



## Análisis de la estabilidad atmosférica mediante distintas formulaciones del número de Richardson

**Autor:** Ramón Vilorio Raymundo

**Institución:** Universidad de Burgos

**Otros autores:** Verónica Tricio (Universidad de Burgos, España); J. F. Oliveira-Júnior (Agricultural Federal University of Rio de Janeiro, Brazil); Gustavo B. Lyra (Agricultural Federal University of Rio de Janeiro, Brazil)

## Resumen

El número de Richardson es un importante parámetro para abordar el estudio de la estabilidad atmosférica y de las condiciones locales de turbulencia, factores determinantes en el transporte y dispersión de contaminantes tanto a escala local como regional. En el número de Richardson intervienen tanto las fuerzas convectivas como las mecánicas presentes en los movimientos atmosféricos, y su valor y signo permite cuantificar la importancia relativa de ambas.

En este trabajo utilizaremos tres formulaciones distintas del número de Richardson ( $R_i$ ) para diversas condiciones, principalmente en época invernal. Estas distintas definiciones son  $R_i$  (tradicional),  $R_{ig}$  (gradiente) y  $R_i(z_m)$ . Se han utilizado datos meteorológicos obtenidos mediante la torre instrumentada de 9 m de altura ubicada en el aeropuerto de Villafría, próximo a la ciudad de Burgos, un terreno llano de transición entre zona urbana y rural. Los resultados para  $R_i$  muestran un predominio de las situaciones de estabilidad, junto a la estratificación neutra. Esta última predomina cuando se analiza  $R_{ig}$ , mientras que  $R_i(2.6)$  y  $R_i(8.25)$  muestran resultados coincidentes en situaciones neutras. Se puede detectar también la presencia de ondas de Kelvin-Helmholtz en la Capa de Mezcla. A pesar de ciertas discrepancias entre unas y otras formulaciones y a la diferente manera en que, desde el punto de vista matemático éstas calculan las contribuciones térmica y dinámica, este parámetro permite una evaluación rutinaria de las condiciones de estabilidad con un alto grado de precisión

**Palabras claves:** meteorología; estabilidad atmosférica; número de Richardson

## 1. INTRODUCCIÓN

El número de Richardson ( $R_i$ ) es un importante parámetro en lo que se refiere a condiciones de turbulencia local y, en general, a estudios de estabilidad atmosférica (Ashrafi y Hoshyaripour, 2010). Este factor resulta ser fundamental en el transporte y dispersión de contaminantes en escalas locales y regionales (Stull, 1988). Las condiciones de estabilidad pueden ser clasificadas de forma dinámica o estática, pero ambas descripciones por separado suministran información incompleta sobre la turbulencia en una región (Arya, 2005; Jacobson, 2005). La descripción estática no aporta información sobre los efectos de cizalla en la generación de turbulencia, y las descripciones dinámicas no consideran los procesos locales que pueden contribuir a su generación. Ambas clasificaciones son, por ello, necesarias para determinar las características de la turbulencia en un fluido (Pardyjak et al., 2002).

$R_i$  determina la estabilidad a través de la relación entre las fuerzas convectivas y mecánicas que intervienen en los movimientos atmosféricos. Otros métodos usados, como es el determinar las condiciones de turbulencia a través  $dT/dz$  and  $d\theta/dz$  proporcionan resultados menos precisos, pues no consideran los términos de turbulencia mecánica (cizalladura mecánica del viento). De todas maneras, estos métodos funcionan correctamente para caracterizar la estabilidad estática (Nakanishi, 2001; Zilitinkevich y Baklanov, 2002). Sin embargo, muchos estudios experimentales utilizan  $R_i$  junto con otros indicadores de estabilidad como la longitud de Monin-Obukhov ( $L$ ), las clases de estabilidad de Pasquill-Gifford (P-G) o la clasificación de Turner (Mohan y Siddiqui, 1998; Sharan y Rama Krishna, 2003).

$R_i$  puede evaluarse por distintos métodos como el Richardson Flux ( $R_f$ ) y el Richardson Bulk ( $R_{iB}$ ). Hay algunos problemas con valores elevados en  $R_f$  debido a los términos de correlación turbulenta presentes en la fórmula de este parámetro (Pardyjak et al., 2002). Las consideraciones físicas basadas en la teoría-K y la proporcionalidad ( $K_r/K_v=1$ ) de la teoría de similaridad conducen a una nueva expresión de  $R_i$ , el número de Richardson del gradiente ( $R_{ig}$ ). Globalmente,  $R_f$  representa la relación entre las turbulencias térmica y mecánica generadas por la cizalladura vertical.

El objetivo de este trabajo es evaluar tres formulaciones de  $R_i$  usadas con frecuencia:  $R_i$  (tradicional),  $R_{ig}$  (gradiente) y  $R_{i(zm)}$  (gradiente geométrico), y el análisis de estos parámetros se basará en sus contribuciones térmica y dinámica, así como en consideraciones de estabilidad propias de la estación invernal analizada en Burgos.

## 2. METODOLOGÍA

La zona de estudio está localizada en el aeropuerto de Villafraía (42° 22'N, 03° 38'W y 894 m), cerca de Burgos (Castilla y León, España). El aeropuerto se halla a 7 km del centro de la ciudad, en un terreno llano próximo a un polígono industrial, en una zona de transición entre condiciones urbanas y rurales. Allí se halla operativa una torre meteorológica de 9 m de altura (Fig.1a). Tres niveles instrumentados (0.75, 3 y 9 m) proporcionan las medidas, y el sistema almacena los datos, que son obtenidos de forma continua, en promedios de 10 minutos. La velocidad de viento ( $u$ ,  $m \cdot s^{-1}$ ), la humedad relativa (RH, %) y la temperatura ( $T$ , °C) se miden en los tres niveles, la dirección de viento a 0,75 y 9 m. También se determinan la temperatura del suelo (0.5, 0.25 y 0.10 m), la presión atmosférica y las radiaciones neta y global ( $R_g$ ,  $W \cdot m^{-2}$ ) (Fig. 1b). En este estudio usamos datos obtenidos en febrero de 1999, por tanto condiciones invernales



**Figura 1.** Torre meteorológica de 9 m (a) y detalle de los sensores (b).

Con estos datos, se han calculado el  $R_i$  tradicional (ecuaciones 2 y 3) y el geométrico (ecuaciones 4 y 5). El rango  $-10 < R_i < 10$  ha sido excluido del estudio estadístico.

Se define la temperatura potencial como:

$$\theta = T \left( \frac{p_0}{p} \right)^{0,286} \quad (1)$$

donde  $p$  (mb) es la presión,  $p_0$  (mb) es la presión de referencia,  $T$  (K) es la temperatura del aire.

Las expresiones del número de Richardson son:

$$R_i = \frac{g(d\theta/dz)}{\theta(d\bar{u}/dz)^2} \quad (2)$$

donde  $R_i$  es el número de Richardson tradicional,  $g/\bar{\theta}$  ( $m \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$ ) es el parámetro de flotabilidad,  $d\bar{u}/dz$  ( $s^{-1}$ ) es la cizalladura promedio del viento y  $d\theta/dz$  ( $K \cdot m^{-1}$ ) es el gradiente de temperatura potencial.

$$R_{i_g} = \frac{N^2}{(d\bar{u}/dz)^2} \quad (3)$$

donde  $R_{i_g}$  es el número de Richardson del gradiente y  $N$  ( $s^{-1}$ ) es la frecuencia de Brunt-Väisälä.

Las formulaciones geométricas son:

$$R_{i_B} = \frac{g}{T_0} \frac{\Delta\theta}{(\Delta U)^2} \Delta z \quad (4)$$

donde  $R_{i(g)}$  es el número de Richardson global y  $\Delta z$  (m) es el intervalo de alturas. Entre los niveles de la torre meteorológica (0.75 y 9 m), se obtiene  $\Delta z = 8.25$ , y lo denotaremos en adelante como  $R_i(8.25)$ .

$$R_i(z_m) = \frac{g}{T_0} \frac{\Delta\theta}{(\Delta U)^2} z_m \ln(z_2/z_1), \quad z_m = \sqrt{z_1 z_2} \quad (5)$$

donde  $R_i(z_m)$  es el número de Richardson del gradiente geométrico, y  $z_m$  (m) es la altura geométrica media. <entre los niveles de la torre (0.75 y 9 m) se obtiene  $z_m \cong 2.6$  m, y lo denotaremos en adelante como  $R_i(2.6)$ .

Se han establecido algunas condiciones de estabilidad: (i) los valores en el rango  $-10 < R_i < 10$  se han eliminado, (ii) para las formulaciones adoptadas, se analizan las contribuciones térmica y dinámica, y (iii) se analiza igualmente el régimen del flujo. En el

proceso de selección de datos según los criterios se ha utilizado Visual Basic (Tabla 1 y 2).

Tabla 1. Criterios de disponibilidad para la estabilidad atmosférica a partir de  $R_i(z_m)$ ,  $R_{iB}$ ,  $R_i$  e  $R_{ig}$ .

Condiciones	Criterios	Clasificación atmosférica
1	$R_i = 0$	Neutra
	$R_i < 0$	Inestable
	$R_i > 0$	Estable
2	$R_i < -0,03$	Convección libre
	$R_i > -0,03$	Convección forzada
	$R_i > 0,25$	Estable
	$R_i = 0$	Neutra
	$0,21 < R_i < 0,25$	Kelvin-Helmholtz

Fuente: Stull, 1988.

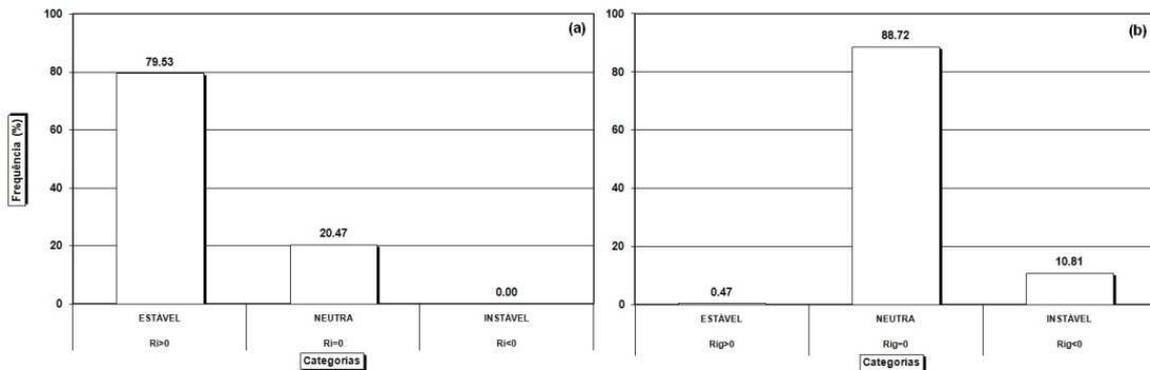
Tabla 2. Características del flujo atmosférico a partir de  $R_{iB}$  e  $R_{ig}$ .

$R_{iB}$ o $R_{ig}$	Tipo de flujo	Flotabilidad	Cizall. del viento
Fuerte, negativa	Turbulento	Fuerte	Débil
Débil, negativa	Turbulento	Débil	Fuerte
Débil, positiva	Turbulento	Estabilidad débil	Fuerte
Fuerte, positiva	Laminar	Estabilidad fuerte	Débil

Fuente: Jacobson, 2005.

### 3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

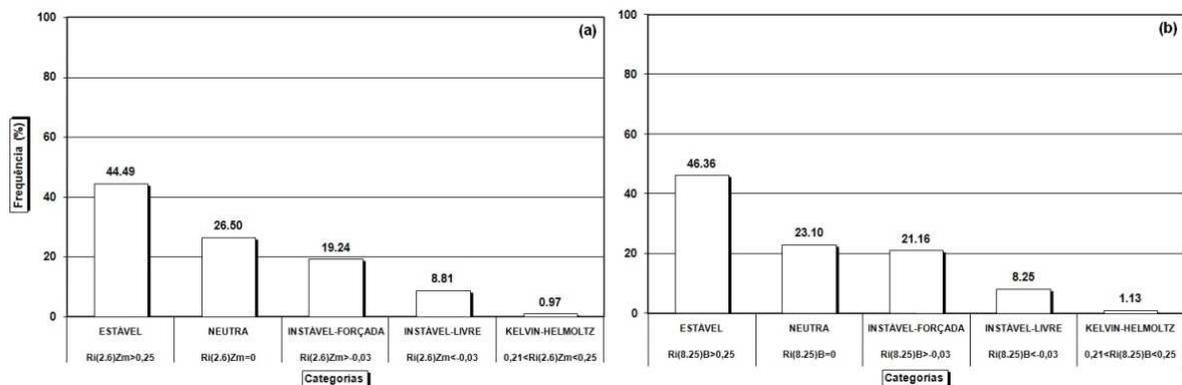
En los meses de invierno estudiados, las condiciones estables (79.53%) y neutras (20.47%) a partir de los cálculos de  $R_i$  son dominantes, como puede también comprobarse en la Fig. 2(a); con esta formulación tradicional, no se han encontrado, sorprendentemente, casos inestables. En la Fig. 2(b), el cálculo de  $R_{ig}$  muestra una muy alta frecuencia de situaciones de neutralidad (88.72%), y un incremento de situaciones de inestabilidad (10.81%) y casi ningún caso estable (0.47%). Este distinto comportamiento entre ambas formulaciones se debe a la diferente evaluación que realizan de las contribuciones térmica y dinámica en el cálculo de  $R_i$  and  $R_{ig}$ , y a las condiciones particulares de viento y temperatura en la época anticiclónica invernal en que se han tomado los datos.



**Figura 2.** Frecuencia media de  $R_i$  (a) y  $R_{ig}$  (b) para Febrero de 1999.

Las condiciones de temperatura y velocidad de viento durante este periodo muestran unos niveles de temperatura muy uniformes salvo en los últimos días, debido a un cambio en las condiciones sinópticas y un aumento notable de las nubes, similar a lo obtenido en estudios previos (Kwon and Oliveira Júnior, 2004 y Oliveira Júnior et al., 2003). Las oscilaciones en los valores de velocidad de viento y por ello la contribución dinámica parecen influir fuertemente en el cálculo de  $R_{ig}$ .

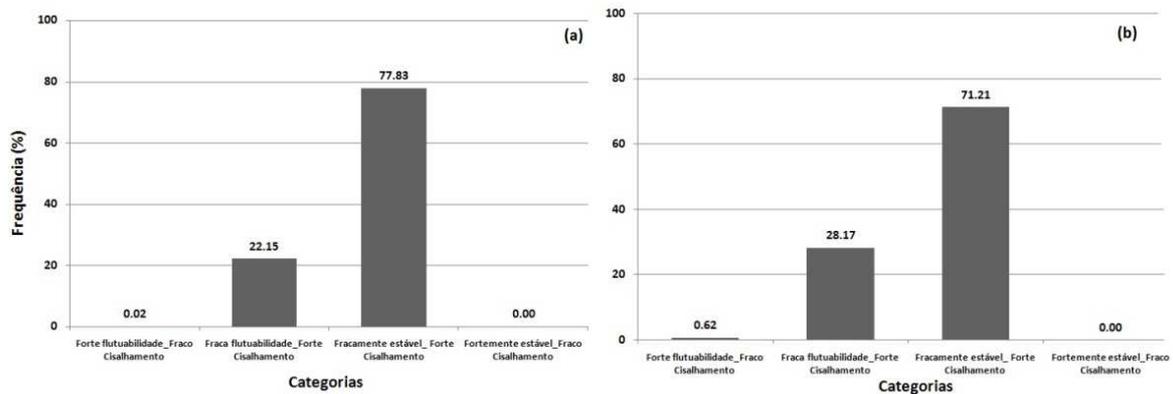
Por tanto, concluimos que para  $R_{ig}<1$  (inestable) en invierno, la mezcla turbulenta se mantiene a causa de la cizalladura del viento, siendo dominantes las condiciones de neutralidad; para  $R_{ig} = 1$  (estable), el régimen turbulento se limita a pequeña escalas no afectadas por la cizalladura del viento.



**Figura 3.** Frecuencia media de  $R_i(2.6)$  (a) y  $R_i(8.25)$  (b) para Febrero de 1999.

El análisis para este periodo de invierno se desarrolla a continuación a partir de  $R_i(2.6)$  y  $R_i(8.25)$ , como se muestra en la fig. 3. Las condiciones dinámicamente estables (44.49%), neutras (26.50%) e inestables forzadas (19.24%) dominan sobre otras condiciones, principalmente a causa del régimen de vientos invernal (fig. 3, a). También dominan las condiciones estables para  $R_i(8.25)$ , con algunos casos de neutralidad, inestables forzadas y libres. Los pocos casos de inestabilidad de Kelvin-Helmholtz muestran que en algunas situaciones la producción de turbulencia mecánica excede las condiciones de flotabilidad térmica observadas. También se observan, a pesar de las condiciones invernales, algunas situaciones de convección libre y forzada, probablemente con origen en la vegetación o la topografía. En la Capa Límite Atmosférica, dado que el

terreno es llano y esa influencia topográfica más improbable, quizá hay que atribuir el comportamiento a perturbaciones sinópticas. Los resultados obtenidos, poco realistas para las formulaciones tradicional y geométrica, nos llevan a considerar mucho más adecuado el uso de  $R_{ig}$  y  $R_i(8.25)$  pues representan de forma más adecuada las contribuciones térmica y dinámica.



**Figura 4.** Contribuciones térmica y dinámica en los parámetros  $R_{ig}$  (a)  $R_i(8.25)$  (b).

En la Fig.4(a) se muestran las altas contribuciones de débilmente estable-fuerte cizalladura (77.83%), y débil flotabilidad-fuerte cizalladura (22.15%), sin otros casos. El mismo resultado se obtiene con la formulación de  $R_i$  geométrico, excepto algunos casos de fuerte flotabilidad-débil cizalladura ( $\approx 1.0\%$ ) y sin casos en las otras categorías. Los datos que ofrecen mayores frecuencias muestran que la cizalladura del viento domina sobre el régimen de flotabilidad en las condiciones atmosféricas locales estudiadas.

#### 4.- CONCLUSIONES

Las formulaciones más habituales del número de Richardson ( $R_i$  e  $R_{ig}$ ) muestran que las condiciones neutras y estables son dominantes en los datos analizados; las formulaciones geométricas ( $R_i(2.6)$  y  $R_i(8.25)$ ) conducen a resultados diferentes, más realistas, con un gran número de situaciones de estabilidad, acordes con la situación sinóptica anticiclónica dominante, y con menos casos de estratificación inestable forzada y neutra.

También hemos visto casos de situaciones de inestabilidad de Kelvin-Helmholtz y, a pesar del pequeño número de casos, es posible mostrar que la producción mecánica excede a las condiciones de flotabilidad. Las formulaciones que consideran tanto las contribuciones térmica como dinámica muestran una mayor contribución de los casos débilmente estable-fuerte cizalladura (dinámicos) seguidos por débil flotabilidad-fuerte cizalladura (térmica) en las condiciones invernales estudiadas. Finalmente, el estudio muestra las diferencias matemáticas entre las diversas formulaciones de  $R_i$  en las contribuciones térmica y dinámica para los datos meteorológicos utilizados.

## 5.- REFERENCIAS

- Arya, S. P. Micrometeorology and Atmospheric Boundary Layer. Pure and Applied Geophysics, v. 162, 1721-1745, 2005.
- Ashrafi, K., Hoshyaripour, G. A. A Model to Determine Atmospheric Stability and its Correlation with CO Concentration. International Journal of Civil and Environmental Engineering, v. 2, 83 – 88, 2010.
- Jacobson, M. Z. Fundamentals of Atmospheric Modeling, 2<sup>a</sup> ed., Cambridge University Press, New York-USA, 2005.
- Kwon, B. H, Oliveira Júnior, J. F. Variation of Turbulent Fluxes in the Atmospheric Surface Layer According to the Presence of Cloud. Journal Korean Earth Science Society, v. 25, 87 -93, 2004.
- Mohan, M., Siddiqui, T. A. Analysis of Various Schemes for the Estimation of Atmospheric Stability Classification. Atmospheric Environment, v. 32, 3775–3781, 1998.
- Nakanishi, M. Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large-eddy simulation data. Boundary Layer Meteorology, v. 99, 349-378, 2001.
- Oliveira Júnior, J. F., Kwon, B. H. Observation of the Atmospheric Surface Layer at the Meteorological 9-m Mast. In: Proceedings Observational Korean South Society Busan, Korean South. Papers Korean South Society, Organizing Committee, February, v. 1, 526-527, 2003.
- Pardyjak, E. R., Monti, P., Fernando, H. J. S. Flux Richardson Number Measurements in Stable Atmospheric Shear Flows. Journal Fluid Mechanics, v. 459, 307-216, 2002.
- Sharan, M., Rama Krishna, T. V. B. P. S. On the bulk Richardson number and flux–profile relations in an atmospheric surface layer under weak wind stable conditions. Atmospheric Environment, v. 37, 3681–3691, 2003.
- Stull, R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology, 1<sup>a</sup> ed., Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1988.
- Zilitinkevich, S., Baklanov, A. Calculation of the height of stable boundary layers in practical applications. Boundary-Layer Meteorology, v. 105, 389-409, 2002.