

# *Analizando los criterios utilizados en estudios de confort eólico*

*Analysis of the criteria used in pedestrian level wind comfort studies*

Pablo Pais<sup>a</sup>, José Cataldo<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Universidad de la República Uruguay, Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. Montevideo – Uruguay.

\*E-mail: ppais@fing.edu.uy

### *Palabras clave:*

*confort eólico; ensayo en túnel de viento.*

### *Keywords:*

*wind comfort, wind tunnel testing.*

## *Resumen*

*Se analizaron diversos criterios de confort eólico. Se ensayó el comportamiento de personas en el túnel de viento. Se identificaron similitudes y discrepancias entre la opinión de las personas y los criterios analizados. Se obtuvieron valores de velocidad umbral y orden de percepción similares a los establecidos en el criterio propuesto por Penwarden y Wise, 1975.*

## *Abstract*

*Many outdoor pedestrian level wind comfort criteria were analyzed. Tests were done with people in a wind tunnel. Similarities and discrepancies were observed in people's assessments and in comfort criteria. The threshold velocity and the wind perception obtained were similar to those proposed by Penwarden and Wise in 1975.*

## *1 Introducción*

*Los espacios exteriores a las edificaciones, las plazas públicas, los edificios de instituciones, los espacios de recreación y los espacios destinados a la realización de espectáculos son utilizados por personas que desarrollan diferentes actividades. Algunas zonas son destinadas a ser utilizadas como vías de tránsito de peatones, en otras las personas se encuentran sentadas o paradas, en otras tomando alimentos o realizando actividades de recreación. En cada caso, el cuerpo humano tenderá a producir diferentes niveles de energía que*

*Llevará a que requiera una mayor o menor intercambio de calor con el medio que la rodea. Además, tendrá diferentes posturas que lo llevarán a requerir un mayor o menor fuerza para mantenerla. En ese intercambio de calor y la fuerza que se realiza sobre el cuerpo, el viento tiene una participación significativa. La fuerza que se establece sobre el cuerpo de una persona como consecuencia de la interacción con el viento, tendrá una componente media que llevará a que el movimiento sea más o menos dificultoso, pero además la componente fluctuante hará que se perciban efectos sobre la vestimenta u objetos circundantes. En la medida que estos efectos se intensifican, el viento se vuelve un factor molesto induciendo una falta de confort.*

*El confort resulta algo subjetivo y dependiente del estado físico de las personas, interviniendo aspectos tales como la complejión, el estado de salud, el desarrollo corporal y la edad, entre otros.*

*Esta condición inducida por el viento se denomina confort eólico y resulta de la combinación de un conjunto de efectos, como mencionado anteriormente.*

*En la medida que el cuerpo de una persona se expone a vientos de velocidades crecientes, estos efectos se hacen más intensos, llegándose a generarse una situación de riesgo. Esta situación se suele deber a la fuerza que se genera sobre el cuerpo humano, dando lugar a caídas o desplazamientos, aunque también se incrementa el intercambio de calor.*

*Un factor que resulta también significativo en el confort eólico es el nivel de la entalpía del aire caracterizado por la temperatura y la humedad absoluta. En la medida que estos parámetros se incrementan se hace menor la pérdida de calor que experimenta el cuerpo expuesto a un viento de cierta velocidad, motivo por el cual una persona tendería a soportar mayores velocidades de viento sin percibir molestia.*

*Estas consideraciones hacen difícil la propuesta de criterios de confort y riesgo eólico debido a la dispersión en la posible percepción de las diferentes personas, así como debido a la incidencia de otros factores. El desarrollo de criterios de confort eólico implica la posibilidad de aislar el efecto del viento de otros aspectos. En tal sentido, para conocer la opinión que una persona en relación al efecto que le produce el viento, se deberían mantener ciertas condiciones ambientales y, además, esas personas deben pertenecer a un grupo representativo de la sociedad en que se hace el análisis.*

*En la bibliografía, tal como se verá en el próximo capítulo, se identifican diversos criterios de confort y riesgo eólico y que suelen ser los que se aplican cuando se realizan los estudios orientados a su caracterización. Estos estudios se realizan utilizando modelos físicos o numéricos. Los modelos físicos se realizan en un túnel de viento, el cual constituye una herramienta de relevancia en este tipo de estudios. El túnel de viento permite además aislar el efecto del viento de otros factores. Entonces es posible utilizarlo como una herramienta que permita verificar algunos aspectos de los criterios de confort y riesgo eólico haciendo que personas se vean expuestas al efecto del viento.*

## 2 Criterios de confort y riesgo eólico

Un criterio de confort usualmente se compone de tres componentes como son un parámetro, un valor umbral y un nivel de excedencia admisible.

Como parámetro se suele utilizar el valor medio de la velocidad del viento ( $V$ ), la denominada velocidad efectiva ( $V_{ef}$ ) como la define la **Ecuación 1** o un parámetro característico de la velocidad máxima como puede ser el máximo valor de la media en tres segundos de la velocidad ( $V3$ ).

$$V_{ef} = \bar{V} + k\sigma_v \quad (1)$$

En esta ecuación  $\sigma_v$  es el valor medio cuadrático de la componente fluctuante de la velocidad y  $k$  es un coeficiente que podría asignársele valores entre 1 y 3.

En todos los casos, el parámetro se evalúa a una altura del piso del orden de la altura de una persona, asumiéndose alturas de entre 1,75 m y 2 m.

### 2.1 Algunos criterios de confort

En Koss (2006) se presenta una revisión de diferentes criterios de confort eólico, algunos de los cuales se comentan a continuación. Asimismo, este autor realiza una comparación entre los diversos criterios.

Penwarden y Wise (1975) presentan una descripción detallada de los efectos que los vientos de diferentes velocidades medias producen sobre peatones, basado en la escala Beaufort. A partir de observaciones de los efectos del viento sobre las personas y cálculos del nivel del esfuerzo necesario para caminar en contra del mismo, estos autores establecieron la correspondencia entre varios grados de falta de confort y la velocidad media, como se muestra en la **Tabla 1**.

**Tabla 1 – Valores umbrales propuestos por Penwarden y Wise (1975)**

Valor del parámetro $V$ (m/s)	Grado de falta de confort
5	Umbral de falta de confort
10	Definitivamente desagradable
20	Peligroso

Fuente: Penwarden y Wise (1975)

Por otra parte, Murakami y Deguchi (1981) propusieron un criterio de correspondencia entre  $V_3$  como parámetro característico y distintos grados de falta de confort, tomando como base observaciones del desempeño de peatones realizadas en un gran túnel de viento y en la base de un edificio de elevada altura. A partir de tal análisis, estos autores proponen los umbrales presentados en la **Tabla 2**.

**Tabla 2 – Valores umbrales propuestos por Murakami y Deguchi (1981)**

Valor del parámetro (m/s)	Grado de falta de confort
$V_3 < 5$	Desempeño no afectado
$5 < V_3 < 10$	Desempeño afectado
$10 < V_3 < 15$	Desempeño seriamente afectado
$15 < V_3$	Desempeño muy seriamente afectado

**Fuente: Murakami y Deguchi (1981)**

Otros experimentos realizados sobre peatones sugieren que el confort peatonal, además de depender de la velocidad media, depende de las características de las ráfagas. En este caso se puede utilizar la velocidad efectiva definida en la **Ecuación 1**. En la bibliografía se sugiere un valor de hasta 3,5 para el coeficiente  $k$ , según publicaciones de Poulton et al. (1975). Otros investigadores usan los valores de  $k=1,5$  o  $k=1,0$  (ISYUMOV; DAVENPORT, 1975; GANDEMER, 1975, respectivamente).

A partir de experimentos realizados en un túnel de viento y observaciones realizadas sobre el desempeño de peatones, Hunt, Poulton y Munford (1976) sugieren los valores umbrales de  $V_{ef}$  (con  $k=3$ ) que se presentan en la **Tabla 3**.

**Tabla 3 – Valores umbrales propuestos en Hunt, Poulton y Munford (1976)**

Valor del parámetro $V_{ef}$ (m/s)	Grado de falta de confort
6	Umbral de falta de confort
9	Desempeño afectado
15	Dificultad para caminar
20	Peligroso

**Fuente: Hunt, Poulton y Munford (1976)**

Por otra parte, la capacidad de los peatones para ajustarse a vientos fuertes se ve afectada de manera adversa si la exposición a dichos vientos se realiza repentinamente como en el caso de zonas con flujos altamente no uniformes en el espacio. Hunt, Poulton y Munford (1976) advierten que si la velocidad media varía en un 70 % o más en una distancia de menos de 2 m, el efecto del viento en los peatones es más severo que el sugerido anteriormente.

Los criterios que utilizan a  $V_{ef}$  como parámetro son equivalentes o marginalmente menos severos que aquéllos que utilizan  $V_3$ , como se indica en Murakami y Deguchi (1981).

En cuanto a la evaluación de si una situación determinada genera o no falta de confort, existen diferentes criterios sugeridos por distintos autores. Penwarden y Wise (1975) sugieren 5 m/s como el umbral de no confortabilidad, al igual que Murakami y Deguchi (1981), con una frecuencia de excedencia de entre el 10 % y el 20 % del tiempo. Frecuencias de excedencia mayores al 20 % corresponden a situaciones en las que ha habido que tomar medidas para reducir las velocidades de viento en centros comerciales. Apperly y Vickery (1974) sugieren el criterio de confort que se presenta en la **Tabla 4**, que refleja opiniones individuales de frecuencias aceptables de ocurrencia de diversas velocidades de viento, atendiendo diferentes lugares de circulación.

**Tabla 4 – Criterio propuesto por Apperly y Vickery (1974)**

Criterio	Descripción del área	Velocidad limitante (m/s)	Frecuencia de ocurrencia admisible
1	Plazas y parques	Ráfagas ocasionales hasta 6	10 % del tiempo o 1000 h/año
2	Circulación de peatones Vías de acceso	Ráfagas ocasionales hasta 12	1 o 2 veces por mes o 50 h/año
3	Áreas mencionadas	Ráfagas ocasionales hasta 20	5 h/año
4	Áreas mencionadas	Ráfagas ocasionales hasta 25	menos de 1 h/año

**Fuente: Apperly y Vickery (1974)**

Por otra parte, Melbourne (1978) propone como criterio general considerar el sitio inaceptable si existe la posibilidad de que las ráfagas de viento, en lugares de acceso público, alcancen los 23 m/s una vez al año, generalmente aceptable para un sitio por donde las personas caminan si la ráfaga máxima no supera los 16 m/s, para casos de corta exposición recomienda como valor umbral 13 m/s y para larga exposición 10 m/s. La primera situación considera el riesgo que correrían los peatones de sufrir accidentes, mientras que las demás se relacionan con el confort.

*Williams, Soligo y Côte (1992) definen rangos del valor medio de la velocidad aceptables para realizar ciertas actividades, tal como se muestra en la **Tabla 5**, tomando en cuenta la fuerza que ejerce el viento sobre los peatones:*

**Tabla 5 – Valores umbrales propuestos por Williams, Soligo y Côte (1992)**

Valor del parámetro (m/s)	Actividad
0 - 4,2	Sentarse
0 - 6,1	Pararse
0 - 8,3	Caminar

**Fuente: Williams, Soligo y Côte (1992)**

*El criterio de confort considerado en este caso, tomando en cuenta el trabajo de Penwarden y Wise (1975) se basa en que los peatones encontrarán condiciones de viento aceptables para las actividades que se desarrollan en el área de estudio si el 80 % del tiempo el valor medio de la velocidad se encuentra comprendida en los rangos definidos en la **Tabla 5**. También indican que se deben evaluar las condiciones de peligrosidad causadas por el viento en el sitio. Tomando en cuenta la fuerza que el viento ejerce en el área proyectada de un ser humano, concluyen que una velocidad de 26,4 m/s es suficiente para derribar a un peatón. Un evento de este tipo podría presentar una frecuencia máxima admisible de ocurrencia del 0,1 % del tiempo, que corresponde a menos de dos ocurrencias por estación, aproximadamente.*

*Finalmente, los estudios de confort deben tener en cuenta las horas del día o las estaciones en que se registrarán las actividades en la zona objeto de estudio (SIMIU; SCANLAN, 1986; WILLIAMS; SOLIGO; CÔTE, 1992). Esto dependerá de las características de uso del mismo. A modo de ejemplo, el entorno de una piscina se utilizará principalmente durante las horas del día y en verano, en tanto que la circulación en una plaza pública puede darse en cualquier momento.*

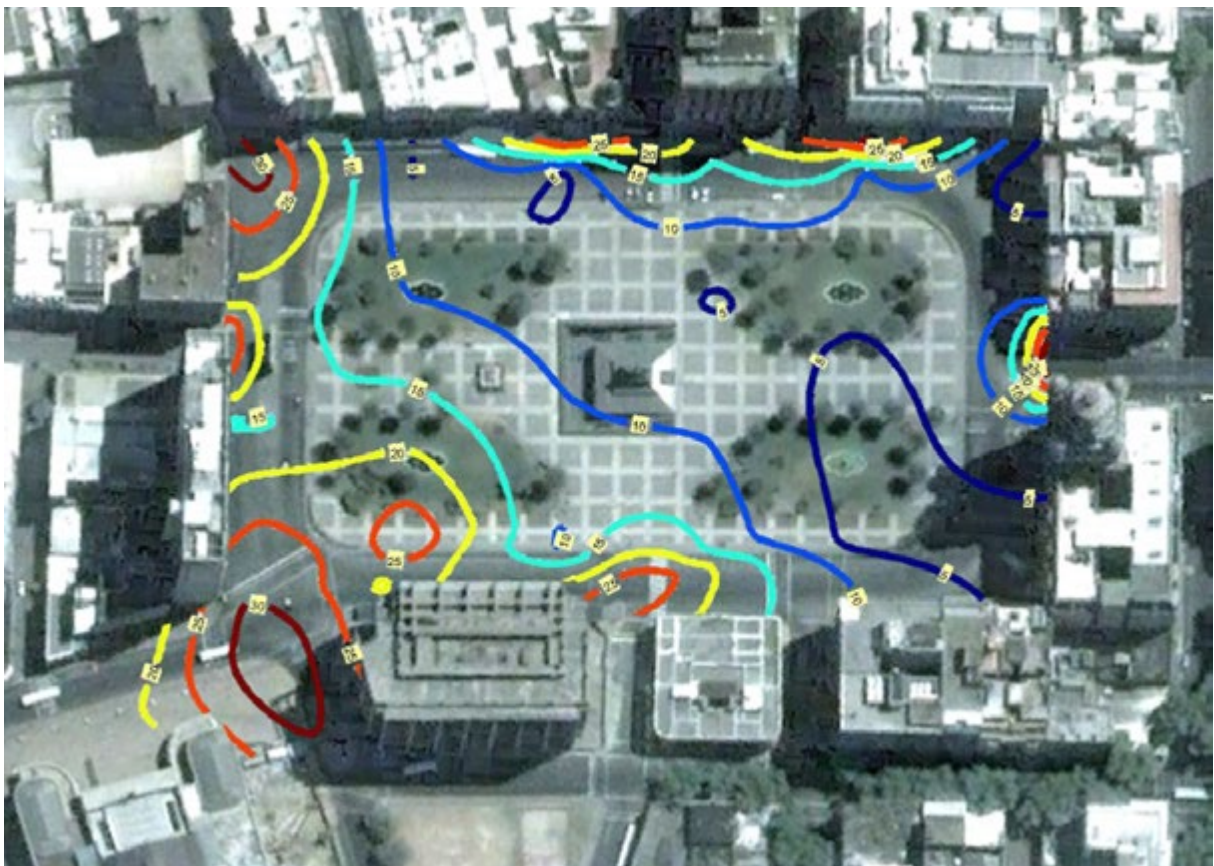
## 2.2 Aplicación de los criterios de confort

*Los diferentes criterios que se describieron en la sección previa establecen diferentes parámetros, valores umbrales y probabilidades de excedencia admisibles. Siguiendo la propuesta de Melbourne (1978) de expresar los diferentes criterios en un gráfico Probabilidad de excedencia – Velocidad media horaria, en Koss (2006) se muestra que dado un clima los criterios resultan similares pues todos se ubican sobre una misma curva de probabilidad.*

El clima de vientos en un sitio de interés dado dependerá de las características del clima en la zona, debido a los forzantes de macro y meso escala meteorológica, así como a los forzantes de micro escala meteorológica como puede ser la interacción entre obstáculos (edificaciones, árboles y topografía) y el viento, o bien cambios en la rugosidad o propiedades termodinámicas del suelo. Como consecuencia de esta interacción se modificará tanto el valor medio de la velocidad como el nivel de turbulencia, lo cual suele analizarse en modelos físicos operados en un túnel de viento o bien con el uso de modelos numéricos.

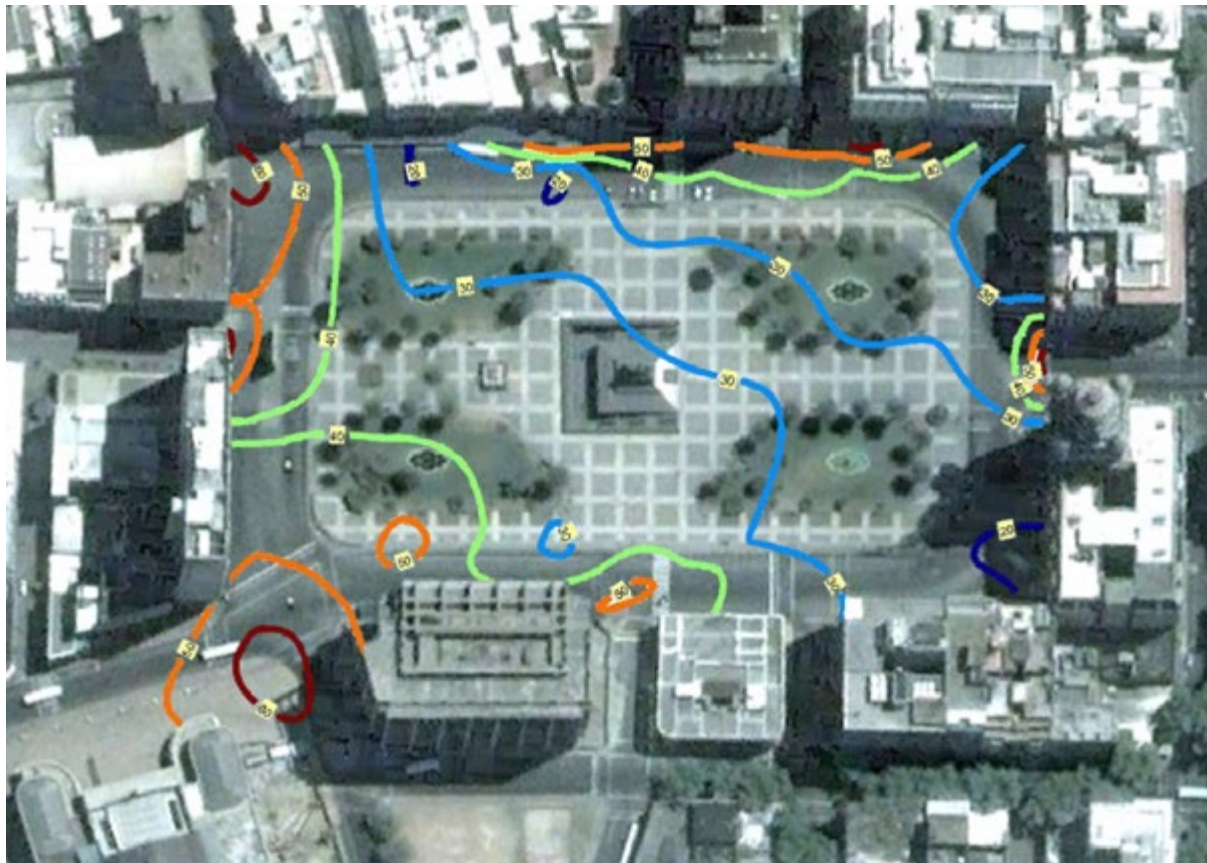
Conociendo series históricas de viento de larga duración características de la zona y los resultados del modelamiento es posible inferir en cada sitio de interés una serie histórica de valor medio de velocidad de viento, así como de velocidad de ráfaga. Luego, es posible construir las curvas de probabilidad que permiten deducir los niveles de excedencia de los umbrales de cada parámetro. A modo de ejemplo, en la **Figura 1** y **Figura 2** se presentan las curvas de igual nivel de excedencia del valor umbral de confort del valor medio de la velocidad (PENWARDEN; WISE, 1975) y de la velocidad efectiva (HUNT; POULTON; MUNFORD, 1976) de un caso analizado en la ciudad de Montevideo.

**Figura 1** – Curvas de igual frecuencia de excedencia del valor medio de velocidad de 5 m/s, Plaza Independencia, Montevideo, Uruguay



Fuente: elaborado por los autores

*Figura 2 - Curvas de igual frecuencia de excedencia de la velocidad efectiva de 6 m/s, Plaza Independencia, Montevideo, Uruguay*



*Fuente: elaborado por los autores*

*Si bien del punto de vista cualitativo ambos resultados serían similares, del punto de vista cuantitativo no lo son. Esto estaría asociado a los elevados niveles de turbulencia producidos como consecuencia de la interacción entre el viento y los edificios.*

*Este tipo de resultado es el que motivó a llevar adelante una actividad experimental que permitiera entender el comportamiento de las personas en diferentes climas de viento.*

### 3 Análisis experimental

El túnel de viento de la Facultad de Ingeniería, que se muestra en la **Figura 3**, fue utilizado por parte de un grupo teatral con el objeto de analizar el efecto que el viento tenía sobre sus cuerpos y a partir de lo cual elaborar una representación. Este grupo se componía de seis personas de entre 25 años y 35 años. Se les planteó llevar adelante una verificación de los criterios de confort eólico propuesto por Penwarden y Wise (1975).

**Figura 3 – Túnel de viento de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay**



**Fuente:** elaborado por los autores

El túnel de viento es de tipo atmosférico con una sección de trabajo de 2,25 m de ancho por 2,0 m de alto y 17 m de longitud. Cada persona involucrada completó un consentimiento informado que incluyó una descripción y un instructivo del ensayo a realizar. Los ensayos tuvieron una duración de 40 min y la velocidad del aire no superó los 17,2 m/s, incrementándose desde velocidad nula. Además, se diseñó un formulario conteniendo los efectos asociados a los criterios de confort presentados por Penwarden y Wise (1975), más quince campos que permiten identificar el orden en que se percibe el efecto y un campo para el tiempo. El campo tiempo es para registrar el instante en que se percibe cada efecto al final del ensayo y así conocer el valor de la velocidad.

En primer lugar, se buscó encontrar la velocidad a la que se percibe cada efecto la primera vez que se expone, sin tomar en cuenta el tiempo de exposición. Luego se diseñaron dos ensayos.

El Ensayo A tuvo como objeto evaluar el efecto de cada persona en forma individual y consistió, con las seis personas estando en simultáneo dentro del túnel, cada una con una copia del formulario diseñado, y un cronómetro. Se encendió el ventilador del túnel en simultáneo con el inicio del cronómetro de cada persona. Se fue incrementando la velocidad del viento a una tasa de 0,1 m/s cada 6,6 s. Las personas caminan de forma aleatoria en la zona de trabajo a fin de que el bloqueo y las turbulencias provocadas por los demás, introduzca un error sistemático. En el momento que una persona registra un evento de la lista, marca el punto en el cronómetro. Se continuó con el aumento de la velocidad a la tasa antes mencionada hasta alcanzar los 17,2 m/s haciéndose todos los registros del formulario. Se apagó el túnel y se procedió a registrar en la planilla los tiempos en los que se produjo cada evento para cada persona. El procesamiento consistió, con el tiempo registrado y la curva de velocidad-tiempo del túnel, determinar la velocidad de viento a la que se registró cada efecto.

El Ensayo B tuvo por objeto conocer el efecto del viento sobre un grupo de personas. Para ello se eligió como efecto de referencia: "Límite de viento agradable en tierra". Se marcaron y numeraron un conjunto de posiciones en el piso del túnel. Estas posiciones estaban en formación de tresbolillo con una separación de dos metros entre líneas. Cada una de las seis personas se posicionó en cada uno de los puntos. Se generó la rampa ascendente igual que el caso anterior, para detectar la velocidad a la que se percibe el efecto buscado. Luego, se fueron cambiando las personas de posición, repitiendo el procedimiento, hasta que todas la personas pasen por todas la posiciones. En la **Figura 4** se presenta los sitios seleccionados, siendo la fila 1 la que se ubicada corriente arriba.

**Figura 4 – Sitios ocupados por las personas durante el ensayo B**

### Posiciones

1		X		
2	X		X	
3		X		
4	X		X	

**Fuente:** elaborado por los autores

En la **Tabla 6**, se resumen los resultados del ensayo A. Se destaca que el formulario dejó filas adicionales como para señalar otros efectos percibidos, los cuales también se incluyen en la **Tabla 6**, además de los efectos consignados por Penwarden y Wise, (1975). En la columna seis se consigna el orden en que se percibió el efecto y luego el valor mínimo, medio, máximo y la desviación estándar de la velocidad, resultante del conjunto de personas, en que se percibió cada efecto.

En la **Tabla 7**, se presenta los resultados del ensayo B. En este caso, se presenta para cada persona ubicada en cada sitio, la velocidad a la cual percibió el efecto planteado. Además, se presenta el valor medio de las velocidades de percepción por persona y por sitio.

**Tabla 6 – Resultados del ensayo A**

Criterio Penwarden y Wise		Velocidad estimada del ensayo						
Nº Rango	Efecto del viento	Rango P. y W.		Nº Efecto	Min.	Max.	Media	Desv. Est
		(m/s)	(m/s)		(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
1 - Corriente de aire suave	Viento imperceptible	0,4	1,5	1	-	-	-	-
2 - Brisa suave	Se siente el viento en la cara	1,6	3,3	2	1,8	2,1	1,9	0,1
3 - Leve brisa	El cabello es movido suavemente	3,4	5,4	3	2,3	3,9	2,9	0,8
	La ropa es movida suavemente	3,4	5,4	4	2,5	3,2	2,8	0,3
4 - Brisa moderada	El cabello es desarreglado	5,5	7,9	5	3,3	5,5	4,6	0,8
5 - Brisa relativamente fuerte	Se siente la fuerza producida por el viento sobre el cuerpo	8	10,7	6	3,1	7,1	5,4	1,5
	Límite de viento agradable en tierra	8	10,7	7	5,7	8,2	6,8	1,0
6 - Brisa fuerte	Dificultad para caminar derecho	8	10,7	8	4,9	10,5	8,6	2,2
	Ruido producido por el viento en los oídos es desagradable	8	10,7	9	7,7	16,7	11,7	3,7
7 - Viento moderado	Inconveniencia para caminar	13,9	17,1	10	4,8	12,4	10,1	3,1
8 - Viento relativamente fuerte	Impide avanzar	17,2	20,7	11	11,0	14,3	13,0	1,3

**Fuente: elaborado por los autores**

Tabla 7 – Resultados del ensayo B

Velocidad límite de viento agradable (m/s)							
Posic. / Pers.	1	2	3	4	5	6	Promedio
1	6,6	6,6	6,9	6,7	8,1	6,7	<b>6,92</b>
2	7,8	7,1	7,2	7,5	8,0	6,3	<b>7,31</b>
3	7,1	6,5	6,1	7,7	7,9	6,1	<b>6,90</b>
4	6,8	6,8	6,3	7,8	8,0	6,9	<b>7,08</b>
<b>Promedio</b>	<b>7,06</b>	<b>6,73</b>	<b>6,64</b>	<b>7,44</b>	<b>7,96</b>	<b>6,49</b>	<b>7,05</b>

Fuente: elaborado por los autores

## 4 Conclusiones

Las personas detectaron los efectos en el orden que se propone en Penwarden y Wise (1975), siendo el valor de la velocidad en que se detectó el efecto similar al propuesto por dicho criterio. Las mayores discrepancias se encuentran en las categorías correspondientes a las mayores velocidades. En esos casos, la percepción se registró a menores valores de velocidad que lo establecido en el criterio de referencia. Se señala que la dispersión en la velocidad de percepción fue baja resultando del orden del 20 %.

Durante el ensayo grupal se registraron valores de velocidad umbral, de detección de falta de confort, mayor a la establecida en el criterio. En este caso se hubiera esperado que la turbulencia producida en la interacción con cada persona hubiera dado lugar a un valor de umbral algo inferior, pero una percepción subjetiva del conjunto de personas dio lugar a un valor mayor.

## 5 Referencias

- APPERLY, L. W.; VICKERY, B. J. The prediction and evaluation of the ground level wind environment. In: AUSTRALASIAN CONFERENCE OF HYDRAULICS AND FLUID MECHANICS, 5., 1974, Christchurch, New Zealand. **Proceedings...** Christchurch: University of Canterbury, 1974.
- GANDEMER, J. **Étude de la tour D.M.A.**: Partie 2, Dètermianction du champ eçde vitesse au voisnagne du complexe bâti de la tour D.M.A., EN-ADYM-75-4C. Nantes, France: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 1975.
- HUNT, J. C. R.; POULTON, E. C.; MUMFORD, J. C. The effects of wind on people; new criteria based on wind tunnel experiments. **Building and Environment**, v. 11, p. 15-28, 1976.
- ISYUMOV, N.; DAVENPORT, A. G. The ground level wind environment in built-up areas. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 4., 1975, London. **Proceedings...** Cambridge: Cambridge University Press, 1975. p. 403-422.
- KOSS, H. H. On differences and similarities of applied wind comfort criteria. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 94, p. 781-797, 2006.
- MELBOURNE, W. H. Criteria for environmental wind comfort. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 3, p. 241-249, 1978.
- MURAKAMI, S.; DEGUCHI, K. New criteria for wind effects on pedestrians. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 7, p. 289-309, 1981.
- PENWARDEN, A. D.; WISE, A. F. E. **Wind environmental around buildings**. London: Department of the Environment, Building Research Establishment, 1975. (Building Research Establishment Report).
- POULTON, E. C.; HUNT, J. C. R.; MUMFORD, J. C.; POULTON, J. The mechanical disturbance produce by steady and gusty winds of moderate strength: skilled performance and semantic assessment. **Ergonomics**, v. 18, n. 6, p. 651-673, 1975.
- SIMIUI, E.; SCANLAN, R. H. **Wind effects on structures**: an introduction to wind engineering. Hoboken: John Wiley & Sons, 1986.
- WILLIAMS, C. J.; SOLIGO, M. J.; CÔTÉ, J. A discussion of the components for a comprehensive pedestrian level comfort criterion. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 41-44, p. 2389-2396, 1992.