7,13 (3,13-15) min.

Tres pacientes (7,5%) presentaron infecciones superficiales de la herida quirúrgica, tratadas de manera conservadora. Ningún paciente regresó a quirófano por malposición de los tornillos.

Véase contenido relacionado en DOI:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.neucir.2012.09.008>.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: juliancastrocastro@yahoo.es (J. Castro Castro).

1130-1473/\$ – see front matter © 2012 Sociedad Española de Neurocirugía. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.neucir.2012.09.006>

Conclusiones: El empleo intraoperatorio del sistema de imagen O-arm con navegación incrementa la precisión y la seguridad en la colocación de tornillos transpediculares en la cirugía de fusión lumbar.

© 2012 Sociedad Española de Neurocirugía. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Posterior lumbar fusion using the O-arm surgical imaging system: initial experience

A B S T R A C T

Keywords:
Lumbar spine
Navigation
O-arm
Pedicule screw
Spine surgery

Object: The use of transpedicular screw fixation has been widely accepted for the treatment of degenerative and traumatic pathology of the lumbar spine. Complications of spinal instrumentation can be serious. Screw misplacement can result in unintended durotomy, nerve root and/or cauda equina injury. In comparison to fluoroscopy-assisted screw placement, computer-assisted image guidance has been shown to achieve overall higher rates of accuracy. The O-arm is able to obtain computed tomography (CT)-type images with multiplanar reconstruction. In this study we evaluated a cohort of patients who underwent posterior lumbar fusion with pedicle screws utilizing the O-arm imaging system.

Methods: A retrospective review of 40 consecutive patients who underwent posterior lumbar fusion surgery with O-arm utilization, was performed. The study population included 14 males and 26 females. Age range was 39-85 years with an average of 63.8 years. Twenty one patients had degenerative lumbar stenosis (52.5%) and 19 had spondylolisthesis (47.5%). Intraoperative CT-images were obtained. The mean time for surgery and screw placement was assessed.

Results: A total of 252 pedicle screws were sited using O-arm navigation system, with a mean of 6.3 screws per patient (range 4-10). On the basis of intraoperative CT, 3 screws were redirected, representing a 98.81% accuracy rate.

The mean duration of surgery was 157.2 (90-240) minutes and the mean time for screw placement was 7.13 (3.08-15) minutes per screw.

Three patients (7.5%) developed superficial wound infections which were treated conservatively. No patients required a return to the operating room because of screw malposition.

Conclusion: The use of intraoperative O-arm imaging system with computer-assisted navigation significantly increases the surgical accuracy and safety of pedicle screw placement in lumbar fusion surgery.

© 2012 Sociedad Española de Neurocirugía. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Introducción

El tratamiento quirúrgico de la inestabilidad lumbar mediante artrodesis fue iniciado en los años veinte del siglo pasado y es ampliamente utilizado hoy en día. Las fijaciones lumbares son empleadas habitualmente en pacientes con espondilolistesis o estenosis degenerativa, en aquellos casos en que se hacen resecciones amplias de las facetas tras realizar la laminectomía¹. La introducción de los tornillos pediculares en 1969² mejoró la estabilidad postoperatoria inmediata y la tasa de consolidación de la artrodesis, alcanzando resultados satisfactorios entre el 72 y el 95%, según las series^{1,3,4}.

La invasión del canal espinal o de los forámenes vertebrales por los implantes puede provocar lesiones a estructuras neurovasculares, motivo por el cual se han probado diversos métodos para mejorar la precisión de su colocación durante el acto operatorio^{5,6}.

Asimismo, la inadecuada colocación del material de artrodesis reduce la estabilidad biomecánica y la tasa de fusión, aumentando la tasa de fallo del sistema⁷⁻⁹.

La cirugía espinal guiada por imagen fue descrita en 1995 y empleada de manera más extensiva a partir del año 2000^{10,11}. Sin embargo la verdadera expansión de este tipo de técnica no se produce hasta el año 2007, en relación con las mejoras tanto en los sistemas de navegación como en los de adquisición de imágenes intraoperatorias^{6,7,12}.

El O-arm (O-arm[®] Surgical Imaging System) es un sistema de imagen quirúrgica con un sistema de emisión de rayos x de haz cónico y detector de panel plano: tomografía computarizada (TC) de haz cónico o *cone beam* CT en la literatura anglosajona. Permite obtener imágenes similares a la TC convencional, reconstrucciones multiplanares y de manera automática carga estos estudios en el sistema de registro y navegación StealthStation Treon Plus (Medtronic, Minneapolis, EE. UU.)^{11,13-16}.

El objetivo del presente estudio es presentar nuestros resultados en una serie de 40 pacientes en los que se ha realizado artrodesis instrumentada de columna lumbar mediante tornillos pediculares, empleando este sistema de imagen y navegación quirúrgica.

Material y métodos

Desde febrero de 2011 a enero de 2012, 40 pacientes fueron tratados en el Complejo Hospitalario Universitario de Ourense mediante artrodesis instrumentada lumbar posterior; empleando para la adquisición de imágenes y la navegación intraoperatoria el sistema O-arm con el equipo StealthStation.

En este periodo se implantaron un total de 252 tornillos en 40 intervenciones quirúrgicas.

Técnica quirúrgica

Para la fijación mediante tornillos transpediculares se empleó el sistema CD Horizon® Legacy™ (Medtronic Sofamor Danek, Minneapolis, EE. UU.), compatible con neuronavegación.

Los pacientes fueron colocados en decúbito prono. A pesar de ser recomendadas las mesas quirúrgicas tipo Jackson, en nuestro estudio se empleó una mesa quirúrgica radiotransparente convencional. Adecuadamente colocadas, este tipo de mesas resultan compatibles. En todas las intervenciones el sistema de imagen se introduce en el quirófano desde la derecha del paciente, con el anillo en posición abierta. Una vez cerrado el anillo, se centra la región espinal deseada, empleando 3 marcas láser para orientación en los 3 planos del espacio (fig. 1).

Se obtienen 2 imágenes de fluoroscopia en modo 2D en proyección anteroposterior y lateral, posteriormente colimadas, que son empleadas para delimitar el área quirúrgica a tratar. Finalmente el anillo se desplaza hacia la cabeza del paciente, en la denominada posición de estacionamiento. En el panel de control del sistema se memorizan tanto las 2 proyecciones de fluoroscopia como la de estacionamiento.

El anillo del O-arm vuelve a ser abierto para envolverlo en una funda estéril y así poder formar parte del campo quirúrgico.

El sistema de navegación se coloca a los pies del paciente, con 2 pantallas enfrente de cada uno de los cirujanos.

El abordaje realizado en los pacientes recogidos en esta serie fue un abordaje lumbar de línea media estándar, quedando excluidos en este estudio los procedimientos mínimamente invasivos.

Una vez realizado el abordaje se emplea el sistema de referencia para navegación, que se fija mediante una pinza a una de las apófisis espinosas más caudales del abordaje, siempre que tenga una osificación adecuada. En caso de ausencia de elementos posteriores adecuados (mala osificación o cirugía previa) empleamos la referencia atornillable a la cresta ilíaca. En los casos en que la artrodesis se realizó a más de 3 niveles lumbares, el marco de referencia fue reposicionado hasta una apófisis espinosa más superior y próxima a la vértebra objetivo (esta recolocación implica la necesidad de repetir el estudio de imagen).

Una vez colocada la referencia en el paciente, se coloca el equipo en la posición previamente memorizada y se obtienen las imágenes en modo 3D multiplanar. Dependiendo del

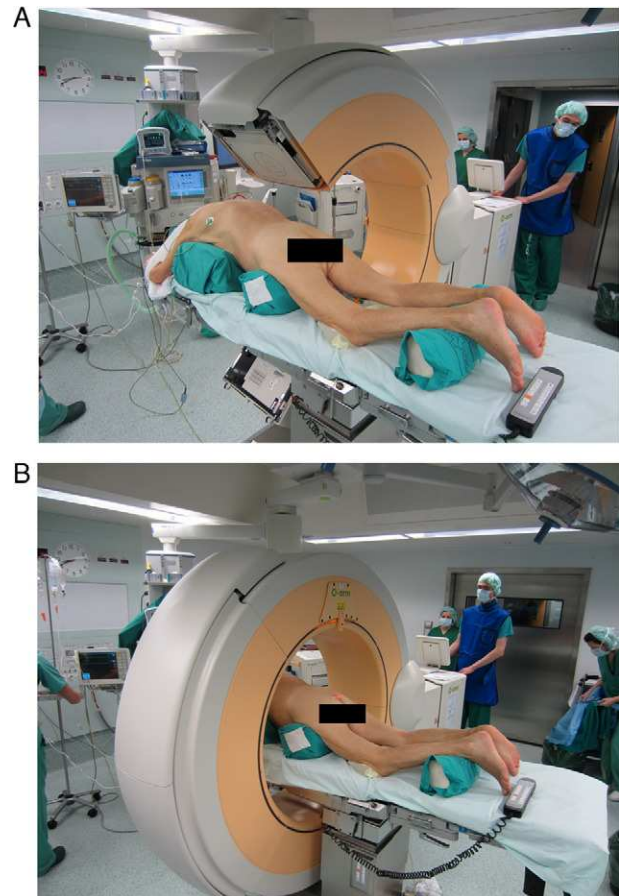


Figura 1 – Colocación del O-arm. A) Posición abierta. B) Posición con anillo cerrado.

paciente y de la región anatómica, existen diversas opciones en la obtención de los estudios (kilovoltaje, miliamperaje, estudios en alta definición, etc.).

Las imágenes son transferidas de manera automática al equipo StealthStation, que realiza las reconstrucciones multiplanares. En la estación de trabajo se deciden las trayectorias a emplear, así como el grosor y la longitud de los tornillos pediculares. También se seleccionan los cortes (tipo escopia anteroposterior o lateral, reconstrucciones axiales o sagitales, etc.) que el cirujano desea emplear como guía para introducir los tornillos.

El anillo es colocado en la posición de estacionamiento previamente memorizada para permitir la intervención quirúrgica. El sistema CD Horizon® Legacy™ compatible con navegación permite el uso de punzones de hueso, sondas pediculares, terrajas y destornilladores acoplados a sistemas de referencia que el sistema StealthStation identifica tras ser calibrados (fig. 2). Cabe mencionar que otros sistemas de artrodesis toracolumbar, no exclusivamente los distribuidos por el fabricante, pueden ser compatibles con este sistema de navegación.

En todos los pacientes se procedió a la comprobación de la colocación de los tornillos transpediculares al final de procedimiento, mediante la TC de haz cónico intraoperatorio que obtiene el equipo (fig. 3).

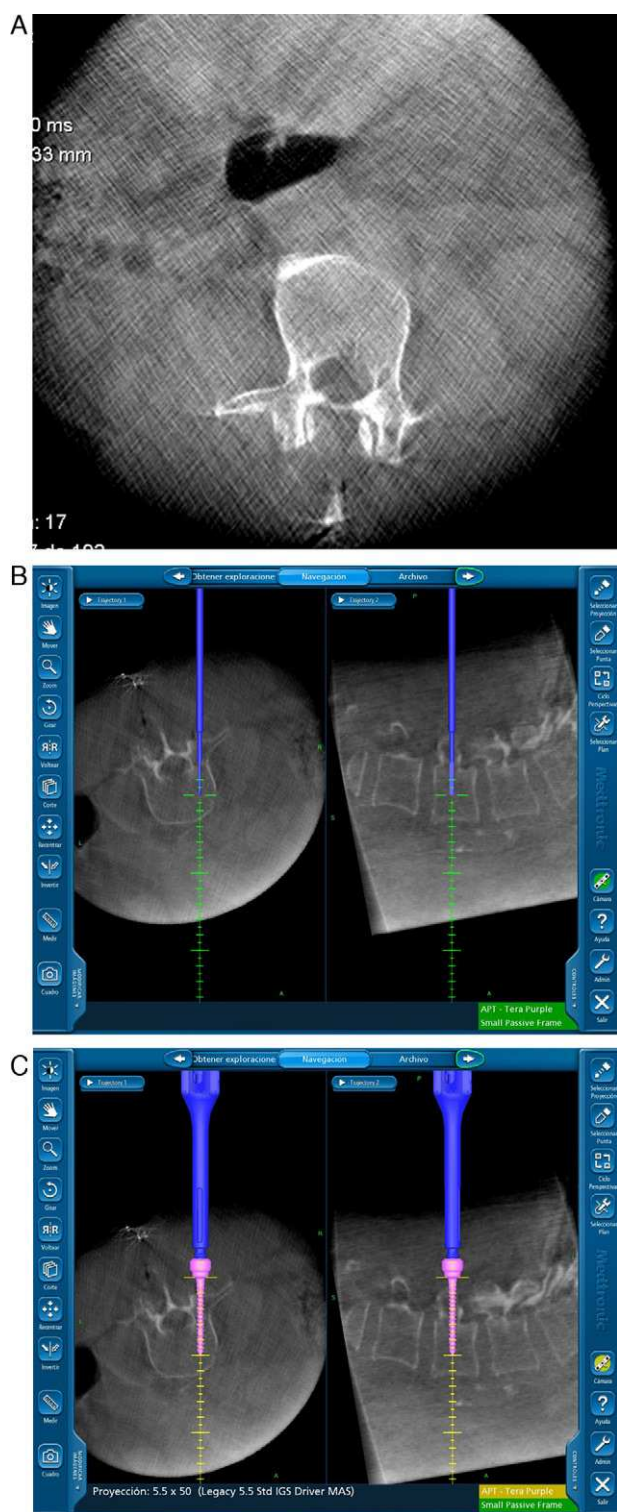


Figura 2 – A) Imagen adquirida en modo 3D de una vértebra lumbar. B) Imagen en la pantalla del navegador empleando la sonda pedicular. C) Imagen virtual con tornillo de 5,5 mm x 50 mm en su posición definitiva.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo de los datos. Las variables categóricas se muestran como frecuencias y porcentajes; las continuas gaussianas, como media y desviación estándar (DE), y las no gaussianas, como mediana (mínimo-máximo).

Posteriormente se realizó un modelo GAM (modelo aditivo generalizado) con suavización p-Spline para determinar el comportamiento del tiempo de colocación por tornillo (en minutos) en función del tiempo transcurrido desde el inicio de la técnica.

Todos los análisis se realizaron utilizando SPSS 15.0 para Windows y el software libre R (<http://www.r-project.org/>). En todos los análisis se consideraron estadísticamente significativos los valores de $p < 0,005$.

Resultados

En nuestra serie de 40 pacientes, 14 fueron hombres (35%) y 26 mujeres (65%). La media de edad fue de 63,78 años (DE $\pm 13,57$; rango de edad, 39 a 85 años).

La indicación quirúrgica fue por espondilolistesis (asociada o no a cierto grado de estenosis del canal) en 19 casos (47,5%) y por estenosis del canal lumbar en 21 casos (52,5%) (tabla 1).

Se colocaron 252 tornillos transpediculares lumbares en 40 intervenciones quirúrgicas.

La distribución según nivel vertebral fue de 2 tornillos en L1 (0,8%), 8 en L2 (3,2%), 56 en L3 (22,2%), 76 en L4 (30,2%), 76 en L5 (30,2%) y 34 en S1 (13,5%). Se realizó fijación de un nivel en 4 casos (10%), de 2 niveles en 28 (70%), de 3 niveles en 6 (15%) y de 4 niveles en 2 (5%) (fig. 4).

El marco de referencia para la navegación fue colocado en la apófisis espinosa más caudal del abordaje en 39 pacientes, y solo en un caso se empleó la referencia atornillable a la cresta ilíaca.

En los 2 casos en que se realizó fusión de más de 3 niveles fue necesario realizar un nuevo estudio de TC intraoperatorio y aproximar la referencia para navegación colocándola en una apófisis espinosa más craneal (evitando distancias superiores a 25-30 cm o 3 niveles vertebrales).

Hemos recogido el tiempo quirúrgico total desde la colocación del equipo hasta el cierre de la herida quirúrgica. La duración media de las intervenciones quirúrgicas fue de 157,2 min (DE $\pm 40,03$; rango de 90 a 240 min).

En cuanto al tiempo empleado por tornillo colocado (tiempo transcurrido desde la obtención de la TC previa a la navegación hasta la comprobación mediante una nueva TC de la adecuada colocación del material), la media fue de 7,13 min (DE $\pm 2,91$; rango 3,13 a 15 min).

Hemos de destacar que en el periodo a estudio se produjo una progresiva reducción del tiempo medio de colocación por tornillo, al adquirir mayor experiencia en la colocación y en el empleo del equipo ($p=0,023$) (fig. 5). Además se observaron 3 zonas claramente diferenciadas: zona 1, los 3-4 primeros meses, en los que la media en minutos por tornillo fue de 9,88 (7,57-12,19); zona 2, del 4.º al 10.º mes, donde se produce un descenso del tiempo de forma lineal (cada mes se reduce el tiempo en 0,566 min) y el tiempo medio por tornillo es de 6,89 (5,93-7,87), y zona 3, a partir del 10.º mes, donde el tiempo

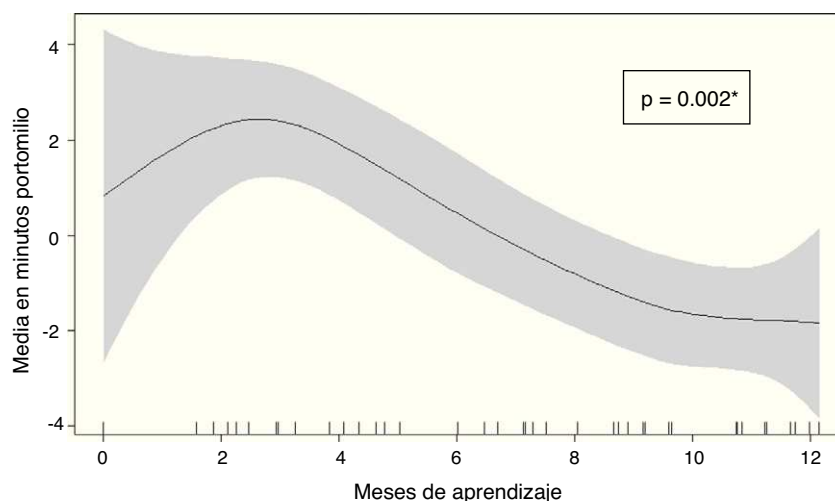


Figura 5 – Representación gráfica, centrada en el origen, de la reducción del tiempo empleado por tornillo (en minutos) en función de los meses transcurridos desde el comienzo de la utilización de la técnica O-arm.

medio es de 5,7 min (3,87-7,53). Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las 3 zonas ($p=0,002$).

Tras finalizar la colocación de los tornillos transpediculares, se emplea la TC intraoperatoria para constatar la adecuada posición del material. En 3 pacientes (7,5% del total) se consideró inadecuada la colocación, por lo que se procedió a redireccionarlos. Esta cifra supone que empleando esta técnica se consigue un 98,81% de precisión quirúrgica inicial. Tras la recolocación en los 3 pacientes, se realizó un nuevo estudio de imagen con TC intraoperatoria. Este hecho va a implicar que la precisión quirúrgica final, previa al cierre de la herida operatoria, es del 100%.

La estancia media postoperatoria de los pacientes fue de 7,01 días ($DE \pm 4,25$; rango 4 a 14 días).

Como complicación postoperatoria recogemos 3 infecciones superficiales de la herida quirúrgica (7,5%) que fueron tratadas de manera conservadora con antibioterapia.

Discusión

La osteosíntesis vertebral, empleando tornillos pediculares asociados a la artrodesis para el tratamiento de ciertas patologías lumbares, es una técnica ampliamente aceptada^{1,4,8}. La ventaja del empleo de los sistemas de fijación radica en la mayor tasa de consolidación y la menor necesidad de inmovilización postoperatoria: implica a las 3 columnas, no precisa que los elementos posteriores estén íntegros, evita la instrumentación dentro del canal espinal y las tasas de fusión son más elevadas^{4,17}. Sin embargo, la colocación de tornillos transpediculares es una técnica relativamente compleja, con el riesgo potencial de lesionar estructuras neurales, provocar durtomías incidentales e incluso perforar vasos sanguíneos o vísceras abdominales^{3,5}.

Las técnicas guiadas por imagen comenzaron a emplearse en 1995, buscando incrementar la precisión en la colocación del material de instrumentación^{15,16,18,19}. Previamente las 2 técnicas básicas de colocación han sido las guiadas por fluoroscopia intraoperatoria o por referencias anatómicas sin

fluoroscopia (*freehand technique*). En las distintas series se han llegado a mencionar del 14 al 55% de colocaciones incorrectas, y lesiones asociadas en el 1 al 8% de las intervenciones quirúrgicas^{5,18,20-22}.

Además de las posibles lesiones asociadas, la mala posición de un tornillo pedicular en una fijación de un solo nivel llega a disminuir la fuerza de agarre del sistema hasta en un 11%^{8,12,21,23,24}.

Diversos estudios han demostrado la superioridad de la cirugía guiada por imagen respecto a las técnicas convencionales a la hora de la colocación de tornillos transpediculares. Ya se ha mencionado la reducción de las complicaciones neurológicas y vasculares. Además, la planificación prequirúrgica en 3D permite diseñar una trayectoria ideal e implantar tornillos de mayor diámetro, que soportan mayores fuerzas de torsión e incrementan la estabilidad del sistema^{7,9,16,25,26}.

Existen diversas modalidades de navegación raquídea, que dependen fundamentalmente de la adquisición de imágenes⁶.

Navegación con fluoro 2D-tomografía computarizada

Es la técnica más económica de las disponibles para navegación raquídea. Se basa en imágenes de TC preoperatorias que se registran respecto a referencias del paciente intraoperatoriamente. El empleo de este sistema de navegación en regiones cervicales y dorsales o para procedimientos mínimamente invasivos es más difícil. Se ha desaconsejado también su uso en casos de gran inestabilidad o ausencia de arco posterior. La técnica de navegación es más compleja para el cirujano^{12,20,27}.

Navegación con fluoro Iso-C 3D

Este sistema tiene la capacidad de adquirir imágenes multiplanares intraoperatoriamente con el paciente posicionado para la cirugía. El Iso-C adquiere las imágenes rotando 190° alrededor del paciente. Pueden ser registradas hasta 3 vértebras

adyacentes. Los datos son transferidos al sistema de navegación, que realiza automáticamente el registro de los datos^{11,28}.

Navegación con tomografía computarizada de fuente cónica

El O-arm incorpora un panel detector y la fuente de rayos x en un anillo que puede ser abierto lateralmente para permitir su colocación en el campo quirúrgico. Puede adquirir imágenes multiplanares al rotar el detector y el emisor de rayos x 360° alrededor del paciente. Esta adquisición mayor de imágenes respecto al Iso-C aumenta la calidad y el campo de visión (mayor número de segmentos vertebrales). Además existen proyecciones fluoroscópicas que pueden ser memorizadas (hasta 4), y de manera robotizada regresa a esas posiciones. Cabe mencionar también que no precisa de la integridad de los elementos posteriores (pacientes con laminectomía previa) para realizar el registro.

Tanto el Iso-C como el O-arm tienen la ventaja de permitir comprobar intraoperatoriamente la colocación del implante.

En la [tabla 2](#) se resumen las ventajas del sistema basado en la revisión de la literatura, la información técnica proporcionada por el fabricante y nuestra propia experiencia.

La capacidad de advertir las malposiciones y solucionarlas en el mismo acto quirúrgico es una de las ventajas fundamentales de este sistema^{26,29,30}. En nuestra serie hemos de destacar la alta precisión en la colocación de los tornillos pediculares, comparable a otras publicadas empleando navegación, y superior a las series que emplean la técnica clásica^{14,22,26,27,29}.

Tras la colocación de los tornillos, se realiza una comprobación de su adecuada posición empleando la TC intraoperatoria. Basándose en estos hallazgos se decidió

reposicionar 3 tornillos, lo cual implica una precisión inicial del sistema del 98,81%.

Atribuimos el error en la colocación en los 3 casos a realizar un trayecto pedicular con un punto de entrada excesivamente lateral (unión de apófisis transversa con faceta articular). El hecho de inclinar los materiales de navegación contra el borde de la incisión puede alterar la referencia respecto a la punta. Por este motivo preferimos actualmente puntos de entrada al pedículo más perpendiculares a través de la apófisis articular lateral.

Una de las grandes preocupaciones al emplear este equipo es la radiación recibida por el paciente y el equipo quirúrgico. El uso adecuado de los protocolos de adquisición de imágenes ha demostrado que la dosis recibida acumulada es menor que con el uso de fluoroscopia convencional, tanto para el paciente como para el personal de quirófano³¹.

Como se muestra en la [figura 5](#), el tiempo medio ajustado por tornillo implantado se ha reducido progresivamente a lo largo del periodo estudiado. La mayor experiencia del equipo quirúrgico en el empleo del material de navegación, y principalmente en la adecuada colocación del anillo del O-arm, son factores claves en este hecho. Aun así, el tiempo promedio quirúrgico y por tornillo sigue siendo superior en las intervenciones guiadas por navegación respecto a la cirugía convencional^{12,24,26,30}.

Conclusiones

Reflejamos en este estudio nuestra experiencia inicial en el empleo del sistema de imagen quirúrgica intraoperatoria O-arm para la colocación de tornillos transpediculares lumbares. La precisión en la colocación inicial de los tornillos (98,81%) es similar a la descrita en la literatura.

El empleo de la TC intraoperatoria permitió advertir las 3 malposiciones de los implantes durante el acto quirúrgico, diseñar trayectorias más adecuadas y emplear tornillos de diámetros más ajustados al pedículo.

El desarrollo tecnológico en la navegación por imagen en 3D en cirugía raquídea está simplificando su uso, a la vez que mejora la calidad de la imagen intraoperatoria y, por extensión, la calidad de la intervención quirúrgica.

Financiación

No se ha recibido financiación para la investigación y redacción de este artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses económico, personal o institucional en este artículo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Babu MA, Coumans JV, Carter BS, Taylor WR, Kasper EM, Roitberg BZ, et al. A review of lumbar spinal instrumentation: evidence and controversy. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2011;9:948-51.

Tabla 2 – Ventajas del sistema O-arm (basado en la revisión de la literatura, experiencia personal de los autores e información proporcionada por el fabricante)

Ventajas sistema O-arm ^{11,14,15,24}	
Calidad de imagen	Sin distorsión de la imagen Pantalla plana de alta resolución (3 megapíxeles) de 30" Mayor campo de visión Mayor potencia del emisor Imagen 3D adquirida en posición quirúrgica 391 imágenes 360° (definición estándar) 750 imágenes 360° (alta definición)
Tiempo quirúrgico	Menor tiempo de registro de imágenes (13 s) Reposicionamiento robótico Integración automática de imagen en navegador
Dosis de radiación	Menores dosis de radiación al cirujano Reposicionamiento robótico
Seguridad para el paciente	Ausencia de partes móviles en el anillo Detector automático de colisión Dosimetría generada automáticamente Posibilidad de recolocación del material antes del cierre de la herida
Esterilidad	Evita entrada y salida del campo quirúrgico Sistema de funda estéril simplificada

2. Harrington PR, Tullos HS. Reduction of severe spondylolisthesis in children. *South Med J*. 1969;62:1-7.
3. Fox MW, Onofrio BM, Hanssen AD. Clinical outcomes and radiological instability following decompressive lumbar laminectomy for degenerative spinal stenosis: a comparison of patients undergoing concomitant arthrodesis versus decompression alone. *J Neurosurg*. 1996;85:793-802.
4. Resnick DK, Choudhri TF, Dailey AT, Groff MW, Khoo L, Matz PG, et al. Guidelines for the performance of fusion procedures for degenerative disease of the lumbar spine. Part 12: pedicle screw fixation as an adjunct to posterolateral fusion for low-back pain. *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2005;2:700-6.
5. Florensa R, Noboa R, Muñoz J, Colet S, Cladellas JM, Rodríguez A, et al. Complicaciones de la artrodesis transpedicular lumbar. *Neurocirugía*. 2001;12:216.
6. Florensa R, Muñoz J, Cardiel I, Bescós A, Tardáguila M, Plans G, et al. Fijación vertebral posterior guiada por neuronavegación. Experiencia en 121 casos. *Neurocirugía*. 2011;22:224-34.
7. Fuster S, Vega A, Barrios G, Urdaneta I, Ojeda O, Macchia M, et al. Fiabilidad del navegador en la colocación de tornillos pediculares toracolumbares. *Neurocirugía*. 2010;21:306-11.
8. Castro WH, Halm H, Jerosch J, Malms J, Steinbeck J, Blasius S. Accuracy of pedicle screw placement in lumbar vertebrae. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1996;21:1320-4.
9. George DC, Krag MH, Johnson CC, Van Hal ME, Haugh LD, Grobler LJ. Hole preparation techniques for transpedicle screws. Effect on pull-out strength from human cadaveric vertebrae. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1991;16:181-4.
10. Foley KT, Simon DA, Rampersaud YR. Virtual fluoroscopy: computer-assisted fluoroscopic navigation. *Spine*. 2001;15:347-51.
11. Park P, Foley KT, Cowan JA, Marca FL. Minimally invasive pedicle screw fixation utilizing O-arm fluoroscopy with computer-assisted navigation: Feasibility, technique, and preliminary results. *Surg Neurol Int*. 2010;1:44.
12. Lekovic GP, Potes EA, Karahalios DG, Hall GA. Comparison of two techniques image-guided thoracic pedicle screw placement: a retrospective study of 37 patients and 277 pedicle screws. *J Neurosurg Spine*. 2007;7:393-8.
13. Koivukangas T, Katisko JP, Koivukangas JP. Technical accuracy of an O-arm registered surgical navigator. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2011;2011:2148-51.
14. Oertel MF, Hobart J, Stein M, Schreiber V, Scharbrodt W. Clinical and methodological precision of spinal navigation assisted by 3D intraoperative O-arm radiographic imaging. *J Neurosurg Spine*. 2011;14:532-6.
15. Patil S, Lindley EM, Burger EL, Yoshihara H, Patel VV. Pedicle screw placement with O-arm and stealth navigation. *Orthopedics*. 2012;35:61-5.
16. Merloz P, Tonetti J, Pittet L, Coulomb M, Lavallée S, Sautot P. Pedicle screw placement using image guided techniques. *Clin Orthop Relat Res*. 1998;354:39-48.
17. Thomsen K, Christense FB, Eiskajer SP, Hansen ES, Fruensgaard S, Buenger CE. The effect of pedicle screw instrumentation on functional outcome and fusion rates in posterolateral lumbar spinal fusion: a prospective, randomized clinical study. *Spine*. 1997;22:2813-22.
18. Kalfas IH, Kormos DW, Murphy MA, McKenzie RL, Barnett GH, Bell GR, et al. Application of frameless stereotaxy to pedicle screw fixation of the spine. *J Neurosurg*. 1995;83:641-7.
19. Nolte L, Zamorano L, Arm E, Visarius H, Jiang Z, Berlerman U, et al. Image guided computer-assisted spine surgery: a pilot study on pedicle screw fixation. *Stereotact Funct Neurosurg*. 1996;66:108-17.
20. De la Torre-Gutiérrez M, Martínez-Quiñones JV, Escobar-Solís R, de la Torre-Gutiérrez S. Navegación raquídea. Nuestra experiencia. *Neurocirugía (Astur)*. 2001;12:490-8.
21. Kosmopoulos V, Schizas C. Pedicle screw placement accuracy: meta-analysis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2007;32:E111-20.
22. Bledsoe JM, Fenton D, Fogelson JL, Nottmeier EW. Accuracy of upper thoracic pedicle screw placement using three-dimensional image guidance. *Spine J*. 2009;9:817-21.
23. Heary RF, Bono CM, Black M. Thoracic pedicle screws postoperative computerized tomography scanning assessment. *J Neurosurg*. 2004;100 Suppl Spine:325-31.
24. Silbermann J, Riese F, Allam Y, Reichert T, Koepfert H, Gutberlet M. Computer tomography assessment of pedicle screw placement in lumbar and sacral spine: comparison between free-hand and O-arm based navigation techniques. *Eur Spine J*. 2011;20:875-81.
25. Nottmeier EW, Seemer W, Young PM. Placement of thoracolumbar pedicle screws using three-dimensional image guidance: experience in a large patient cohort. *J Neurosurg Spine*. 2009;10:33-9.
26. Tormenti MJ, Kostov DB, Gardner PA, Kanter AS, Spiro RM, Okonkwo DO. Intraoperative computed tomography image-guided navigation for posterior thoracolumbar spinal instrumentation in spinal deformity surgery. *Neurosurg Focus*. 2010;28:E11.
27. Holly LT, Foley KT. Intraoperative spinal navigation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2003;28 Suppl 15:S54-61.
28. Hott JS, Deshmukh VR, Klopfenstein JD, Sonntag VK, Dickman CA, Spetzler RF, et al. Intraoperative Iso-C C-arm navigation in craniocervical surgery: the first 60 cases. *Neurosurgery*. 2004;54:1131-6.
29. Ishikawa Y, Kanemura T, Yoshida G, Matsumoto A, Ito Z, Tauchi R, et al. Intraoperative, full-rotation, three-dimensional image (O-arm)-based navigation system for cervical pedicle screw insertion. *J Neurosurg Spine*. 2011;15:472-8.
30. Larson AN, Santos ER, Polly Jr DW, Ledonio CG, Sembrano JN, Mielke CH, et al. Pediatric pedicle screw placement using intraoperative computed tomography and 3-dimensional image-guided navigation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37:E188-94.
31. Schafer S, Nithianathan S, Mirotta DJ, Uneri A, Stayman JW, Zbijewski W, et al. Mobile C-arm cone-beam CT for guidance of spine surgery: image quality, radiation dose, and integration with interventional guidance. *Med Phys*. 2011;38:4563-74.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.neucir.2012.09.006>