

# Alcance máximo en el plano sagital

*Maximum reach in the sagittal plane  
Portée maximale dans le plan sagittal*

## Autor:

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)

## Elaborado por:

Alfredo Álvarez Valdivia  
CENTRO NACIONAL DE  
CONDICIONES DE TRABAJO. INSHT

*Se desarrolla un modelo para la estimación de los alcances en el plano sagital (en posición de pie y sentado), que es función de las dimensiones antropométricas y del percentil de la población que puede realizar dichos alcances.*

*Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito del diseño de los puestos de trabajo, deben tenerse en consideración las zonas de alcance, las alturas de las superficies de trabajo y los espacios necesarios para poder realizar las tareas, con el fin de evitar las posturas forzadas, así como cualquier otro riesgo para la seguridad y la salud de los trabajadores (INSHT, 2008). Tanto las posturas forzadas como aquellas que se mantienen durante períodos largos de tiempo en posición estática pueden suponer un aumento del riesgo de lesión para los trabajadores (HSE, 2002).

Las posturas forzadas implican que una parte del cuerpo (bien sea un segmento o una articulación) se aleja más allá de la posición neutra y de la zona de trabajo recomendada.

Los músculos son menos eficientes cuando las posturas son forzadas y, por lo tanto, deben realizar mayor esfuerzo físico para llevar a cabo las tareas. Este aumento de la fuerza contribuye a la fatiga y a la tensión musculotendinosa, a un aumento de la fricción y compresión de los tejidos blandos, así como a una disminución del torrente sanguíneo en los músculos y tendones afectados.

El alcance repetido o prolongado, la torsión, la flexión, el trabajo por encima de la cabeza, las posturas de rodillas o en cuclillas son algunas de las posturas forzadas más típicas. Los efectos adversos para la seguridad y la salud pueden verse agravados si las tareas también implican la realización de movimientos repetitivos o la aplicación de fuerzas. Las posturas forzadas pueden estar causadas por: puestos de trabajo incorrectamente diseñados, herramientas, utensilios y prácticas de trabajo deficientes.

En el ámbito del diseño de los puestos de trabajo, deben tenerse en cuenta las dimensiones antropométricas de la población trabajadora para que los elementos que conforman el puesto no impliquen alcances superiores a los límites de los distintos segmentos corporales. Por lo tanto, es útil desarrollar un modelo formal que permita

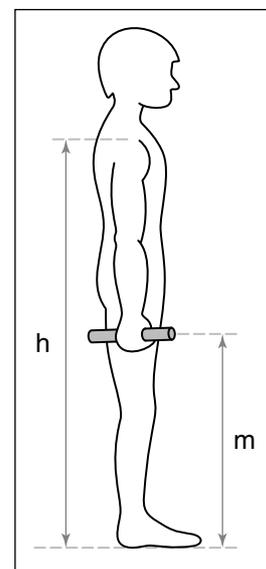
estimar los alcances, tanto para diferentes poblaciones como para diferentes percentiles de estas poblaciones.

## 2. ALCANCE EN POSICIÓN DE PIE EN EL PLANO SAGITAL

En posición de pie, se pueden utilizar dos dimensiones antropométricas para estimar el alcance en el plano sagital: la altura de los hombros y la altura del tercer metacarpiano (figura 1). La definición de éstas, según Carmona (2001), es:

- Altura de los hombros. Es la distancia vertical desde la superficie de apoyo de los pies (suelo) al punto más elevado del acromión. Corresponde a la dimensión 4.1.4 de la norma UNE-EN ISO 7250-1:2010.
- Altura del tercer metacarpiano. Es la distancia vertical desde la superficie de apoyo de los pies (suelo) hasta la cabeza del tercer metacarpiano. La correspondencia más cercana en la norma UNE-EN ISO 7250-1:2010 es la altura del puño (eje del puño), que se define como la distancia vertical desde el suelo hasta el eje de prensión del puño (dimensión 4.4.4).

Los valores proporcionados por Carmona (2001) se muestran en la tabla 1, donde el número entre paréntesis indica la referencia de la dimensión en la norma UNE-EN ISO 7250-1:2010.



*Figura 1. Dimensiones antropométricas con el sujeto en posición de pie.*

HOMBRES		MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
4 (4.1.4)	(h) Altura de los hombros	1414,62	63,68
15 (4.2.4)	(s) Altura de los hombros, sentado	590,36	29,85
21 (4.2.12)	(p) Longitud de la pierna	437,99	25,65
41 (4.4.4)	(m) Altura del tercer metacarpiano	746,38	40,51

MUJERES		MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
4 (4.1.4)	(h) Altura de los hombros	1320,09	57,66
15 (4.2.4)	(s) Altura de los hombros, sentado	556,32	29,04
21 (4.2.12)	(p) Longitud de la pierna	399,41	26,17
41 (4.4.4)	(m) Altura del tercer metacarpiano	706,94	36,61

Tabla 1. Dimensiones antropométricas en milímetros de la población laboral española.

A continuación se desarrollan las expresiones para el cálculo de las coordenadas cartesianas correspondientes al alcance en posición de pie y en el plano sagital. La altura de los hombros y la altura del tercer metacarpiano se simbolizan mediante las variables  $h$  y  $m$  respectivamente. La ecuación 1 muestra el cálculo de las dos componentes cartesianas del alcance, que son función del ángulo  $\theta$  de flexo-extensión del hombro.

$$A_x = \cos\theta (h - m) \quad [1]$$

$$A_y = h - \text{sen}\theta (h - m) = (1 - \text{sen}\theta) h + m \text{sen}\theta$$

Como las variables  $h$  y  $m$  tienen asociada una distribución de probabilidad, entonces el alcance, en sus componentes horizontal ( $A_x$ ) y vertical ( $A_y$ ), tendrá asociado un error en forma de desviación estándar. Teniendo en cuenta que el alcance es una combinación lineal de las variables  $h$  y  $m$ , la varianza puede calcularse siguiendo la propuesta de Kroemer et al. (2010).

La ecuación 2 muestra el cálculo de la varianza de la componente de abscisas del alcance, donde  $s_h$  y  $s_m$  son las desviaciones estándar de la altura de los hombros y la altura del tercer metacarpiano, respectivamente,  $cov_{hm}$  es la covarianza entre las variables  $h$  y  $m$ , y  $r_{hm}$  es el coeficiente de correlación de Pearson entre dichas variables. Dado que las dimensiones antropométricas del cuerpo

humano no son independientes unas de otras, esta covarianza es necesaria para contemplar la correlación entre las mismas, en este caso entre  $h$  y  $m$ .

[2]

$$S_{A_x}^2 = \cos^2\theta (s_h^2 + s_m^2 - 2 \text{cov}_{h,m}) = \cos^2\theta (s_h^2 + s_m^2 - 2 r_{h,m} s_h s_m)$$

La ecuación 3 muestra el desarrollo para la obtención de la varianza de la componente de ordenadas del alcance. En este caso es necesario realizar varios pasos intermedios, ya que el valor de  $A_y$  (ecuación 1) es una combinación doble de las variables  $h$  y  $m$ .

[3]

$$S_{A_y}^2 = (1 - \text{sen}\theta)^2 s_h^2 + \text{sen}^2\theta s_m^2 + 2 \text{sen}\theta (1 - \text{sen}\theta) s_h s_m$$

$$S_{A_y}^2 = s_h^2 + \text{sen}^2\theta (s_h^2 + s_m^2 - 2s_{h,m}) - 2 \text{sen}\theta (s_h^2 - s_{h,m})$$

$$S_{A_y}^2 = s_h^2 + \text{sen}^2\theta (s_h^2 + s_m^2 - 2r_{h,m} s_h s_m) - 2 \text{sen}\theta (s_h^2 - r_{h,m} s_h s_m)$$

El coeficiente de correlación  $r_{hm}$  expresa la relación lineal y la proporcionalidad entre las variables  $h$  y  $m$ . Carmona (2003) calculó los coeficientes de correlación para las diferentes dimensiones antropométricas de la población laboral española. La tabla 2 presenta los valores en hombres y mujeres para las dimensiones utilizadas en

$r_{i,j}$ hombres	h (4.1.4)	s (4.2.4)	p (4.2.12)	m (4.4.4)
h (4.1.4)	1			
s (4.2.4)	0,724	1		
p (4.2.12)	0,755	0,478	1	
m (4.4.4)	0,840	0,654	0,555	1

$r_{i,j}$ mujeres	h (4.1.4)	s (4.2.4)	p (4.2.12)	m (4.4.4)
h (4.1.4)	1			
s (4.2.4)	0,736	1		
p (4.2.12)	0,766	0,547	1	
m (4.4.4)	0,826	0,682	0,559	1

Tabla 2. Coeficiente de correlación entre las dimensiones antropométricas utilizadas.

este texto (entre paréntesis se indica la referencia de la dimensión en la norma UNE-EN ISO 7250-1:2010).

Según Carmona (2003), las dimensiones antropométricas de la población laboral española siguen una distribución normal y, debido a que el alcance calculado (ecuación 1) es una combinación lineal de dimensiones antropométricas, éste también tendrá una distribución normal de probabilidad. En esta situación, los percentiles del alcance se calculan según la expresión 4 (Kroemer et al., 2010).

$$p = A_i + z s_{A_i} \quad [4]$$

donde  $z$  es una variable normal estandarizada cuyo valor es función del percentil que se quiere calcular. En la tabla 3 se muestran algunos de los valores más habituales de  $z$ .

PERCENTIL	$z$
1	-2.326
2.5	-1.960
5	-1.645
10	-1.282
50	0.000
90	1.282
95	1.645
97.5	1.960
99	2.326

Tabla 3. Valores típicos de la variable normal estandarizada  $z$ .

Según Greene y Hechman (1997), los ángulos de rotación del hombro en función del plano de movimiento toman los valores que se muestran en la tabla 4.

PLANO	MÁXIMO	MÍNIMO
Flexión/extensión	62	-167
Rotación interna/externa	69	-104
Aducción/abducción	184	-0.01

Tabla 4. Valores de rotación del hombro en grados sexagesimales.

La figura 2 muestra una representación gráfica del alcance (ecuación 4) en el plano sagital y en posición de pie con los datos antropométricos (tabla 1) del percentil 5 de la población laboral masculina y del percentil 5 de la población laboral femenina. De esta forma, los objetos situados a estas distancias podrán ser alcanzados por el 95% de la población laboral masculina en un caso y el 95% de la población laboral femenina en el otro.

En la figura 2 se puede observar que, si bien el alcance para hombres y mujeres corresponde al de un arco de circunferencia, ambos arcos no son concéntricos debido a que la altura del hombro toma valores diferentes en cada caso.

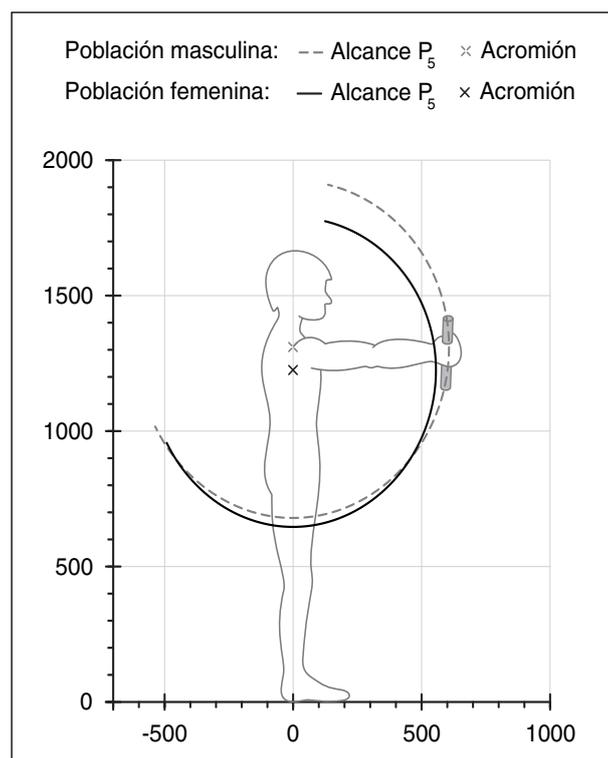


Figura 2. Alcances (en mm) en posición de pie.

### 3. ALCANCE EN POSICIÓN DE SENTADO EN EL PLANO SAGITAL

Para estimar el alcance en posición de sentado, es necesario emplear más dimensiones antropométricas que las utilizadas en posición de pie. La altura del hombro y la altura del tercer metacarpiano, definidas en el apartado anterior, son imprescindibles para calcular la longitud del brazo. No obstante, dado que no existe una altura medida desde el suelo hasta el hombro en posición de sentado, es necesario utilizar otras dos dimensiones —altura de los hombros sentado y longitud de la pierna (figura 3)— para estimar esta dimensión. Según Carmona (2001), su definición es la siguiente:

- Altura de los hombros (sentado). Es la distancia vertical desde la superficie horizontal de asiento hasta el punto más elevado del acromión. Corresponde a la dimensión 4.2.4 de la norma UNE-EN ISO 7250-1:2010.

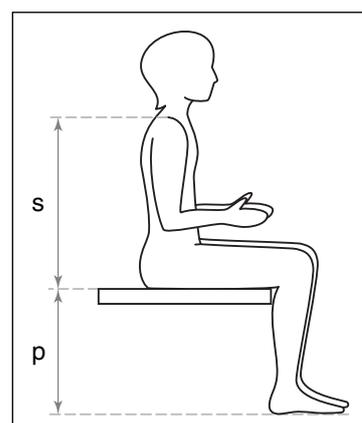


Figura 3. Dimensiones antropométricas en posición de sentado.

- Longitud de la pierna (altura del poplíteo). Es la distancia vertical desde la superficie de apoyo de los pies hasta la superficie inferior del muslo inmediata a la rodilla, con ésta doblada en ángulo recto. Corresponde a la dimensión 4.2.12 de la norma UNE-EN ISO 7250-1:2010.

El desarrollo de las expresiones matemáticas para estimar el alcance en posición de sentado es el mismo que en el caso correspondiente a la posición de pie, con la diferencia de que el número de variables es mayor en este caso.

Las componentes cartesianas de este alcance, parametrizadas en función del ángulo  $\theta$ , se muestran en la ecuación 5. Se comprueba que la componente de abscisas no presenta variación alguna respecto a la calculada anteriormente, mientras que la de ordenadas adopta una forma similar, a pesar de ser función de cuatro variables en lugar de dos.

$$\begin{aligned} A_x &= \cos \theta (h - m) \\ A_y &= (s + p) - \sin \theta (h - m) \end{aligned} \quad [5]$$

Las variables  $h$  y  $m$  son las mismas que en el caso anterior: la altura del hombro y la altura del tercer metacarpiario respectivamente. La variable  $s$  corresponde a la altura de los hombros sentado, mientras que la variable  $p$  es la longitud de la pierna (altura poplíteo).

En relación con las varianzas, la componente de abscisas sigue siendo igual que la calculada en posición de pie (ecuación 2), mientras que la componente de ordenadas presenta una expresión diferente (ecuación 6).

Mediante la ecuación 4, y utilizando los datos antropométricos de la tabla 1, se puede calcular el alcance en el plano sagital para cualquier percentil de la población. La

figura 4 muestra estos valores para la posición de sentado y los percentiles 5 de la población masculina y femenina.

Además, según Grandjean (1983), mediante una extensión de pies, piernas, tronco y hombros, los valores calculados pueden superarse en 15 cm, bajo la condición de que esta extensión tenga un carácter casual y no acarree un esfuerzo excesivo. La figura 4 muestra estos límites ocasionales, tanto para hombres como para mujeres, mediante líneas discontinuas.

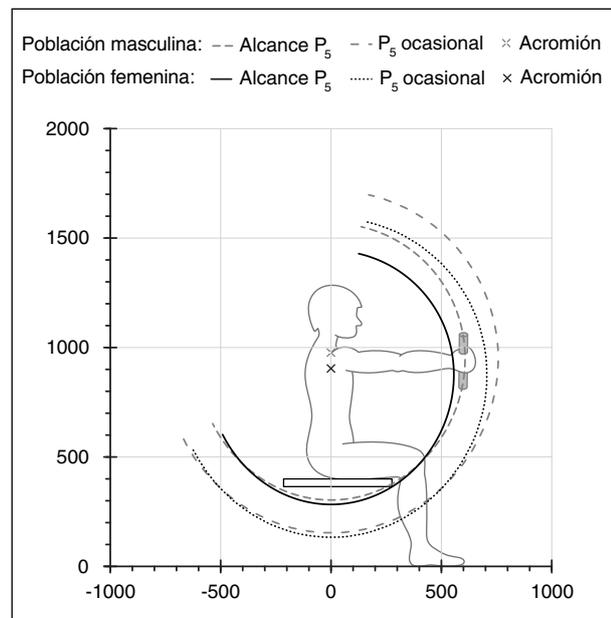


Figura 4. Alcances (en mm) en posición de sentado.

[6]

$$S_{A_y}^2 = s_s^2 + s_p^2 + \sin^2 \theta s_h^2 + \sin^2 \theta s_m^2 + s_{s,p} - \sin \theta s_{s,h} + \sin \theta s_{s,m} + s_{s,p} - \sin \theta s_{p,h} + \sin \theta s_{p,m} - \sin \theta s_{s,h} - \sin \theta s_{p,h} - \sin^2 \theta s_{h,m} + \sin \theta s_{s,m} + \sin \theta s_{p,m} - \sin^2 \theta s_{h,m}$$

$$S_{A_y}^2 = \sin^2 \theta (s_h^2 + s_m^2 - 2s_{h,m}) - 2 \sin \theta (s_{s,h} + s_{p,h} - s_{s,m} - s_{p,m}) + (s_s^2 + s_p^2 + 2s_{s,p})$$

$$S_{A_y}^2 = \sin^2 \theta (s_h^2 + s_m^2 - 2r_{h,m} s_h s_m) - 2 \sin \theta (r_{s,h} s_s s_h + r_{p,h} s_p s_h - r_{s,m} s_s s_m - r_{p,m} s_p s_m) + (s_s^2 + s_p^2 + 2r_{s,p} s_s s_p)$$

## BIBLIOGRAFÍA

CARMONA, A.  
**Datos antropométricos de la población laboral española.**  
*Prevención, Trabajo y Salud, 2001, 14, 22-35.*

CARMONA, A.  
**Aspectos antropométricos de la población laboral española aplicados al diseño industrial.**  
*Madrid: INSHT, 2003.*

GRANDJEAN, E.  
**Precis d'ergonomie.**  
*Paris: Les éditions d'Organisations, 1983.*

GREENE, WALTER B., HECKMAN, JAMES D.  
**Evaluación clínica del movimiento articular.**  
*Barcelona: EdikaMed, 1997.*

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE.  
**Upper limb disorders in the workplace.** 2002.

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO.  
**Ergonomía.** 5ª edición.  
*Madrid: INSHT, 2008.*

KROEMER, KARL H. E., KROEMER, HILTRUD J., KROEMER-ELBERT, KATRIN E. ENGINEERING PHYSIOLOGY.  
**Bases of Human Factors Engineering/Ergonomics.** 4th edition.  
*Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.*

UNE-EN ISO 7250-1:2010. **Definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico. Parte 1: Definiciones de las medidas del cuerpo y referencias (ISO 7250-1:2008).**