

## Corrección de balance sagital de columna vertebral por vía anterior.

### La «ley del péndulo» o cómo explicar la forma 3D de la columna

Gilles Norotte\*

#### RESUMEN

En la introducción, el autor recuerda los parámetros clásicos que permiten estudiar la forma sagital de la columna siguiendo una semántica vertebral (lordosis, cifosis, parámetros espino-pélvicos, balance sagital). Luego, propone una perspectiva totalmente diferente que analiza la forma de la columna, no en plano sagital o coronal sino en el plano vertical, es decir, integrando la gravedad como eje de construcción en 3D. Comenzando por un análisis del esquema corporal global (del cual forma parte la columna), se introducen las sinergias musculares utilizando puntos de referencia, definiendo líneas de tensión, arcos anatómicos y funcionales, y se resalta la importancia de la función respiratoria como estabilizador de la forma del raquis toracolumbar. Esto demuestra que cualesquiera que sean las anomalías pélvicas o vertebrales, el esquema biomecánico depende de una ley única vinculada a la gravedad: «La ley del péndulo». Esto permite definir una columna «ideal» de referencia, comparándola con modelos opuestos. Se evoca el interés semántico práctico y terapéutico de tal perspectiva.

**Palabras clave:** Columna vertebral, esquema biomecánico de la columna, parámetros sagitales, balance sagital, arcos anatómicos.

#### SUMMARY

*In the introduction, author recall the classical parameters that allows to study the sagittal shape of the spine, according to the vertebral curves (lordosis, kyphosis, spino-pelvic parameters, sagittal balance). Later, author propose a completely different perspective to analyze the shape of the spine, not in sagittal or coronal plane, but in a vertical plane, that is, integrating gravity as axis of construction, in 3D. Starting with an analysis of a global corporal scheme (spine is part of it), muscular synergies are introduced by the use of several reference points, defining tension lines, as well as functional and anatomical arches. Stands out the importance of the respiratory function as stabilizer of thoraco-lumbar spine shape. This shows that whatever the pelvic or spinal anomaly, biomechanics scheme depends on a unique law attached to gravity: «The pendulum law». This law allows to define an «ideal» spine of reference, comparing it to opposite models. It evokes the practical and therapeutic semantic interest of such perspective.*

**Key words:** Spine, biomechanics scheme of the spine, sagittal parameters, sagittal balance, anatomical arches.

\* Centre Hospitalier Intercommunal des Alpes du Sud.

Dirección para correspondencia:

Gilles Norotte

1, place A. Muret

05000 GAP (Francia)

Correo electrónico: Gilles-norotte@wanadoo.fr

Este artículo puede ser consultado en versión completa en <http://www.medigraphic.com/orthotips>

## INTRODUCCIÓN

El hombre es el único primate que presenta una curvatura lumbar en lordosis. Esto asegura su estabilidad bipodal, estrictamente vertical y estable al caminar.<sup>1,2</sup> La organización de curvaturas sagitales, conocidas desde Hipócrates, es una sucesión de cifosis algo rígidas (sacro, tórax, cráneo) y de lordosis móvil (lumbar y cervical).

La mayoría de autores analiza la columna toracolumbar muy aparte, en un plan estrictamente sagital, utilizando una semántica vertebral angular con el fin de explicar la forma y la biomecánica de la columna. Algunas conclusiones generalmente admitidas en la literatura surgen de estos trabajos:

- Existe una fuerte relación entre la pendiente (inclinación) sacra y la lordosis lumbar.<sup>3,4</sup>
- Roussouly define diferentes parámetros que permiten el estudio sagital de la forma.<sup>5-7</sup>
- Parámetros espino-pélvicos (incidencia pélvica, inclinación del sacro, angulación de la pelvis).
  - Propone una segmentación de curvaturas sagitales en función del punto de inflexión, separando lordosis y cifosis con el fin de obtener cálculos angulares. Pero esos puntos de inflexión son variables.
  - La lordosis lumbar es así dividida en dos partes en función del ápex lumbar: una lordosis inferior, fuertemente relacionada con la pendiente o inclinación sacra y una lordosis superior (20°) casi constante.
  - Finalmente, propone una clasificación de las formas sagitales en cuatro grupos, según la inclinación de la pendiente sacra.
- El balance sagital es definido en función del cuerpo vertebral de C7, aparece relativamente estable.<sup>3</sup> La plomada se refiere ya sea al sacro o al centro de las caderas.
- La interdependencia de curvaturas y de la posición de la pelvis son admitidas por la mayoría de autores.
- Estudios estadísticos analizan estos parámetros sobre una gran población europea.<sup>8</sup>

Todos recalcan en la gran variabilidad de esos cálculos angulares,<sup>9</sup> lo que no permite definir cálculos estándares.<sup>10</sup> Ninguno propone realmente un esquema relacionando las curvaturas entre sí mismas.

En esta primera parte, proponemos un esquema biomecánico global, que permite definir una forma ideal de columna en relación con dos modelos opuestos. En la segunda parte explicamos la variación del esquema biomecánico de la columna en función de las anomalías más frecuentemente observadas en pacientes con lumbalgia crónica.

Esta visión diferente se fundamenta en un análisis funcional del esquema corporal (del cual forma parte la columna) en el plano vertical. Es decir, se refiere únicamente a la gravedad como eje de construcción 3D. Son estas reglas que expondremos aquí y que denominaremos «Ley del Péndulo».

## MATERIAL Y MÉTODOS

El análisis de la variación entre el espinograma pre- y postoperatorio de 300 pacientes con patología lumbar operados por Alif (abordaje anterior único - *stand alone*), y los pacientes recibidos diariamente en consulta por lumbalgia crónica, permitieron establecer las reglas del esquema biomecánico corporal propuesto líneas abajo.

### A. Construcción de la columna en el plan vertical

Durante el crecimiento, la columna adquiere su forma contra la gravedad. Las sinergias músculo-aponeuróticas tienen como función crear curvaturas sagitales y mantener la anatomía raquídea vertical en los tres planos del espacio (sagital, coronal, axial). Éstas integran las anomalías comunes y organizan el esquema biomecánico corporal (del cual forma parte la columna) en función de esta regla gravitacional constante (*Figura 1*).

- Definiremos diferentes puntos importantes, ya sea porque son puntos de contacto de la vertical con las curvaturas (ápex), como también porque tienen relación con la anatomía (punto de inflexión de curvaturas, pulmón) o porque simbolizan la inserción músculo-aponeurótica (polea de reflexión, punto de inserción).
- La relación entre estos puntos, determina las líneas de tensión de los arcos anatómicos y/o funcionales, lo que permite establecer un esquema de organización corporal. Este esquema representa una filosofía funcional:

- Asegurar la función respiratoria vital, garantizando el equilibrio de las presiones pulmonares a un costo energético menor.
- Asegurar la independencia de la respiración en función de la locomoción, en conjunto con la estabilidad y el movimiento de la cabeza, mediante curvaturas móviles y flexibles «amortiguantes» (que son la lordosis lumbar y cervical).



**Figura 1.**

*La ley del péndulo.*

- El esquema funcional de la columna tóraco-lumbar (que es el eje vertical esencial del esquema corporal) es, por lo tanto, consecuencia dependiente de la función respiratoria y de su envoltura muscular corporal.

### Definición de la «ley del péndulo» (Figura 1)

En el plano frontal:

- Constatamos que sea cual sea la estructura «común» de la columna en un adulto, el único punto de referencia entre ellas es que los ápex pulmonares son horizontales, tienen como fin equilibrar las presiones pulmonares en los movimientos respiratorios (estabilización neumática). Las sinergias musculares del esquema corporal son simétricas. El punto de unión (A) del péndulo se define como el punto equidistante entre los dos ápex pulmonares.
- La plomada vertical se mantiene por encima del ápex del sacro (Punto S). De frente, este punto S es el punto de confluencia del sistema extensor músculo-aponeurótico.
- Al andar, el péndulo se mantiene verticalmente (tronco) a pesar de los movimientos oscilatorios de la pelvis, cuyo eje de rotación es el punto S. Cuando el tronco está en movimiento, el péndulo materializado por el punto E (equilibrio de sinergias musculares) regresa enseguida a su lugar de reposo. La altura del punto (E) depende de la forma sagital.
- En la mayoría de casos, las anomalías corrientes vertebrales (rotatorias y/o sagitales) o pélvicas (inclinación del sacro) y las alteraciones degenerativas afectan poco esta «regla» cuestionada por las anomalías rotatorias mayores que salen del cuadro. Podemos entonces hablar de estabilización neumática como una lógica para la edificación vertical de la columna toracolumbar y del esquema corporal.

En el plano sagital:

Dos imperativos

1. Estabilizar la base (la pelvis) sobre la cual se construye el edificio corporal

La línea que une el ápex del sacro (S), el centro de las cabezas femorales (F) y la sínfisis púbica (Y) constituye la base pélvica, en movimiento alrededor de las cabezas femorales (F) pero muscularmente estabilizado por las sinergias musculares antagonistas (glúteos, psoas, aductores) de las extremidades inferiores.

Sean cuales sean las formas sagitales «comunes» de la columna subyacente, el ángulo dado del segmento S/F con la horizontal es de una fijeza considerable. Definiendo «el ángulo de estabilización de la base» su valor es de  $15^\circ (+ 4^\circ)$ .

La distancia S/F es el «brazo de palanca del sacro». Se alarga si el «péndulo» va hacia adelante y se acorta si va hacia atrás.

2. Suspender el péndulo cuya unión superior es el ápex pulmonar (A), de manera precisa

El equilibrio de las presiones pulmonares se aplica necesariamente en el plano sagital durante los movimientos respiratorios. El péndulo siempre tiene como unión el punto (A). Los movimientos respiratorios normales no afectan al péndulo ni la posición sagital de la columna. La inspiración y espiración profunda y los movimientos en flexión-extensión hacen mover el péndulo. El punto de reposo del péndulo (E) se ubica de manera equidistante entre el ápex anatómico lumbar (L) y la vertical del ápex torácico anatómico (T), situándose en el cruce de la línea vertical del punto (A) y de la horizontal pasando por el ápex lumbar anatómico (L). Éste es el punto de equilibrio de sinergias musculares definiendo así el ápex lumbar funcional.

Por definición, el péndulo depende únicamente de la gravedad. El péndulo define una «línea vertical de tensión» del esquema corporal: distancia A/E. Su posición en el espacio de acuerdo con la base depende de las variaciones y las anomalías anatómicas comunes, pero se mantiene como generador del esquema biomecánico corporal, y por consecuencia de la columna.

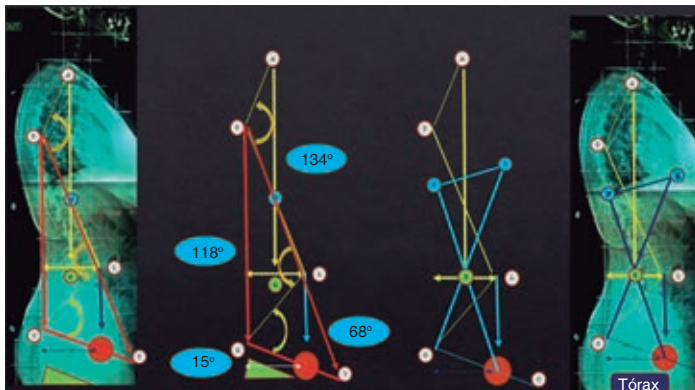
### B. Definición de una columna «ideal»

El esquema corporal (el de la columna vertebral) estará definido por sus ápex anatómicos y funcionales, que son al mismo tiempo poleas de reflexión de tensiones aponeuróticas y musculares; y/o puntos de inflexión de las curvaturas. Por lo tanto, su desarrollo depende de las sinergias musculares y de la función respiratoria.

*Idealmente se organiza siguiendo dos esquemas:*

- Una construcción anatómica vertical (*Figura 2A*)

Ésta alinea el ápex torácico (T) por encima del ápex del sacro (S) (búsqueda de verticalidad), creando una lordosis ideal alineando el ápex torácico (T)/ lumbar (L)/ y la sínfisis (Y) dentro del eje de tracción del psoas. Esta línea L/T cruza



**Figura 2A.**

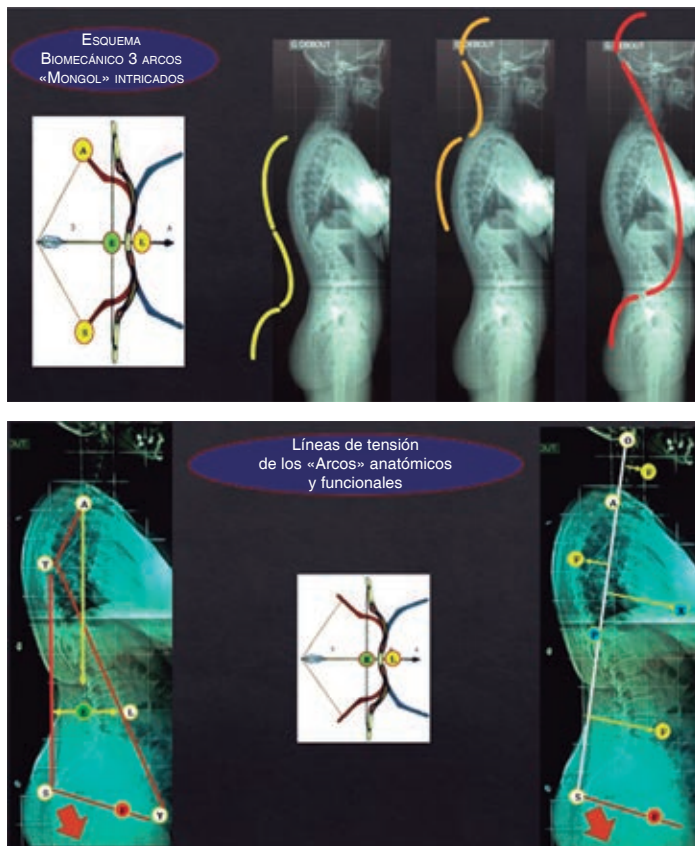
*Esquema biomecánico ideal «de referencia».*

armoniosa y oblicuamente los cuerpos vertebrales. Esta línea define un triángulo anatómico uniendo los ángulos (S, Y, T), estabilizándose muscularmente sobre el centro de rotación (F). La plomada de (F) viene por encima de F. El ápex lumbar (L) se sitúa frente a la plataforma superior de L4.

- Una construcción funcional (*Figura 2B*)

La columna está constituida de una secuencia de arcos anatómicos rígidos/flexibles; sacro (arco rígido), lumbar (flexible), tórax (rígido), cervical (flexible), cráneo (rígido), constituyendo un triple sistema de arcos tipo «Mongol» entrelazados, cuyos movimientos sinérgicos aseguran la estabilidad vertical (contra la gravedad) y la independencia de la función respiratoria:

- Con aparato locomotor (arco del sacro/lumbar/tórax).
  - Con los movimientos de la cabeza por otro lado (arco del tórax/cervical/cráneo).
- Y también la hiperextensión (arco sacro/tórax/cráneo).



En la línea mayor de la «tensión de los arcos funcionales» en esta forma «ideal» se unen el ápex del sacro (S), el ápex pulmonar posteroinferior (P), el ápex pulmonar superior (A), la articulación occipito-cervical (O), y el ápex del cráneo (H).

Las flechas de los arcos son perpendiculares a esta línea, repartiéndose en cada lado de la misma, uniendo los puntos más alejados de las curvaturas y al mismo tiempo, siendo paralelas y prácticamente equidistantes de su punto de inflexión.

La forma y la posición del tórax se definen en función de sus ápex (A, X, P). El ápex pulmonar anteroinferior (X) define la fecha anterior del tórax. El punto (P) es el ápex pulmonar posteroinferior.

Éste representa el ápex torácico funcional. El tórax depende íntimamente del «péndulo» y por consecuencia del ápex lumbar. Sean cuales sean las anomalías comunes, las líneas de tensión pélvico-torácica X/S y P/S se cruzarán siempre en (E).

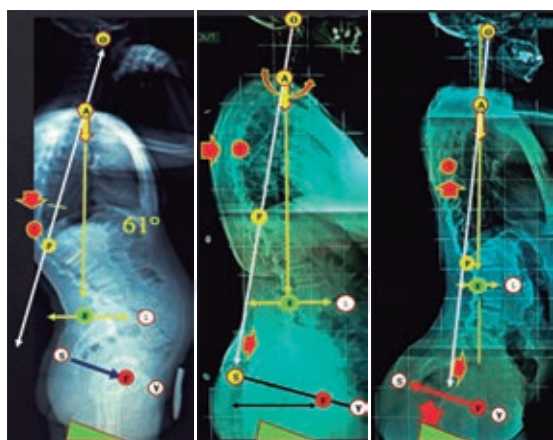
La articulación occipito-cervical se sitúa en posición «estática» al reposo, dentro de la prolongación del arco torácico (P/A) rígido que la estabiliza. Este segmento P/A/O tiene como punto de rotación A, y determina una «línea de tensión del arco toracocervical» llamado «arco largo».

Este sistema es llamado «ideal», puesto que alinea las dos líneas de tensión de los arcos funcionales pélvico torácico (S/P/A) y toracocervical (P/A/O).

Existe entonces una repartición de los ápex anatómicos/funcionales en el espacio, lo que define una forma y un esquema biomecánico «ideal» y preciso que servirá de referencia.

### C. Las «variaciones» de formas sagitales (Figuras 3 y 4)

Dependen únicamente de la integración por la gravedad de las anomalías constitucionales aisladas o asociadas. Aquí presentaremos dos modelos opuestos comparándolos al esquema ideal.



**Figura 3.** Variaciones del arco toraco-occipital largo P/A/O según las anomalías: variaciones de nivel del ápex torácico y del alineamiento del ápex torácico con el ápex del sacro.

- Las anomalías modifican la repartición de los ápex. El triángulo anatómico modificado se reposita en el centro F para compensar el desplazamiento horizontal y vertical del péndulo para mantener el ángulo de estabilización S/F con la horizontal.
- La ley sigue siendo suspender (atar) el péndulo de tal manera que sea equidistante del ápex lumbar y torácico. Entonces el péndulo sigue organizando el cuadro del esquema biomecánico.

- El alineamiento de T con S desliza hacia adelante o hacia atrás según las anomalías. Existe una disociación de las líneas de tensión de los arcos funcionales P/A/O cuyo eje es A (enganche del péndulo). La rotación depende de la altura del ápex torácico.
- La posición de la cabeza (O) depende de la línea toraco-occipital P/A/O y también de la línea anterior X/V. V simboliza la inserción muscular.
- La flecha horizontal que pasa por V está alineada con el conducto vestibular, lo que permite la estabilidad de la cabeza al respirar.
- La línea X/V pasa por el péndulo cervical P cruzada de la plomada de O.

Por definición, el esquema corporal depende de la relación dentro del péndulo (línea A/E) con las caderas F, sean cuales sean las anomalías comunes. Este esquema de proporcionalidad vinculado con la gravedad demuestra la interdependencia de las curvaturas (Figura 5).

## DISCUSIÓN

Las clasificaciones morfogénicas de la columna en el plano sagital o coronal se fundan en mediciones angulares.

Este tipo de análisis estático, monoplanar, es poco satisfactorio.

- Las mediciones angulares varían según la respiración y la posición estática del paciente.
- Por un mismo ángulo (de lordosis, cifosis o de parámetros espino-pélvicos) según su orientación existen varias formas, incluso opuestas.
- La incidencia pélvica no integra el ápex del sacro, éste es la polea del sistema extensor cuyo eje es la cadera. Esta construcción matemática (perpendicular en la parte mediana del sacro) no da cuenta del enrollamiento del sacro alrededor de las caderas ni tampoco de sus anomalías verticales o sagitales. Además, las anomalías lumbosacras son muy frecuentes, lo que relativiza el interés de la pendiente sacra como referencia.

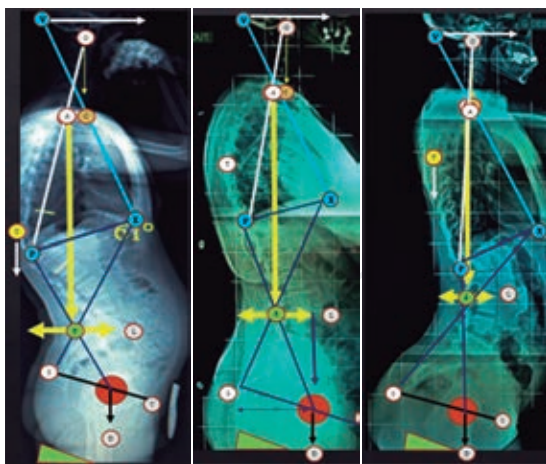


Figura 4. Variaciones del esquema global según el péndulo A/E y péndulo cervical.

Además, las anomalías lumbosacras son muy frecuentes, lo que relativiza el interés de la pendiente sacra como referencia.

- Aislado el raquis toracolumbar del esquema corporal se desconocen las sinergias musculares, el efecto estabilizador de la respiración, incluso la noción de desalineamiento de los ápex T/S que permite definir la biomecánica muy específica en el plano sagital.



A final, la gravedad es el único eje de construcción 3D, explicando la forma en su globalidad a través de un esquema de proporcionalidad. Las líneas de tensión implican que las anomalías ya sean de la base (pelvis) y/o por arriba de su base (vertebrales) son siempre interdependientes. Esas modificaciones se organizan alrededor de la «ley del péndulo». Una corrección quirúrgica perfecta y precoz de una anomalía mayor llega a una adaptación años después según el esquema estándar (Figura 6).

- El interés de esa ley es múltiple:
  - Explicar y clasificar los patrones de colapsos discogénicos degenerativos en el plano rotatorio (escoliosis *de novo* del adulto) o en el plano sagital.<sup>9-12</sup>

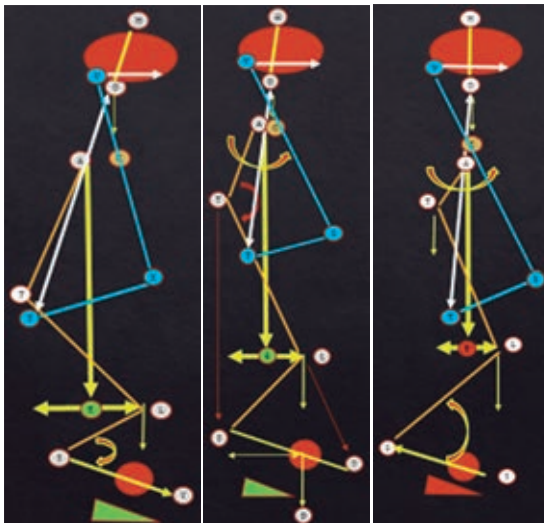


Figura 5. Esquema biomecánico de «proporcionalidad» dentro del péndulo y las caderas.

- Analizar las modificaciones del esquema biomecánico pre- y postoperatorio de los pacientes operados por Alif (stand alone). La técnica Alif devuelve la altura discal y re- extiende el arco lumbar anterior. Los músculos preservados facilitan una auto-adaptación. El paciente recobra y mejora su propio esquema biomecánico. Este análisis nos da una visión más dinámica que angular del esquema corporal en su globalidad.

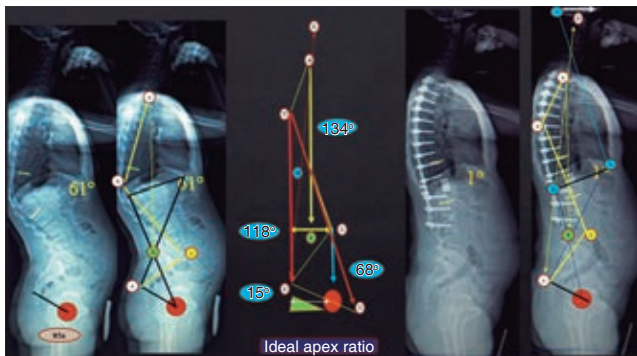


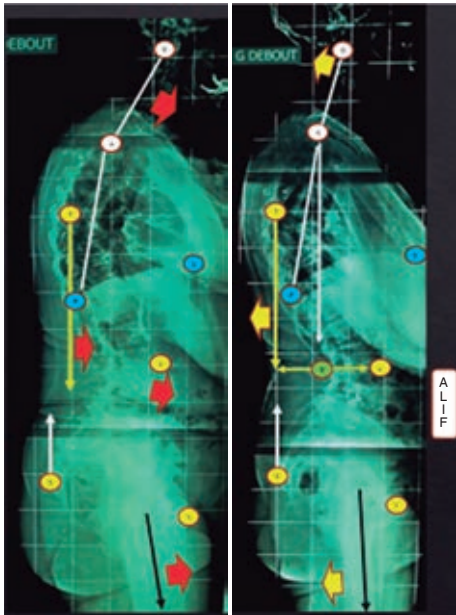
Figura 6.

Corrección quirúrgica precoz de las anomalías mayores: auto-adaptación según el esquema «ideal».

- La consecuencia terapéutica es bajar el costo iatrogénico vinculado al uso de instrumentación posterior en pacientes mayores de edad.

## CONCLUSIÓN

Siempre habrá dos maneras complementarias de pensar en la columna según la patología. Cada una tiene sus herramientas:



**Figura 7.** Mejoramiento del esquema biomecánico con Alif stand alone en espondilolistesis L4/L5: cascada degenerativa A1S2.<sup>6</sup>

- Una semántica ósea, centrada en la deformidad, usando mediciones angulares, clasificación morfogénica, imponiendo una forma definitiva con instrumentación posterior.
- Una semántica discogénica, centrada en el mecanismo degenerativo (colapso discogénico), con clasificaciones de los colapsos degenerativos y usando la técnica Alif (*stand alone*) (Figura 7), preservando los músculos, con el propósito de mejorar el esquema biomecánico del paciente.

Pero existe una regla única 3D de la columna: la gravedad. «Para adquirir la verticalidad la columna tiene que recorrer de abajo hacia



**Figura 8.**

Devolver la altura del arco lumbar anterior con Alif stand alone mejora el esquema biomecánico global: cascada degenerativa tipo C3.<sup>5</sup>

arriba a pesar de los obstáculos (anomalías) un camino para atar el ápex pulmonar para que el esfuerzo respiratorio sea mínimo». Eso se explica a través de la ley del péndulo.

Esta ley tiene varios puntos de interés:

- Identificar y clasificar esquemas biomecánicos según las anomalías.
- Estudiar sus biomecánicas degenerativas específicas.
- Precisar las indicaciones y analizar los resultados de la técnica Alif (*stand alone*) en la patología degenerativa (*Figura 8*).

## BIBLIOGRAFÍA

1. Roussouly P, Pinheiro-Franco JL. Sagittal parameters of the spine: biomechanical approach. *Eur Spine J*. 2011; 20 (Suppl 5): 578-585.
2. Berthonnaud E, Dimnet J, Roussouly P, Labelle H. Analysis of the sagittal balance of the spine and pelvis using shape and orientation parameters. *J Spinal Disord Tech*. 2005; 18 (1): 40-47.
3. Stagnara P, De Mauroy JC, Dran G, Costanzo G. Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: approach to references for evaluation of kyphosis and lordosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1982; 7 (4): 335-342.
4. Roussouly P, Berthonnaud E, Dimnet J. Geometrical and mechanical analysis of lumbar lordosis in asymptomatic population: proposed classification. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*. 2003; 89 (7): 632-639.
5. Roussouly P, Gologly S, Berthonnaud E, Dimnet J. Classification of the normal variation in the sagittal alignment of the human lumbar spine and pelvis in standing position. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005; 30 (3): 346-353.
6. Boulay C, Tardieu C, Hecquet J, Benaïm C, Mouilleseaux B, Marty C, et al. Sagittal alignment of the spine and pelvis regulated by pelvic incidence: standard values and prediction of lordosis. *Eur Spine J*. 2006; 15 (4): 415-422.
7. Kuntz C 4th, Levin LS, Ondra SL, Shaffrey CI, Morgan CJ. Neutral upright sagittal spinal alignment from the occiput to the pelvis in asymptomatic adults: a review and resynthesis of the literature. *J Neurosurg Spine*. 2007; 6 (2): 104-112.
8. Mac-Thiong JM, Roussouly P, Berthonnaud E, Guigui P. Sagittal parameters of global spinal balance: normative values from a prospective cohort of seven hundred nine Caucasian asymptomatic adults. *Spine (phila pa 1976)*. 2010; 35 (22): 193-198.
9. Norotte G, Craviari T, Hammami R, Garotta L, Dehoux E. Classification "discogénic" des scolioses Lombaires dégénératives < 50°: Effondrement Disco-génique Rotatoire (EFDR). *Rachis*. 2012; (6):
10. Norotte G, Craviari T, Hammami R, Garotta L, Dehoux E. Classification des effondrements discogéniques dans le plan sagittal (EFDS): intérêt sémantique, pratique et thérapeutique dans les indications d'Alif stand alone. *Rachis*. 2012; (6):
11. Norotte G, Craviari T, Hammami R, Garotta L, Precup S. Loi du pendule: comment se modifie le schéma biomécanique sagittal de la colonne en fonction des anomalies courantes? *Rachis*. 2014; (6):
12. Vedantam R, Lenke LG, Bridwell KH, et al. The effect of variation in arm position on sagittal spinal alignment. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2000; 25: 2204-2209.