

Tendencias de largo plazo en cinco índices de estabilidad atmosférica en Colombia

Andrés Ochoa¹, Diana Cantor²

¹Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia. aochoaj@unal.edu.co

²Estudiante de Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia.

dccantor@unal.edu.co

Resumen

La estabilidad atmosférica favorece el estancamiento del aire en la atmósfera baja, y con él, la humedad del aire, el material particulado en suspensión y diferentes sustancias contaminantes. Las consecuencias se manifiestan en la salud humana (morbilidad y mortalidad infantil, enfermedades cardíacas, pulmonares y cerebro vasculares), la agricultura (heladas), el deterioro de infraestructuras y la navegación aérea. Los índices de estabilidad derivados de información de sondeos diarios atmosféricos son típicamente empleados en la predicción de clima severo en el corto plazo y en el estudio de cambios en el potencial de desarrollo de tormentas severas, en el largo plazo. El archivo del Forecast Systems Laboratory (FSL) y el National Climatic Data Center (NCDC) de Estados Unidos almacena registros históricos de radiosondeos en todo el planeta, y entre ellos de cinco lugares de Colombia: San Andrés (1956–2010), Riohacha/Almirante Padilla (1992–2010), Bogotá/El Dorado (1960–2010), Las Gaviotas (1976–2010) y Leticia/Vásquez Cobo (1986–2010). En este trabajo se realizaron pruebas estadísticas para evaluar la existencia de tendencias de largo plazo en series mensuales de valores máximos, medios y mínimos de cinco índices de estabilidad atmosférica calculados a partir de dichos registros de radiosondeos. Los índices estudiados fueron el Lifted Index (LI), el índice K, el índice de Total de Totales (TT), el índice de Energía Potencial Disponible Convectiva (CAPE) y el índice de Showalter (SWI). La existencia de tendencias de largo plazo en las series mensuales fue evaluada mediante las pruebas T de Sen, Mann Kensall,

Mann Kendall para datos autocorrelacionados. Rho de Spearman, Vann Belle y Hugues, prueba T para detección de tendencias lineales en series anuales y el estimador de pendiente de Sen. Los resultados mostraron tendencia hacia la inestabilidad varias series de percentiles anuales, y en las series mensuales de valores medios, máximos y mínimos para la estación San Andrés; en Las Gaviotas la totalidad de las señales indican tendencia clara a la estabilidad atmosférica; en Leticia las series de valores medios indican tendencia a la inestabilidad y en Bogotá predominan los resultados que indican que no existen tendencias significativas ni en las series de valores medios ni en las de los extremos. Para Riohacha las señales no son claras.

Palabras claves: Radiosondeo, homogeneidad, serie de tiempo, estabilidad atmosférica.

Abstract

Atmospheric stability favors the stagnation of air in the lower atmosphere, and with it the humidity, airborne particulate matter and various pollutants. The consequences are manifested in human health (morbidity and mortality, heart, lung and brain vascular diseases), agriculture (frost), deteriorating infrastructure and air navigation. Stability indices derived from daily weather information from surveys are typically used in severe weather forecasting in the short term and in the study of changes in the potential development of severe thunderstorms in the long term. The file's Forecast Systems Laboratory (FSL) and the National Climatic Data Center (NCDC) U.S. stocks historical radiosonde records worldwide, and each there are five sites in Colombia: San Andres (1956-2010), Riohacha / Almirante Padilla (1992-2010), Bogota / El Dorado (1960-2010), Las Gaviotas (1976-2010) and Leticia / Vásquez Cobo (1986-2010). In this paper statistical tests were performed to evaluate the existence of long-term trends in monthly series of maximum values, average and minimum of five atmospheric stability indices calculated from these radiosonde records. The indices studied were the Lifted Index (LI), K index, Total Totals Index (TT), Convective Available Potential Energy (CAPE) and Showalter index (SWI). The existence of long-term trends in the monthly series was evaluated through the Sen's T tests, Mann Kensall, Mann

Kendall for autocorrelated data, Spearman's rho test, Mann-Bell and Hughes test, T test for detection of linear trends in annual series and the Sen's slope estimator. The results showed a tendency toward instability clearly diagnosed at percentiles series, and the monthly average values, maximum and minimum for the season "San Andres". In "Las Gaviotas" all the signs are clear tendency to atmospheric stability, in "Leticia" series of average values indicate instability and in "Bogota" results indicate no significant trends in either series or the average values of the extremes. To Riohacha signals are not clear.

Keywords: Radiosonde, homogeneity, time series, atmospheric stability.

Introducción

El análisis de tendencias es frecuentemente utilizado en registros históricos de variables climáticas medidas tanto en superficie como en altura. El IGRA (*Integrated Global Radiosonde Archive*) posee una extensa base de datos que consta de información de aproximadamente 1106 estaciones distribuidas en todo el mundo, con registros que datan desde 1946. La información del IGRA puede agruparse en tres categorías: variables observadas (presión, altura geopotencial y temperatura), cantidades básicas derivadas (altura geopotencial, temperatura potencial, presión de vapor, presión de vapor de saturación, humedad relativa, componente zonal y meridional del viento) y gradientes verticales (temperatura, temperatura potencial, humedad relativa, componente zonal y meridional del viento) (Durre y Yin, 2008).

Los índices de estabilidad derivados de información de sondeos diarios atmosféricos son típicamente empleados en la predicción de clima severo en el corto plazo y en el estudio de cambios en el potencial del desarrollo de tormentas severas, en el largo plazo. Estos índices son diseñados para medir la facilidad con la que una parcela de aire aumenta a través de la atmósfera, usando la diferencia de temperatura parcela-atmósfera, una comparación entre la temperatura en superficie y

la temperatura en algún nivel de referencia (generalmente a 100 mb y 500 mb), o el contenido de humedad de la capa límite.

Barrantes (2001) utilizó series históricas de tres estaciones de radiosondeos en el valle central de Costa Rica, para evaluar la existencia de correlación entre la lluvia y los índices de estabilidad atmosférica Showalter, K, TT, LI, SWEAT, mediante el proceso de regresión lineal múltiple. Lanzante et al. (2003a, 2003b) homogenizaron 87 series de temperatura derivada de mediciones de radiosondeos en distribuidas en el mundo a partir de comparación con mediciones satelitales de temperatura derivadas de sondeos con microondas. Posteriormente analizaron tendencias en dichas series de temperatura mediante una prueba no paramétrica consistente en el análisis de las pendientes entre pares de datos y la posterior elección de la mediana de la serie resultante. Randel et al. (2005) demostró significantes sesgos en tendencias encontradas en temperatura derivada de información diaria de radiosondeos e información satelital. Hurst et al. (2011), evaluaron tendencias de largo plazo en una serie histórica de vapor de agua estratosférico en Boulder, Colorado. El análisis de tendencias se desarrolló para cinco capas estratosférica de 2 km de longitud cada una mediante el análisis de regresión lineal. DeRubertis (2006) analizó tendencias en la media y en los valores extremos de 4 índices comunes de estabilidad atmosférica, usando observaciones diarias desde 48 estaciones de radiosondeo en Estados Unidos de la fuente de datos del FSL (*Forecast Systems Laboratory*) y el NCDC (*National Climatic Data Center*), con aproximadamente 50 años de registro y para las series de los meses de verano y primavera. Tales índices son: índice de levantamiento (*lifted index*), índice K, índice CAPE (*Convective available potencial energy*) y SWEAT (*Severe Weather Threat Index*). Sankovich et al. (2007) analizaron mediciones de radiosondeos en el sureste de Estados Unidos entre 1958 y 2003 durante las fases de El Niño y La Niña, con el objetivo de observar si la alguna de estas fases presenta alta compatibilidad con la ocurrencia de tormentas severas. Guo y Ding (2009), homogenizaron series históricas de

temperatura atmosférica en China y posteriormente evaluaron tendencias de largo plazo en dichas series mediante regresiones lineales.

En este trabajo se evaluaron tendencias de largo plazo en cinco índices de estabilidad atmosférica para 5 estaciones del IGRA en Colombia. Las tendencias de largo plazo de dichas series fueron analizadas mediante la aplicación de las pruebas T de Sen, Mann-Kendall, Mann-Kendall para datos autocorrelacionados, Rho de Spearman y la prueba de homogeneidad en la tendencia de Van Belle y Hughes y prueba T para detección de tendencias lineales en series anuales. Adicionalmente la magnitud de la tendencia se evaluó con el estimador de pendiente de Sen.

Materiales y Métodos

El archivo del *Forecast Systems Laboratory* (FSL) y el *National Climatic Data Center* (NCDC) de Estados Unidos almacena registros históricos de radiosondeos en todo el planeta. En Colombia se cuenta con información diaria de radiosondeos en cinco estaciones con registros tomados en general para las 0000UTC y 1200UTC.

Tabla 1. Estaciones IGRA en Colombia

Código	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Periodo
80001	San Andrés	12.58	-81.70	2	1956-2010
80035	Riohacha / Almirante Padilla	11.53	-72.93	4	1992-2010
80222	Bogotá / El Dorado	4.70	-74.15	2546	1960-2010
80241	Las Gaviotas	4.47	-70.73	165	1976-2003
80398	Leticia / Vásquez Cobo	-4.55	-69.53	84	1986-2010



Figura 1. Ubicación de las estaciones de radiosondeos del IGRA en Colombia.

Doswell (1996) presenta una clasificación de índices de estabilidad atmosférica, entre los que pueden mencionarse: Showalter, LI, Pickup, EHI, BRN, SWEAT, K, dT, SRH, BRN shear, CAPE, TT y Boyden. En este trabajo se eligieron 5 de estos índices para analizar la información de radiosondeos diarios a las 1200 UTC en las 5 estaciones de registro existentes en Colombia reportadas por el IGRA. Dichos índices son: LI, K, CAPE, TT y SI. Una vez obtenidos los índices de estabilidad, se construyeron series mensuales y anuales de valores máximos, medios y mínimos y series anuales de los percentiles 5, 10,25, 50, 75, 90 y 95, para cada índice.

- *Lifted Index (LI)*

El índice LI expresa la diferencia de temperaturas entre una parcela de aire en ascenso y su entorno a una presión de 500mb (Galway 1956, Doswell, 1996; De Rubertis 2006). La parcela de aire asume la temperatura y la humedad media registrada en los 100 mb más cercanos a la superficie. El índice LI es negativo cuando la parcela es más caliente que su entorno.

$$LI = T_{\text{ambiente}}(500 \text{ mb}) - T_{\text{parcela}}(500 \text{ mb})$$

Este índice se interpreta como se muestra en la Tabla 2, según su valor.

Tabla 2. Interpretación del índice de estabilidad LI según su valor.

LI [°C]	Interpretación
(0,3)	Estable.
(-3,0)	Marginalmente inestable.
(-6,-3)	Moderadamente inestable.
(-9,-6)	Muy inestable.
(-∞,-9)	Extremadamente inestable.

- *Índice K*

El índice K es comúnmente utilizado para predecir tormentas. Valores altos del índice K indican mayor probabilidad de desarrollo de tormentas severas.

(George, 1960; Doswell, 1996; De Rubertis, 2006)

$$K = (T_{850\text{mb}} - T_{500\text{mb}}) + Td_{850\text{mb}} - (T_{700\text{mb}} - Td_{700\text{mb}})$$

La interpretación del índice K según su valor es como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Interpretación del índice K según su valor.

K [°C]	Probabilidad de desarrollo de tormentas [%]
K<15	0
15<K<20	20
21<K<25	20-40
26<K<30	40-60
31<K<35	60-80
36<K<40	80-90
K>40	~100

- *CAPE*

La Energía Potencial Convectiva Disponible, en inglés *Convective Available Potential Energy* (CAPE), expresa la energía de una parcela de aire mediante su ascenso por la atmósfera. Es una integración vertical de la diferencia de temperaturas entre la parcela de aire y su entorno, entre el nivel en que la parcela asciende libremente, llamado nivel de convección libre (LFC), y el nivel de boyancia neutral (LBN), (Moncrieff & Green, 1972; Doswell, 1996; De Rubertis, 2006).

$$CAPE = g \int_{LFC}^{LNB} \left[T_p(z) - \frac{T_a(z)}{T_p(z)} \right]$$

Donde:

$T_p(z)$ es el perfil vertical de temperatura en una parcela que asciende mediante un proceso adiabático húmedo. La parcela asume las condiciones de los primeros 500 m desde la superficie.

$T_a(z)$ es el perfil vertical de temperatura del ambiente.

g es la aceleración de la gravedad.

El índice CAPE se interpreta como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Interpretación del índice K según su valor.

CAPE [J/kg]	Estabilidad de la atmósfera
0	Estable.
1000-2500	Moderadamente inestable.
2500,∞	Muy inestable.

- *Total of Totals (TT)*

El índice Total de Totales, en inglés *Total of Totals Index* (TT), fue diseñado para la predicción del clima severo. Su cálculo depende de la obtención de dos valores: “*Vertical Total* (VT)” que es una medida de la estabilidad vertical sin tener en cuenta a humedad, y “*Cross Total* (CT)” que es una medida de la estabilidad teniendo en cuenta la humedad (Miller, 1972; Doswell, 1996).

$$TT = (T_{850mb} - T_{500mb}) + (Td_{850mb} - T_{500mb})$$

El índice CAPE se interpreta como se indica en la Tabla 4Tabla 5.

Tabla 5. Interpretación del índice TT según su valor.

TT [°C]	Interpretación
45-50	Posibles tormentas.
50-55	Probables tormentas, posiblemente severas.
55-60	Probables tormentas severas

- *Showalter Index (SI)*

El índice Showalter (SI) evalúa el ascenso adiabático seco de una parcela de aire desde 850 mb a su nivel de condensación y su posterior ascenso adiabático húmedo hasta el nivel de 500 mb. (Showalter, 1953, a947; Doswell, 1996). Se cuantifica de la siguiente manera:

$$SI = T_{500mb} - T_{500mb}^*$$

Donde T_{500}^* es la temperatura de la parcela que ha sido elevada adiabáticamente desde 850 mb hasta 500 mb.

El índice SI se interpreta como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Interpretación del índice SI según su valor.

SI [°C]	Interpretación
SI>0	Atmósfera estable, posibilidad de tormenta casi nula.
-3<SI<0	Atmósfera moderadamente inestable. Posibilidad de fuertes tormentas.
-6<SI<-4	Atmósfera notablemente inestable. Posibilidad de tormentas severas y granizo.
SI<-6	Atmósfera extremadamente inestable.

Para el análisis de tendencias de largo plazo, se implementaron 5 pruebas estadísticas sobre las series mensuales de cada uno de los índices evaluados en las 5 estaciones de radiosondeos del IGRA en Colombia. Estas pruebas son: T de Sen, Van Belle y Hughes, rho de Spearman, Mann Kendall y Mann Kendall para datos autocorrelacionados. Adicionalmente se implementó “El estimador de pendiente de Sen” para el cálculo de la magnitud de la tendencia. Las series anuales de valores máximos, medios y mínimos de cada índice y las series anuales de los percentiles 5, 10,25, 50, 75, 90 y 95 de cada índice en cada estación, fueron analizadas con la prueba T para detección de tendencias lineales en series anuales.

- *Prueba T de Sen*

La prueba T de Sen es una prueba de rango alineado que sugiere remover el ciclo estacional de la serie mediante la substracción a cada dato de la media mensual promediada en los años y la posterior asignación de rangos a cada diferencia. Con esta información se calcula el estadístico T como se presenta a continuación (Sen, 1968; Farrell, 1980; Van Belle y Hughes, 1984; Kahya y Kalay, 2004)

$$T = \left(\frac{12m^2}{n(n+1) \sum \sum (R_{ij} - R_j)^2} \right)^{\frac{1}{2}} * \left(\sum_{i=1}^n \left(i - \frac{n+1}{2} \right) \left(R_i - \frac{nm+1}{2} \right) \right)$$

Donde:

n Años de periodo de registro.

m Número de meses o estaciones a evaluar.

R_{ij} Rango de cada dato donde con $i=1, \dots, n$, y $j=1, \dots, m$.

$R_{.j}$ Promedio de los rangos sobre los años

$R_{.i}$ Promedio de los rangos sobre los meses

Se rechaza la hipótesis de no tendencia si el T excede un percentil especificado de la distribución normal.

- *Prueba Van Belle y Hughes*

Van Belle y Hughes (1984) consideraron la importancia en la evaluación de la heterogeneidad de tendencia entre meses o estaciones, demostrando que el resultado de una prueba de tendencia puede inducir a conclusiones ambiguas cuando este factor no es tomado en cuenta. A continuación se presenta el estadístico de prueba (Van Belle y Hughes, 1984; Kahya y Kalay, 2004).

$$\chi^2_{\text{homogeneo}} = \chi^2_{\text{total}} - \chi^2_{\text{tendencia}} = \sum_{i=1}^m (z_i)^2 - m(\bar{z})^2$$

Donde

$$z_i = \frac{s_i}{\sqrt{V(s_i)}} \text{ y } \bar{z} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z_i$$

m estaciones evaluadas (12 meses)

s_i y $V(s_i)$ Obtenidos de la prueba de Mann Kendall

Si $\chi^2_{\text{homogeneo}}$ excede el nivel crítico de α para la distribución chi-cuadrado con $m-1$ grados de libertad, la hipótesis nula de tendencia homogénea estacional debe ser rechazada.

Si $\chi^2_{\text{homogeneo}}$ no excede el nivel crítico de α , se calcula $\chi^2_{\text{tendencia}}$ para la distribución chi-cuadrado con 1 grado de libertad. Si $\chi^2_{\text{tendencia}}$ no excede el nivel crítico de α , no hay tendencia lineal. Si $\chi^2_{\text{tendencia}}$ excede el nivel crítico de α , hay tendencia lineal.

- *Prueba rho de Spearman*

La prueba rho de Spearman es una prueba de rango no paramétrica que determina la existencia de correlación entre pares de datos consecutivos en una serie de tiempo. El estadístico de prueba se define como sigue (Sneyers, 1990; Yue et al., 2002; Kahya y Kalay, 2004)

$$D = \frac{6 \sum_{i=1}^n [R(X_i) - i]^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde

n Tamaño de la muestra

$R(X_i)$ i -ésimo rango de la observación X_i

Para tamaños de muestra grandes, el estadístico D distribuye aproximadamente normal con media cero y varianza:

$$V(D) = \frac{1}{n-1}$$

Finalmente se calcula un estadístico Z estandarizado:

$$Z_{SR} = \frac{D}{\sqrt{V(D)}}$$

Se rechaza la hipótesis de no tendencia si el $|Z_{SR}|$ excede un percentil especificado de la distribución normal.

- *Prueba de Mann Kendall*

La prueba de Mann Kendall se basa en el cálculo del estadístico S definido como sigue (Van Belle y Hughes, 1984, Yue et al., 2002; Kahya y Kalay, 2004).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

$$\text{Si } (x_j - x_i) > 0 \quad \text{sgn}(x_j - x_i) = 1$$

$$\text{Si } (x_j - x_i) = 0 \quad \text{sgn}(x_j - x_i) = 0$$

$$\text{Si } (x_j - x_i) < 0 \quad \text{sgn}(x_j - x_i) = -1$$

Donde

n Tamaño de la muestra

x_j y x_i Son datos secuenciales

Para tamaños de muestra grandes, el estadístico S distribuye aproximadamente normal con media cero y varianza:

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18}$$

Donde:

\sum_t indica que el término $t(t-1)(2t+5)$ es evaluado para los t grupos de los datos existentes en la serie.

Finalmente se calcula un estadístico Z estandarizado:

$$\text{Si } S > 0 \quad Z_{MK} = \frac{S - 1}{\sqrt{V(S)}}$$

$$\text{Si } S = 0 \quad Z_{MK} = 0$$

$$\text{Si } S < 0 \quad Z_{MK} = \frac{S + 1}{\sqrt{V(S)}}$$

Se rechaza la hipótesis de no tendencia si el $|Z_{MK}|$ excede un percentil especificado de la distribución normal.

- *Prueba Mann Kendall para datos autocorrelacionados*

La hipótesis nula de la prueba de Mann Kendall afirma que los datos de una serie de tiempo son independientes e idénticamente distribuidos. Sin embargo bajo la existencia de una autocorrelación positiva en los datos, incrementa la posibilidad de detectar tendencias cuando realmente no existen y viceversa. Por este motivo Hamed y Ramachandra (1998) proponen una nueva metodología para el cálculo de la varianza de Mann Kendall para datos autocorrelacionados.

$$V^*(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} * \frac{n}{n_s^2}$$

Donde

$$\frac{n}{n_s^2} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} * \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)\rho_s(i)$$

Donde

n Tamaño de la muestra.

$\rho_s(i)$ Función de autocorrelación de los rangos de las observaciones.

- *Estimador de pendiente de Sen*

El estimador de pendiente de Sen es un procedimiento no paramétrico que estima cambios por unidad de tiempo en una serie cuando existe en ella tendencia lineal. Para N pares de datos, la pendiente de Sen se estima como sigue (Sen, 1968b; Kahya y Kalay, 2004).

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}$$

Donde

$i=1, \dots, N$.

x_j y x_k Son datos en los tiempos j y k ($j > k$), respectivamente.

La mediana de los N valores de Q_i es el estimador de pendiente de Sen.

- *Prueba T para la detección de tendencias lineales en series anuales*

Probar que una serie presenta una tendencia lineal significativa es equivalente a probar que la pendiente de la regresión de la serie es diferente de cero. Esta hipótesis puede verificarse a partir del cálculo del estadístico T.

$$T = \hat{\rho}_{tY_t} \sqrt{\frac{n-2}{1 - \hat{\rho}_{tY_t}^2}}$$

Donde:

$t=1, \dots, N$.

N Tamaño de la muestra.

Y_t Serie de tiempo.

$\hat{\rho}_{tY_t}$ Coeficiente de correlación simple entre Y_t y t .

La hipótesis de que la pendiente es igual a cero es rechazada si $|\hat{\rho}| > T_{1-\frac{\alpha}{2}}(N-2)$ para un nivel de significancia α .

Análisis de Resultados

Con la información de cada sondeo diario de las 1200 UTC se construyó un diagrama Skew-T Log-P, con información del nivel de convección libre, el nivel de equilibrio, y los índices LI, TT, K, SI y CAPE. La Figura 2 presenta el diagrama Skew-T para un día de registro de la estación Bogotá/El Dorado.

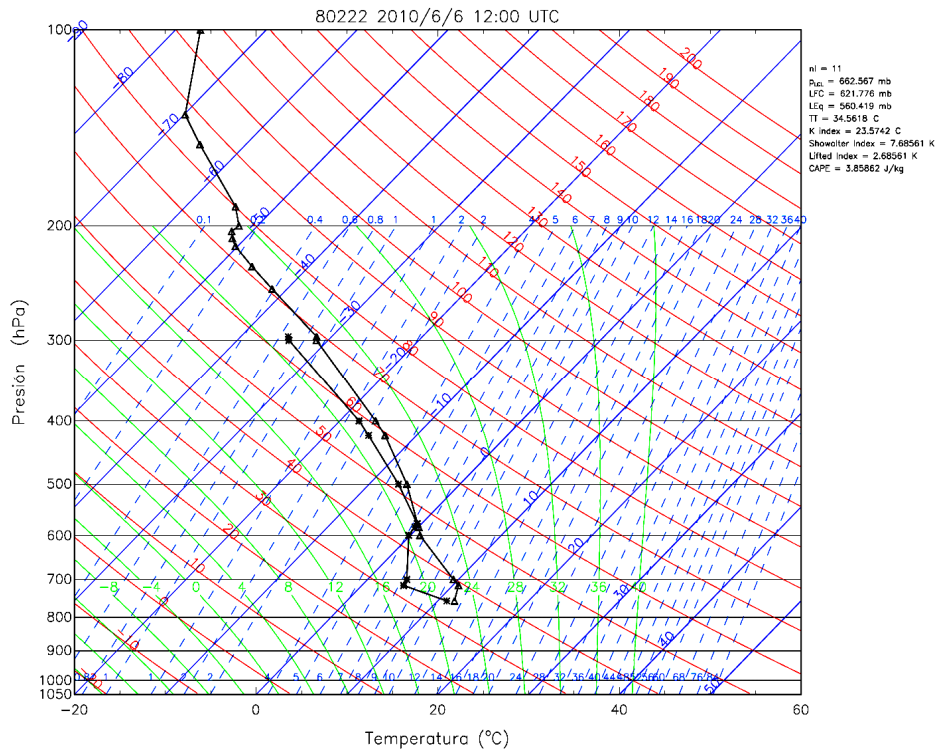


Figura 2. Diagrama Skew-T Log-P para el sondeo del 6 de junio de 2010 a las 7:00 am en Bogotá.

Con el fin de observar con mayor detalle las variaciones de las series de cada índice a nivel anual, se construyó el ciclo anual de la serie diaria de cada índice de estabilidad en cada estación. Figura 3 presenta el ciclo anual de la serie diaria del índice LI para la estación Bogotá/El Dorado. La línea roja representa la media de los datos, las envolventes negras representan los valores máximos y mínimos para cada día y los puntos representan el valor del índice para cada día a lo largo del año.

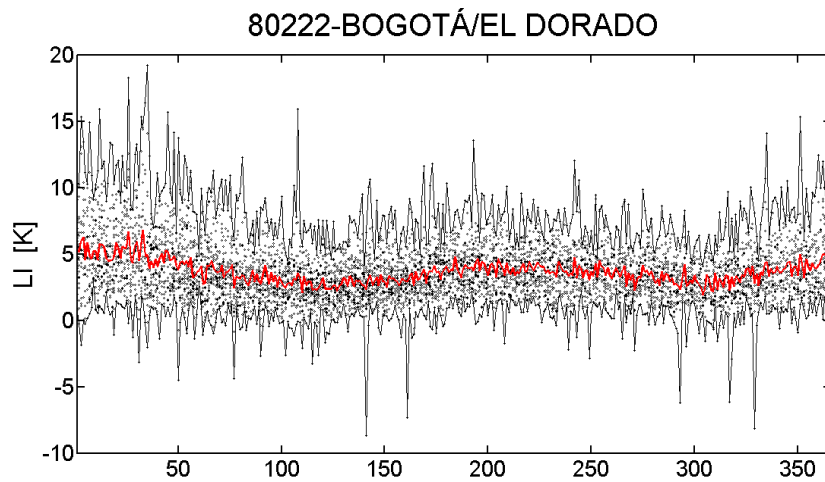


Figura 3. Ciclo anual de la serie diaria del en la estación Bogotá/El Dorado.

Adicionalmente se obtuvieron las series de los percentiles anuales 5, 10, 25, 50, 75, 90 y 95. La Figura 4 presenta la serie de percentiles anuales para el índice LI en la estación Bogotá/El Dorado. La línea roja representa la media anual de los datos, las envolventes negras representan los valores máximos y mínimos anuales, los puntos representan los datos del índice para cada año y las líneas azules los percentiles anteriormente mencionados.

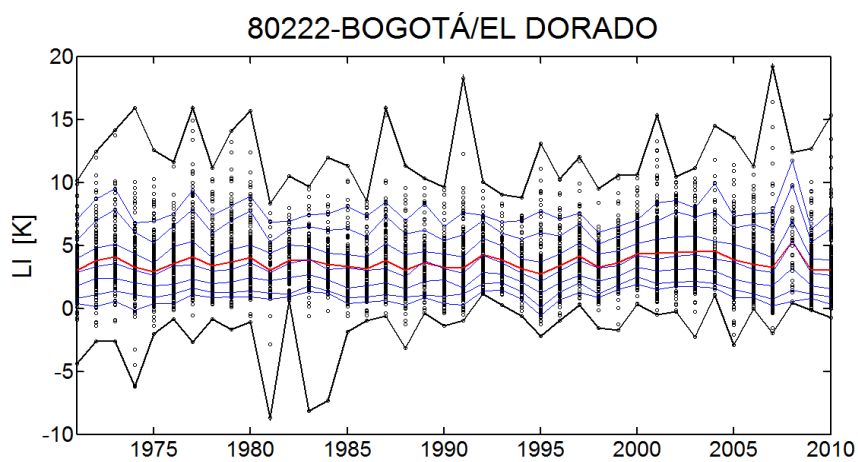


Figura 4. Serie de percentiles anuales para el índice LI en la estación Bogotá/El Dorado.

Siguiendo la metodología presentada anteriormente se analizaron tendencias de largo plazo en las series de valores medios, máximos y mínimos a nivel mensual y anual para cada índice de estabilidad y en cada estación. Convención: R (rechaza tendencia), A (aprueba tendencia),

Tendencias crecientes (\nearrow) y decrecientes (\searrow). El estimador de pendiente de Sen publicado en las

tablas proporciona información de la magnitud de la tendencia por mes en el caso de las series mensuales e información de la magnitud de la tendencia por año en el caso de las series anuales. En la Tabla 10 se indica cuando los resultados apuntan a la estabilidad atmosférica (E) y cuando apuntan a inestabilidad atmosférica (I).

Tabla 7. Resultado del análisis de tendencias para las series de valores medios mensuales de los índices de estabilidad.

	T de Sen	Van Belle & Hugues	Rho de Spearman	Mann Kendall	Mann Kendall para datos autocorrelacionados	Estimador de pendiente de Sen
LI [K]						
San Andrés	A \searrow	Prueba no apta	A \searrow	A \searrow	R	-0.0033
Riohacha / Almirante Padilla	R	No hay tendencia lineal	A \searrow	R	R	-0.0009
Bogotá / El Dorado	R	Si hay tendencia lineal	A \searrow	R	R	0.0007
Las Gaviotas	A \nearrow	Prueba no apta	A \nearrow	A \nearrow	R	0.0073
Leticia / Vásquez Cobo	R	Prueba no apta	A \searrow	R	R	-0.0022
TI [C]						
San Andrés	A \nearrow	Prueba no apta	A \nearrow	A \nearrow	R	0.0056
Riohacha / Almirante Padilla	A \nearrow	Si hay tendencia lineal	A \nearrow	R	R	0.0050
Bogotá / El Dorado	R	Si hay tendencia lineal	A \nearrow	R	R	0.0006
Las Gaviotas	A \searrow	Prueba no apta	A \searrow	A \searrow	R	-0.0394
Leticia / Vásquez Cobo	A \nearrow	Prueba no apta	R	A \nearrow	R	0.0112
KI [C]						
San Andrés	A \nearrow	Prueba no apta	A \nearrow	A \nearrow	R	0.0119
Riohacha / Almirante Padilla	R	Si hay tendencia lineal	A \nearrow	R	R	0.0083
Bogotá / El Dorado	R	No hay tendencia lineal	A \searrow	R	R	-0.0001
Las Gaviotas	A \searrow	Prueba no apta	A \searrow	A \searrow	R	-0.0374
Leticia / Vásquez Cobo	A \nearrow	Si hay tendencia lineal	R	A \nearrow	R	0.0094
SI [K]						
San Andrés	A \searrow	Prueba no apta	A \searrow	A \searrow	R	-0.0043
Riohacha / Almirante Padilla	A \searrow	Prueba no apta	A \searrow	R	R	-0.0037
Bogotá / El Dorado	A \searrow	Prueba no apta	A \searrow	R	R	-0.0011
Las Gaviotas	A \nearrow	Prueba no apta	A \nearrow	A \nearrow	R	0.0272
Leticia / Vásquez Cobo	A \searrow	Prueba no apta	A \searrow	A \searrow	R	-0.0089
CAPE [J/kg]						
San Andrés	A \nearrow	Si hay tendencia lineal	A \nearrow	A \nearrow	R	0.9024
Riohacha / Almirante Padilla	R	Prueba no apta	A \searrow	R	R	-0.6235
Bogotá / El Dorado	A \searrow	Prueba no apta	A \searrow	A \searrow	R	-0.0303
Las Gaviotas	A \searrow	Prueba no apta	A \searrow	A \searrow	R	-0.8076
Leticia / Vásquez Cobo	A \nearrow	Si hay tendencia lineal	R	A \nearrow	R	0.2461

Tabla 8. Resultado del análisis de tendencias para las series de valores máximos mensuales de los índices de estabilidad.

		T de Sen	Van Belle & Hugues	Rho de Spearman	Mann Kendall	Mann Kendall para datos autocorrelacionados	Estimador de pendiente de Sen
LI [K]							
80001	San Andrés	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.010
80035	Riohacha / Almirante Padilla	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.016
80222	Bogotá / El Dorado	R	Si hay tendencia lineal	A ↗	R	R	0.001
80241	Las Gaviotas	A ↗	Prueba no apta	A ↗	A ↗	R	0.009
80398	Leticia / Vásquez Cobo	A ↗	Si hay tendencia lineal	A ↗	A ↗	R	0.006
TT [C]							
80001	San Andrés	A ↘	Prueba no apta	A ↘	R	R	-0.003
80035	Riohacha / Almirante Padilla	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.017
80222	Bogotá / El Dorado	R	No hay tendencia lineal	A ↘	R	R	0.000
80241	Las Gaviotas	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.029
80398	Leticia / Vásquez Cobo	A ↗	Prueba no apta	R	A ↗	R	0.025
K [C]							
80001	San Andrés	R	Si hay tendencia lineal	A ↘	R	R	0.003
80035	Riohacha / Almirante Padilla	A ↘	No hay tendencia lineal	A ↘	R	R	-0.004
80222	Bogotá / El Dorado	R	No hay tendencia lineal	A ↘	R	R	0.000
80241	Las Gaviotas	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.030
80398	Leticia / Vásquez Cobo	A ↗	Prueba no apta	R	A ↗	R	0.021
SI [K]							
80001	San Andrés	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.013
80035	Riohacha / Almirante Padilla	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.033
80222	Bogotá / El Dorado	R	No hay tendencia lineal	A ↘	R	R	-0.001
80241	Las Gaviotas	A ↗	Prueba no apta	A ↗	A ↗	R	0.037
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R	No hay tendencia lineal	A ↘	R	R	-0.001
CAPE [J/kg]							
80001	San Andrés	A ↗	Si hay tendencia lineal	A ↗	A ↗	R	1.129
80035	Riohacha / Almirante Padilla	A ↘	Prueba no apta	A ↘	R	R	-1.150
80222	Bogotá / El Dorado	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.082
80241	Las Gaviotas	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-2.308
80398	Leticia / Vásquez Cobo	A ↗	Prueba no apta	R	A ↗	R	1.703

Tabla 9. Resultado del análisis de tendencias para las series de valores mínimos mensuales de los índices de estabilidad.

		T de Sen	Van Belle & Hugues	Rho de Spearman	Mann Kendall	Mann Kendall para datos autocorrelacionados	Estimador de pendiente de Sen
LI [K]							
80001	San Andrés	A ↗	No hay tendencia lineal	A ↗	R	R	0.0012
80035	Riohacha / Almirante Padilla	A ↗	Si hay tendencia lineal	R	A ↗	R	0.0102
80222	Bogotá / El Dorado	R	No hay tendencia lineal	A ↗	R	R	0.0005
80241	Las Gaviotas	A ↗	Prueba no apta	A ↗	A ↗	R	0.0079
80398	Leticia / Vásquez Cobo	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.0090
TT [C]							
80001	San Andrés	A ↗	Prueba no apta	A ↗	A ↗	R	0.0242
80035	Riohacha / Almirante Padilla	A ↗	Si hay tendencia lineal	R	A ↗	R	0.0565
80222	Bogotá / El Dorado	R	No hay tendencia lineal	A ↗	R	R	0.0006
80241	Las Gaviotas	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.0517
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R	No hay tendencia lineal	A ↘	R	R	-0.0005
K [C]							
80001	San Andrés	A ↗	Si hay tendencia lineal	A ↗	A ↗	R	0.0188
80035	Riohacha / Almirante Padilla	A ↗	Si hay tendencia lineal	A ↗	R	R	0.0310
80222	Bogotá / El Dorado	R	Prueba no apta	A ↘	R	R	-0.0024
80241	Las Gaviotas	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.0473
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R	Prueba no apta	A ↘	R	R	-0.0103
SI [K]							
80001	San Andrés	R	Si hay tendencia lineal	A ↗	R	R	0.0010
80035	Riohacha / Almirante Padilla	A ↗	Si hay tendencia lineal	A ↗	A ↗	R	0.0083
80222	Bogotá / El Dorado	A ↘	Prueba no apta	A ↘	R	R	-0.0011
80241	Las Gaviotas	A ↗	Prueba no apta	A ↗	A ↗	R	0.0193
80398	Leticia / Vásquez Cobo	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.0158
CAPE [J/kg]							
80001	San Andrés	A ↗	Si hay tendencia lineal	A ↗	R	R	0.0147
80035	Riohacha / Almirante Padilla	R	No hay tendencia lineal	A ↘	R	R	-0.0018
80222	Bogotá / El Dorado	R	No hay tendencia lineal	A ↘	R	R	0.0002
80241	Las Gaviotas	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.0338
80398	Leticia / Vásquez Cobo	A ↘	Prueba no apta	A ↘	A ↘	R	-0.0150

Tabla 10. Resumen del análisis de tendencias para las series de valores medios, máximos y mínimos mensuales de los índices de estabilidad.

Estación	Series medias mensuales				
	LI [K]	TT [C]	K [C]	SI [K]	CAPE [J/kg]
San Andrés	A ↘ 0.003 I	A ↗ 0.006 I	A ↗ 0.011 I	A ↘ 0.004 I	A ↗ 0.902 I
Riohacha	R	A ↗ 0.005 I	R	R	R
Bogotá	R	R	R	R	A ↘ 0.030 E
Las Gaviotas	A ↗ 0.007 E	A ↘ 0.039 E	A ↘ 0.037 E	A ↗ 0.027 E	A ↘ 0.807 E
Leticia	R	A ↗ 0.011 I	A ↗ 0.009 I	A ↘ 0.009 I	A ↗ 0.246 I
Estación	Series máximas mensuales				
	LI [K]	TT [C]	K [C]	SI [K]	CAPE [J/kg]
San Andrés	A ↘ 0.010 I	R	R	A ↘ 0.013 I	A ↗ 1.120 I
Riohacha	A ↘ 0.016 I	A ↘ 0.017 E	R	A ↘ 0.033 I	A ↘ 1.150 E
Bogotá	R	R	R	R	A ↘ 0.082 E
Las Gaviotas	A ↗ 0.009 E	A ↘ 0.029 E	A ↘ 0.030 E	A ↗ 0.037 E	A ↘ 2.300 E
Leticia	A ↗ 0.006 E	R	R	R	A ↗ 1.700 I
Estación	Series mínimas mensuales				
	LI [K]	TT [C]	K [C]	SI [K]	CAPE [J/kg]
San Andrés	R	A ↗ 0.024 I	A ↗ 0.019 I	R	A ↗ 0.015 I
Riohacha	A ↗ 0.010 E	A ↗ 0.060 I	A ↗ 0.030 I	A ↗ 0.008 E	R
Bogotá	R	R	R	R	R
Las Gaviotas	A ↗ 0.008 E	A ↗ 0.050 I	A ↘ 0.047 E	A ↗ 0.019 E	A ↘ 0.033 E
Leticia	A ↘ 0.009 I	R	R	A ↘ 0.016 I	A ↘ 0.015 E

Tabla 11. Resultado del análisis de tendencias para las series de valores medios, máximos y mínimos anuales de los índices de estabilidad.

		Serie medios anuales	Serie máximos anuales	Serie mínimos anuales
		LI [K]		
80001	San Andrés	A ↘ -0.042	A ↘ -0.330	A ↗ 0.166
80035	Riohacha / Almirante Padilla	R -0.031	R -0.375	R 0.080
80222	Bogotá / El Dorado	R 0.010	R 0.016	A ↗ 0.067
80241	Las Gaviotas	A ↗ 0.023	R 0.076	R 0.046
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R -0.013	R 0.254	R -0.147
		TT [C]		
80001	San Andrés	A ↗ 0.084	A ↘ -0.351	A ↗ 0.655
80035	Riohacha / Almirante Padilla	R 0.033	R -0.294	R 0.150
80222	Bogotá / El Dorado	R -0.002	A ↘ -0.070	A ↘ -0.019
80241	Las Gaviotas	R -0.011	A ↗ 0.135	A ↘ -0.267
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R -0.039	A ↗ 0.648	A ↘ -0.537
		K [C]		
80001	San Andrés	A ↗ 0.149	A ↘ -0.154	R 0.111
80035	Riohacha / Almirante Padilla	R -0.016	R 0.141	R -0.103
80222	Bogotá / El Dorado	R -0.008	R -0.036	R -0.049
80241	Las Gaviotas	R -0.007	R 0.194	R -0.095
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R -0.013	R 0.162	A ↘ -0.924
		SI [K]		
80001	San Andrés	A ↘ -0.060	A ↘ -0.324	A ↗ 0.168
80035	Riohacha / Almirante Padilla	R -0.047	R -0.001	R 0.018
80222	Bogotá / El Dorado	R -0.010	R -0.027	A ↗ 0.031
80241	Las Gaviotas	R 0.009	R 0.102	R -0.048
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R 0.006	R 0.217	A ↘ -0.359
		CAPE [J/kg]		
80001	San Andrés	A ↗ 13.250	R 18.977	R 0.127
80035	Riohacha / Almirante Padilla	R 3.265	R 17.096	R 0.693
80222	Bogotá / El Dorado	A ↘ -0.732	A ↘ -7.126	R 0.562
80241	Las Gaviotas	A ↘ -9.111	R -12.376	R -0.466
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R 3.523	R 19.167	R 0.576

Tabla 12. Resultado del análisis de tendencias para las series de percentiles anuales 5, 10, 25, 50, 75, 90 y 95 de los índices de estabilidad.

		Percentil 5	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Percentil 95							
		LI [K]													
80001	San Andrés	R	-0.006	R	-0.011	A ↘	-0.031	A ↘	-0.041	A ↘	-0.048	A ↘	-0.072	A ↘	-0.080
80035	Riohacha / Almirante Padilla	R	-0.033	R	-0.038	R	-0.047	R	-0.017	R	-0.027	R	-0.050	R	-0.055
80222	Bogotá / El Dorado	R	0.0164	R	0.0101	R	0.0104	R	0.0105	R	0.0087	R	0.0035	R	0.0023
80241	Las Gaviotas	A ↗	0.0435	A ↗	0.0341	A ↗	0.0363	R	0.0349	R	0.0141	R	0.0003	R	0.0007
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R	-0.0432	R	-0.0142	R	-0.0316	R	-0.0201	R	-0.0247	R	-0.0001	R	0.0895
		TT [C]													
80001	San Andrés	A ↗	0.254	A ↗	0.167	A ↗	0.094	A ↗	0.084	R	0.045	R	0.027	R	0.000
80035	Riohacha / Almirante Padilla	R	0.000	R	0.071	R	-0.007	R	-0.024	R	0.025	R	0.013	R	-0.018
80222	Bogotá / El Dorado	R	0.031	R	0.006	R	-0.003	R	0.000	R	0.000	R	-0.017	R	-0.022
80241	Las Gaviotas	R	-0.018	R	-0.029	R	0.011	R	-0.012	R	-0.025	R	-0.033	R	0.058
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R	-0.175	R	-0.058	R	0.000	R	-0.015	R	0.011	R	0.019	R	0.014
		K [C]													
80001	San Andrés	R	0.181	R	0.257	A ↗	0.281	R	0.163	R	0.074	A ↗	0.069	A ↗	0.082
80035	Riohacha / Almirante Padilla	R	-0.318	R	-0.442	R	-0.085	R	0.073	A ↗	0.125	R	0.107	A ↗	0.100
80222	Bogotá / El Dorado	R	-0.023	R	-0.007	R	0.000	R	0.007	R	0.000	R	-0.010	R	-0.009
80241	Las Gaviotas	R	0.078	R	0.000	R	0.002	R	0.001	A ↗	-0.035	A ↗	-0.061	R	0.034
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R	0.031	R	-0.013	R	0.029	R	-0.017	R	0.010	R	0.021	R	-0.052
		SI [K]													
80001	San Andrés	R	-0.013	R	-0.024	A ↘	-0.032	A ↘	-0.060	A ↘	-0.081	A ↘	-0.116	A ↘	-0.150
80035	Riohacha / Almirante Padilla	R	-0.009	R	-0.050	R	-0.045	R	-0.038	R	-0.008	R	-0.009	R	-0.016
80222	Bogotá / El Dorado	R	0.003	R	-0.004	R	-0.009	R	-0.014	R	-0.009	R	-0.009	R	-0.016
80241	Las Gaviotas	R	-0.024	A ↗	0.029	A ↗	0.022	R	0.004	R	0.000	R	0.026	R	0.003
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R	-0.004	R	-0.003	R	-0.018	R	-0.003	R	-0.004	R	0.008	R	0.061
		CAPE [J/kg]													
80001	San Andrés	R	0.069	R	0.271	A ↗	3.018	A ↗	16.983	A ↗	18.070	A ↗	19.215	A ↗	19.026
80035	Riohacha / Almirante Padilla	R	-0.124	R	-0.201	A ↘	-2.037	R	-12.788	A ↗	10.188	A ↗	18.030	A ↗	23.928
80222	Bogotá / El Dorado	R	0.132	R	0.031	R	-0.057	A ↘	-0.202	A ↘	-0.553	A ↘	-1.816	R	-1.860
80241	Las Gaviotas	R	-0.078	R	-0.159	R	-0.940	A ↘	-6.990	A ↘	-19.059	A ↘	-26.123	A ↘	-31.497
80398	Leticia / Vásquez Cobo	R	0.389	R	0.282	R	0.515	R	1.306	R	5.542	R	8.573	R	8.620

Los resultados distan de ser consistentes para cada cuantil de cada índice cuando se evalúa la existencia de tendencias con las diferentes pruebas. Sin embargo se pueden observar algunos patrones generales como los siguientes:

- Las series mensuales medias de los índices LI, SI, K y CAPE no muestran tendencias claras de cambio. El índice TT muestra tendencia creciente con magnitud máxima de 0.011 °C/mes.
- Las series mensuales máximas de los índices LI, SI, K y TT no muestran tendencias claras de cambio. El índice CAPE muestra tendencia creciente con magnitud máxima de 1.7 J/Kg/mes para la estación Leticia y tendencia decreciente con magnitud máxima de 2.3 J/Kg/mes para la estación Las Gaviotas.
- Las series mensuales mínimas de los índices LI, SI, K y CAPE no muestran tendencias claras de cambio. El índice TT muestra tendencia creciente con magnitud máxima de 0.06 °C/mes.
- Las series anuales medias de los índices LI, SI, K y CAPE no muestran tendencias claras de cambio. El índice TT muestra tendencia creciente con magnitud máxima de 0.06 °C/mes.

- En general las series mínimas, máximas y medias anuales para todos los índices no presentan tendencia clara de cambio, excepto para la serie de mínimos anuales del índice TT que presenta señal de decrecimiento con magnitudes máximas de $0.27\text{ }^{\circ}\text{C/año}$.
- Las series de percentiles anuales para todos los índices, no presentan una señal clara de cambio.

Conclusiones

El signo de las tendencias en los índices de estabilidad tiene sentido cuando se interpreta teniendo en cuenta el planteamiento y el significado de cada índice. Por ejemplo, si la atmósfera de un lugar tiene una tendencia hacia la estabilidad las tendencias en LI, y SI deberían ser positivas y las tendencias en K, CAPE y TT negativas, y viceversa. De esta forma se pueden sacar las siguientes conclusiones.

La atmósfera de San Andrés presenta tendencia hacia la inestabilidad diagnosticada claramente en todos los percentiles, y en la serie mensual de valores medios, máximos y mínimos.

Las señales en Riohacha no son muy claras. En las series de valores medios de los índices predomina la no existencia de tendencias significativas, mientras en los valores extremos las señales son contradictorias.

En Bogotá predominan los resultados que indican que no existen tendencias significativas ni en las series de valores medios ni en las de los extremos.

En Las Gaviotas la totalidad de las señales indican tendencia clara a la estabilidad atmosférica.

En Leticia las series de valores medios indican tendencia a la inestabilidad, en las de valores máximos predomina la no presencia de tendencias significativas y en las de los mínimos las señales no son claras.

Estos resultados deberían ser un aporte importante para la investigación y la gestión en temas como la dinámica de la contaminación del aire en los centros urbanos, la gestión del transporte y la industria para el control de dichos contaminantes, las implicaciones que los mismos pueden tener en la salud pública, la gestión de la navegación aérea, la formación de fenómenos hidrometeorológicos extremos, etc.

Reconocimientos

Los autores queremos agradecer a la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia y ala Beca Jóvenes Investigadores. Virginia Vallejo de Colciencias, por el apoyo brindado a la estudiante Diana Cantor Gómez, en la financiación de su Maestría en Ingeniería-Recursos Hidráulicos.

Referencias

- Barrantes, Jorge A. 2001. Los índices de estabilidad y la lluvia en el Valle Central. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 8, no. 1: 10-14.
- DeRubertis, Diana. 2006. Recent Trends in Four Common Stability Indices Derived from U.S. Radiosonde Observations. *Journal of Climate* 19, no. 3 (February): 309-323. doi:10.1175/JCLI3626.1.
- Doswell, C.A. Iii. 1996. On Convective Indices and Sounding Classification. In Preprints, 5th Australian Severe Storms Conf., ed. Bureau of Meteorology. Avoca Beach, New South Wales.
- Durre, Imke, Russell S. Vose, and David B. Wuertz. 2006. Overview of the Integrated Global Radiosonde Archive. *Journal of Climate* 19, no. 1: 53-68.
- Durre, Imke., X. Yin. 2008. Enhanced Radiosonde data for studies of vertical structure. *Bulletin of the American Meteorological Society*, no. 89:1257-1262.
- Gaffen, Dian J. 1994. Temporal inhomogeneities in radiosonde temperature records. *Journal of Geophysical Research* 99, no. D2: 3667-3676.
- Galway, J.G. 1956. The lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, no. 37: 528-529.

- Guo, Yanjun, and Yihui Ding. 2009. Long-Term Free-Atmosphere Temperature Trends in China Derived from Homogenized In Situ Radiosonde Temperature Series. *Journal of Climate* 22, no. 4: 1037. doi:10.1175/2008JCLI2480.1.
- Hurst, Dale F., Samuel J. Oltmans, Holger Vömel, Karen H. Rosenlof, Sean M. Davis, Eric A. Ray, Emrys G. Hall, and Allen F. Jordan. 2011. Stratospheric water vapor trends over Boulder, Colorado: Analysis of the 30 year Boulder record. *Journal of Geophysical Research* 116, no. D2 (January). doi:10.1029/2010JD015065
- Randel, William J., Keith P. Shine, John Austin, John Barnett, Chantal Claud, Nathan P. Gillett, Philippe Keckhut, et al. 2009. An update of observed stratospheric temperature trends. *Journal of Geophysical Research* 114, no. D02107 (January). doi:10.1029/2008JD010421.
- Renno, O.N., A.P. Ingersoll. 1996. Natural Convection as a Heat Engine. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 53, no. 4, 572–585.
- Sankovich, Victoria, Joseph T. Schaefer, and Jason J. Levit. 2007. A Comparison of Rawinsonde Data from the Southeastern United States During El Niño, La Niña, and Neutral Winters. In 22nd Conference of Severe Local Storms. Hyannis, Massachusetts.
- Showalter, A.K. 1947. A stability index for forecasting thunderstorms. *Bulletin of the American Meteorological Society* 34: 250-252.
- Showalter, A.K. 1953. A Stability Index for Thunderstorm Forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society* 34, no. 6: 250-252.
- WMO. 2008. Measurement of upper air pressure, temperature, humidity. In *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, 1-46. 7th ed. Geneva: World Meteorological Organization.