

ANÁLISIS DEL EQUILIBRIO CON PLATAFORMAS DE FUERZAS

Rubén Lafuente Jorge; Juan Manuel Belda

INSTITUTO DE BIOMECÁNICA DE VALENCIA

Introducción

La función del equilibrio se considera el resultado de un complejo sensorial y motor cuyo fin es el mantenimiento de la postura. Ésta puede definirse como la posición o relación del cuerpo característica o asumida con un propósito específico. La *posturografía* estudia dicho comportamiento incluyendo técnicas de análisis y valoración del equilibrio postural durante el movimiento y la bipedestación. La posturografía (también denominada en ocasiones *estabilometría*) contribuye en la otoneurología para evaluar la contribución de los reflejos vestibulo-espinales en la función del equilibrio.

La función del equilibrio se basa en dos premisas: la estabilización del campo visual y el mantenimiento de la posición adoptada. Para ello, se necesita la participación de múltiples reflejos, que pueden clasificarse en: reflejos oculares (vestibulo-ocular, optocinético y cérvico-ocular) y reflejos espinales (vestibulo-

espinal, vestibulo-cervical, cérvico-cervical y cérvico-espinal). De forma general, los reflejos oculares son los encargados de la estabilización del campo visual y los espinales del mantenimiento de la postura erecta, tanto durante la marcha, como durante la bipedestación. Sin embargo, los reflejos oculares y los espinales están relacionados, ya que los reflejos cervicales estabilizan la posición de la cabeza y contribuyen, de esta forma, a la estabilización de la mirada.

Todos estos reflejos se organizan en el encéfalo gracias a la información sensorial captada por la visión, laberinto y sistema propioceptivo. Estos elementos sensoriales informan a los centros nerviosos del cerebro acerca de los cambios en la relación espacial, es decir, cambios entre el individuo y su entorno, así como modificaciones de la posición relativa de los segmentos corporales, para que estos centros puedan elaborar movimientos reflejos compensatorios adecuados. La función del equilibrio en condiciones normales se desarrolla de forma inconsciente.

Cuando surge un trastorno del equilibrio, este proceso se hace consciente; normalmente, esta experiencia va unida a la sensación de "vértigo".

La función del equilibrio se basa en dos premisas: la estabilización del campo visual y el mantenimiento de la posición adoptada

La valoración del equilibrio postural, en sujetos normales y en pacientes con patologías que afectan, bien a receptores periféricos, bien a estructuras del Sistema Nervioso Central (SNC), se puede realizar merced a estudios clásicos de respuesta a estímulos diversos (por ejemplo, nistagmografía) o mediante técnicas de posturografía. Trascendiendo los métodos del simple análisis visual, las técnicas posturográficas más avanzadas se basan en plataformas dinámicas.

La posturografía estudia y mide el comportamiento de un sujeto de pie en apoyo estable, en condiciones de desestabilización, así como durante movimientos activos (andando o dando pasos). La primera clase de técnicas se conocen como *posturografía estática*, ya que los pies del sujeto permanecen inmóviles, mientras que el segundo tipo corresponde a técnicas de *posturografía cinética o dinámica* en las que se induce

Cuando surge un trastorno del equilibrio, este proceso se hace consciente; normalmente, esta experiencia va unida a la sensación de vértigo



La sala donde se realicen los ensayos de posturografía deberá mantener unas condiciones de ruido y luminosidad constantes

un movimiento. La mayor dificultad de la posturografía estriba en la determinación de las pruebas de medida que proporcionen información significativa y en la selección de parámetros que se puedan extraer de dichas medidas y que permitan caracterizar el estado funcional del equilibrio del sujeto y emitir valoraciones clínicas útiles.

Clásicamente, el estudio estabilométrico se realizaba de forma subjetiva mediante la valoración de desviaciones de segmentos, bien de forma estática (test de Romberg) o dinámica (denominado, indistintamente, test de marcha, test de Unterberger o test de Fukuda). Con la introducción de las tecnologías que se describen en los próximos apartados, es posible cuantificar y objetivar este proceso.

Metodología

En este apartado se comentan las condiciones deseables del laboratorio de posturografía, el protocolo de medida propuesto, junto con un protocolo de medida antropométrica recomendado para la caracterización anatómica del sujeto.

Condiciones del laboratorio

La sala donde se realicen los ensayos de posturografía deberá mantener unas condiciones de ruido y luminosidad constantes y se deberá evitar que el sujeto sea distraído por la presencia de personas u objetos en los alrededores. Se fijará una diana de 5-10 cm de diámetro a la altura de los ojos del sujeto y a unos 2-4 m de distancia por delante de la plataforma dinamométrica.

Se empleará preferiblemente una plataforma de tamaño grande (800 mm x 800 mm) para que el sujeto no se salga de la superficie instrumentada durante las pruebas. Para las pruebas que requieran ocultación de la vista, se recomienda el uso de gafas de natación tintadas de negro o con los cristales totalmente cubiertos. En cuanto a la colocación del sujeto durante las pruebas estáticas, se recomienda situarlo sobre la plataforma con talones juntos y punteras a unos 30° de apertura (la distancia entre punteras no es esencial, aunque sí lo es la distancia entre los talones).

El colchón de gomaespuma, utilizado en diversas pruebas, debe ser lo suficientemente rígido como para evitar el hundimiento total del sujeto y lo suficientemente blando como para alterar la propiocepción de manera significativa. El tamaño recomendado de éste es de unos 120 mm de grosor y unos 500 mm x 500 mm de superficie. Sería aconsejable recubrirlo con

cuero para evitar resbalones y acumulación de suciedad.

Es interesante añadir en una entrada analógica un inclinómetro que mida la angulación instantánea de la cabeza del sujeto.

Protocolo de medida

La frecuencia de muestreo deberá fijarse entre 25-50 Hz, según los recursos de almacenamiento del equipo. Las frecuencias de muestreo más elevadas permiten un análisis más nítido del espectro frecuencial de las señales captadas.

Es necesario reducir al máximo las fuentes de error y variabilidad de los ensayos. Para ello, se recomienda seguir un protocolo estándar que varíe lo mínimo posible entre sujetos distintos y que sea llevado a cabo preferiblemente por la misma persona. El proceso de adquisición de datos se resume en los siguientes pasos:

- En caso de tratarse de *sujetos de control*, es importante realizar test de normalidad¹ para determinar que el individuo en cuestión pueda ser incorporado a la base de datos de control. En el caso de *sujetos patológicos*, además de relacionar la medida con el historial clínico del paciente, se deberá pasar un cuestionario de valoración funcional.
- Determinación de las medidas corporales según el protocolo de medida



¹Consiste en una anamnesis en la que se descartan factores neurológicos u osteoarticulares que puedan afectar el patrón fisiológico de equilibrio. También puede efectuarse una pequeña prueba de capacidad de equilibrio con ojos cerrados para verificar el estado del sujeto.

antropométrica, descrito en el próximo epígrafe.

- Complimentación del formulario de ensayo para cada sujeto. El número de referencia coincide con el nombre del fichero donde se almacenan las variables registradas. La codificación del nombre del fichero (8 caracteres) deberá facilitar la posterior clasificación. Una posible forma de codificación es la siguiente:
 - 1º carácter: Tipo de individuo: (Normal, Patológico, Ménière, etc).
 - 2º, 3º y 4º caracteres: Número de referencia del sujeto (0-999).

Las pruebas de estabilometría generan una serie de registros objetivos y repetibles que documentan el estado de equilibrio del sujeto

- 5º carácter: Sexo del sujeto (Varón o Mujer).
- 6º y 7º caracteres: Tipo de prueba (OA, TA, OC, GA, GC, UN).
- 8º carácter: Número de repetición (1-9).
- Se realizarán las seis siguientes pruebas en el orden indicado. La duración de cada una será de 50 segundos. En caso de caídas o movimientos anormales durante el tiempo de

observación se repetirá la prueba. En caso de imposibilidad de culminar una prueba, se indicará claramente en las hojas de protocolo el instante en el que el sujeto perdió definitivamente el equilibrio. Las mediciones se iniciarán manualmente y finalizarán de forma automática. Se recomienda una pausa de 15-30 s entre cada prueba, durante la cual el paciente debería permanecer sentado.

1. Romberg² con ojos abiertos mirando al frente (OA).
2. Romberg con pies en tándem y ojos abiertos, mirando al frente (TA).
3. Romberg con ojos cerrados (OC).
4. Romberg sobre colchón de gomaespuma y los ojos abiertos (GA).
5. Romberg sobre colchón de gomaespuma y los ojos cerrados (GC).
6. Prueba de marcha estática de Unterberger³ (UN).

- Tras la realización de cada prueba, el examinador anotará un factor de calidad que refleje su confianza en la fiabilidad de la medida realizada (por ejemplo, BUENA, REGULAR o MALA). En caso de medidas de calidad pobre, se aconseja la repetición de éstas, siempre y cuando las pruebas adicionales no se vean afectadas por el cansancio o el discomfort del sujeto.

Protocolo de medida antropométrica

En el formulario de posturografía se recogen las medidas a tomar de cada paciente. Se recomienda mantener una postura normalizada para la toma de datos y que sea siempre la misma persona la que realice dichas medidas. Las medidas recomendadas son:

- Estatura
- Anchura de hombros
- Anchura de caderas
- Peso
- Longitud de ambos pies
- Anchura máxima de los antepiés
- Anchura máxima de los retropiés
- Índices de Chippeaux a partir de una pedigráfica. En caso de no disponer de pedígrafo, opcionalmente, se recomienda medir la anchura mínima de los mediopiés.

Análisis biomecánico del equilibrio

Las pruebas de estabilometría generan una serie de registros objetivos y repetibles que documentan el estado del equilibrio de un sujeto. Es a partir del análisis de los registros que es posible hacer la interpretación clínica de dicha función.



²Para realizar la prueba de Romberg, el sujeto deberá colocarse en el centro de la plataforma con los pies juntos, los brazos extendidos a los lados del cuerpo; procurará permanecer lo más quieto posible, sin realizar movimientos que puedan interferir en la medición.

³La prueba de Unterberger consiste en que el sujeto debe realizar un movimiento alternativo de ambos miembros inferiores que simulen la marcha, sobre el mismo punto de partida, es decir, sin desplazamiento del sitio y con los ojos cerrados. Para ello, deberán colocarse sus pies lo más próximo al borde de la plataforma (en el límite del eje Y negativo).

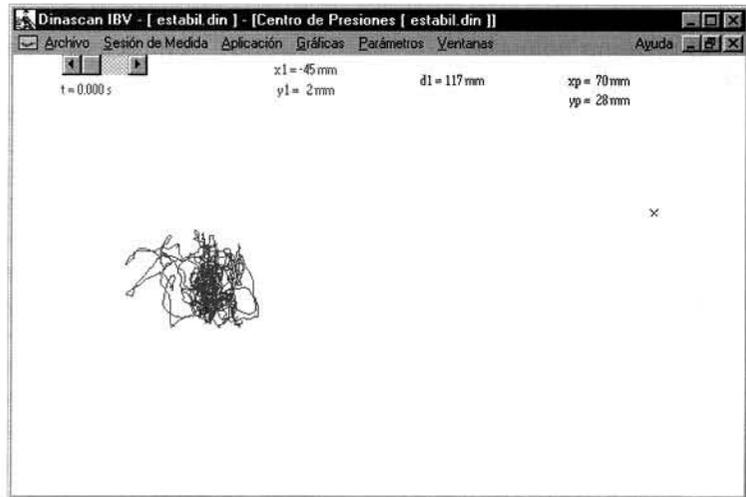
Morfología de las curvas de posturografía en el equilibrio normal

Utilizando la Aplicación de Estabilometría de Dinascan/IBV es posible la representación del punto de aplicación de las cargas en función del tiempo, también conocida como la evolución del centro instantáneo de presiones. Si se escoge dentro del programa la Aplicación General también es posible visualizar las fuerzas de reacción del sujeto en función del tiempo. El resto de representaciones gráficas actualmente disponibles en modo generalizado no tiene interés para el estudio del equilibrio, aunque sí en marcha.

Gráfica de la Evolución del Punto de Aplicación

En esta gráfica se aprecia la evolución del punto de aplicación de la carga del individuo a lo largo de la prueba. Si el sujeto no se moviera en absoluto, el punto de aplicación representaría la proyección sobre el suelo de su centro de gravedad. Sin embargo, el sujeto ejerce fuerzas para mantener el equilibrio, lo que genera ligeras aceleraciones del cuerpo y conduce a ligeros movimientos. Por ello, el punto de aplicación se desplaza obedeciendo a dichas fuerzas de reacción y reflejando indirectamente la oscilación del centro de gravedad del sujeto.

Las gráficas con trayectorias oscilantes y muy dispersas son características de sujetos con control postural deficitario que no son capaces de mantener su postura sin necesidad de desplazar significativamente los segmentos de



Gráfica de evolución del Punto de Aplicación

Las fuerzas medio-laterales (FY) y antero-posteriores (FX) reflejan la reacción ante desviaciones del centro de gravedad del sujeto de la línea de acción de la fuerza de apoyo

su cuerpo y, por ello, también su centro de gravedad. Dispersiones elevadas y áreas barridas por dicha trayectoria más altas que en población normal son indicativas de trastornos.

Es posible seguir la evolución del punto de aplicación utilizando el cursor sobre las gráficas de coordenadas o las teclas de avance.

Gráfica de Fuerzas Reacción-Tiempo

Es posible visualizar estas gráficas empleando el modo de Aplicación General de Dinascan/IBV. Estas curvas son análogas a la representación estándar de marcha humana, aunque en este caso (al tratarse de un gesto cuasi-

estático) no muestran ni una forma típica ni una amplitud significativa. Sólo la fuerza vertical (FZ) posee una magnitud que, en término medio, equivale al peso del individuo. Las demás fuerzas representan la reacción muscular del cuerpo para alcanzar una correcta estabilización postural.

Las fuerzas medio-laterales (FY) y antero-posteriores (FX) reflejan la reacción ante desviaciones del centro de gravedad del sujeto de la línea de acción de la fuerza de apoyo. Existe, por tanto, una relación estrecha entre dichas fuerzas y la trayectoria del punto de aplicación. Como norma general, cuanto mayor sea la amplitud de dichas fuerzas tangenciales, mayor será la energía que invierta el sujeto en mantener su posición. Cuando el mantenimiento de una postura suponga un gasto metabólico excesivo, ello será indicativo de algún tipo de trastorno.

Parámetros cinéticos de la posturografía

El patrón de equilibrio se



compone de una serie de parámetros, los cuales son calculados de forma automática por la aplicación Dinascan/IBV a partir de la evolución del punto de aplicación exclusivamente. Éstos son:

- Desplazamiento medio del punto de aplicación en el eje de ordenadas (X).
- Desplazamiento medio del punto de aplicación en el eje de abscisas (Y).
- Desplazamiento medio total del punto de aplicación, desde el origen, en línea recta (I).
- Ángulo del desplazamiento formado por la anterior recta y el eje OY, siendo positivo hacia la derecha y negativo hacia la izquierda.
- Dispersión en x del punto de aplicación (Dx), que equivale a la desviación típica de dicha coordenada.
- Dispersión en y del punto de aplicación (Dy), que equivale a la desviación típica de dicha coordenada.
- Área media barrida por el punto de aplicación (A), que se calcula a partir de las dispersiones en x e y.
- Distancia recorrida por el punto de aplicación (D).
- Velocidad media de desplazamiento del punto de aplicación (V), que se calcula dividiendo la distancia entre la duración de la prueba.

Los parámetros con una mayor interpretabilidad y repetibilidad son las dispersiones, el área y la velocidad media del punto de aplicación.

Análisis clínico del equilibrio

La mayor parte de los estudios que aparecen en la bibliografía específica se han circunscrito a una compa-

The screenshot shows a software window titled 'Dinascan IBV - [estabil.din] - [Parámetros Estabilometría [estabil.din]]'. The menu bar includes 'Archivo', 'Sesión de Medida', 'Aplicación', 'Gráficas', 'Parámetros', 'Ventanas', and 'Ayuda'. The main content area is titled 'Global' and 'Parámetros cinéticos del centro de presiones'. It displays the following data:

<u>Desplazamiento medio</u>		
en el eje x	:	1.03 mm
en el eje y	:	7.07 mm
total	:	7.14 mm
<u>Dirección desplazamiento</u>	:	8.32 °
<u>Dispersión</u>		
en el eje x	:	5.09 mm
en el eje y	:	5.53 mm
<u>Area barrida aproximada</u>	:	109.79 mm ²
<u>Distancia recorrida</u>	:	1371.16 mm
<u>Velocidad media</u>	:	0.03 m/s

ración directa entre patrones, con fines de valoración funcional o seguimiento de un proceso de rehabilitación. Los intentos de normalización de parámetros medidos se han limitado, con frecuencia, a un tratamiento estadístico restringido a pocos parámetros y con aplicaciones muy focalizadas a la patología en estudio.

En la mayor parte de dichos estudios, se adoptaba como *criterio de normalidad* el que los valores resultantes de las pruebas de posturografía se encontraran dentro de un intervalo de ± 2 desviaciones estándar en torno al promedio de esa variable en población sana de edad semejante, aunque este criterio es poco fiable.

Existen diferencias claras entre los mecanismos de compensación del reflejo vestibulo-ocular (VOR) y la compensación del reflejo vestibulo-espinal (VSR). Las

Existen diferencias claras entre mecanismos de compensación del reflejo vestibulo-ocular (VOR) y la compensación del reflejo vestibulo-espinal (VSR)

pruebas de nistagmografía evalúan los primeros, mientras que las pruebas de posturografía lo hacen con el segundo. El estudio del VOR proporciona información más fidedigna para el diagnóstico diferencial de la patología genérica que afecta al sujeto, mientras que los resultados de las pruebas de posturografía se correlacionan mejor con el estado funcional momentáneo del paciente. Ésta reproduce mejor las quejas del paciente, aunque (según algunos autores) no es especialmente sensible para el diagnóstico diferencial.



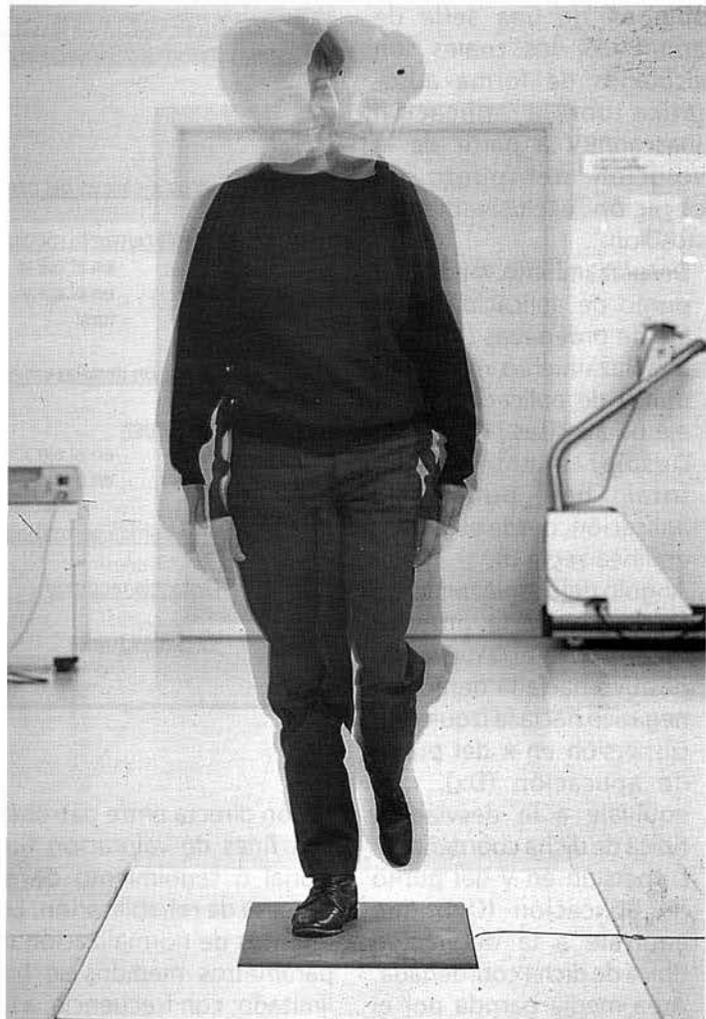
Instrumentación

Mientras que el sexo no parece repercutir significativamente en los parámetros del equilibrio, la edad aparece como un factor determinante

Se ha señalado en bibliografía que la complejidad de la dinámica del movimiento de estabilización postural refleja el grado de trastorno del equilibrio. Los comportamientos patológicos parecen correlacionarse con una disminución de los grados de libertad (complejidad del movimiento) del sistema de regulación postural humano, es decir, la trayectoria del punto de aplicación obedecería en patologías a un patrón más primitivo, con velocidades medias inferiores y con mayores dispersiones.

La oscilación en el eje *antero-posterior* es siempre mayor que en el eje *medio-lateral*. También el temblor postural en este eje parece aportar mayor información para discriminar patologías del sistema de control del equilibrio.

Mientras que el *sexo* no parece repercutir significativamente en los parámetros del equilibrio, la *edad* aparece como un factor determinante en gran número de investigaciones. Se encuentran diferencias significativas en parámetros tales como área, distancia total y velocidad media de excursión del centro de presiones. Se ha comprobado que, con la edad, aumentan la velocidad y el área del balanceo.



Se ha destacado que el equilibrio postural es un proceso no estacionario que se modifica durante el transcurso mismo de la prueba

Se ha destacado que el equilibrio postural es un proceso no estacionario que se modifica durante el transcurso mismo de la prueba. Por ello, los tests no deberían tener una duración de aproximadamente más de un minuto. La variabilidad

intrasujeto, en repeticiones de la misma prueba, no suele considerarse como un fenómeno destacado en la mayoría de los estudios analizados.

Las patologías que afectan directamente al SNC (patologías centrales) tienden a producir un mayor temblor postural que las patologías periféricas que, en muchos casos, no evidencian oscilaciones significativamente distintas de las de población normal.

□