

Energía Solar Térmica

Vol 1: Fundamentos (Cap. 4)

Acción del viento sobre colectores solares

Valeria Durañona

Grupo de Eolo Dinámica

Instituto de Mecánica de los Fluidos e
Ingeniería Ambiental (IMFIA)

Facultad de Ingeniería

Universidad de la República



21 de marzo de 2013, Facultad de Ingeniería, UdelaR

Clima de vientos extremos en Uruguay

El clima de vientos extremos de Uruguay suele producir con bastante frecuencia daños materiales, poniendo en riesgo a la población, y en ocasiones provocando pérdidas de vidas humanas



Clima de vientos extremos en Uruguay



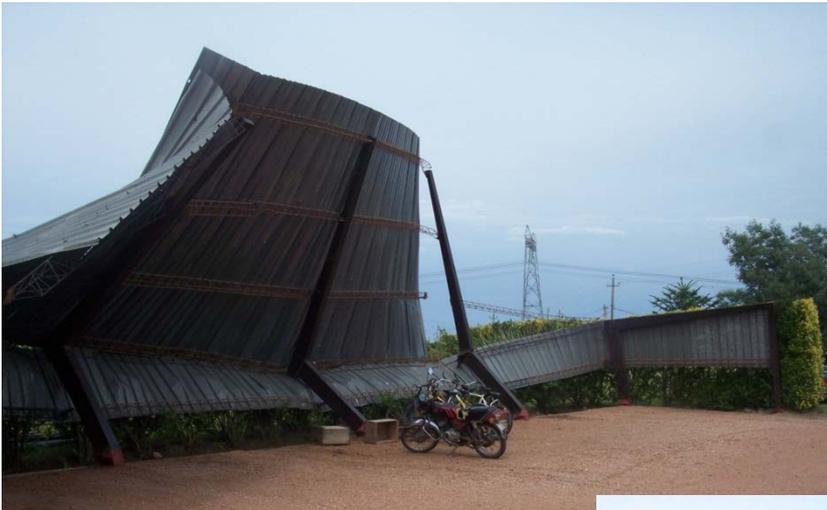
Clima de vientos extremos en Uruguay

Estas escenas nos son comunes, y seguramente estamos acostumbrados a presenciarlas, pero no por ello podemos pasar por alto que nuestro clima de vientos extremos es intenso



Clima de vientos extremos en Uruguay

Distintos tipos de daños por viento



Clima de vientos extremos en Uruguay

Distintos tipos de daños por viento



Clima de vientos extremos en Uruguay

Distintos tipos de daños por viento



Clima de vientos extremos en Uruguay

Distintos tipos de daños por viento



23 de agosto de 2005, Montevideo



10 de marzo de 2002, Joanicó y alrededores (Canelones)



Clima de vientos extremos en Uruguay

Distintos tipos de daños por viento



Clima de vientos extremos en Uruguay

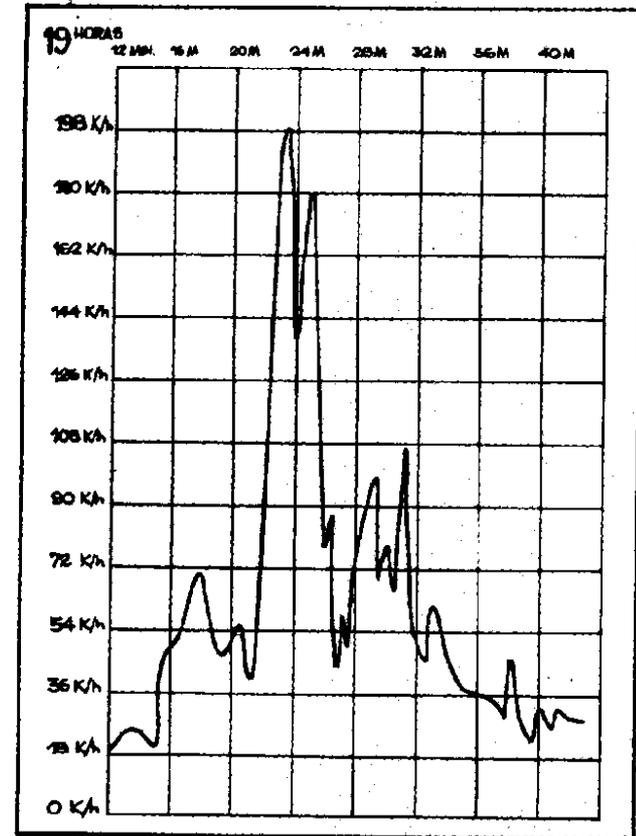
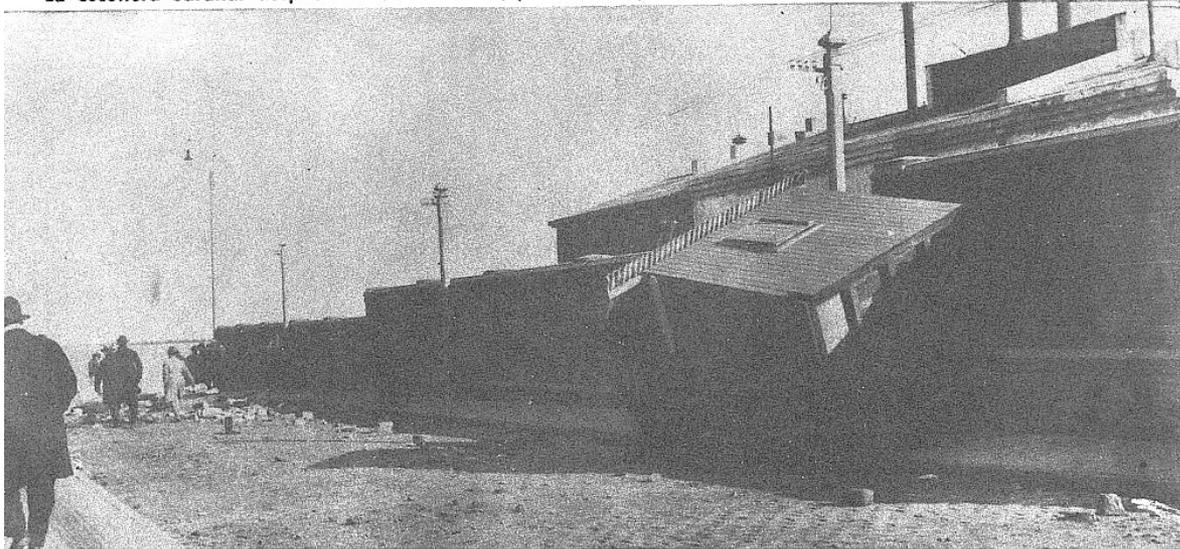
Distintos tipos de daños por viento



Clima de vientos extremos en Uruguay

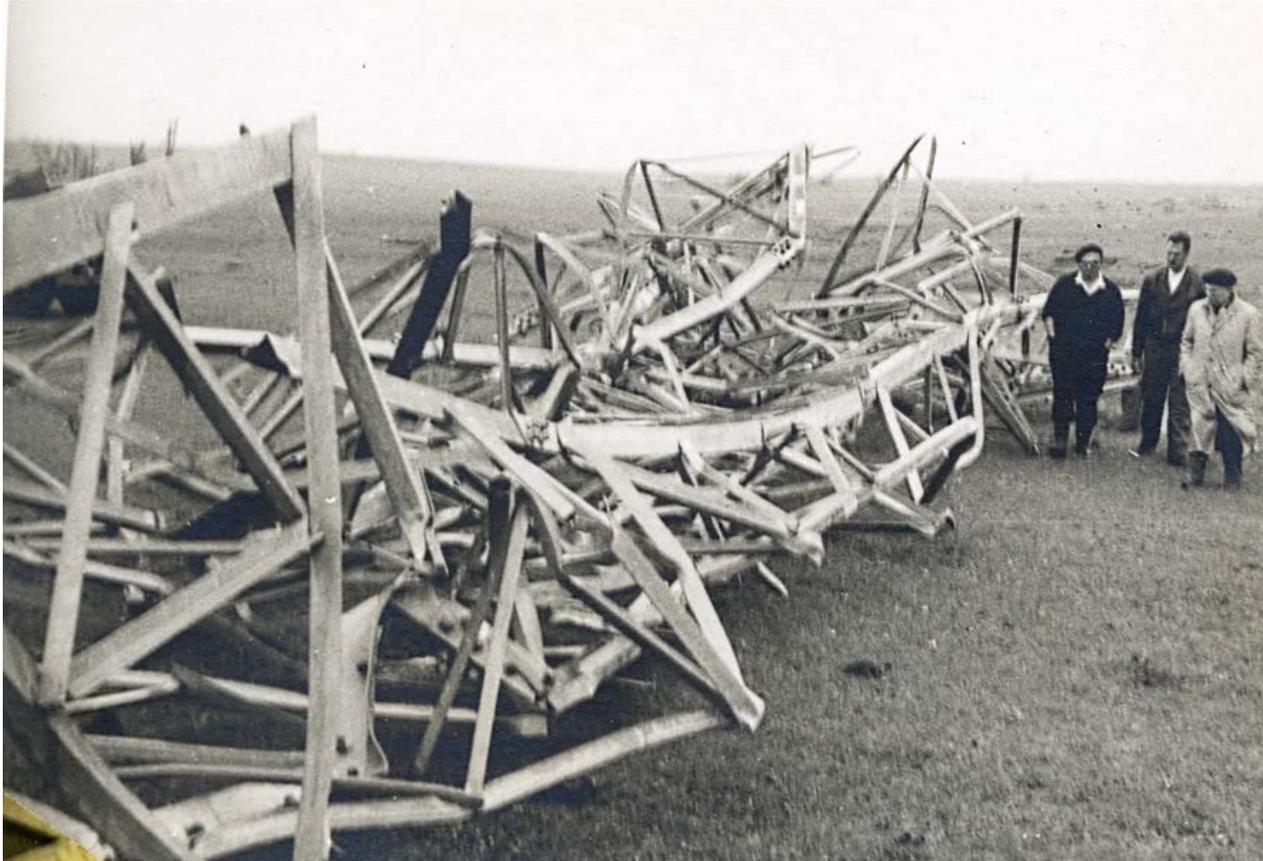
También se tienen registros históricos de tormentas muy intensas sobre Uruguay

La escollera Sarandí después de los destrozos provocados por el temporal del 10 de julio de 1923.



8 de julio de 1935, Sayago, Montevideo

Clima de vientos extremos en Uruguay



30 de octubre de 1963, Trinidad (Flores)

Clima de vientos extremos en Uruguay

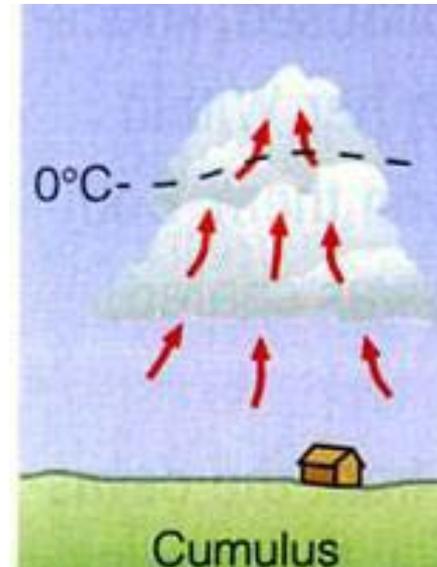


21 de abril de 1970, Fray Marcos (Florida)

Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas

Las tormentas convectivas tienden a formarse cuando aire húmedo y cálido se eleva en una atmósfera inestable



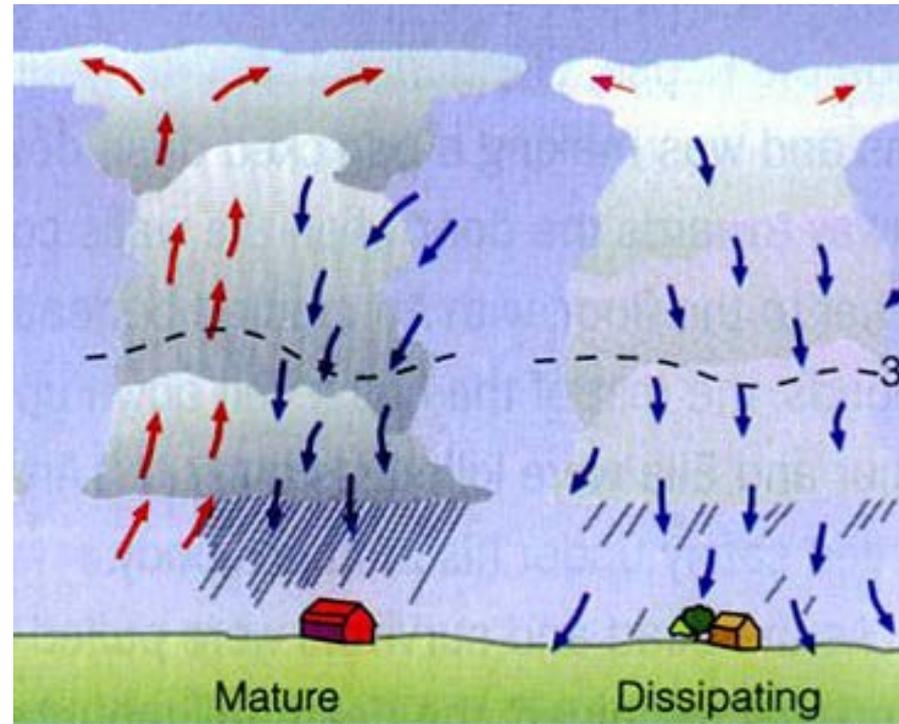
El aire cálido puede elevarse debido a un calentamiento desigual de la superficie terrestre, a efectos del terreno, al encuentro con una masa de aire frío o a vientos convergentes en superficie

Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas

Cuando el aire que se eleva hasta alcanzar temperaturas lo suficientemente bajas, el vapor de agua condensa y puede ocurrir precipitación

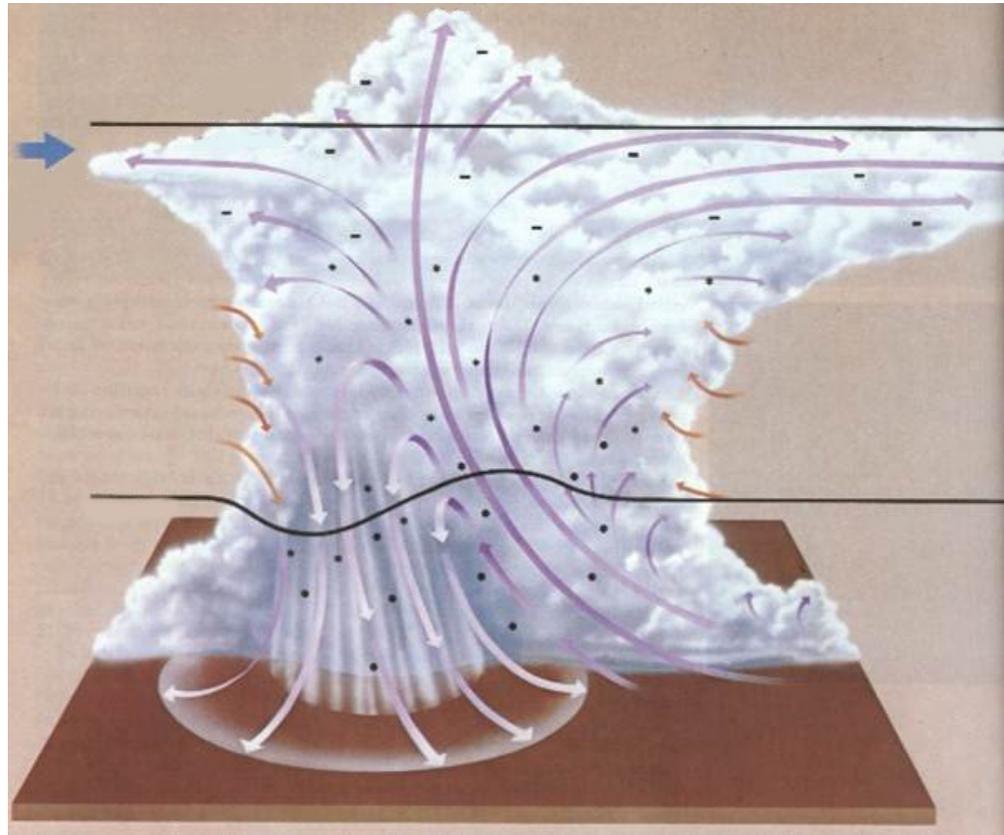
La precipitación enfría y arrastra al aire circundante



Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas

Si el flujo ascendente se ve fortalecido por alguno(s) de los mecanismos, se puede dar lugar a una tormenta convectiva severa, la cual genera corrientes descendentes muy fuertes



Estas tormentas son responsables de vientos y lluvias intensas, y eventualmente pueden producir granizo de gran tamaño y tornados

Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas

Las tormentas convectivas severas producen vientos intensos debido a la formación de fuertes corrientes descendentes



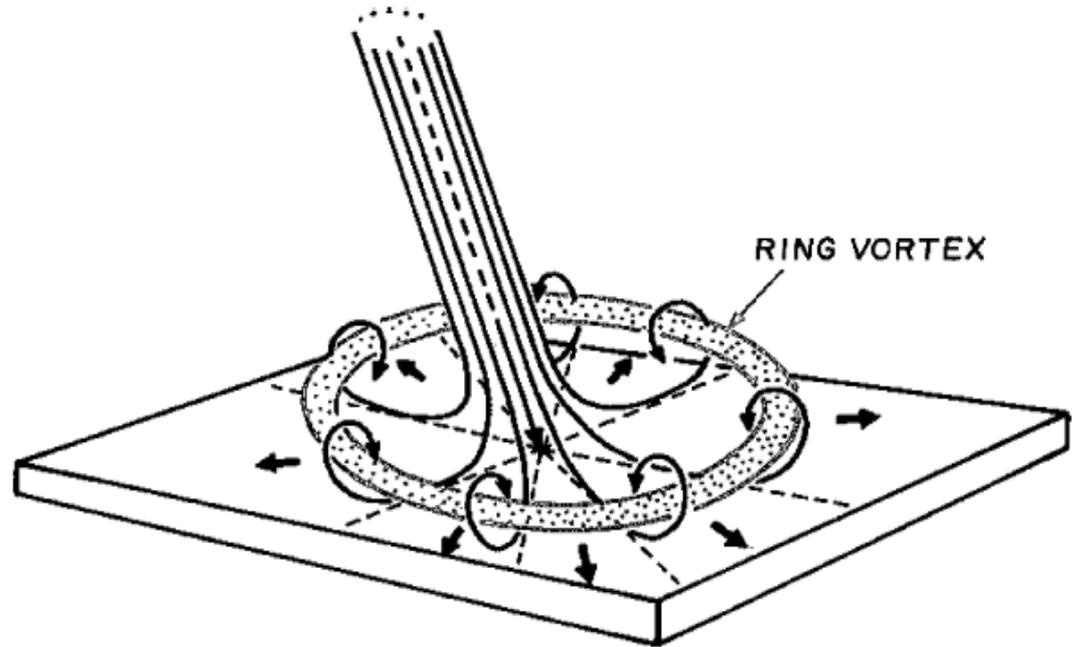
y eventualmente, de tornados

Están generalmente asociadas a la formación de nubes conocidas como Cumulonimbus

Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas

Una corriente descendente se puede modelar como un chorro que al impactar sobre el suelo diverge radialmente, y tiende a formar un anillo a su alrededor

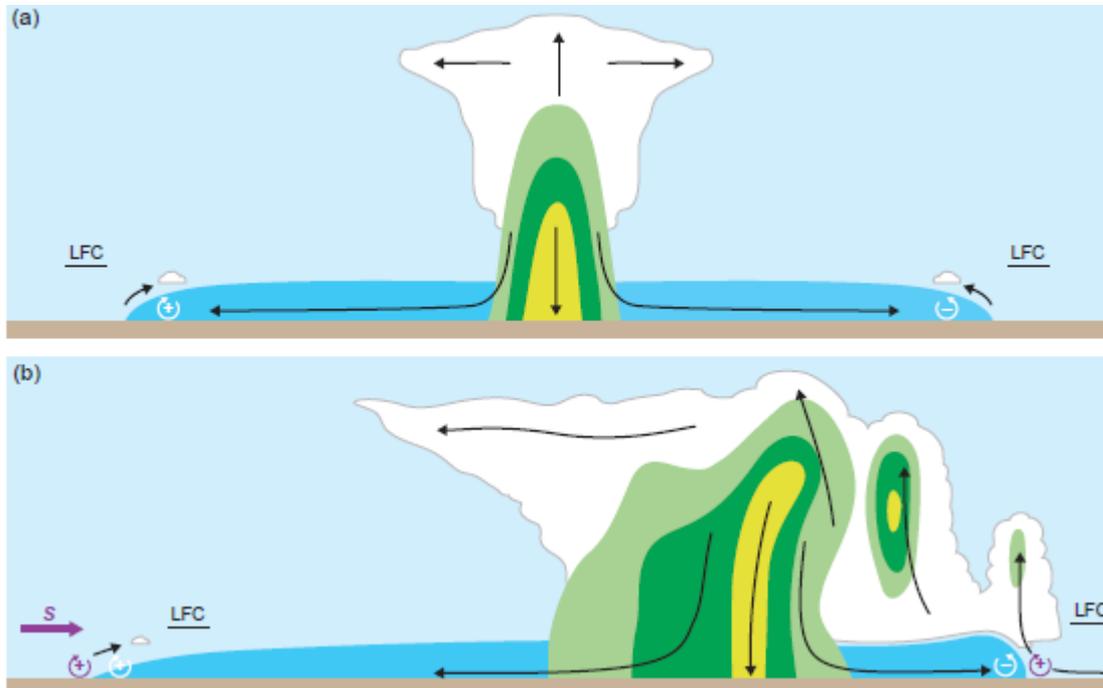


Este anillo va alejándose del centro del chorro luego de su impacto contra el suelo

Eventos meteorológicos responsables

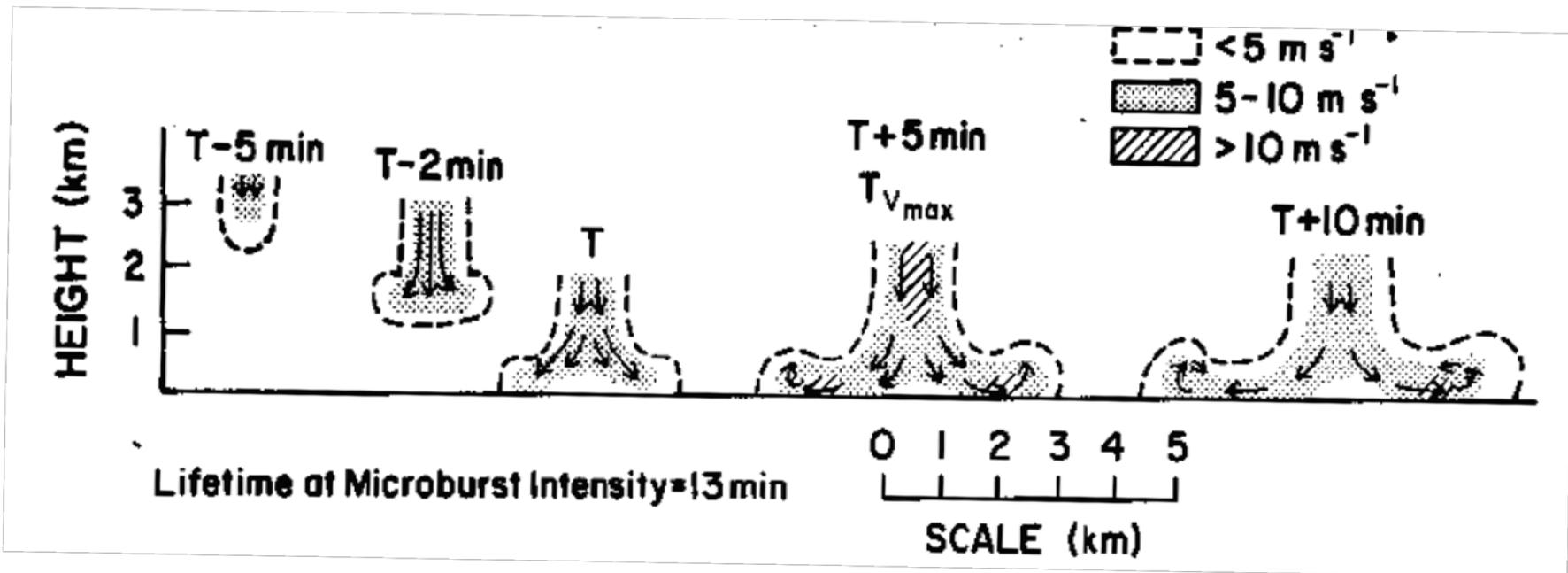
Tormentas convectivas severas

y dejando temperaturas menores que su entorno debido al aire frío que desciende y se expanda



Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas



La escala temporal típica de una corriente descendente es de minutos, y su escala espacial, de kilómetros

y la velocidad de viento máxima generalmente se registra debajo del anillo, a alturas entre los 30 y los 100m

Eventos meteorológicos responsables

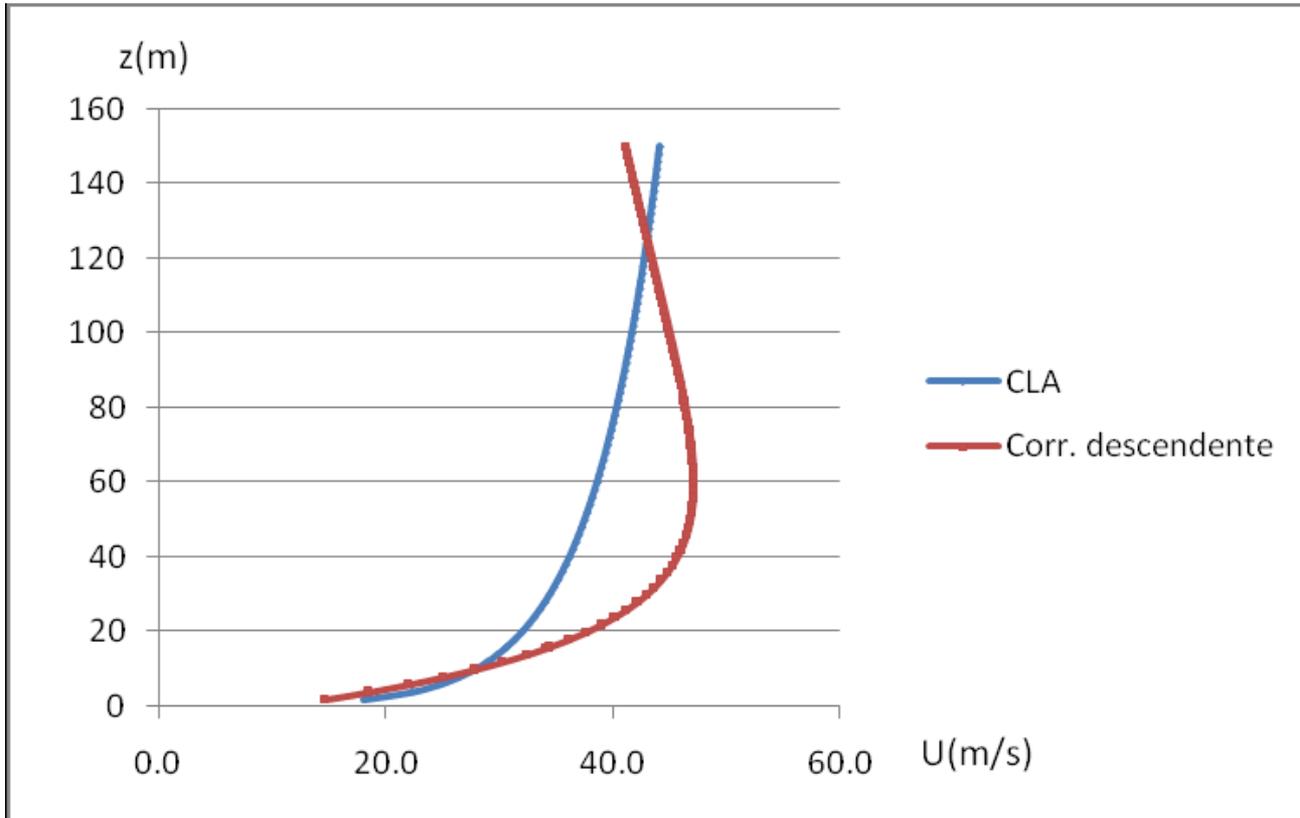
Tormentas convectivas severas



Las corrientes descendentes pueden producir daños en áreas relativamente pequeñas

Eventos meteorológicos responsables

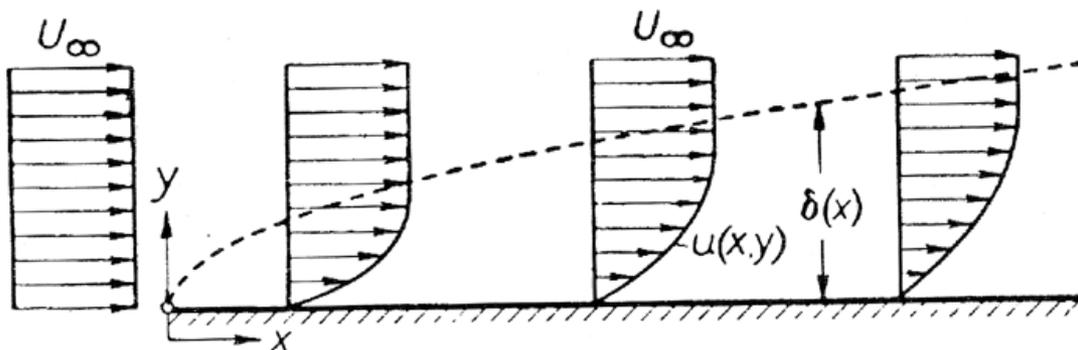
Tormentas convectivas severas



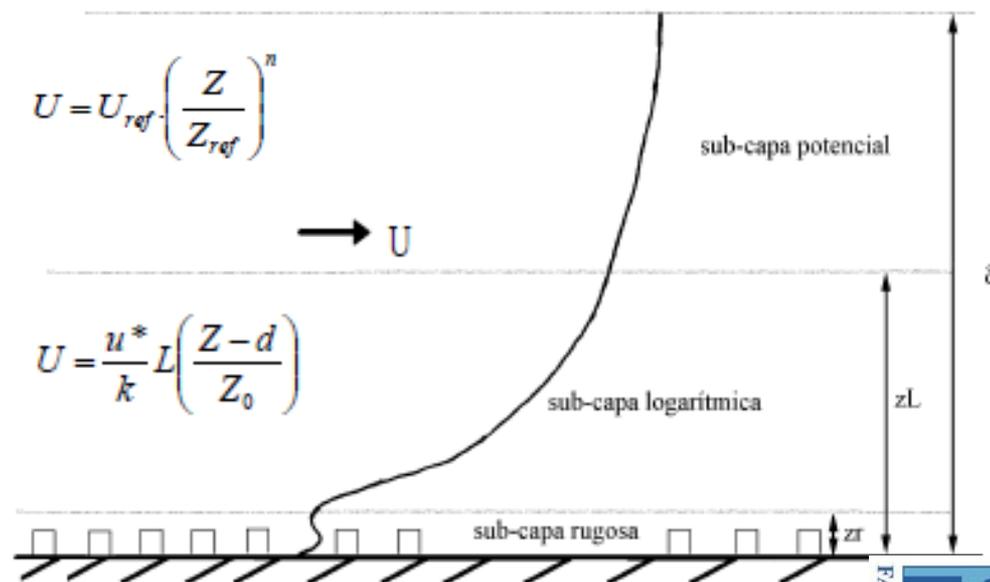
Y la velocidad de viento en altura difiere de la distribución de velocidad de los flujos tipo Capa Límite Atmosférica (CLA)

Eventos meteorológicos responsables

Flujos tipo Capa Límite Atmosférica



Las normas suelen considerar una distribución de velocidad en altura suponiendo que el flujo es de tipo Capa Límite Atmosférica

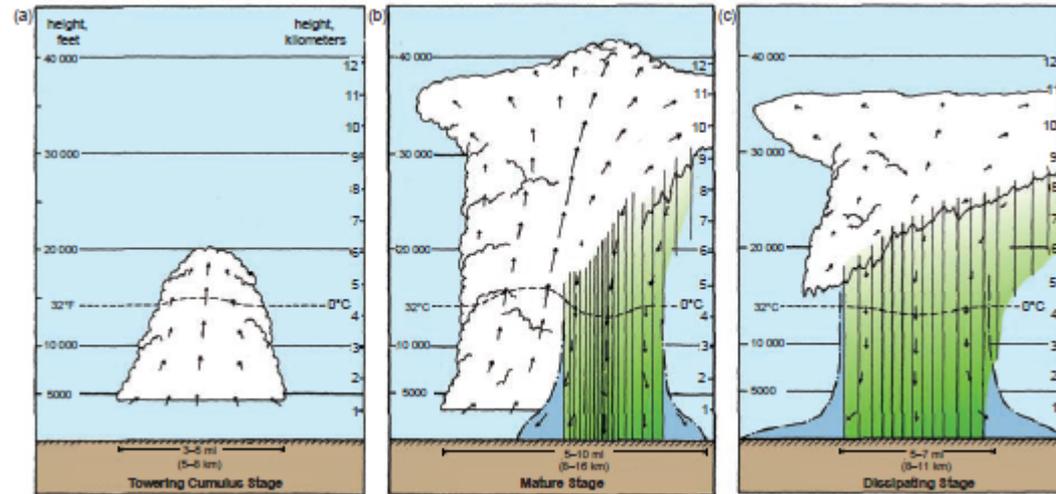


Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas

Una tormenta convectiva puede ocurrir

en forma de
celda aislada



Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas

en forma de
conglomerado
nuboso

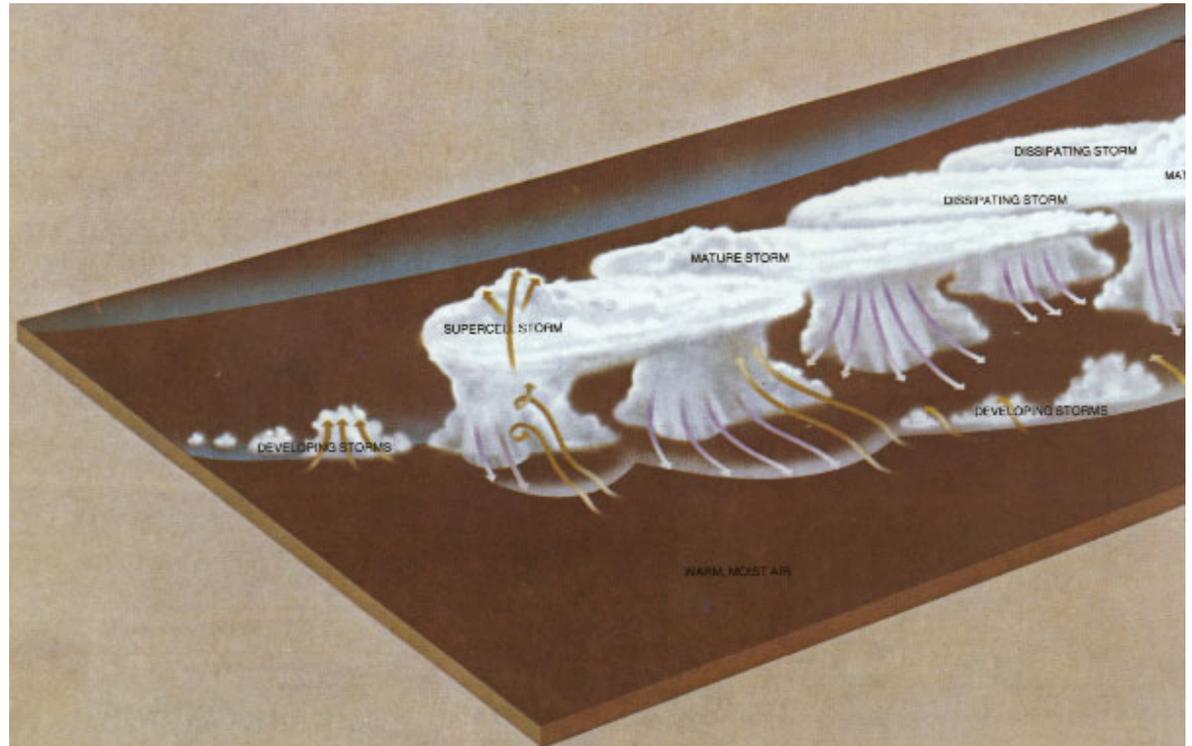


Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas

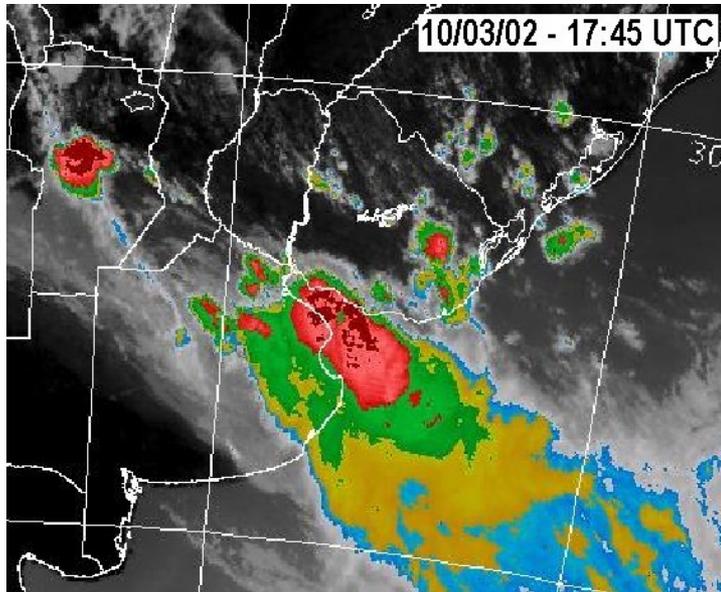
o en forma de línea

En nuestra región las tormentas en línea suelen orientarse de NO a SE y desplazarse del SO al NE, o del O al E



Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas en Uruguay



Río de la Plata – 10/3/2002

Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas en Uruguay



Frente de ráfagas

Punta del Este – 2001



Florida – 29/12/2009

Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas en Uruguay



tornado en Fray Marcos - 1970



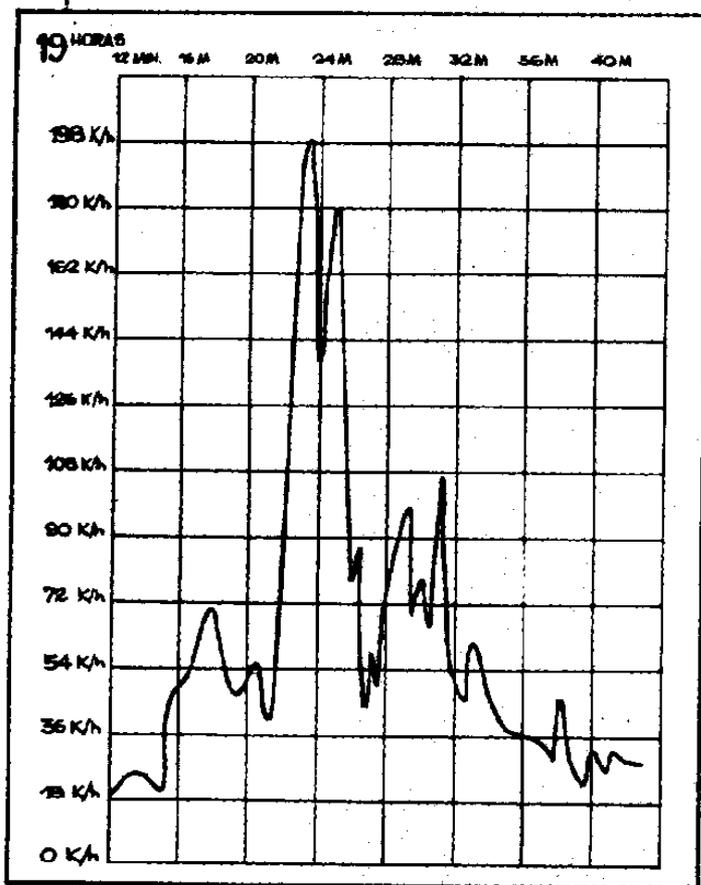
trombas en Colonia- 1988



tornado en Florida - 2008

Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas en Uruguay



Velocidad máxima: 200 km/h

Duración: 5 minutos

Registro de la velocidad durante una corriente descendente en Montevideo (Sayago) en 1935

Eventos meteorológicos responsables

Tormentas convectivas severas en Uruguay

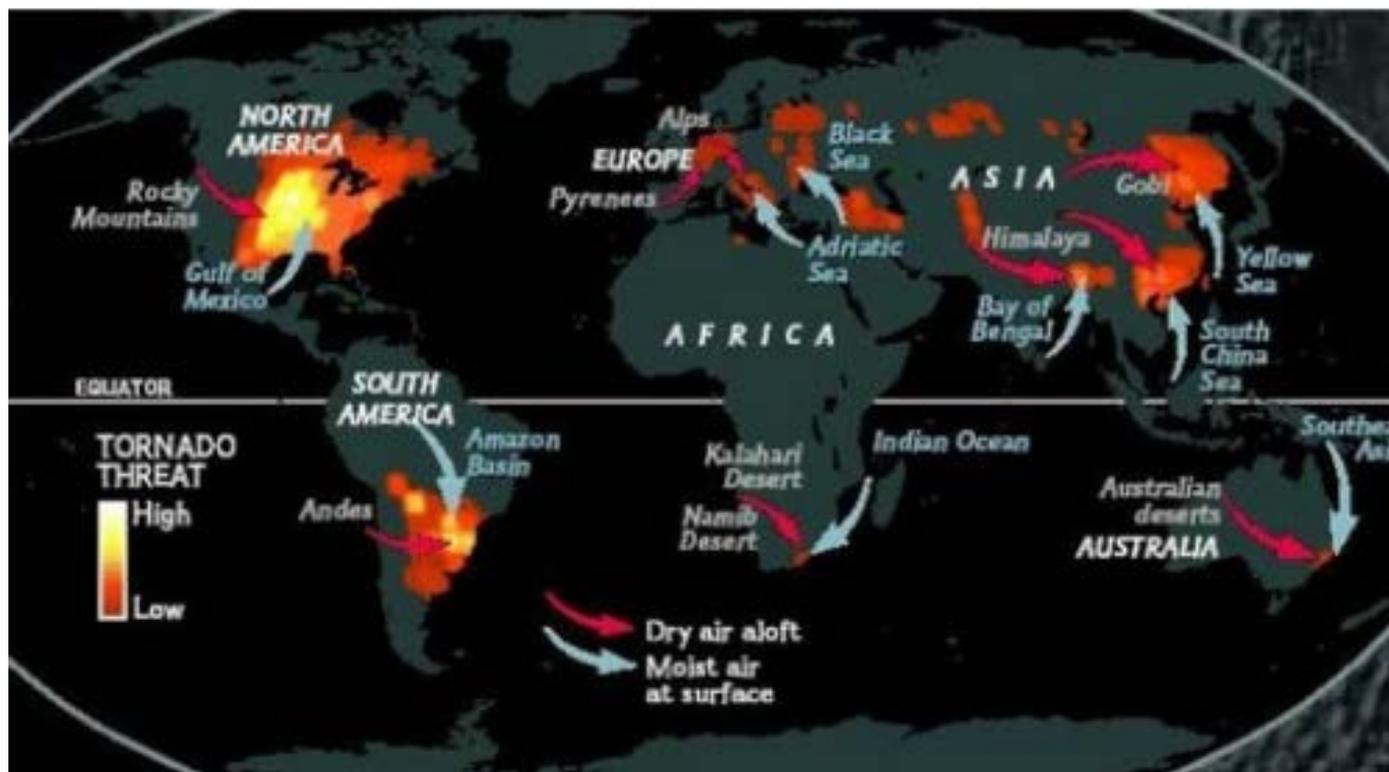
Uruguay pertenece a la zona con mayor frecuencia de ocurrencia de tormentas convectivas severas en América del Sur



Eventos meteorológicos responsables

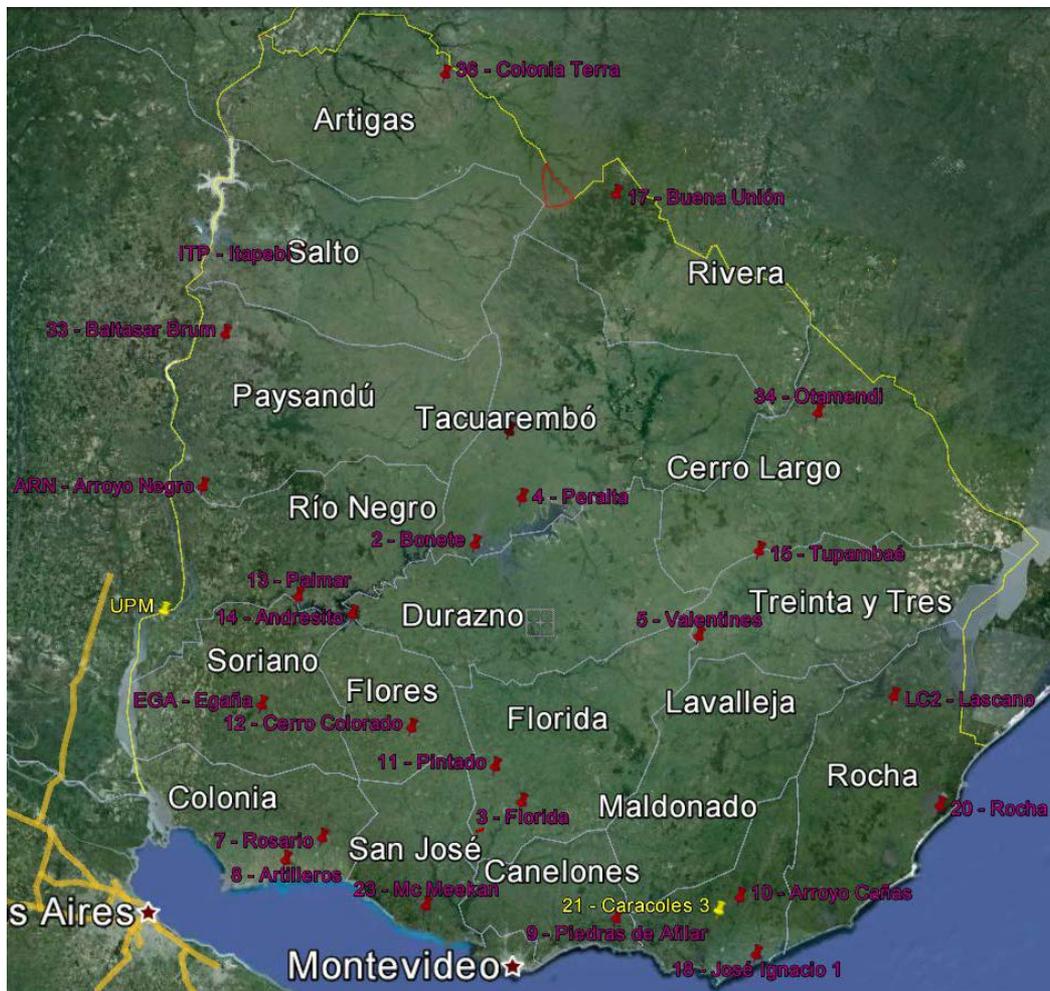
Tormentas convectivas severas en Uruguay

y a la segunda región del mundo con mayor formación de tormentas convectivas severas



Eventos meteorológicos responsables

Red de monitoreo de UTE



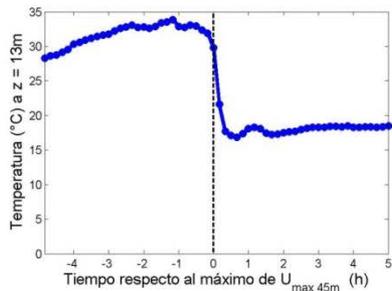
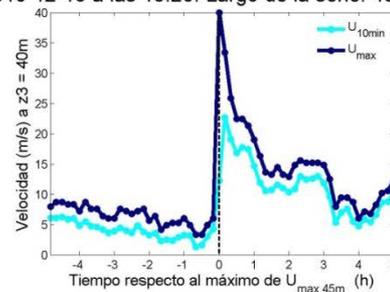
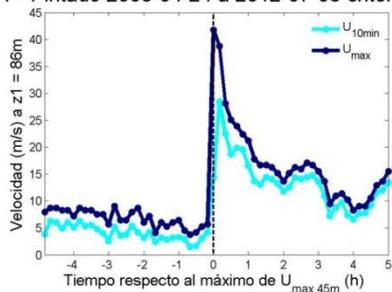
Eventos meteorológicos responsables

Red de monitoreo de UTE

Tomando los 4 casos de máximas $U_{\text{ráf}}$ de cada estación

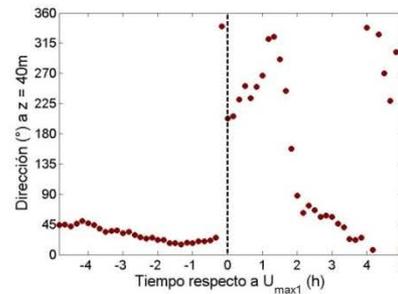
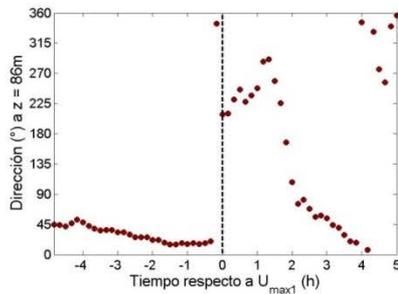
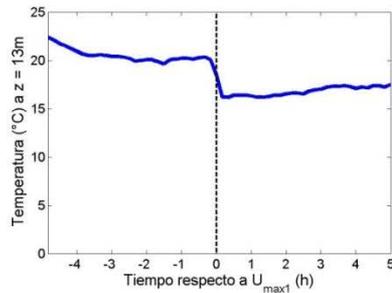
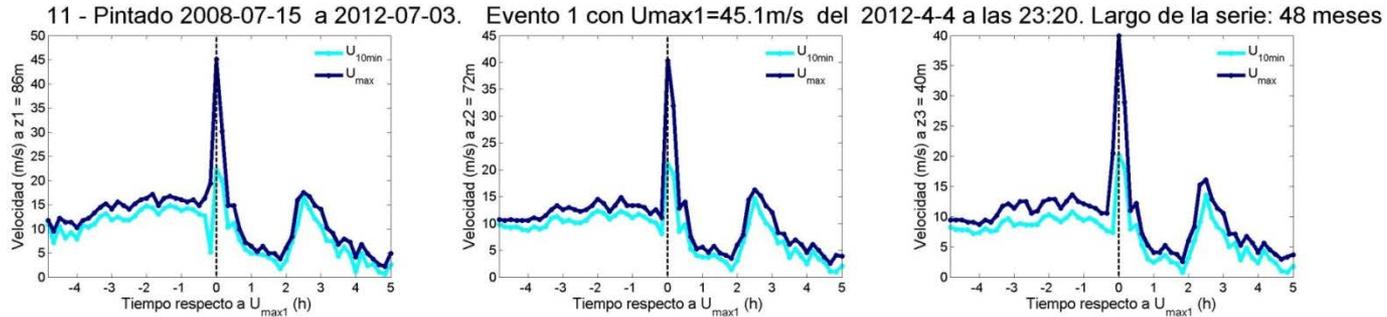
- En el 80 % de los casos $T \downarrow \rightarrow$ asociado al pasaje de tormentas convectivas severas

11 - Pintado 2008-04-24 a 2012-07-03 criterio VFmax45. Evento 1 con $U_{\text{max}45\text{m}}=40.1\text{m/s}$ del 2010-12-10 a las 15:20. Largo de la serie: 48 meses



Eventos meteorológicos responsables

Red de monitoreo de UTE



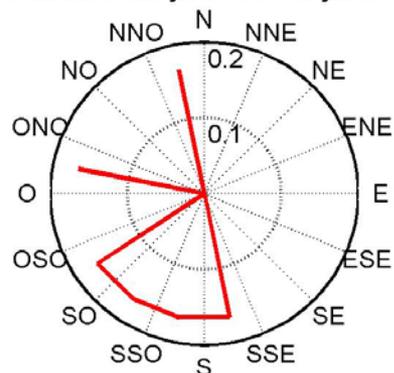
Obsérvese también la gran correlación de la velocidad en altura, y el cambio abrupto de dirección del viento

Eventos meteorológicos responsables

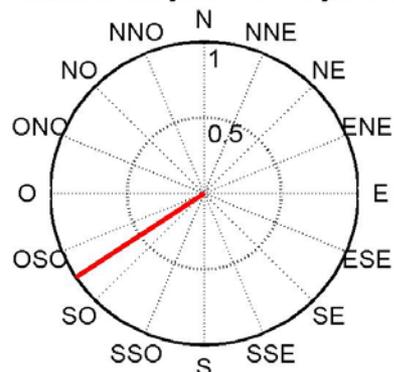
Red de monitoreo de UTE

Las tormentas convectivas severas en Uruguay suelen producir vientos intensos del cuadrante SO

Rosa de vientos para $v_{F45m} \geq 75 \text{ km/h}$ en 11-Pintado de jul/2008 a jun/2012



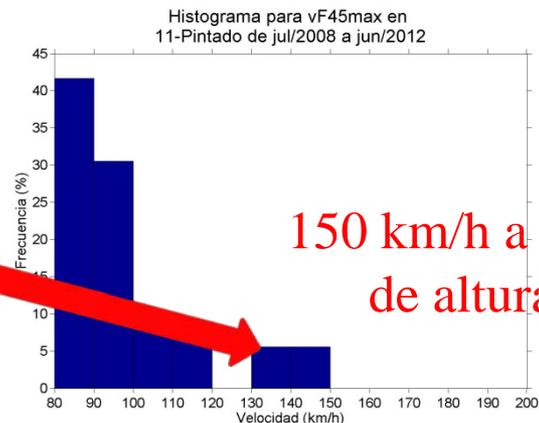
Rosa de vientos para $v_{F45m} \geq 90 \text{ km/h}$ en 11-Pintado de jul/2008 a jun/2012



Eventos meteorológicos responsables

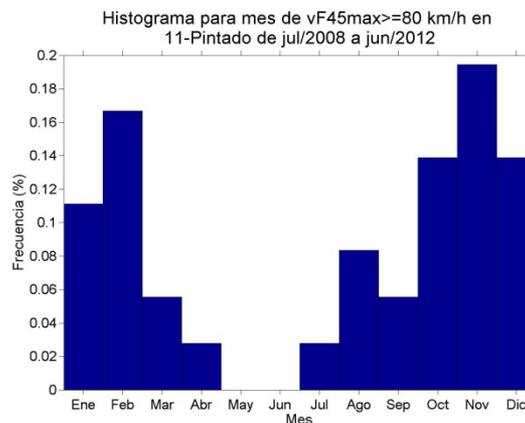
Red de monitoreo de UTE

pudiendo alcanzar
velocidades de ráfaga
muy intensas



150 km/h a 45m
de altura

y suelen ser más
frecuentes en primavera
y verano



Eventos meteorológicos responsables

Red de monitoreo de UTE

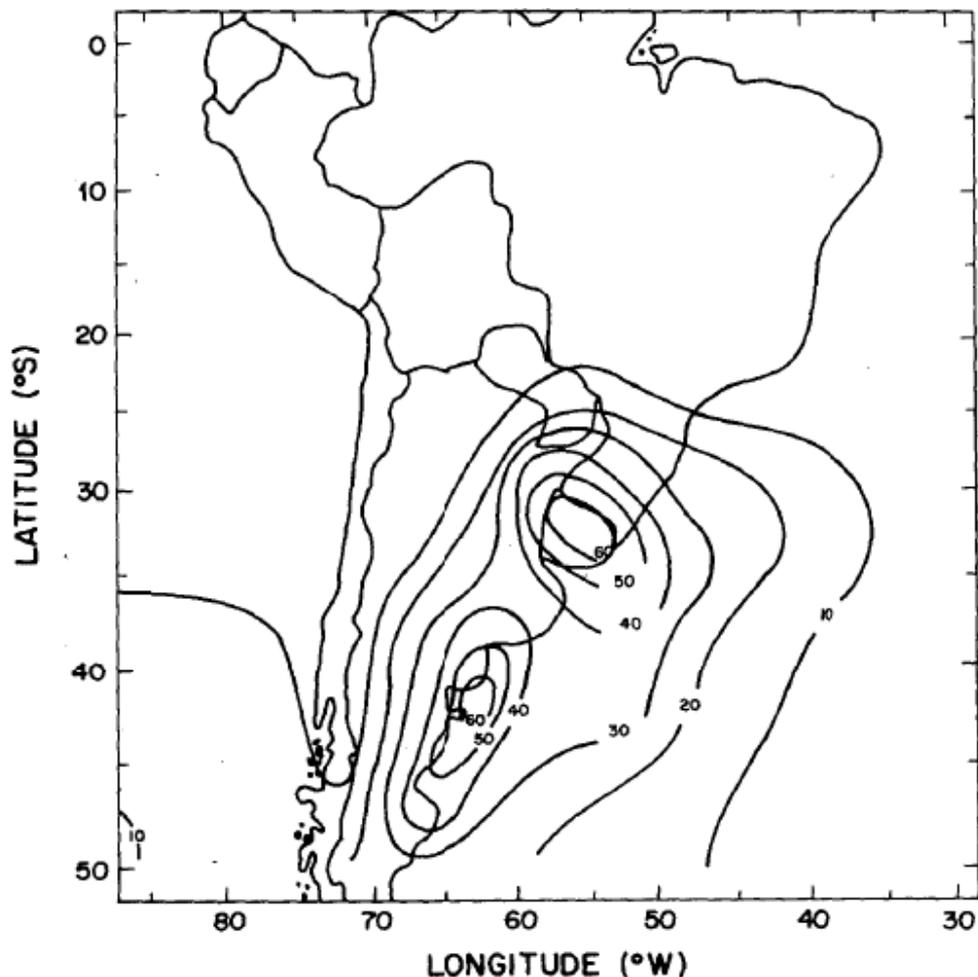
Las tormentas convectivas severas suelen producir en un sitio fijo, vientos intensos entre unos minutos a alguna hora

La intensidad de las velocidades de viento que se registran durante su pasaje va variando mientras éstas se desplazan

Hay evidencia de que en la zona centro-sur de Uruguay estos eventos tienden a alcanzar velocidades más intensas

Eventos meteorológicos responsables

Ciclones extratropicales

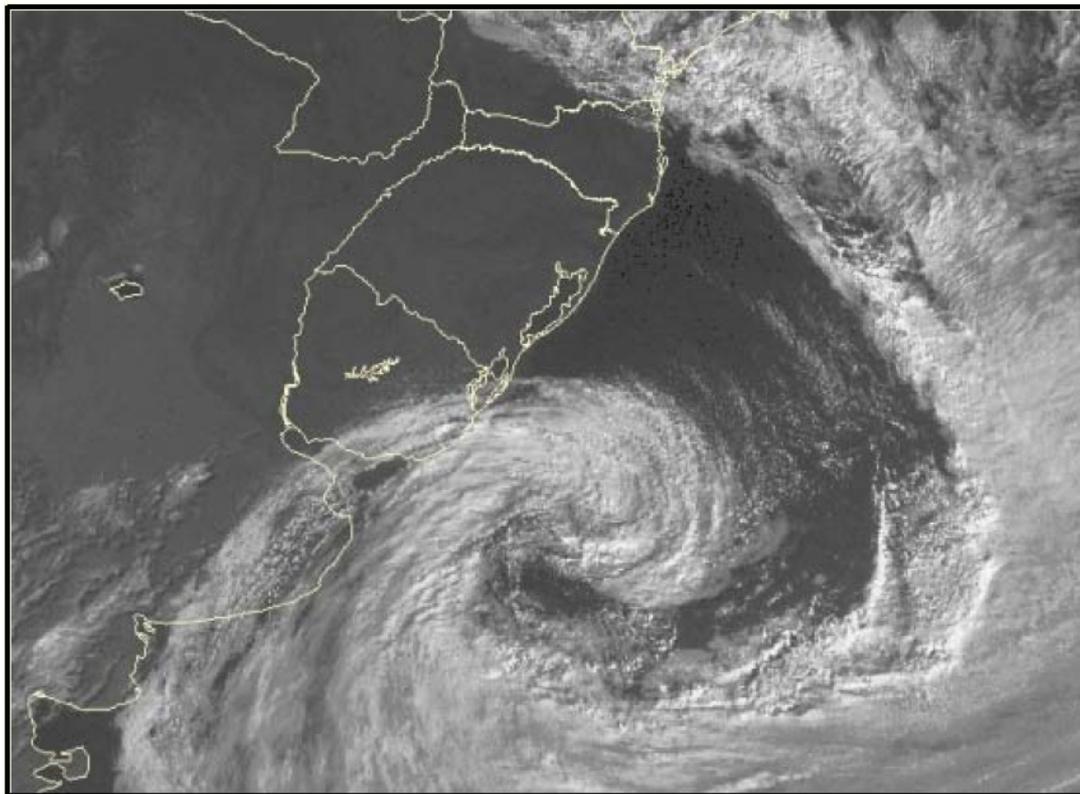


Uruguay también pertenece a una de las regiones de mayor generación de ciclones del Hemisferio Sur, con un máximo sobre Uruguay

En algunas situaciones estos ciclones pueden intensificarse y ser responsables de la ocurrencia de vientos intensos

Eventos meteorológicos responsables

Ciclones extratropicales en Uruguay

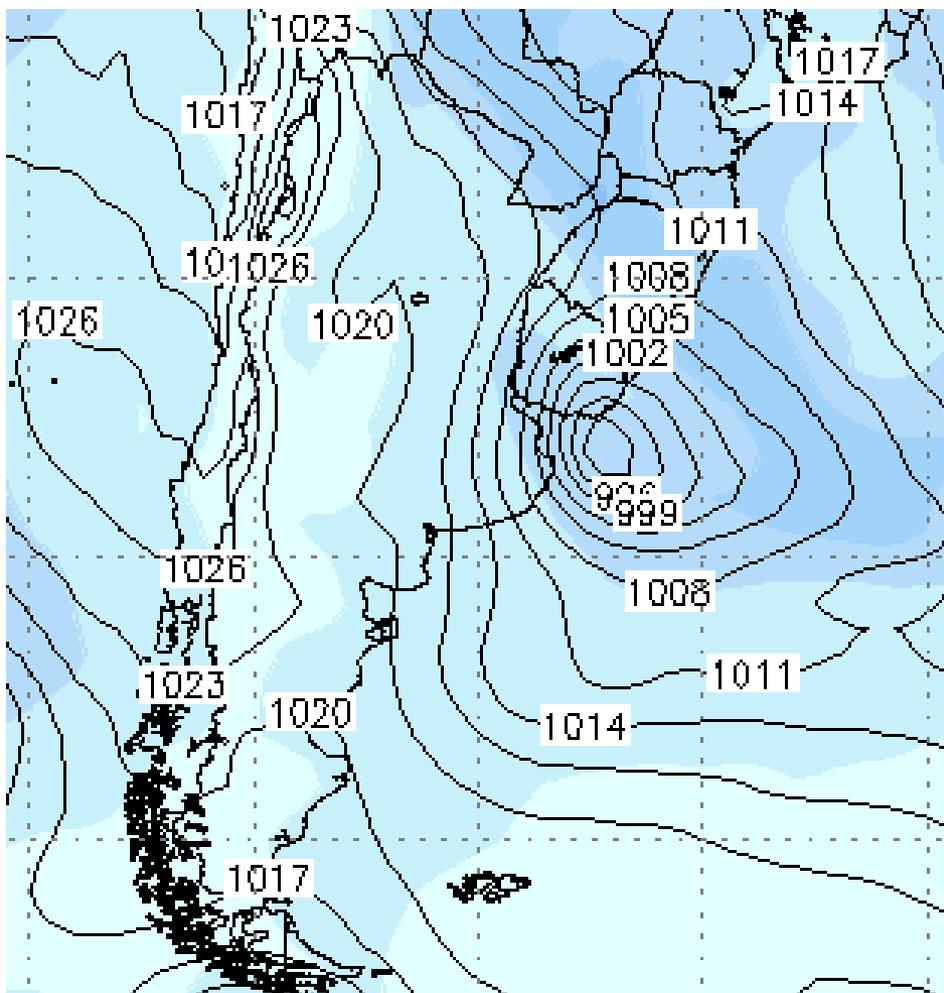


Son sistemas de baja presión, de diámetros del orden de los 1000km, que en el Hemisferio Sur presentan velocidades que rotan en sentido horario

Generalmente estos ciclones se mueven hacia el SE, y alcanzan su máxima depresión (y sus máximas velocidades en superficie) sobre el océano

Eventos meteorológicos responsables

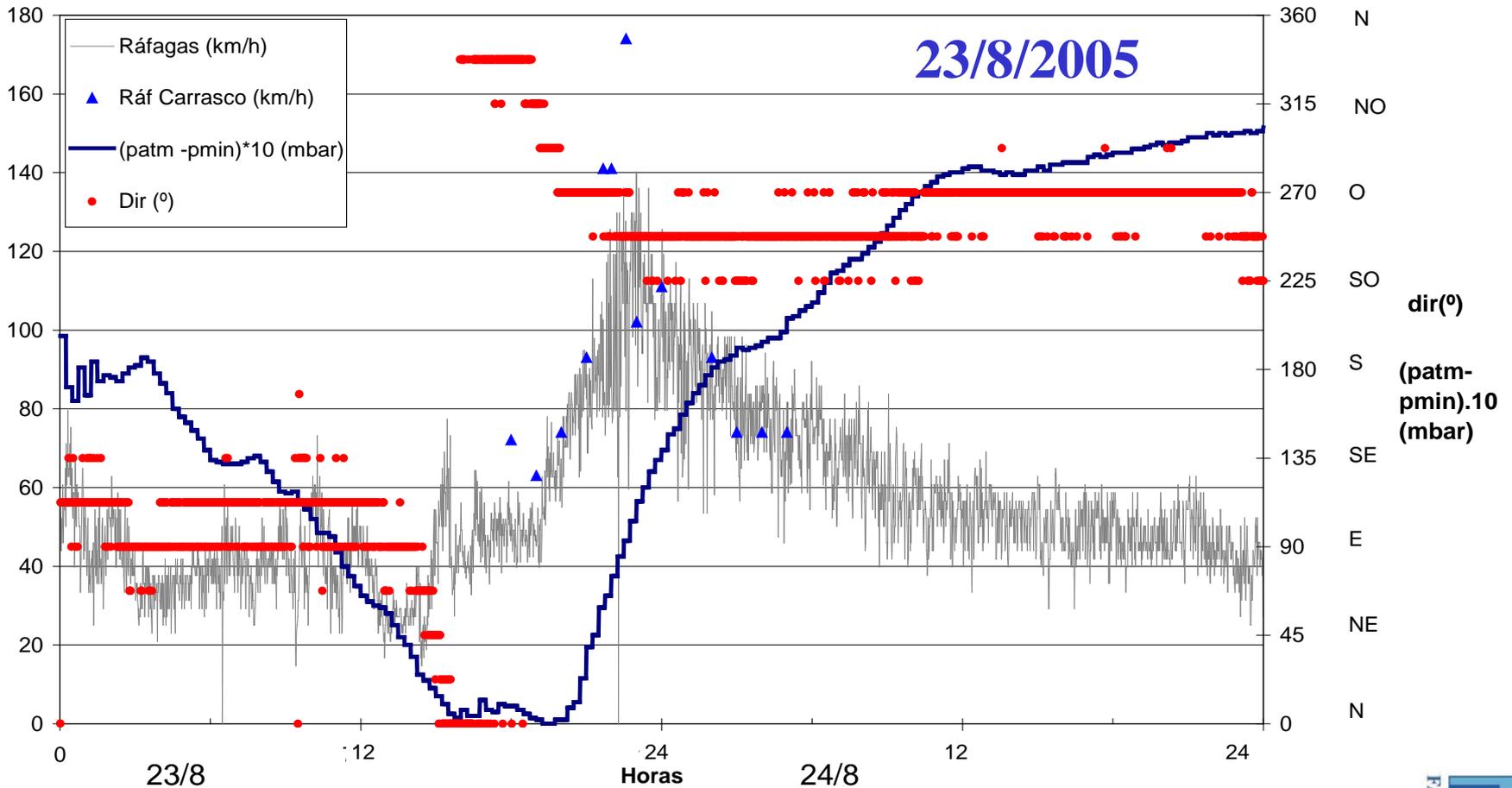
Ciclones extratropicales en Uruguay



23/8/2005

Eventos meteorológicos responsables

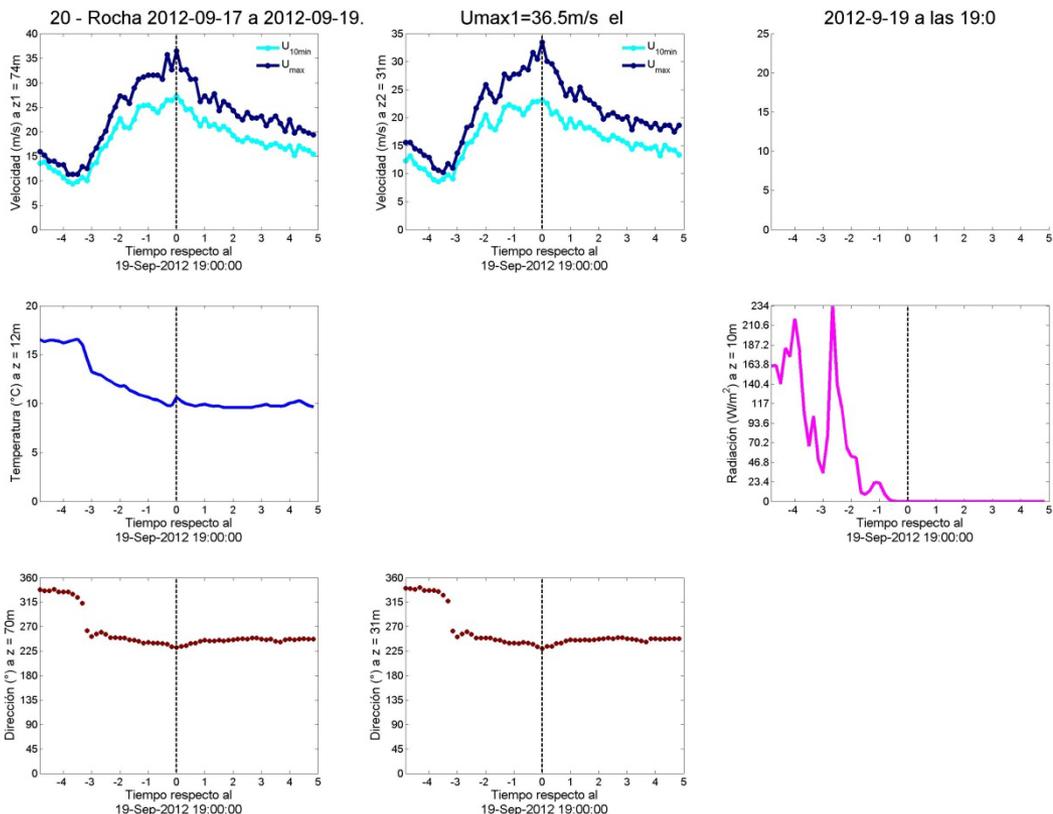
Ciclones extratropicales en Uruguay



Su escala temporal es de entre una serie de horas y algún día

Eventos meteorológicos responsables

Ciclones extratropicales en Uruguay

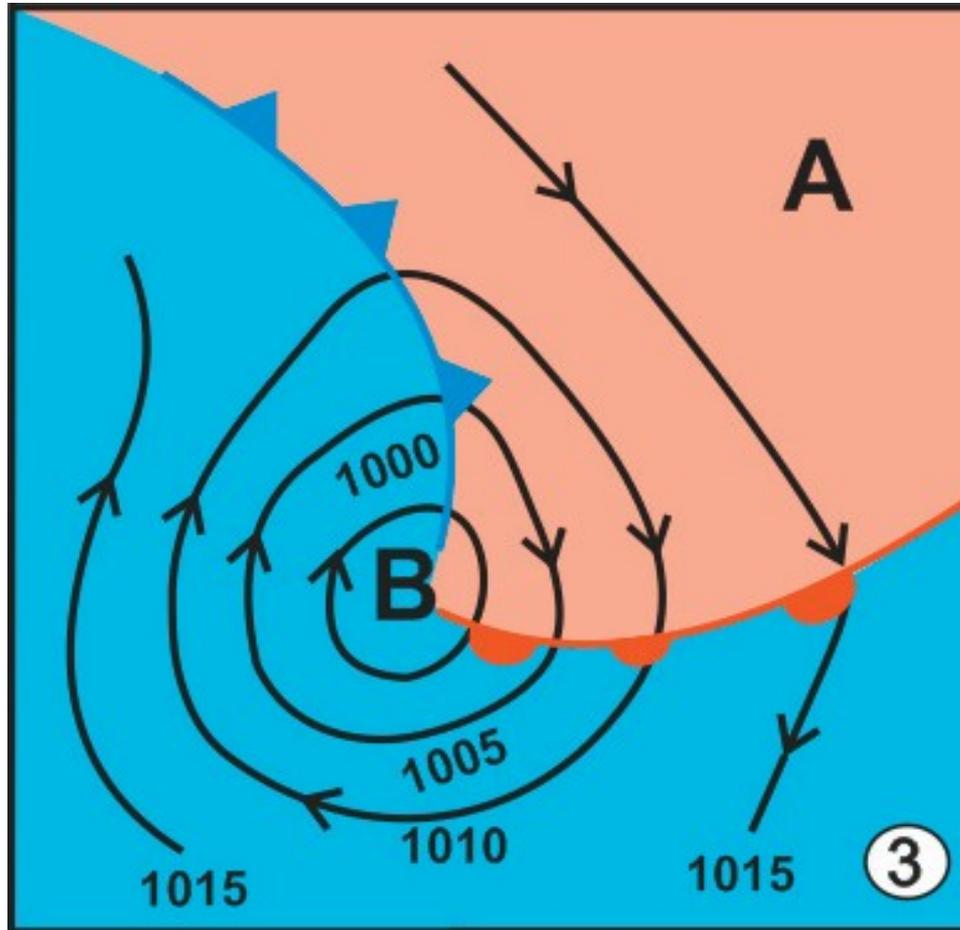


Si presentan cambios de temperatura, estos suelen ser más graduales, al igual que el cambio en la dirección del viento

Y en un sitio fijo suelen producir vientos intensos durante horas

Eventos meteorológicos responsables

Ciclones extratropicales en Uruguay



Eventos meteorológicos responsables

Ciclones extratropicales en Uruguay

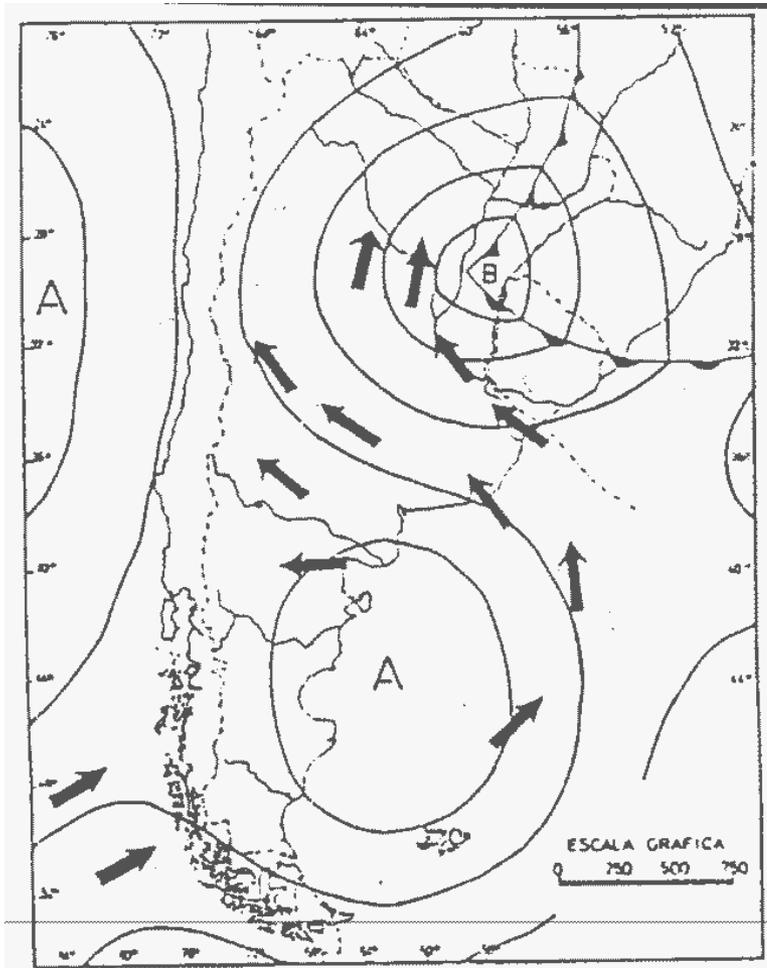
La intensidad de las velocidades de viento que se registran durante su pasaje va variando mientras estos se desplazan

Hay evidencia de que en la zona sur y sur-este de Uruguay estos eventos tienden a alcanzar las velocidades más intensas

Estos eventos suelen producir sus velocidades más intensas del cuadrante SO

Eventos meteorológicos responsables

Ciclones extratropicales en Uruguay



Aunque en algunos
casos las velocidades
máximas provienen del
SE

Eventos meteorológicos responsables

Ciclones extratropicales en Uruguay

Lejos de los frentes frío y caliente, se suele suponer que la distribución de velocidad en altura es de tipo Capa Límite Atmosférica

La velocidad que presentan es mayormente horizontal, y no suele variar de manera abrupta ni espacial ni temporalmente

Eventos meteorológicos responsables

Otros eventos de escala sinóptica

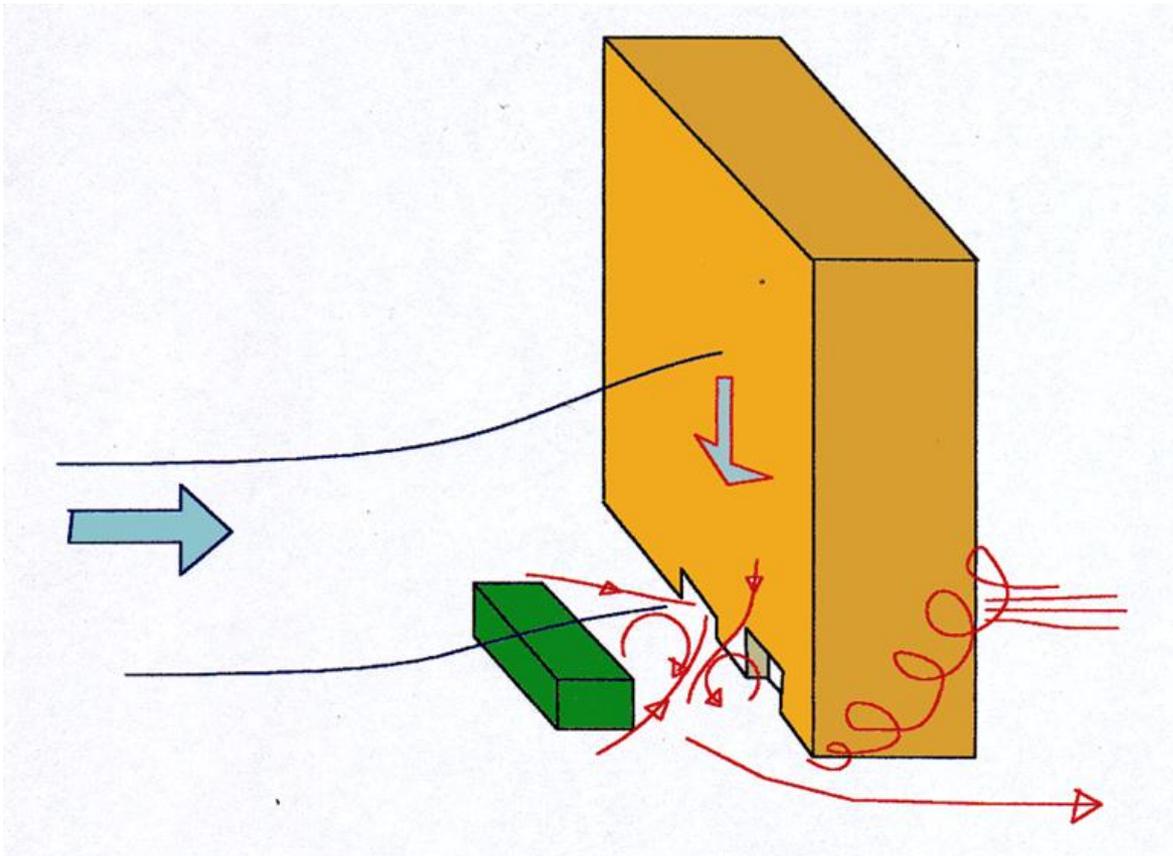
Hay eventos de escala sinóptica que también pueden producir vientos intensos durante una serie de horas o días

Generalmente están asociados a localizaciones específicas de sistemas de alta y baja presión

En estos casos también se suele suponer que la distribución de velocidad en altura es de tipo Capa Límite Atmosférica

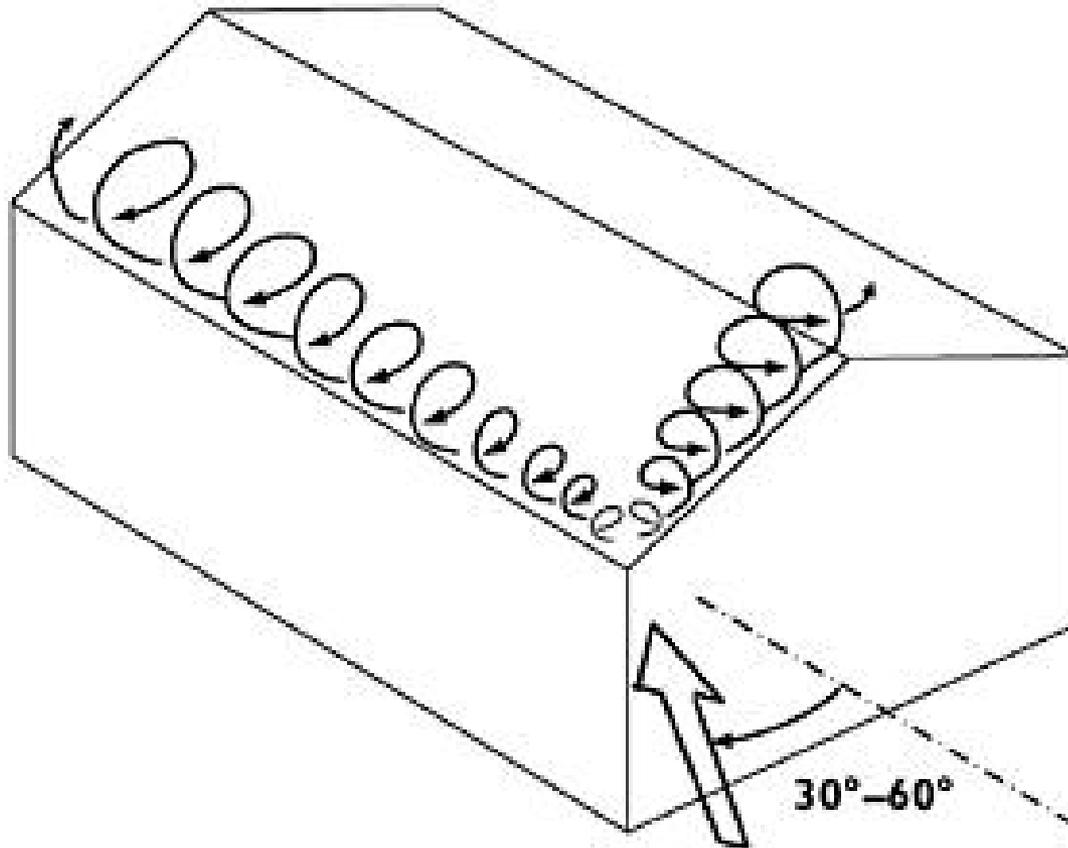
Efecto del entorno en la velocidad del viento

Efecto de construcciones



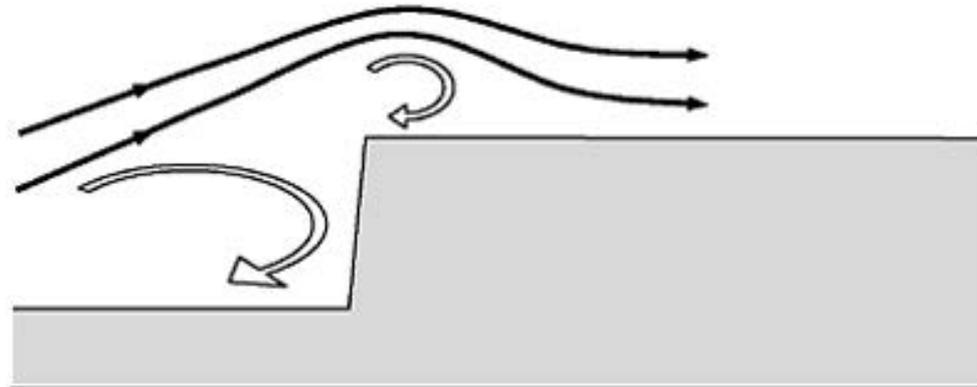
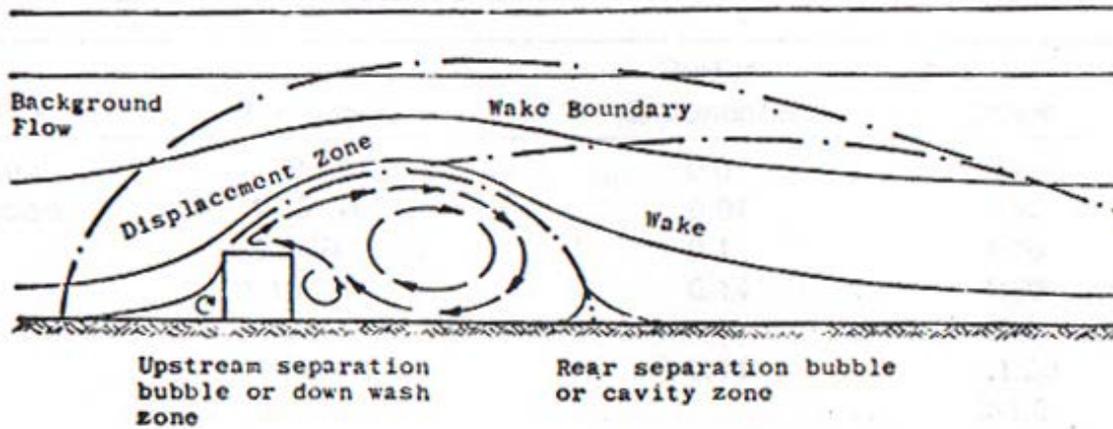
Efecto del entorno en la velocidad del viento

Efecto de construcciones



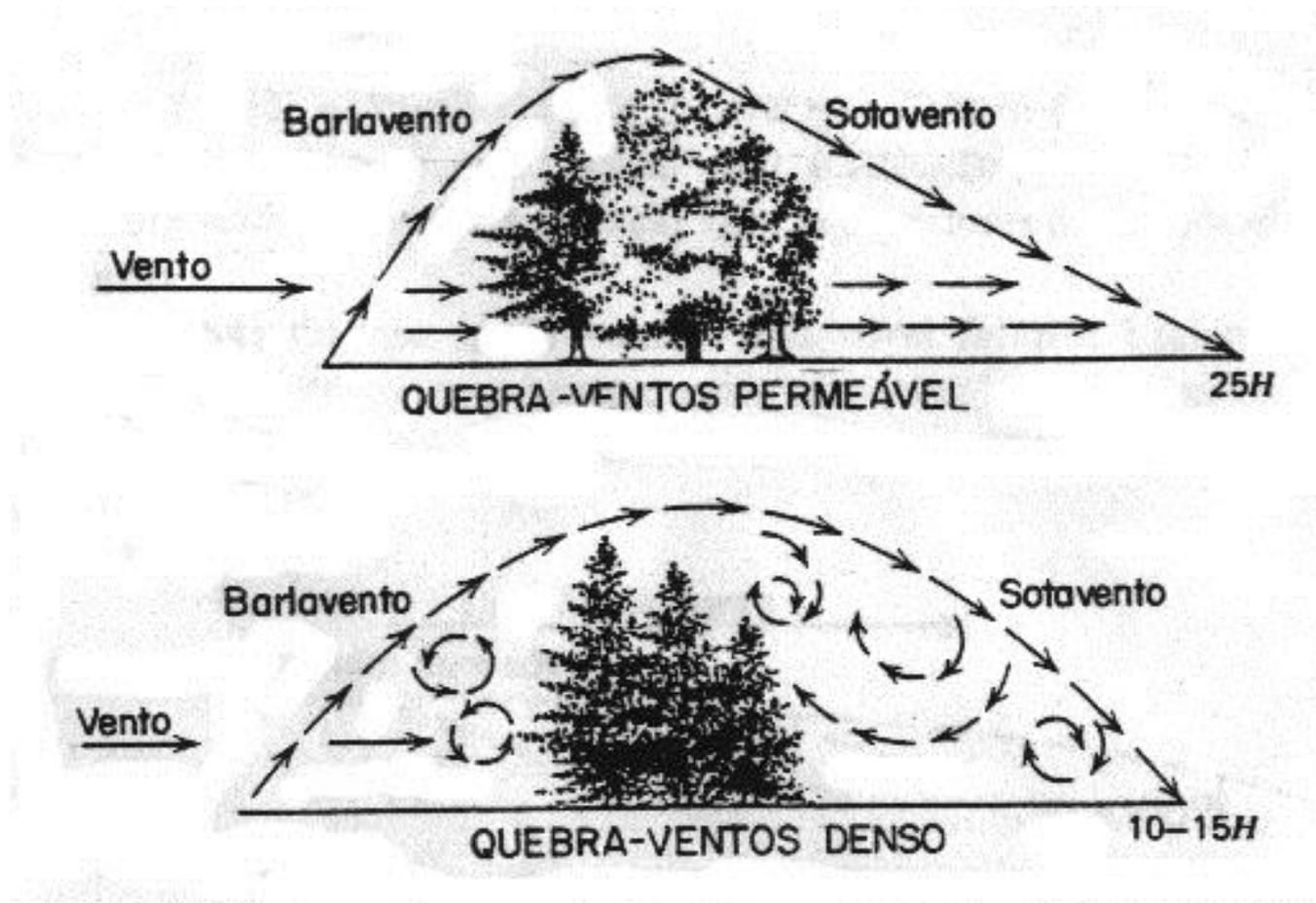
Efecto del entorno en la velocidad del viento

Efecto de construcciones



Efecto del entorno en la velocidad del viento

Efecto de cortinas de árboles



Efecto del entorno en la velocidad del viento

Las normas de acción del viento sobre construcciones suelen tomar en cuenta el efecto de:

- la topografía del lugar
- la rugosidad del terreno corriente arriba
- la altura
- las dimensiones del elemento a considerar

sobre la velocidad del viento

Lo que suele ser más difícil de estimar es cómo el entorno cercano a la estructura en estudio afecta el valor de velocidad con el que se deberían realizar los cálculos

Efecto del entorno en la velocidad del viento

Esto se vuelve más complejo si esa estructura va a estar situada muy próxima o sobre otra construcción

como suele ser el caso de los colectores solares

En muchos casos los colectores solares se encontrarán protegidos para la dirección de los vientos intensos más frecuentes (SO)

pero se debe analizar cuidadosamente si el entorno produce conducciones del flujo o efectos localizados que puedan ocasionar **velocidades más altas de las esperadas**

Norma UNIT 50-84

Acción del viento sobre construcciones

Disposiciones particulares

5.2.3 En el caso de construcciones rodeadas total o parcialmente por otras construcciones se pueden producir modificaciones en la distribución de velocidades, las cuales se tomarán en cuenta, solamente, cuando tengan efectos desfavorables (ver 13.3). Esta alteración se hará efectiva a través de una modificación de los coeficientes de presión o de forma de acuerdo con lo que se indique expresamente.

13.3 Interferencias

La determinación de esas modificaciones a la dirección y velocidad del viento por interferencia entre diversas construcciones vecinas es un problema sumamente complejo que únicamente puede ser definido correctamente en cada caso particular, mediante ensayos sobre modelos en túnel de viento.

Por otra parte no debe perderse de vista la gran inseguridad que existe generalmente sobre la permanencia de la situación del conjunto de construcciones a lo largo del tiempo.

Norma UNIT 50-84

Acción del viento sobre construcciones

Disposiciones particulares

2.2 Ensayos en túnel de viento

2.2.1 En el caso de edificios de forma, dimensiones o ubicación excepcionales se deberá analizar la aplicabilidad de esta norma, especialmente las disposiciones de los capítulos 8 al 12, en cuyo caso se deberá realizar ensayos sobre modelos en túnel de viento, cuyos resultados podrán prevalecer sobre las disposiciones de esta norma.

2.2.2 También podrá utilizarse resultados de otros ensayos realizados sobre casos análogos, siempre que estén debidamente documentados y cuya aplicabilidad al caso en estudio se demuestre adecuadamente.

Norma UNIT 50-84

Acción del viento sobre construcciones

– Velocidad de cálculo

$$v_c = K_t \cdot K_z \cdot K_d \cdot K_k \cdot v_k$$

6.2.1.2 La velocidad de cálculo se halla aplicando la expresión:

$$v_c = K_t \cdot K_z \cdot K_d \cdot K_k \cdot v_k \quad (2)$$

donde:

- v_k velocidad característica del viento del lugar, determinada en la forma indicada en 6.2.2, en m/s;
- K_t coeficiente que tiene en cuenta las características topográficas del lugar, adimensional, (6.2.3);
- K_z coeficiente que expresa la ley de variación de la velocidad en función de la altura y de la rugosidad del terreno, adimensional, (6.2.4);
- K_d coeficiente que tiene en cuenta las dimensiones de la superficie de influencia del elemento estudiado, adimensional, (6.2.6);
- K_k coeficiente que tiene en cuenta el grado de seguridad requerido para cada tipo de construcción y su vida útil, adimensional, 6.2.7

Norma UNIT 50-84

Acción del viento sobre construcciones

– Velocidad característica (v_k)

6.2.2. Velocidad característica

6.2.2.1 La velocidad característica (v_k) es la velocidad media de una ráfaga de 3 segundos de duración medida a 10 metros de altura sobre el terreno, en campo plano, abierto y sin obstáculos (rugosidad I del párrafo 6.2.5) que tiene una probabilidad igual a 0,05 de ser excedida en cualquier año (período de recurrencia $R = 20$ años) (Ver 13.4).

a) para todos los lugares ubicados a una distancia menor o igual a 25 kilómetros de cualquier punto de las márgenes del Río Uruguay y del Río de la Plata o de la costa atlántica será:

$$v_k = 43,9 \text{ m/s (158 km/h)}$$

b) para todos los lugares ubicados en el resto del territorio nacional será:

$$v_k = 37,5 \text{ m/s (135 km/h)}$$

Norma UNIT 50-84

Acción del viento sobre construcciones

- Velocidad característica (v_k)

Dados los resultados presentados anteriormente, se recomienda utilizar el valor de $v_k = 43.9$ m/s para todo el territorio nacional

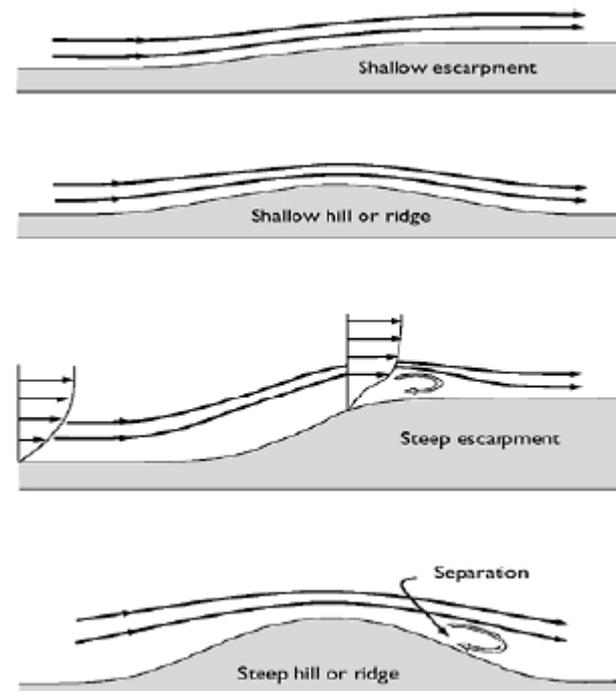
Norma UNIT 50-84

Acción del viento sobre construcciones

– Efecto de la topografía (K_t)

TABLA 6.1 – FACTOR TOPOGRAFICO K_t

TIPO	DESCRIPCION DEL TERRENO	K_t
NORMAL	Todos los casos excepto los siguientes	1,0
EXPUESTO	Cima de acantilados o de cerros muy expuestos. Valles estrechos donde el viento se encajona. Islas o penínsulas angostas, montañas aisladas y ciertas abras	1,10
PROTEGIDO	Valles o cunetas profundas y abruptas, protegidas de todos los vientos en todo su perímetro	0,90



se recomienda para el cálculo de K_t el uso de la norma de acción del viento sobre estructuras “Eurocode 1: Actions on structures – General actions – Part 1-4: Wind Actions”



Norma UNIT 50-84

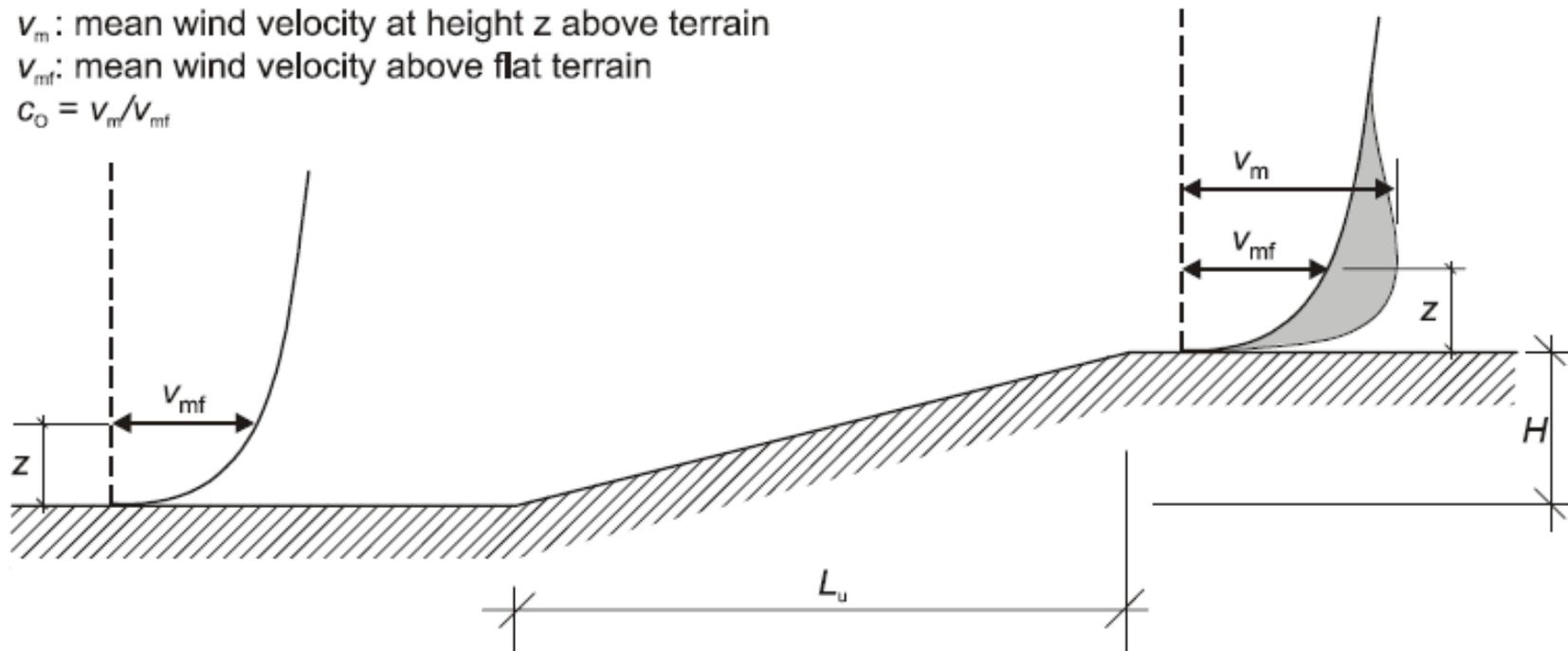
Acción del viento sobre construcciones

– Efecto de la topografía ($K_t = c_o$)

v_m : mean wind velocity at height z above terrain

v_{mf} : mean wind velocity above flat terrain

$$c_o = v_m / v_{mf}$$



“Eurocode 1: Actions on structures – General actions – Part 1-4: Wind Actions”, pp. 97-102



Norma UNIT 50-84

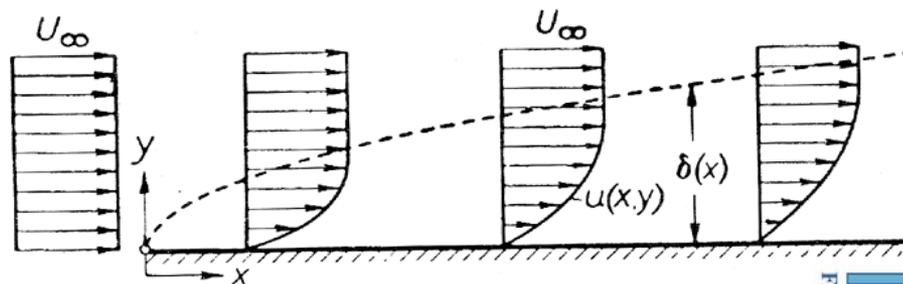
Acción del viento sobre construcciones

- Efecto de la rugosidad del terreno corriente arriba y altura (K_z)

TABLA 6.2 - FACTOR DE ALTURA K_z

z m	TIPO DE RUGOSIDAD			
	I	II	III	IV
≤ 5	0,993	0,822	0,667	0,515
10	1,000	0,900	0,750	0,600
15	1,041	0,949	0,804	0,656
20	1,072	0,985	0,844	0,699
25	1,096	1,014	0,876	0,734
30	1,116	1,038	0,904	0,764
40	1,149	1,078	0,943	0,814
50	1,175	1,109	0,986	0,855
60	1,195	1,136	1,017	0,890
70	1,215	1,159	1,044	0,921
80	1,231	1,179	1,068	0,948
90	1,246	1,190	1,090	0,973
100	1,259	1,214	1,109	0,996
120	1,282	1,243	1,144	1,037
140	1,302	1,268	1,175	1,072
160	1,320	1,291	1,202	1,104
180	1,335	1,310	1,226	1,133
200	1,349	1,329	1,248	1,160
225	1,365	1,349	1,273	1,190
250	1,380	1,368	1,296	1,218
K_z	$1,00 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,10}$	$0,90 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,13}$	$0,75 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,17}$	$0,60 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,22}$

- I): Terreno abierto y a nivel, sin obstrucciones. Superficies de agua y faja costera en un ancho de 1 km. Aeropuertos, granjas extensas sin cercos.
- II): Terreno plano o poco ondulado con obstrucciones bajas como setos o muros, árboles y edificaciones eventuales (altura media alrededor de 2 m).
- III): Zonas cubiertas por numerosas construcciones medianas, parques y bosques con muchos árboles. Ciudades pequeñas o suburbios de grandes ciudades (altura media alrededor de 10 m).
- IV): Zonas cubiertas por grandes construcciones, centros de grandes ciudades (altura media mayor que 25 m).



Norma UNIT 50-84

Acción del viento sobre construcciones

- Efecto de la rugosidad del terreno corriente arriba y altura (K_z)

Los valores de K_z de UNIT 50-84 fueron calculados suponiendo flujos de viento tipo CLA,

mientras que las velocidades de ráfaga más altas que se registran en nuestro país suelen deberse a corrientes descendentes debido a tormentas convectivas severas,

las cuales presentan una distribución de velocidad en altura diferente.

Algunas normas de acción del viento sobre estructuras ya están considerando las corrientes descendentes en sus cálculos de fuerzas

Norma UNIT 50-84

Acción del viento sobre construcciones

- Efecto de las dimensiones de la construcción (K_a)

K_a tiene en cuenta la distribución espacial irregular de las velocidades de ráfaga y la consecuente disminución de la presión media sobre una superficie a medida que ésta aumenta sus dimensiones

Depende de:

- el área de referencia del elemento a considerar (A)
- la altura de cálculo (z)
- y el tipo de rugosidad del terreno en los alrededores del sitio



Norma UNIT 50-84

Acción del viento sobre construcciones

- Efecto de las dimensiones de la construcción (K_d)

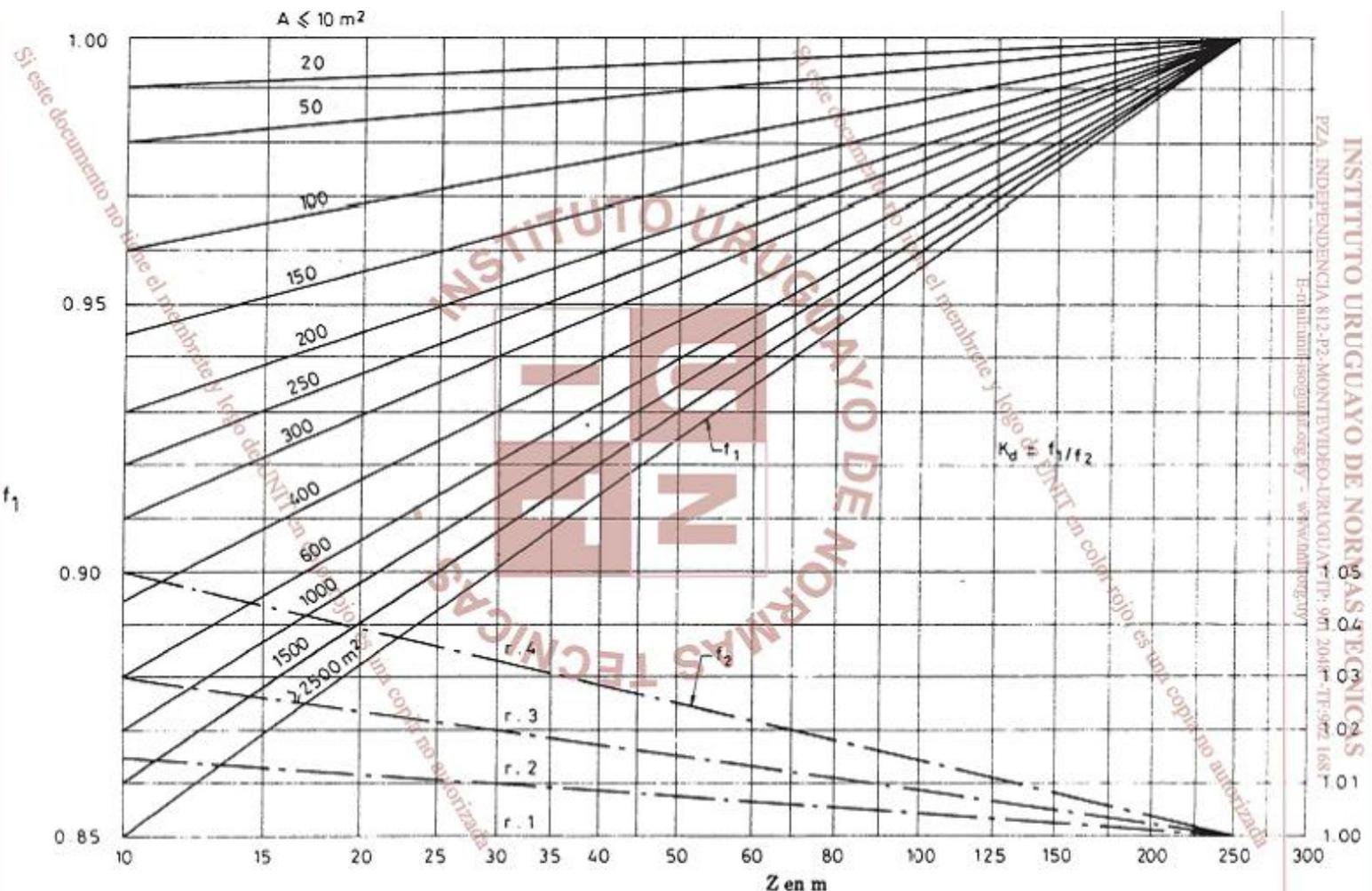


Figura 6.2

Se obtienen f_1 y f_2



$$K_d = f_1/f_2$$

Norma UNIT 50-84

Acción del viento sobre construcciones

– Efecto del periodo de retorno (K_k)

K_k tiene en cuenta el destino y vida útil de la construcción en estudio, agrupando las construcciones en seis categorías

Para el caso de los colectores solares se tomó como periodo de retorno 20 años, por lo que $K_k = 1$

Una velocidad con un periodo de retorno de 20 años significa que, en un año cualquiera, la probabilidad de que se alcance o se supere dicha velocidad es de un 5% ($0.05=1/20$), o lo que es lo mismo, que la probabilidad de que la velocidad máxima anual no supere dicha velocidad es de un 95%.

Norma UNIT 50-84

Acción del viento sobre construcciones

– Cálculo de fuerzas

la norma UNIT 50-84 calcula la **fuerza F** que se ejerce sobre un elemento como:

$$F = C \cdot A \cdot q_z$$

donde:

- **C** es un coeficiente global de empuje (o de fuerza)
- **A** es un área de referencia
- y **qz** es el valor medio de la presión dinámica de cálculo para el área A, a la altura z

Norma UNIT 50-84

Acción del viento sobre construcciones

– Presión dinámica

$$q_z = \frac{1}{2} \rho \cdot v_c^2 \cdot C_f(z)$$

donde:

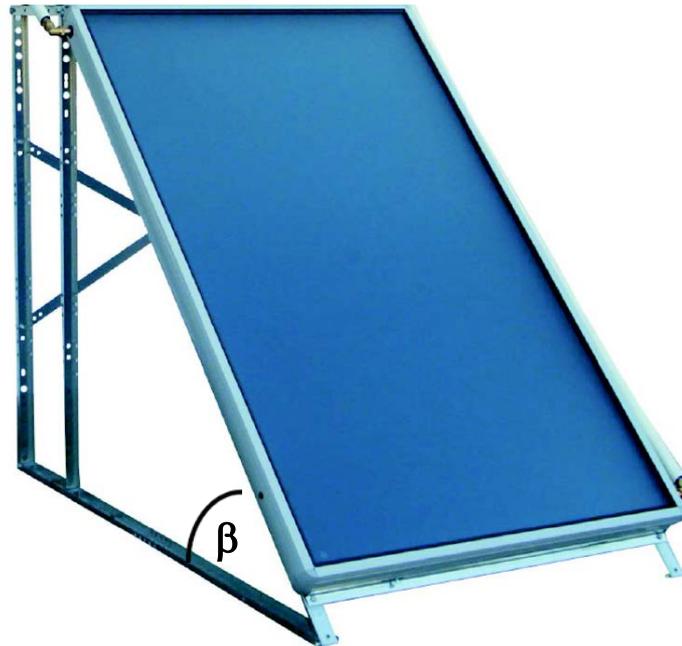
- ρ es la densidad del aire, tomada como 1.23 kg/m^3
- v_c es la velocidad de cálculo a la altura z

$$(v_c = K_t \cdot K_z \cdot K_d \cdot K_k \cdot v_k)$$

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Los colectores solares más solicitados por la acción del viento son los colectores planos con cubierta y sin acumulador

Comenzaremos analizando este tipo de colector.



Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Respecto al viento, estos colectores se comportan como superficies planas inclinadas al viento, y situadas cerca del suelo (generalmente)

El caso más similar presentado en la norma UNIT 50-84 es el de cubiertas aisladas, pero ésta pide que la distancia al suelo (e) sea mayor que un valor que no suelen cumplir los colectores solares

10.2.1.1 Entran en esta categoría las cubiertas de una o más vertientes simétricas cuyas cumbres o bordes son horizontales (ver figura 10.1), a las que el viento puede atacar por los bordes sobre toda la periferia y cuya altura mínima e sobre el suelo es:

$$e \geq (0,005\alpha + 0,55) \cdot h_c \text{ para } \alpha \geq 40^\circ$$

$$e \geq 0,75 \cdot h_c \text{ para } \alpha < 40^\circ$$

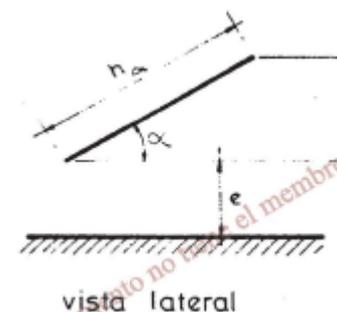


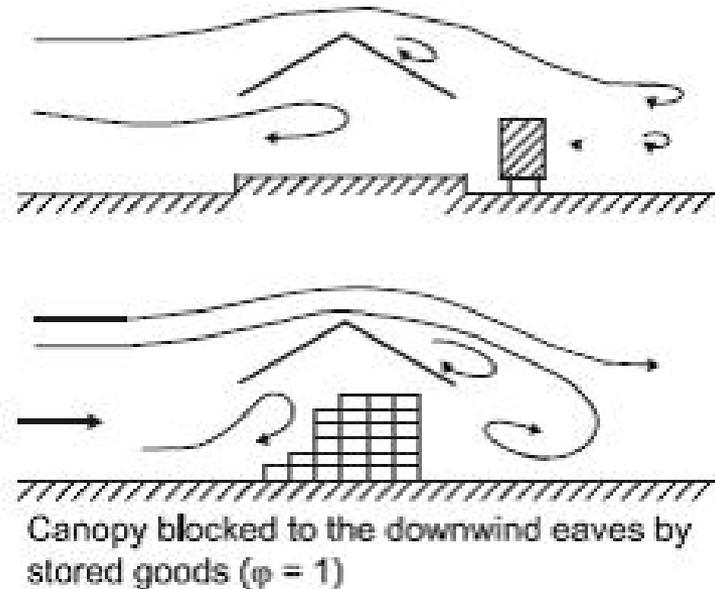
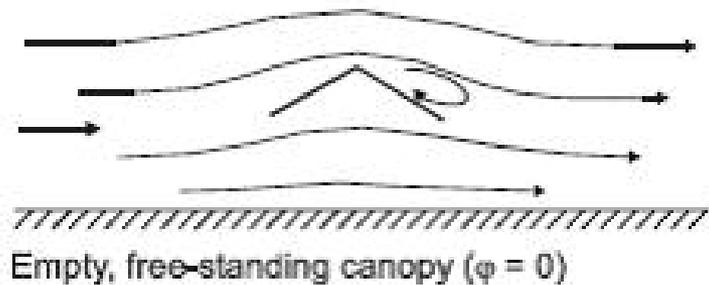
Figura 10.1

Obs. En este caso se le está llamando α al ángulo de la cubierta respecto al suelo

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Por ello se revisaron otras normas

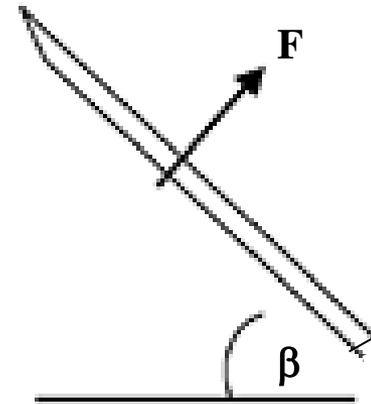
y se encontró que la norma **Eurocode 1** contempla el caso de cubiertas aisladas (*canopy*) inclinadas, incluyendo el caso en el que el pasaje del flujo por debajo de ésta se ve obstruido de alguna manera



ϕ representa el grado de bloqueo

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Un colector solar plano con cubierta y sin acumulador, correspondería al caso de una cubierta aislada de una sola pendiente, con ϕ muy cercano a 1



Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Eurocode 1 presenta, entre otros resultados, valores de C para cubiertas de una sola pendiente (*monopitch canopies*), para distintos bloqueos φ y ángulos respecto al suelo β

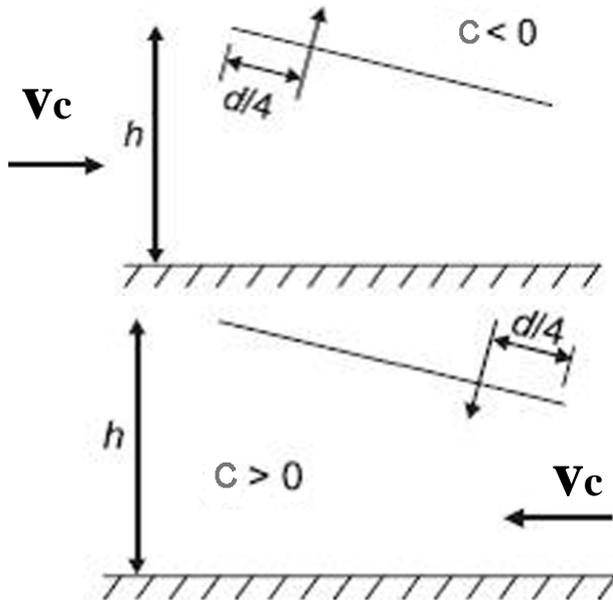
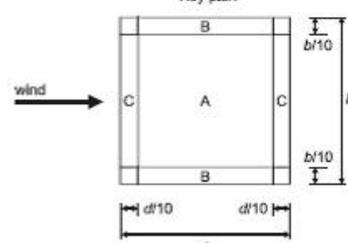


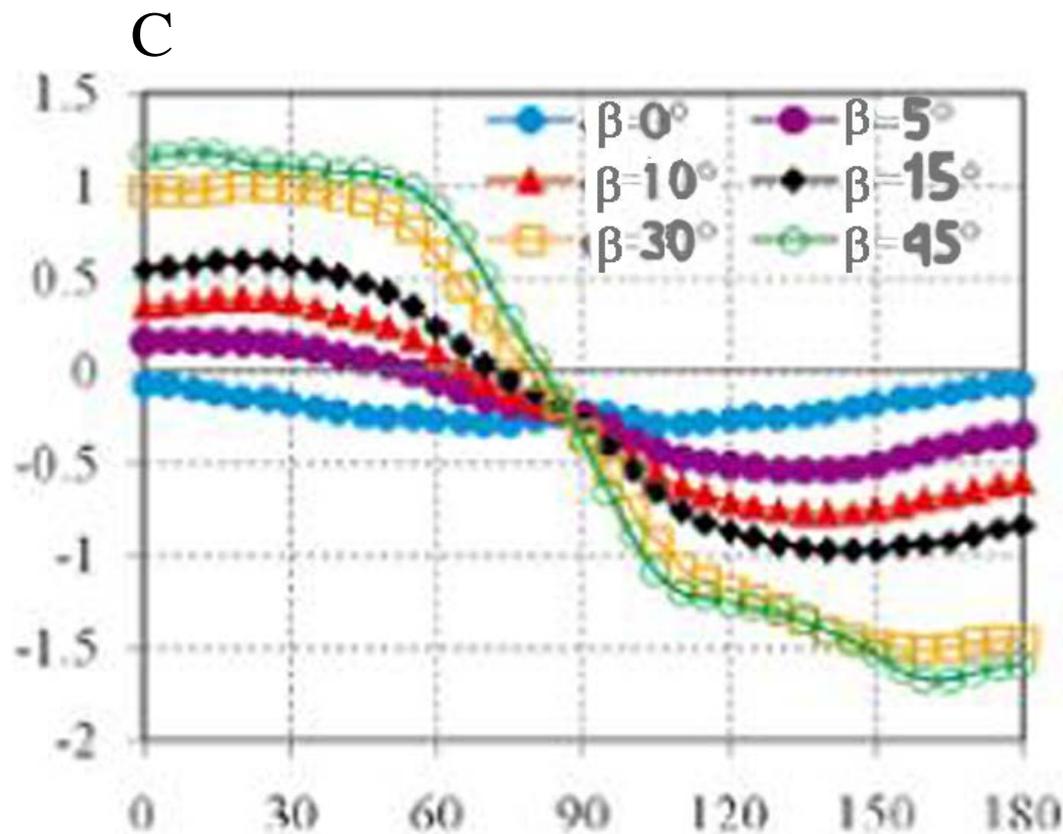
Table 7.6 — $c_{p,net}$ and C values for monopitch canopies

Eurocode 1			Net Pressure coefficients $c_{p,net}$		
			Key plan		
					
Roof angle β	Blockage φ	Overall Force Coefficients C	Zone A	Zone B	Zone C
0°	Maximum all φ	+0,2	+0,5	+1,8	+1,1
	Minimum $\varphi = 0$	-0,5	-0,6	-1,3	-1,4
	Minimum $\varphi = 1$	-1,3	-1,5	-1,8	-2,2
5°	Maximum all φ	+0,4	+0,8	+2,1	+1,3
	Minimum $\varphi = 0$	-0,7	-1,1	-1,7	-1,8
	Minimum $\varphi = 1$	-1,4	-1,6	-2,2	-2,5
10°	Maximum all φ	+0,5	+1,2	+2,4	+1,6
	Minimum $\varphi = 0$	-0,9	-1,5	-2,0	-2,1
	Minimum $\varphi = 1$	-1,4	-2,1	-2,6	-2,7
15°	Maximum all φ	+0,7	+1,4	+2,7	+1,8
	Minimum $\varphi = 0$	-1,1	-1,8	-2,4	-2,5
	Minimum $\varphi = 1$	-1,4	-1,6	-2,9	-3,0
20°	Maximum all φ	+0,8	+1,7	+2,9	+2,1
	Minimum $\varphi = 0$	-1,3	-2,2	-2,8	-2,9
	Minimum $\varphi = 1$	-1,4	-1,6	-2,9	-3,0
25°	Maximum all φ	+1,0	+2,0	+3,1	+2,3
	Minimum $\varphi = 0$	-1,6	-2,6	-3,2	-3,2
	Minimum $\varphi = 1$	-1,4	-1,5	-2,5	-2,8
30°	Maximum all φ	+1,2	+2,2	+3,2	+2,4
	Minimum $\varphi = 0$	-1,8	-3,0	-3,8	-3,6
	Minimum $\varphi = 1$	-1,4	-1,5	-2,2	-2,7

NOTE + values indicate a net downward acting wind action
- values represent a net upward acting wind action

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Wind Engineering Research Center, 2012 (Wind Effects Bulletin 17)



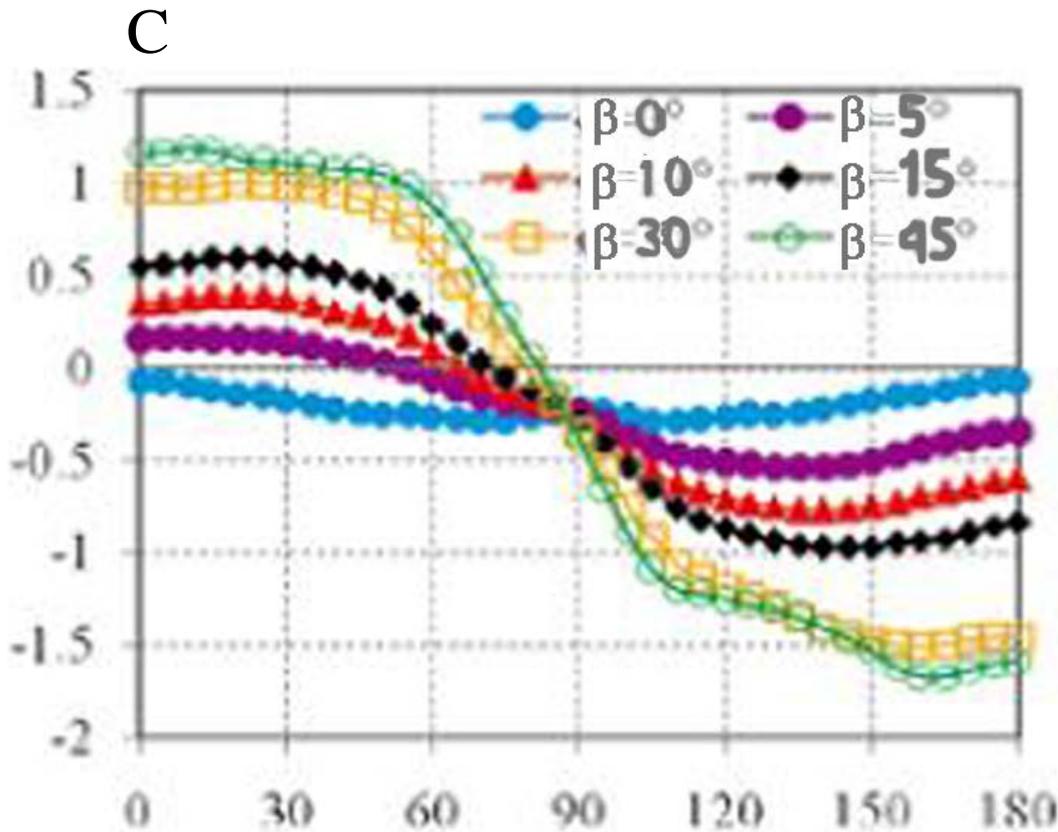
presenta de estudios en túnel de viento, valores de C para paneles solares, para distintos ángulos respecto al suelo β

y para ángulos entre el viento y el panel entre 0° y 180°

ángulos entre el viento y el panel

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Wind Engineering Research Center, 2012 (Wind Effects Bulletin 17)

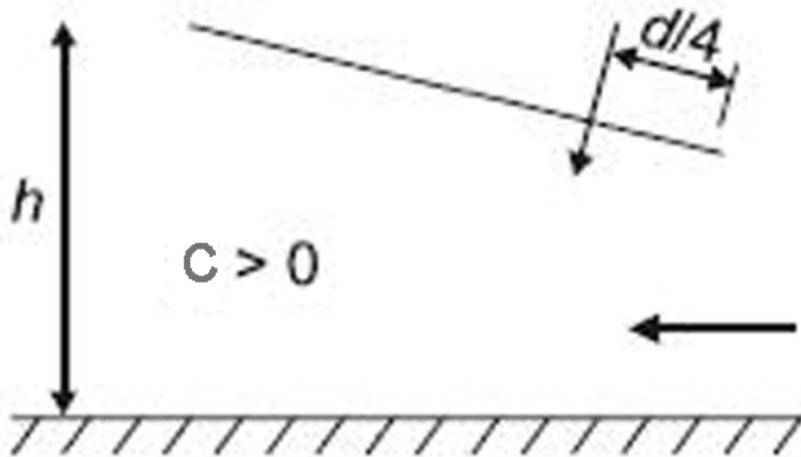


ángulos entre el viento y el panel

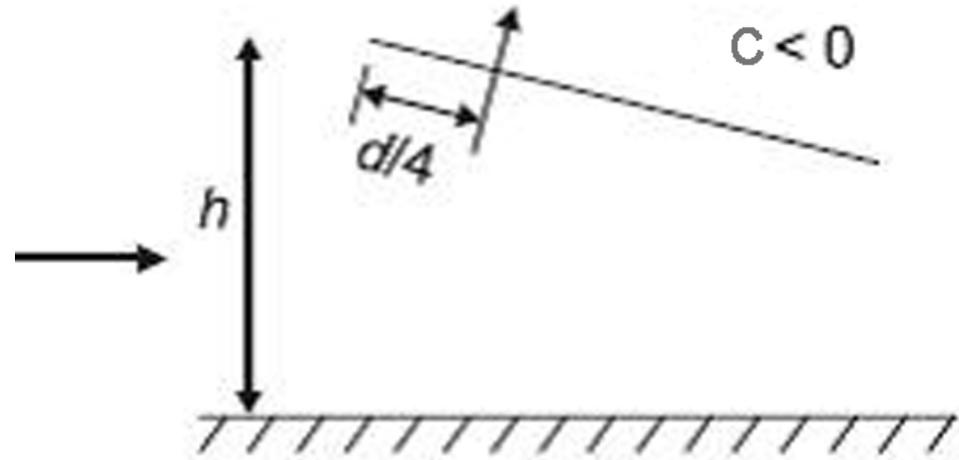
Se observa que para los valores usuales de β en Uruguay

- se tienen los valores máximos de C para ángulos entre el viento y el panel cercanos a 0°
- y los valores mínimos de C para ángulos entre el viento y el panel cercanos a 180°

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento



el ángulo entre el viento y
el panel es 0°

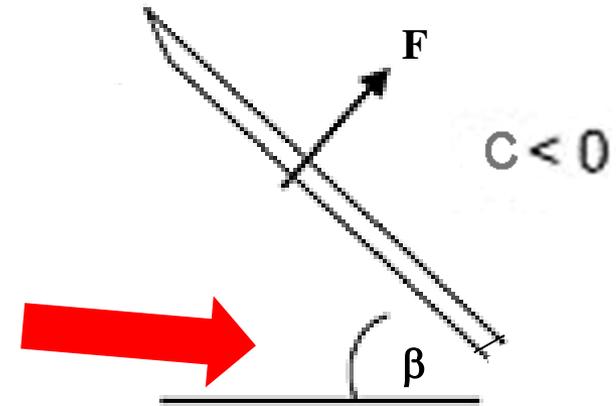


el ángulo entre el viento y
el panel es 180°

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Por ejemplo, para $\beta = 30^\circ$
para estar del lado de la seguridad,
se recomienda tomar:

- $C = -1.5$ para colectores con muy poco pasaje de aire por debajo
- $C = -1.8$ para colectores con pasaje de aire por debajo relativamente libre

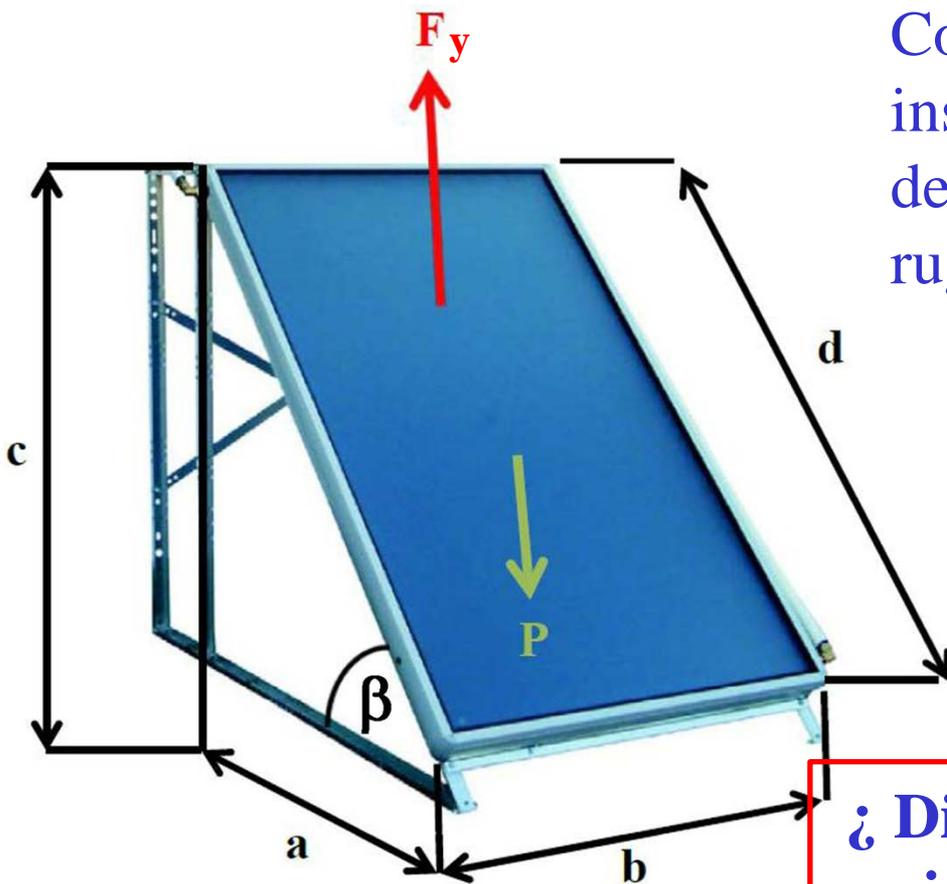


Para β entre 30° y 50°
se recomienda tomar:

$C = 1.2$ para cálculos con fuerza
positiva sobre el colector

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo



Colector plano sin acumulador a ser instalado en la azotea de un edificio de 10m de altura, en un terreno de rugosidad II, sin efecto de topografía

$$A = 2\text{m}^2 \quad P = 40\text{kgf}$$

$$b = 1\text{m}$$

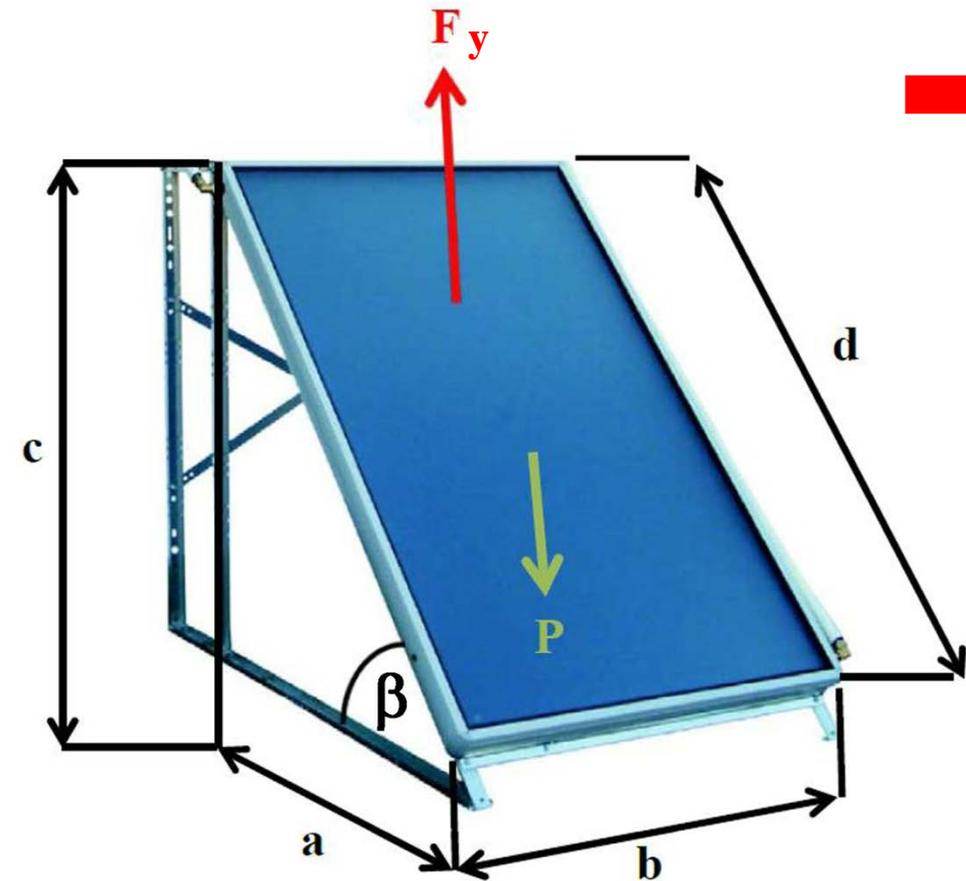
$$d = 2.08\text{m}$$

$$\beta = 40^\circ$$

¿ Diseño de su sujeción para un periodo de retorno de 20 años?

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo



$$a = \cos(\beta).d = 1.59\text{m}$$

$$c = \text{sen}(\beta).d = 1.34\text{m}$$

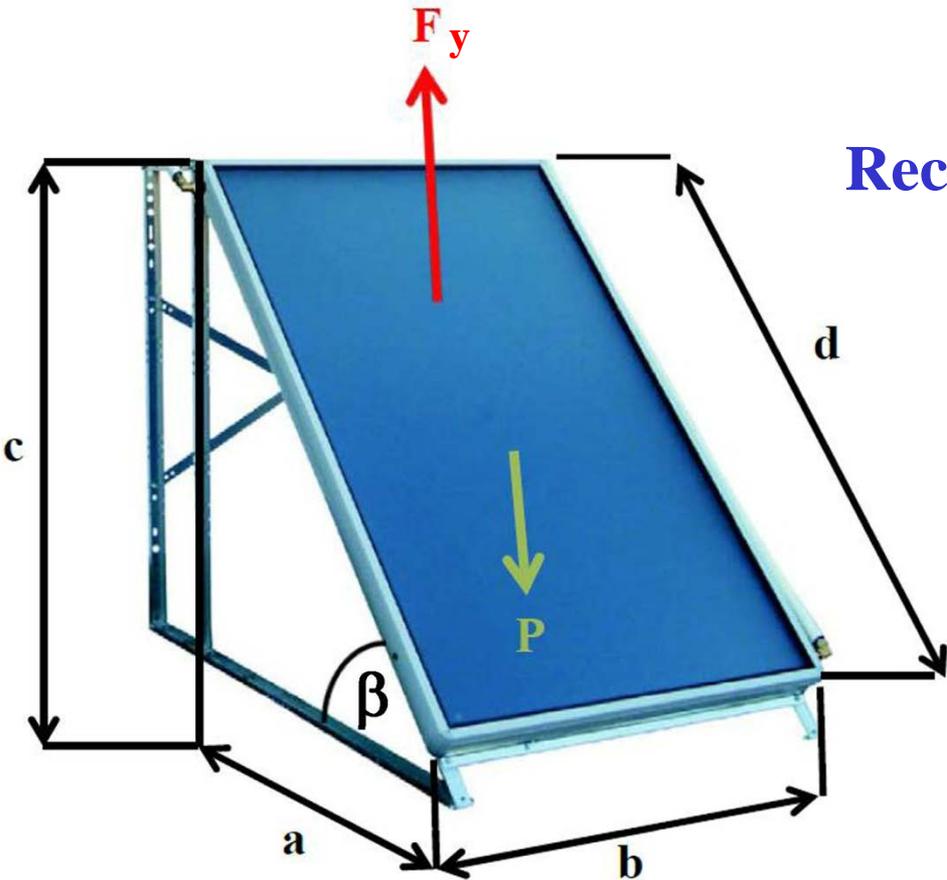
$$z = 10\text{m} + c = 11.34\text{m}$$

Para poder calcular **F** (fuerza perpendicular al colector) debemos calcular:

- **vc** para poder calcular **qz** y
- **C**

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo



Recuerdo:

$$v_c = K_t \cdot K_z \cdot K_d \cdot K_k \cdot v_k$$

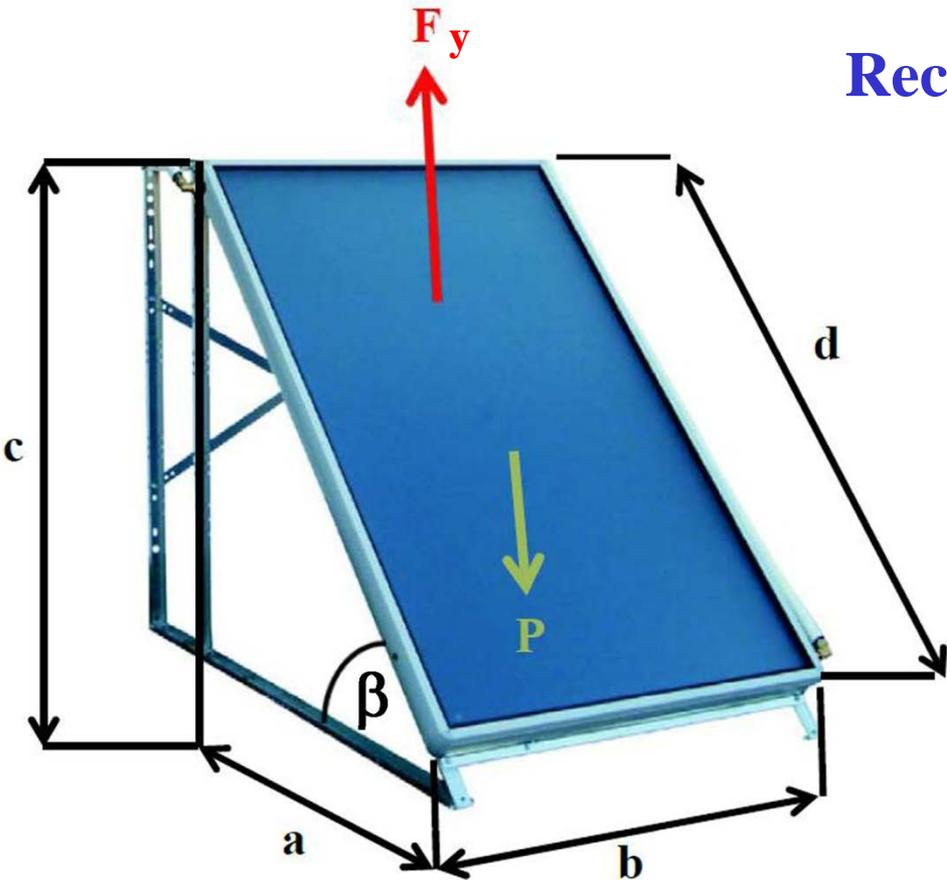
$$q_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_c^2 \cdot z^c$$

$$F = C \cdot A \cdot q_z$$

En este esquema, F_y es la componente vertical de la fuerza F . F también tiene una componente horizontal, F_x

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo



Recuerdo:

$$v_c = K_t \cdot K_z \cdot K_d \cdot K_k \cdot v_k$$

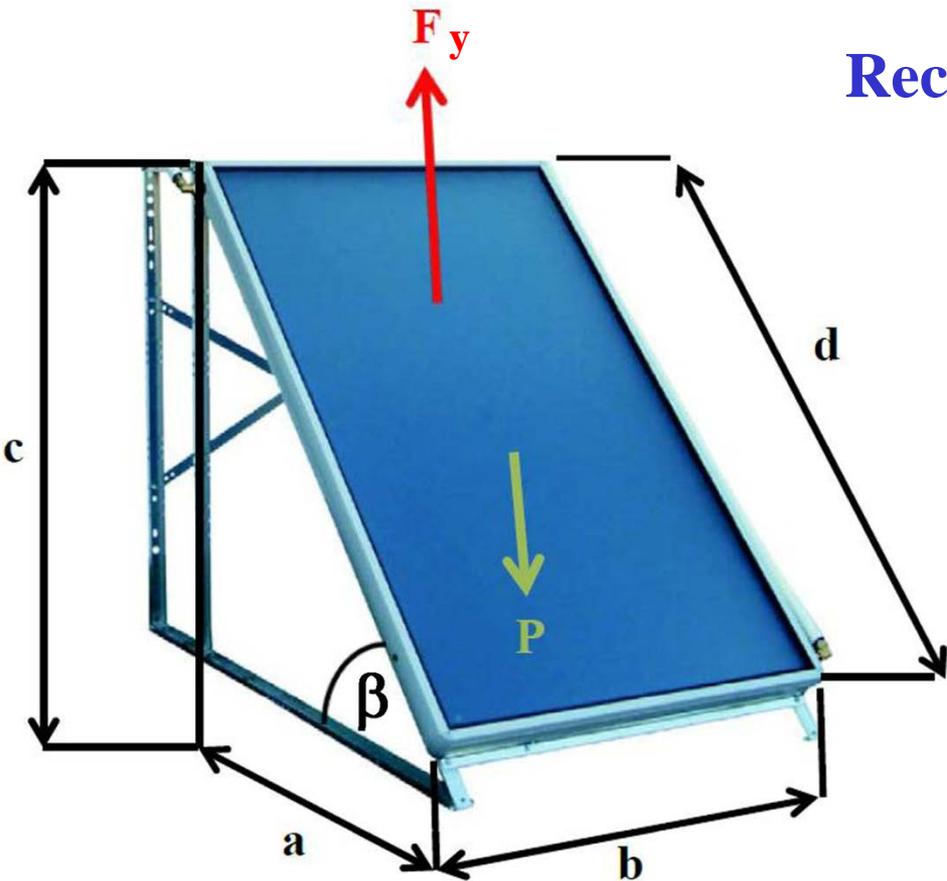
sin efecto de topografía



$$K_t = 1$$

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo



Recuerdo:

$$v_c = K_t \cdot K_z \cdot K_d \cdot K_k \cdot v_k$$

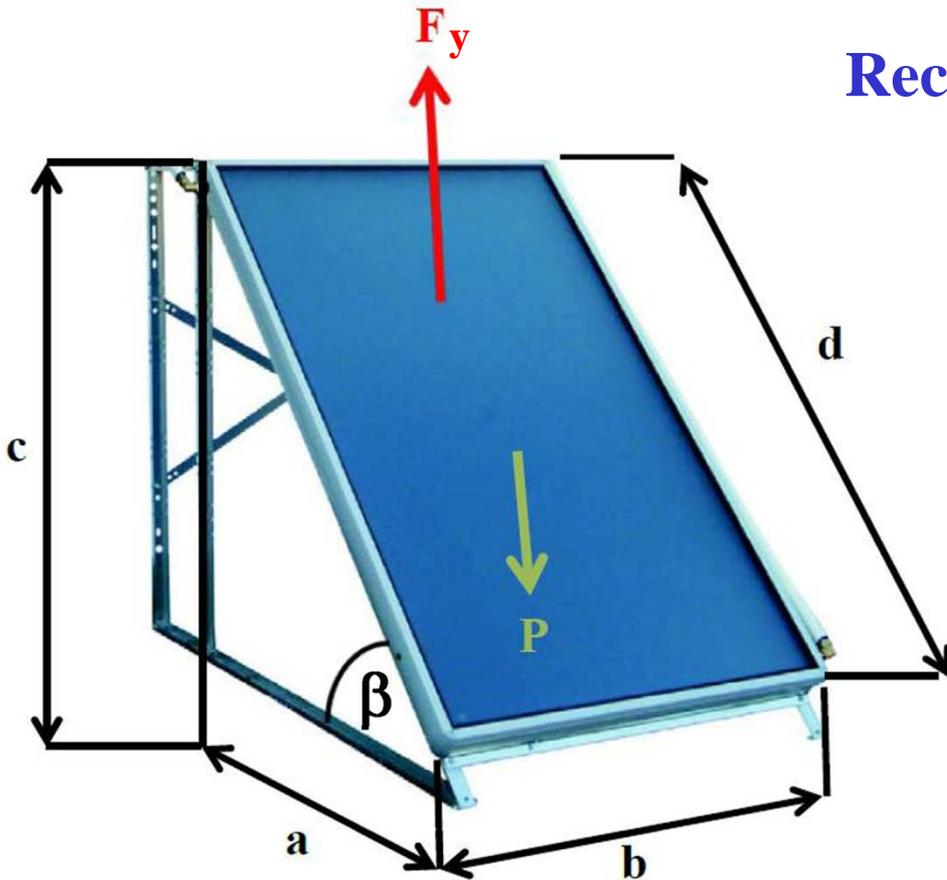
K_z : Tabla 6.2 de UNIT 50-84,
rugosidad tipo II, $z = 11.3\text{m}$

↓

$$K_z = 0.913$$

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo



Recuerdo:

$$v_c = K_t \cdot K_z \cdot K_d \cdot K_k \cdot v_k$$

K_d : Figura 6.2 de UNIT 50-84

— $A \leq 10\text{m}^2$, $z = 11.3\text{m}$

$$f_1 = 1$$

— rugosidad tipo II, $z = 11.3\text{m}$

$$f_2 = 1.015$$



Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo

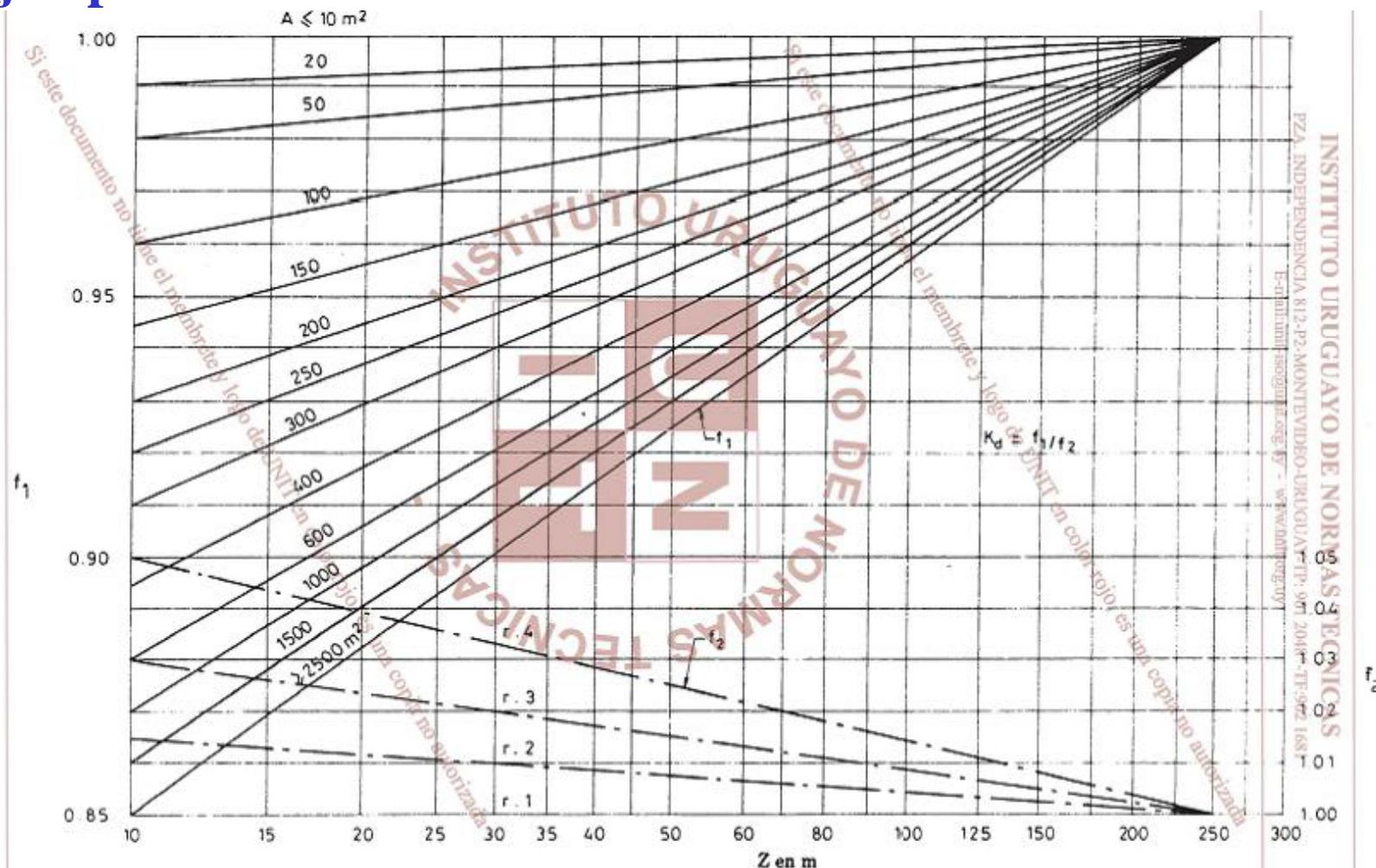
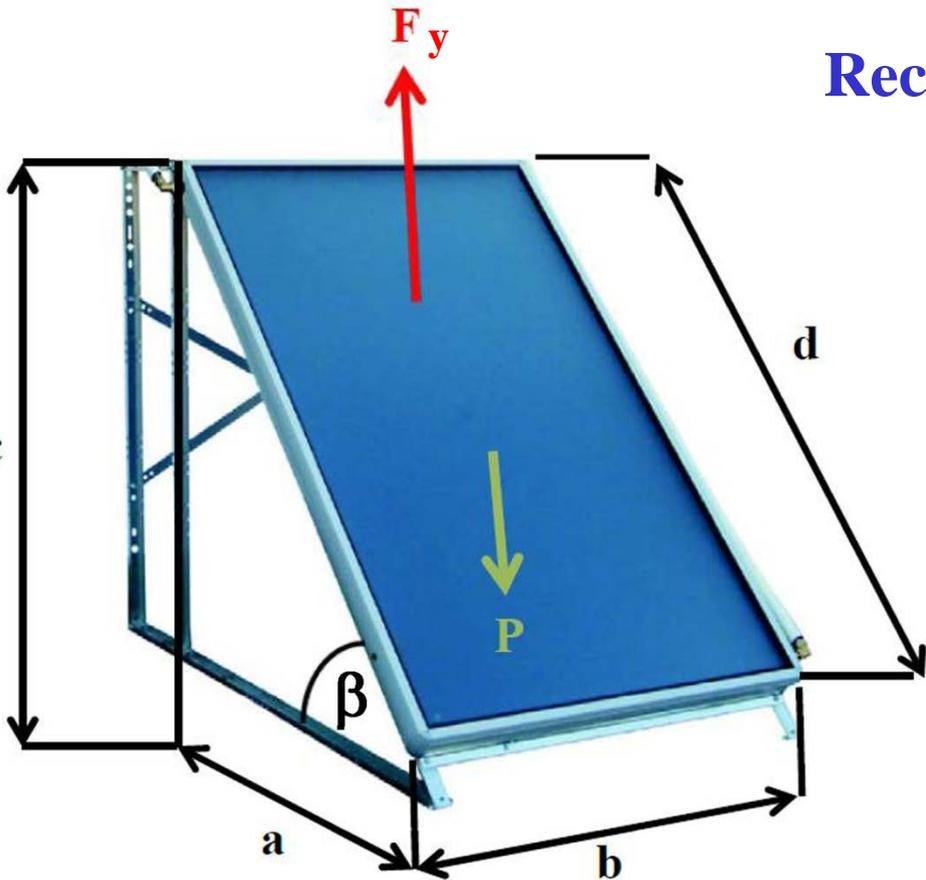


Figura 6.2

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo



Recuerdo:

$$v_c = K_t \cdot K_z \cdot K_d \cdot K_k \cdot v_k$$

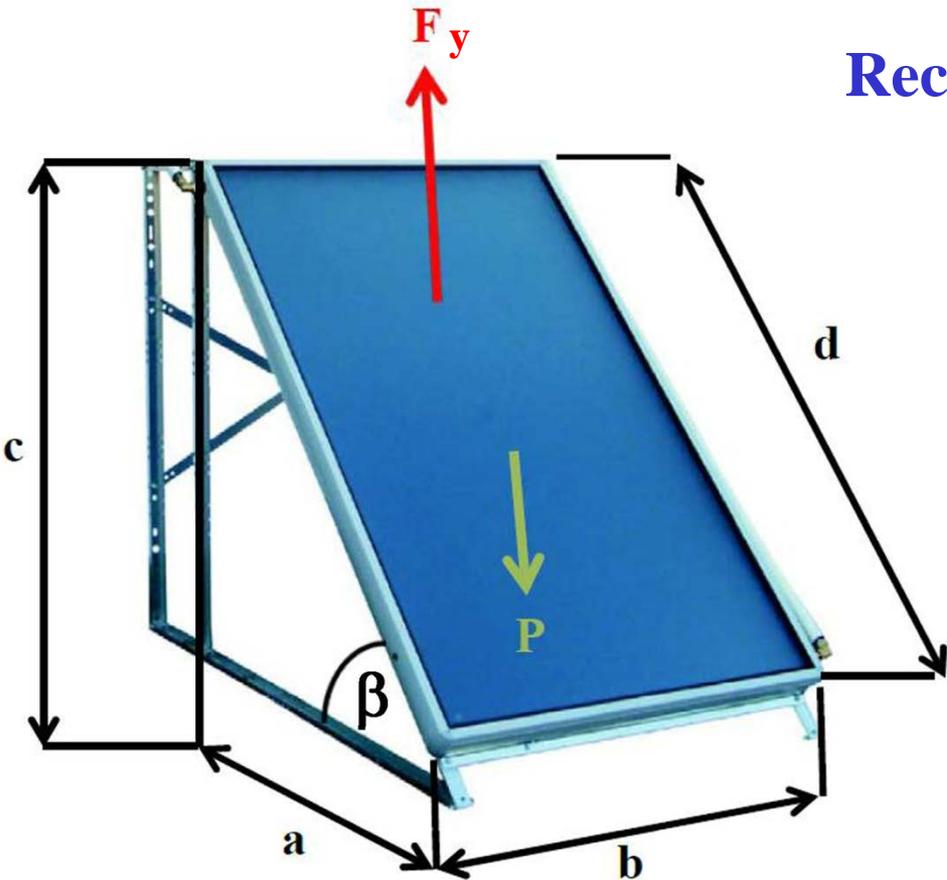
→ $K_d = f_1 / f_2 = 0.99 \cong 1$

Cálculo de F para un periodo de retorno de 20 años

↓
 $K_k = 1$

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo



Recuerdo:

$$v_c = K_t \cdot K_z \cdot K_d \cdot K_k \cdot v_k$$

Habíamos sugerido tomar el mismo valor de v_k para todo el país



$$v_k = 43.9 \text{ m/s}$$

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo

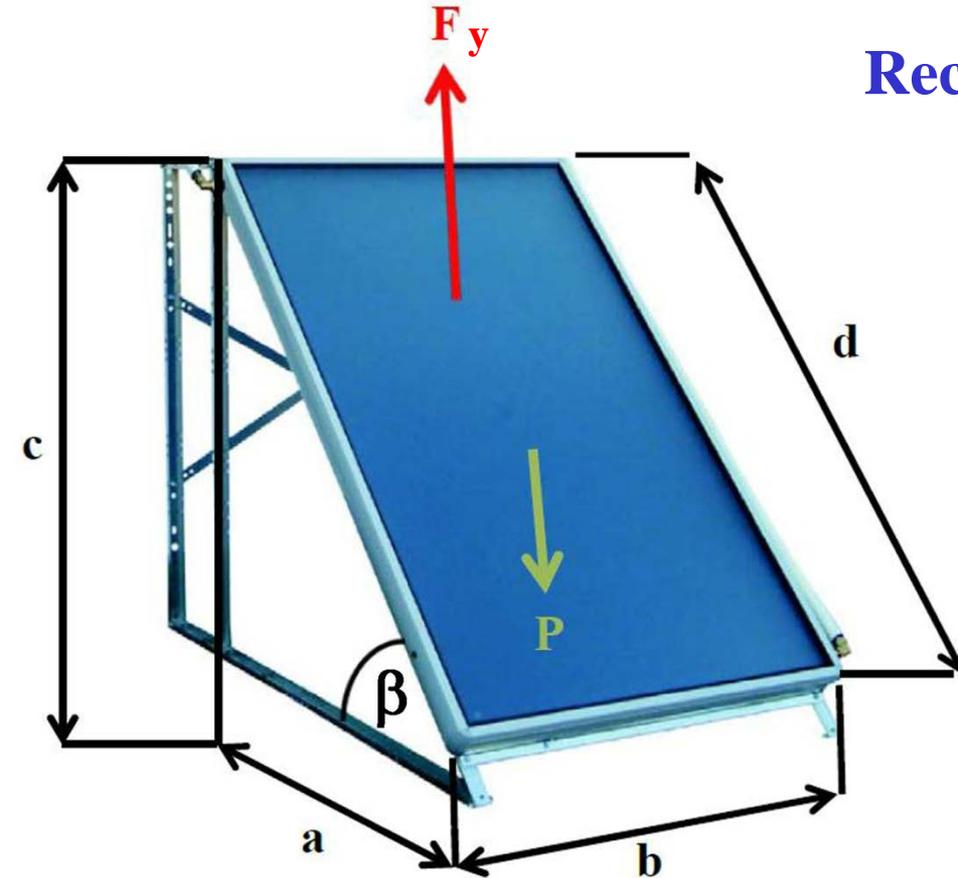
F_y

Recuerdo:

$$v_c = K_t \cdot K_z \cdot K_d \cdot K_k \cdot v_k$$

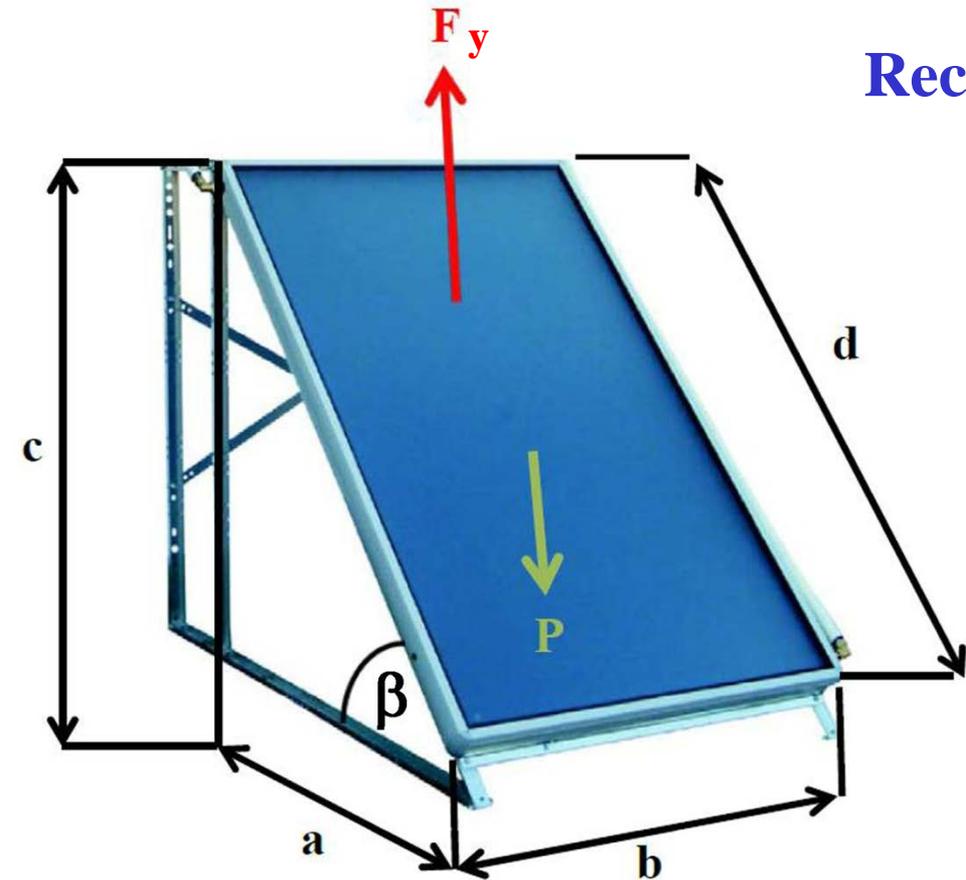


$$v_c = 1 \times 0.913 \times 1 \times 1 \times 43.9 = 40 \text{ m/s}$$



Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo



Recuerdo:

$$q_z = \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot z \cdot c \quad ()$$



$$q_z = 0.5 \times 1.23 \times 40^2 = 984 \text{ Pa}$$

$$F = C \cdot A \cdot q_z$$

$$A = 2.08 \text{ m}^2$$

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo

F_y

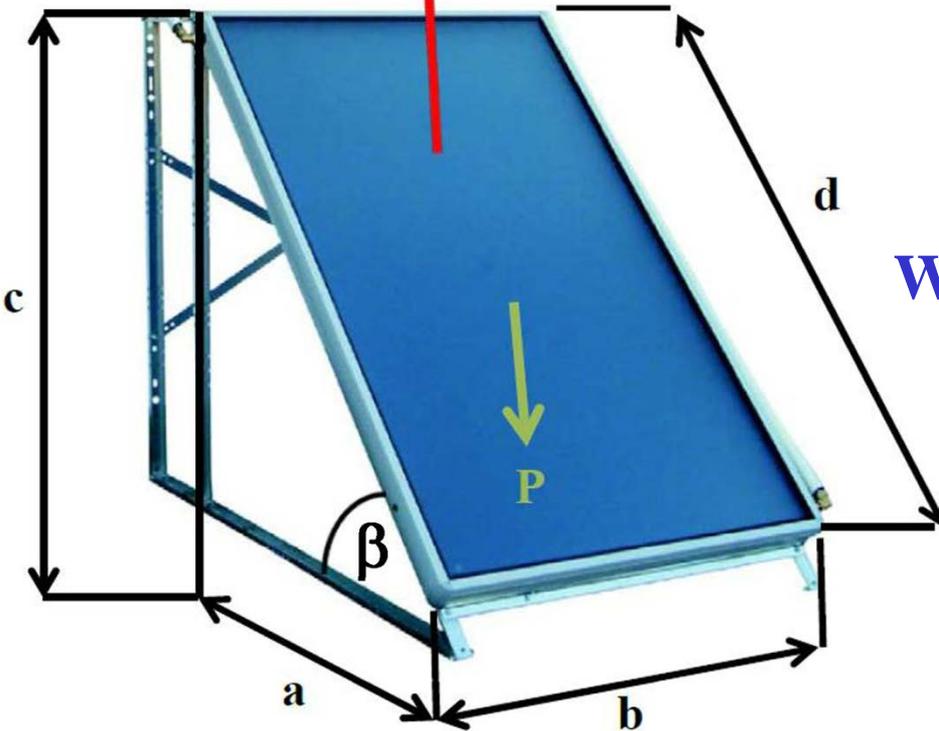
Recuerdo:

$$F = C \cdot A \cdot q_z$$

Wind Engineering Research Center,
2012

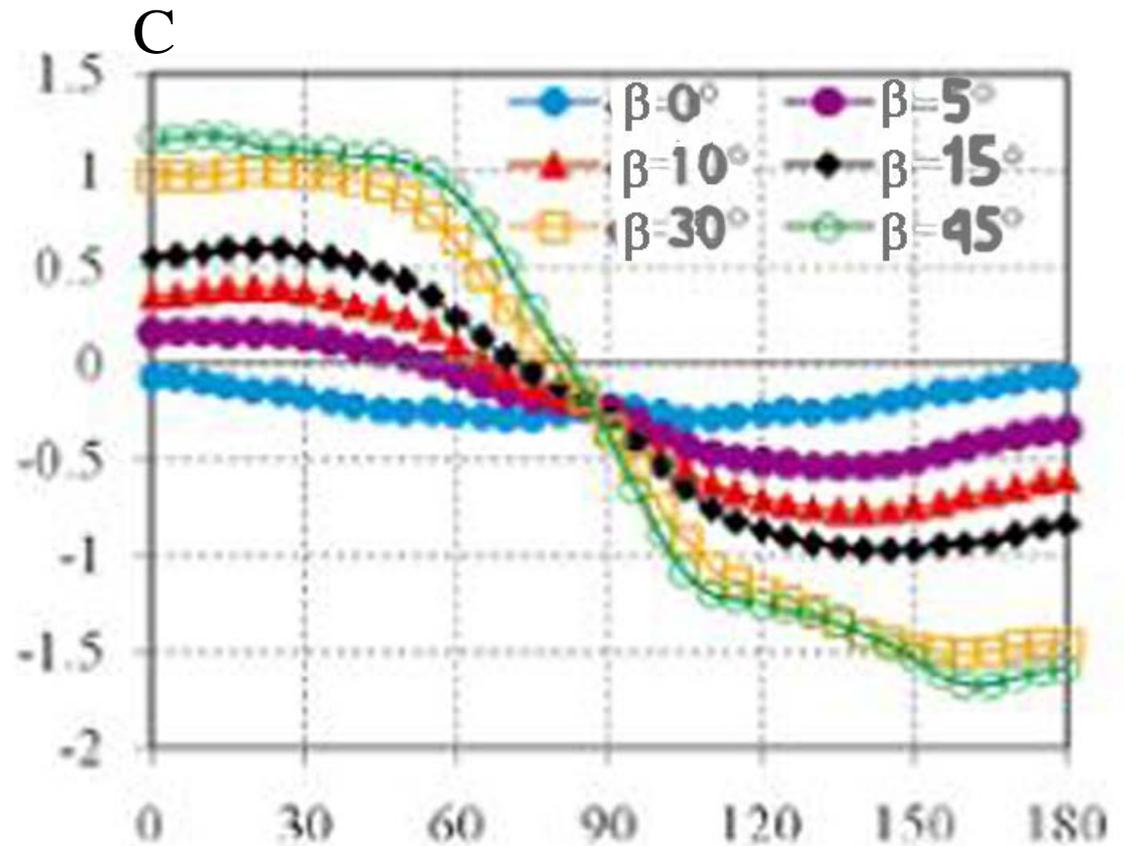
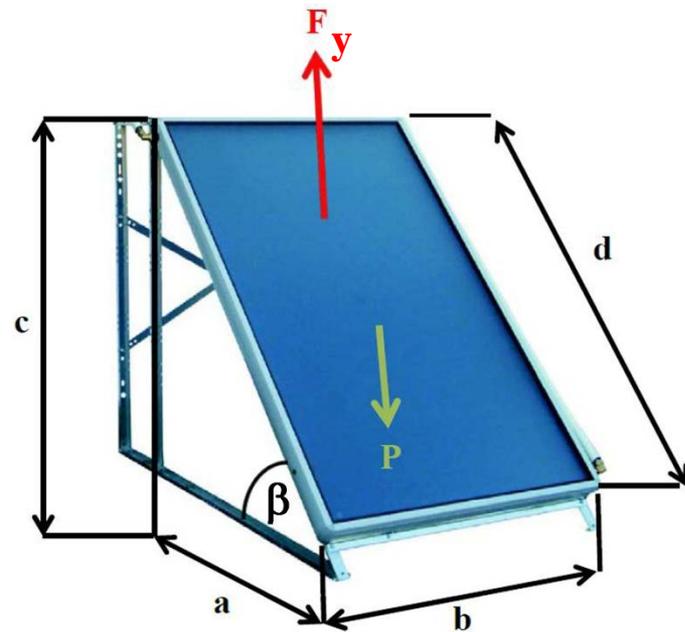
$C = -1.65$

$$F = -1.65 \times 2.08 \times 984 = 3377 \text{ N}$$



Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

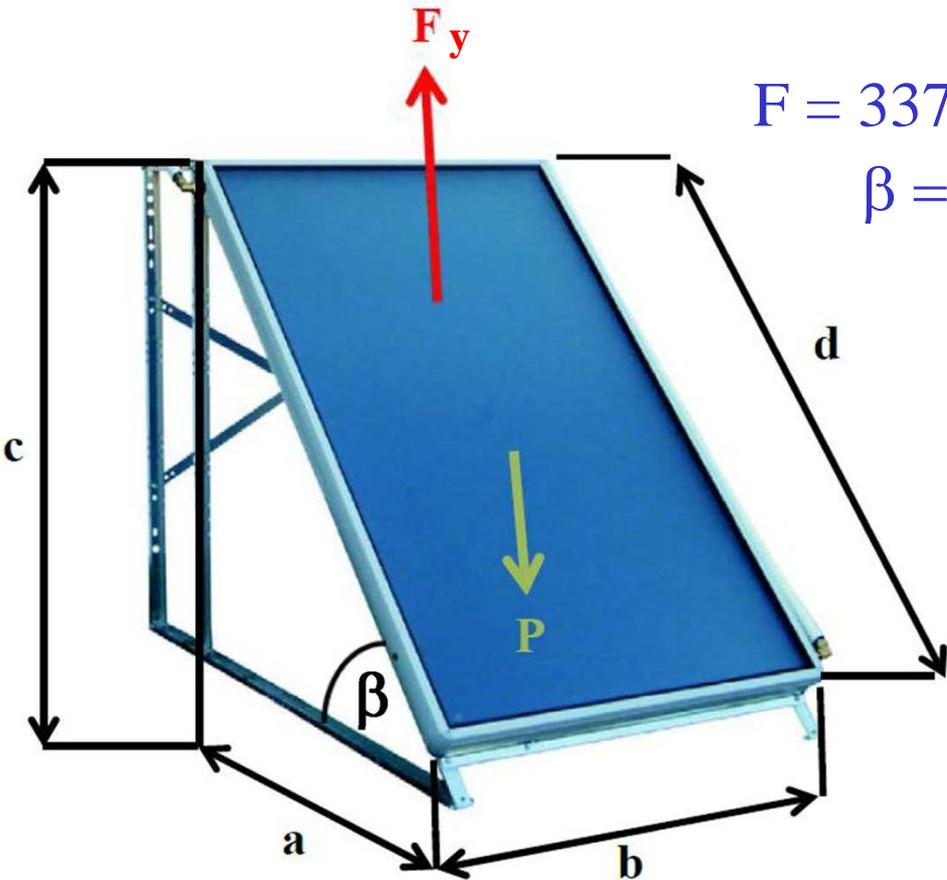
Ejemplo de cálculo



ángulos entre el viento y el panel

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Ejemplo de cálculo



$$F = 3377 \text{ N} \quad \beta = 40^\circ \quad \rightarrow \quad F_y = 3377 \times \cos(40) = 263 \text{ kgf}$$

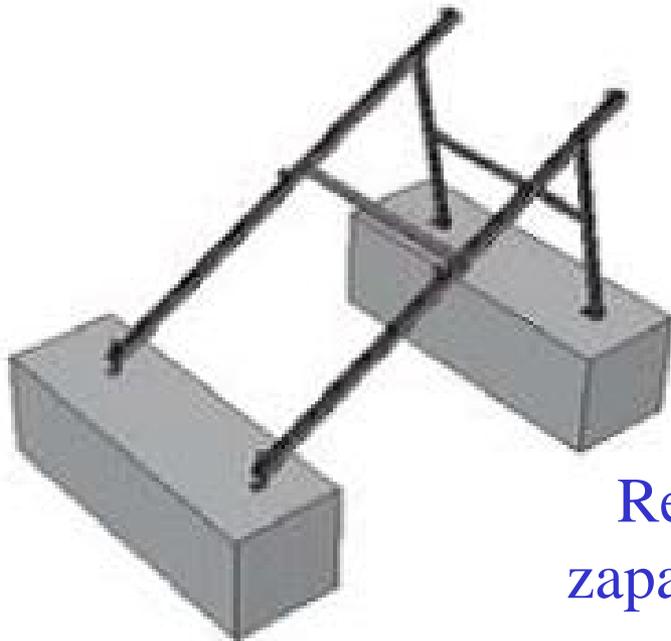


Los apoyos deberán soportar una fuerza vertical ascendente de:

$$F_y - P = 263 - 40 = 223 \text{ kgf}$$

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Cálculo de contrapesos



Suponiendo que el sistema de sujeción es el indicado en esta figura

se deberá calcular el peso de cada zapata planteando el equilibrio de fuerzas y momentos

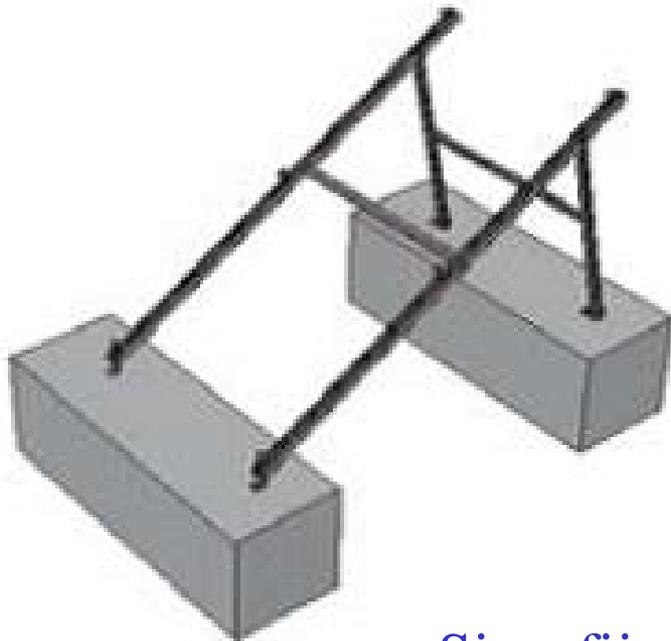
Realizando algunas suposiciones, para la zapata delantera se podría tener por ejemplo:

$$P_1 = 46 \text{ kgf}$$

y para la zapata trasera: $P_2 = 177 \text{ kgf}$

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Cálculo de contrapesos



Suponiendo una densidad del
hormigón de 2300 kg/m^3

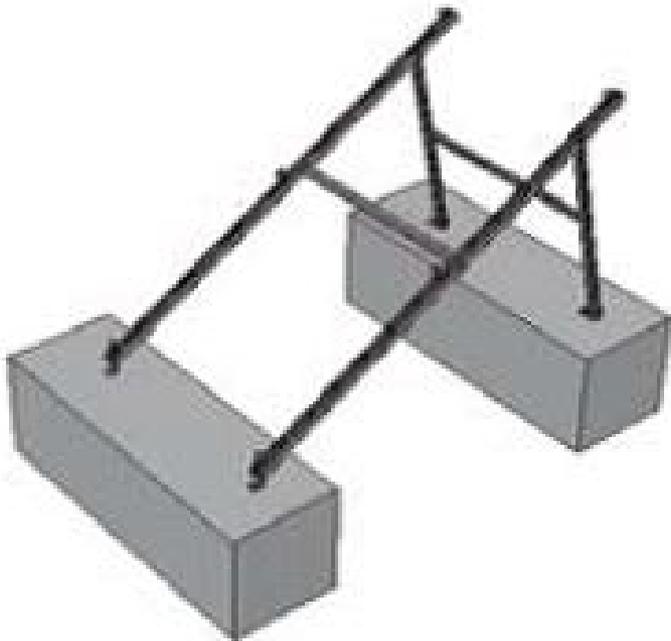
y zapatas de 1m de largo

La sección de la zapata trasera
debería ser como mínimo
de $28 \text{ cm} \times 28 \text{ cm}$,
o de $20 \text{ cm} \times 39 \text{ cm}$

Si se fijara una altura de 20 cm por ej,
la zapata delantera debería ser como
mínimo de $20 \text{ cm} \times 10.7 \text{ cm}$

Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Cálculo de contrapesos



Se recomienda manejar los números anteriores con cuidado, debido a la serie de suposiciones de cálculo realizadas e incertidumbres mencionadas en relación a la acción del viento sobre colectores solares

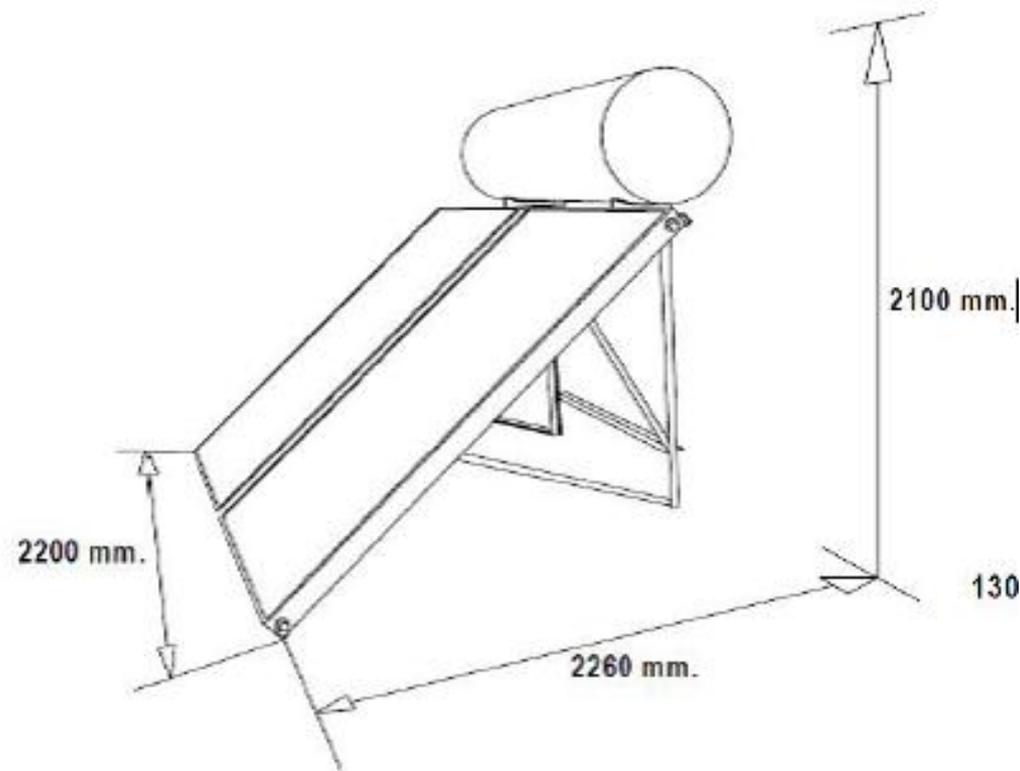
Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Otros casos de colectores



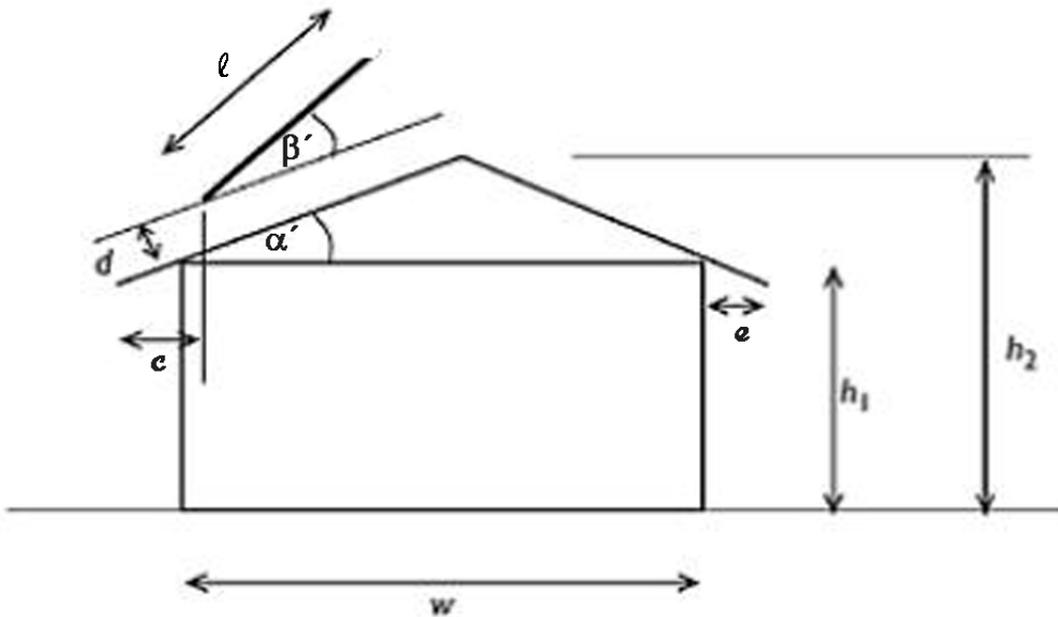
Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Otros casos de colectores



Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Otros casos de colectores



Cálculo de fuerzas sobre colectores solares por acción del viento

Otros casos de colectores



Conclusiones

Tanto en el caso de las tormentas convectivas severas como en el de los ciclones extratropicales intensos se pudo apreciar que

las máximas velocidades provienen del cuadrante suroeste

El análisis de una serie de casos en los que $U_{ráf} > 80$ km/h mostró:

- que existiría una zona en el centro-sur del país con velocidades de ráfaga relativamente más altas y un mayor número de eventos que superan ese umbral
 - y que en la mayoría de los casos estos eventos corresponden al pasaje de una tormenta convectiva severa por el sitio

Conclusiones

El entorno cercano y la propia edificación donde se coloque un colector solar pueden influir de manera significativa en las cargas por viento que se produzcan sobre él, lo cual debería considerarse en el diseño de su sistema de sujeción.

Se debe evitar colocar colectores solares (o diseñar su sujeción con mayores coeficientes de seguridad), si van a estar expuestos en un sitio donde el flujo se contraiga y se puedan producir aceleraciones, y por consiguiente, mayores velocidades de viento.

Conclusiones

Las cargas por viento sobre los paneles solares pueden ser muy importantes, en particular las cargas por succión, por lo que se debe diseñar con cuidado el sistema de sujeción.

Dado que lo planteado en este curso es una primera aproximación al problema y teniendo en cuenta el impulso actual que se le está dando a la utilización de la energía solar térmica en el país, se recomienda profundizar más en los posibles métodos de sujeción, en particular involucrando a ingenieros estructurales en su estudio.

Se debe tener especial cuidado en evitar colocar colectores solares muy cerca de las esquinas de las viviendas con techo inclinado, ya que allí se producen presiones de succión muy importantes con viento oblicuo, especialmente si éste puede provenir del cuadrante suroeste.

Conclusiones

Se debe prestar especial atención a los colectores planos con cubierta, pues sobre ellos se producen las mayores cargas por m^2 de superficie total y, en particular, si se van a encontrar muy expuestos al cuadrante suroeste en su parte trasera,

ya que en ese cuadrante se producen las ráfagas más fuertes en nuestro país

En particular, en alturas entre 30 m y 100 m, las velocidades de viento pueden ser mayores que las calculadas a partir de la norma UNIT 50-84, debido a la alta frecuencia de ocurrencia de tormentas convectivas severas en nuestro país.

Conclusiones

Adicionalmente al cálculo de la carga sobre los colectores solares, se debe verificar que la estructura donde se coloquen pueda resistir las cargas adicionales que impondrá los colectores, debido a la fuerza por acción del viento sobre ellos en sentido descendente y su peso.

En casos de emprendimientos económicos importantes, o que puedan poner en riesgo a muchas personas en caso de falla por viento, se recomienda verificar los cálculos consultando a especialistas en interacción viento-estructuras e ingenieros estructurales.

Si las cargas por viento que se producen en un caso particular no se pueden estimar con la bibliografía existente, se cuenta con la posibilidad de realizar estudios específicos en túnel de viento