

Índices de circulación atmosférica y anomalías de la lluvia en Cuba

*Dra. Cecilia Fonseca Rivera
cecilia.fonseca@insmet.cu
Centro del Clima, Instituto de Meteorología.*

Resumen

Mediante la determinación previa de los índices de circulación atmosférica (ICA), se evalúan las principales características de la circulación atmosférica regional y las precipitaciones en Cuba, para el período 1961-2004, con especial énfasis en la estimación de las tendencias y puntos de cambios en las series. El vínculo o influencia de los mecanismos de circulación atmosférica regional con el comportamiento de la lluvia en el país, se estableció por medio de un modelo lineal simple, conjuntamente con un análisis de componentes principales (ACP) o función ortogonal empírica (FOE). Los resultados muestran que la circulación zonal explica más de 30 % de la variabilidad de la lluvia en la mitad occidental de Cuba durante el período poco lluvioso, mientras que en el período lluvioso, la circulación meridional explica más de 40 % en general en el país. Los transportes meridionales juegan un papel determinante en el comportamiento de las precipitaciones durante el período lluvioso, principalmente relacionados con los flujos cálidos y húmedos de componente sur, que se asocian en los niveles bajos y medios con la mayor persistencia del anticiclón subtropical en esta época del año.

Palabras claves: Índice de circulación atmosférica (ICA), transporte de masa, procesos circulatorios.

Introducción

La reciente divulgación de los resultados compilados por el panel intergubernamental sobre cambio climático (IPCC, 2007), adiciona más interés a las investigaciones relacionadas con el estudio de los eventos climáticos extremos. La conclusión: «El calentamiento del sistema climático es inequívoco [...]», y la aseveración de que «[...] un número cada vez mayor de observaciones ofrecen una visión cada vez más completa del calentamiento de la tierra y de otros cambios en el sistema climático» motivan el aumento de las investigaciones sobre el clima actual y sus variaciones.

Incrementar el conocimiento sobre las relaciones entre los procesos de circulación atmosférica y el comportamiento de las variables climáticas en superficie, continúa siendo de especial importancia. El avance en este tipo de investigaciones contribuye a perfeccionar los sistemas de predicción climática y a incluir ese nuevo conocimiento dentro de los modelos y herramientas que se emplean en la estimación del cambio climático futuro. Este reto es mucho mayor en variables como la precipitación, cuya distribución espacial y temporal es sumamente discontinua y que además posee una notable importancia en el desarrollo de la vida en el planeta.

Aunque es conocido que el comportamiento de la precipitación es resultado de las características de los procesos circulatorios y que se encuentra relacionada con las configuraciones que adquiere la circulación de la atmósfera (Folland y otros, 1991; Naranjo, 1994) y a las condiciones físico-geográficas, las relaciones entre ellos no siempre se aprecian con claridad. Encontrar y explicar el vínculo que existe entre las variaciones de las precipitaciones y los procesos de circulación constituye un reto y objetivo clave de las investigaciones climáticas actuales.

Centella y otros (1997) así como Naranjo y Centella (1998) demostraron que los cambios en frecuencia y características de los patrones de circulación, asociados con las configuraciones que adquiere la circulación de la atmósfera, entre otros aspectos, son la principal causa de las fluctuaciones de los elementos climáticos en Cuba. Además, indicaron que el incremento de la variabilidad anual de las precipitaciones, ocurrido a partir de la década de los años 70 está asociado a cambios en los patrones de circulación sobre la región del Caribe y el Golfo de México.

Tanto el régimen de los transportes atmosféricos (zonales y meridionales), como los ciclos o fases de los diferentes factores que modifican o fuer-

zan el comportamiento de los primeros, son elementos que se deben considerar cuando se analizan las anomalías climáticas. Naranjo (1994), demostró la factibilidad del uso de los índices de circulación atmosférica (ICA) para el estudio de las condiciones de transporte atmosférico e influencia predominante de los macroprocesos en regiones de escalas muy inferiores a aquellas donde tradicionalmente se han utilizado. Más tarde Aroche (2002 a y b), Cutié (2002) y Lapinel *et al.* (2003), tomando como base los resultados de Naranjo (1994), demostraron que la intensidad de los transportes de masa constituyen importantes «sensores» para la identificación de los procesos de sequías en Cuba, toda vez que modulan la eficiencia de los sistemas nubosos para generar precipitaciones.

En el presente trabajo, a partir del análisis de las tendencias en los acumulados de las lluvias en Cuba en las décadas más recientes, se realiza un examen de las relaciones entre los ICA y la lluvia con el objetivo de incrementar el conocimiento del papel de estos complejos procesos en la conformación y configuración de la sequía en el país.

Materiales y métodos

Datos

Se utilizaron las series de acumulados mensuales de lluvia para Cuba como un todo y sus tres regiones para el período 1961-2004, del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) y empleadas operacionalmente en el Centro del Clima del Instituto de Meteorología. Estos datos fueron calcula-

dos a partir de la información usada para la confección del mapa del período 1931-1972 (Trusov y otros, 1983), el cual fue elaborado con una selección de pluviómetros de la Red Básica Nacional del INRH, escogidos y procesados siguiendo rigurosamente las normas técnicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) que establecen los requisitos de instalación, observación y procesamiento de datos hidrológicos (WMO, 1994, 1996). La red estuvo conformada por 925 pluviómetros, convenientemente distribuidos para muestrear la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, y según las técnicas de diseño de redes empleadas en Cuba (Huerta, 1978).

La clasificación utilizada para la regionalización del país es la empleada actualmente en el Sistema Nacional de la Vigilancia del Clima, en la cual la región occidental está integrada por las provincias Pinar del Río, La Habana, Ciudad de La Habana, Matanzas y el municipio especial Isla de la Juventud; la región central por las provincias Cienfuegos, Villa Clara, Ciego de Ávila, Sancti-Spíritus y Camagüey y la región oriental por las cinco provincias orientales (Fig. 1).

Para el cálculo de los ICA se utilizaron las series de datos mensuales de altura geopotencial, obtenidos para el dominio previamente seleccionado, por puntos de rejilla, con una resolución de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ para los niveles 850, 500 y 300 hPa tomados como representativos de la atmósfera baja, media y alta respectivamente, durante el período 1961-2004. Estos datos son los conocidos reanálisis del NCEP-NCAR (Kalnay, 1996) que fueron extraídos y manipulados por medio del



Fig. 1. Regionalización de Cuba para el cálculo de los acumulados de lluvia por regiones.

«The Grid Analysis and Display System» (GrADS), herramienta diseñada para el fácil acceso, manipulación y visualización de datos geofísicos.

A partir de los datos de altura geopotencial obtenidos y con el empleo del sistema de programas CIRC2002.EXE (Aroche, 1999 y 2003), se elaboraron las series de índices de circulación para el período 1961-2004. El procedimiento utilizado para ello fue el descrito por Katz (1960) que, aplicado a datos pertenecientes a una rejilla, se fundamenta básicamente en el cálculo del gradiente de presión (variación de presión por unidad de distancia medida perpendicularmente a las isobaras o isohipsas) a partir del conteo del número total de intersecciones de los meridianos o paralelos por las isobaras o isohipsas.

Partiendo del criterio de que los procesos circulatorios que originan a la lluvia en Cuba varían sustancialmente con la estación del año, las series de datos se organizaron teniendo en cuenta la división elemental del año en dos períodos estacionales, a saber:

- Período poco lluvioso (noviembre a abril). Las lluvias están originadas fundamentalmente por procesos de latitudes medias en interacción con aquellos propios de latitudes tropicales.
- Período lluvioso (mayo a octubre). Las lluvias están asociadas principalmente a fenómenos tropicales. La no consideración de estos elementos pudiera llevar a la obtención de relaciones aparentes, con signos ficticios o forzados.

Procedimiento para el cálculo de los ICA

El cálculo de los índices de circulación zonal y meridional (IZ, IM), en unidades mb/grado y mmp/grado, a partir de los mapas sinópticos viene dado por:

$$IZ = \Delta P \frac{\sum_{i=1}^i M_i}{(\phi_2 - \phi_1)i} \quad (1) \quad IM = \Delta P \frac{\sum_{j=1}^j P_j K}{(\lambda_1 - \lambda_2)j} \quad (2)$$

Donde:

ΔP - intervalo entre las isobaras o isohipsas en los mapas sinópticos de superficie o de aire superior. El intervalo implícito puede ser 2 mb o 4 dm (decámetros) para cada cual.

M_i - número total de intersecciones de los meridianos por las isobaras o isohipsas.

i - número de meridianos para los cuales se calculan los gradientes en el cinturón de latitudes.

P_j - número total de intersecciones de los paralelos por las isobaras o isohipsas.

j - número de paralelos para los cuales se calculan los gradientes en el semicono de los meridianos.

ϕ - Latitud geográfica.

λ - Longitud geográfica.

$$K = \frac{1}{\cos(\phi_{rep})} \quad (3)$$

K - coeficiente de corrección de la longitud del arco de donde ϕ_{rep} es la latitud representativa de la banda y se calcula como:

$$\phi_{rep} = 0.5(\phi_1 + \phi_2) \quad (4)$$

Con los datos enrejillados la curvatura de las isobaras no se tiene en cuenta, de modo que para iguales gradientes en condiciones ciclónicas o anticiclónicas, se generan intensidades diferentes, según la aproximación ciclostrófica.

$$IZ = \frac{1}{i(\phi_j - \phi_{j-1})} \sum_1^j (\Delta P_j)_i \quad (5)$$

$$IM = \frac{1}{j \cos(\phi_{rep})(\lambda_{j-1} - \lambda)} \sum_1^j (\Delta P_j)_i \quad (6)$$

Estas dos últimas fórmulas son las que se utilizan directamente en el programa CIRC2002.EXE, en la variante matricial del arreglo de los datos. Las primeras sirvieron para comprobar los resultados obtenidos, partiendo del mapa analizado en GrADS de los mismos datos rejillados.

Entonces:

- IZ > 0 transporte zonal del oeste (W)
- IZ < 0 transporte zonal del este (E)
- IM > 0 transporte meridional del sur (S)
- IM < 0 transporte meridional del norte (N)

Dominio de trabajo utilizado para el cálculo de los ICA

El área de trabajo utilizada para el cálculo de los índices de circulación está limitada por los paralelos 15° y 30° N y los meridianos 90° y 70° W para los niveles medios y superiores y por los paralelos 15° y 25° N (período poco lluvioso) y 15° y 27,5° N (período lluvioso) y los meridianos 90° y 70° W

para los niveles bajos de la atmósfera (Fig. 2). El área fue seleccionada sobre la base del criterio desarrollado por Fonseca (2007), en el cual se tienen en cuenta las estructuras y movimiento medio de los principales sistemas anticiclónicos que representan el incremento o disminución de la zonalidad y la meridionalidad. De esta manera, se pueden describir y representar las características predominantes del régimen de la circulación atmosférica sobre el área de interés con mayor grado de confiabilidad y de forma adecuada.

Técnicas estadísticas empleadas

En atención a las características y naturaleza de las variables en estudio, como índice numérico para cuantificar la relación existente entre ellas, se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson (r) por ser un modo simple de medir la fortaleza de la relación lineal entre dos variables (Sneyers, 1990). Se empleó además, el análisis de componentes principales (ACP) o función ortogonal empírica (FOE) (Mardia y otros, 1979), para describir y caracterizar la representatividad de las anomalías de precipitación para Cuba en los transportes de masa en la región. Esta técnica es muy utilizada en el campo de la investigación meteorológica, en particular en la climatología, por ser muy eficaz para la agrupación de estaciones meteorológicas o pe-

ríodos de tiempo que reflejen adecuadamente determinados patrones meteorológicos.

Para la estimación de la tendencia y puntos de cambios en las series analizadas se utilizaron las pruebas de Spearman, Kendal-Mann y Pettitt (Sneyers, 1990). Los algoritmos de cálculos están contenidos en el sistema de programas Win Stat.exe (Mellado, 1997), que es una herramienta para el cálculo de índices de tendencia en las series temporales.

Dada la gran variabilidad de las series estudiadas se tomó como nivel de significación 5 % como medida para determinar la significación estadística de los resultados obtenidos.

Discusión de los resultados

Tendencias y puntos de cambios en las series estacionales de precipitación

En las series evaluadas de los acumulados de lluvia para Cuba y sus tres regiones, que abarcan el período 1961-2004, los parámetros del estadígrafo Kendall-Mann y Spearman (Sneyers, 1990) reflejan una tendencia global al incremento de los acumulados en el período poco lluvioso del año y una disminución en el período lluvioso (Tabla 1). Si bien

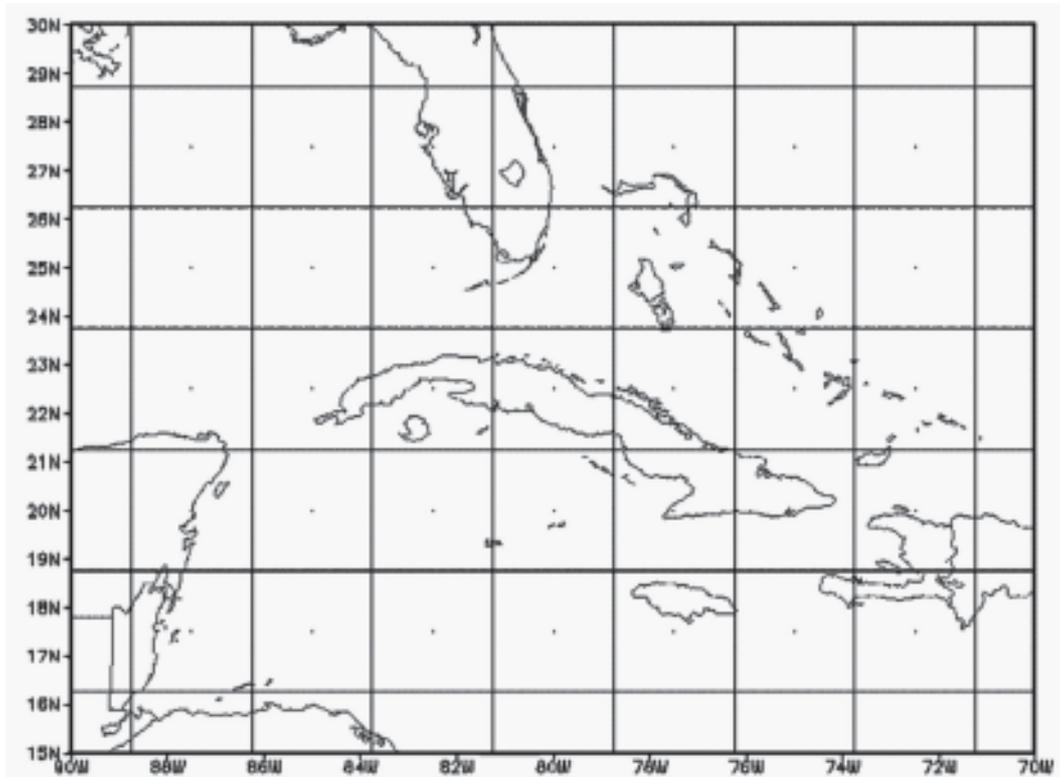


Fig. 2. Dominio de trabajo para el cálculo de los índices de circulación.

Tabla 1. Estadígrafos representativos de la tendencia y puntos de cambio de las series estacionales de anomalías de precipitación. Período: 1961-2004 (KM- Kendall-Mann, PE- Pettitt y SP- Spearman)

Series	Período lluvioso			Período poco lluvioso		
	KM	PE/año	SP	KM	PE/año	SP
Cuba	-0,57	137/80	-0,52	1,58	-224/75*	1,61
Occidente	0,61	-123/93	0,71	1,78	-242/74*	1,91
Centro	-0,31	112/80	-0,24	2,20*	-260/76*	2,28*
Oriente	-2,02*	183/80	-1,93	0,98	-168/74	0,89

*pd \leq 0,05

estas tendencias sólo resultaron ser significativas para la región central en el período poco lluvioso y en el período lluvioso para la oriental, en general son coincidentes con el comportamiento mostrado por los valores estacionales en las últimas décadas. Según Lapinel y otros (2003) en las décadas más recientes el período lluvioso ha manifestado persistentes déficit en los acumulados de las lluvias.

Un aspecto a destacar es la tendencia al incremento de la lluvia observada en la región occidental en el período lluvioso, con un punto de cambio alrededor de 1993, que si bien no resultó significativa estadísticamente, es contraria a la disminución ocurrida en el resto del país a partir de 1980. Este hecho está muy vinculado con las modificaciones recientes en el comportamiento de los procesos que originan las lluvias de una a otra región del país.

Estos resultados evidencian una vez más, que desde finales de la década de los años 70 se han producido cambios importantes en la distribución de los acumulados de precipitación en todo el país, vinculados a oscilaciones o ciclos de baja y alta frecuencia en las condiciones climáticas, dentro del propio proceso de la variabilidad natural del clima

(Centella y otros, 2001) o propiamente como efecto del cambio climático (Centella y otros, 2006).

Tendencias y puntos de cambios en las series estacionales de ICA

Considerando que las tendencias antes descritas no han sido más que una respuesta a los cambios o alteraciones que se han producido en la circulación atmosférica regional en los alrededores de Cuba, como consecuencia de cambios a mayor escala, se exponen de manera sintetizada las principales tendencias observadas en la circulación, representada a través de los ICA en los períodos estacionales lluvioso y poco lluvioso.

El análisis de la tendencia observada en los meses del período estacional poco lluvioso, a partir de los estadígrafos Kendall-Mann y Spearman (Tabla 2), reveló la existencia de una tendencia global decreciente en la circulación zonal en los niveles bajos y medios y creciente en los niveles superiores. Por su parte, la circulación meridional mostró una tendencia decreciente en los tres niveles troposféricos. En ambos casos, aunque revelaron la existencia de tendencia global positiva o negativa en las series, estas no fueron significativas.

Tabla 2. Valores de los estadígrafos de las dójimas de Mann (KM), Spearman (Sp) y Pettitt (Pe) referidos a las características de la circulación en el período poco lluvioso desde 1961-2004

Niveles	Índice zonal				Índice meridional			
	KM	SP	PE	Año	KM	SP	PE	Año
300 hPa	0,30	0,22	-114	1988	-0,50	-0,36	100	1981
500 hPa	-0,12	-0,23	106	1980	-1,33	-1,34	163	1981
850 hPa	-0,55	-0,76	198	1980	-1,23	-1,46	191	1987

*pd \leq 0,05

En el período lluvioso (Tabla 3), la circulación zonal mostró una tendencia positiva en los tres niveles y la meridional una tendencia positiva en los niveles bajos y medios y negativa en 300 hPa. Lo más relevante fue que en 850 hPa el estadígrafo mostró una tendencia positiva o creciente, significativa a 5 % de significación, en ambos transportes, con un punto de cambio en el año 1973 para los zonales y en el 1983 para los meridionales. De esta manera se revela la evidente existencia en los últimos años, de persistencia y predominio de los transportes zonales del este y meridionales del sur en los niveles bajos y medios en ese período, asociados a una marcada influencia anticiclónica en nuestra región.

A pesar de que estadísticamente no se advierte y corrobora la existencia de un punto de cambio significativo alrededor de 1979, la evaluación detallada de los estadígrafos (Fig. 3) sugiere la ocurrencia de un proceso de modificación de las características de la circulación en el entorno de ese año.

Este hecho no puede ser firmemente demostrado, quizás debido a la variabilidad de la serie que implica la no existencia de valores significativos relativos a los estadígrafos Mann y Pettitt, ni a 5 ni a 10 % de significación debido a compensaciones que se producen a lo largo del tiempo. Sin embargo, es importante resaltar que es consistente con lo observado por Naranjo (1994) y Fonseca (2001) y además aporta un nuevo elemento que puede ser considerado para continuar profundizando en este tipo de investigación.

Sobre la base de los resultados obtenidos se pudo determinar que las tendencias mostradas por los acumulados de lluvia son opuestas a las tendencias observadas en la circulación regional. Este hecho permite considerar que las variaciones o cambios en la circulación zonal y meridional en el área indican la existencia de una posible asociación entre la lluvia y los índices de circulación.

Análisis de la matriz de correlación entre los acumulados de lluvia y los transportes de masa

Uno de los primeros pasos a seguir cuando se intenta valorar la asociación entre dos o más variables cuantitativas, es la búsqueda de la relación que se establece entre ellas por medio de un índice numérico capaz de cuantificar esa relación. A partir del análisis de los coeficientes de correlación de Pearson (r) obtenidos para los índices de circulación zonal y meridional y las anomalías estandarizadas de lluvia para todos los meses del período 1961-2004 para Cuba y sus tres regiones (Tabla 4), se pudo determinar como una primera aproximación, que las relaciones más fuertes y de igual signo se establecen con la circulación meridional en los tres niveles troposféricos analizados (850, 500 y 300 hPa), se exceptúa los niveles bajos (850 hPa) en la región oriental de Cuba.

Si bien los coeficientes de correlación están considerados dentro del rango de débiles (Chan, 2003), estos son significativos a 5 % de significación. Asimismo, los coeficientes obtenidos para la circulación zonal en los niveles bajos, en las regiones occidental y central de Cuba, aunque también son considerados dentro del rango de débiles, resultan significativos y revelan el carácter predominante de este tipo de circulación durante todo el año. Estos resultados sugieren un aumento de los acumulados de las lluvias asociados con un incremento de los transportes meridionales en los niveles bajos, medios y altos, así como también de los zonales en los niveles bajos.

Los coeficientes de correlación obtenidos a partir de las series estacionales de las anomalías mensuales de precipitación y de los índices de circulación, mostraron que las relaciones más fuertes de la lluvia con los transportes de masa se establecen en el período poco lluvioso del año (Tabla 5). Los

Tabla 3. Valores de los estadígrafos de las décimas de Mann (KM), Spearman (Sp) y Pettitt (Pe) referidos a las características de la circulación en el período lluvioso desde 1961-2004

Niveles	Índice zonal				Índice meridional			
	KM	SP	PE	Año	KM	SP	PE	Año
300 hPa	0,57	0,41	-1,45	1991	-0,73	-0,77	182	1970
500 hPa	1,62	1,67	-2,19	1989*	0,67	0,53	130	1970
850 hPa	2,96*	2,82	-2,33*	1973	3,20*	3,43	-3,62*	1983

*pd ≤ 0,05

valores positivos más elevados de los coeficientes demuestran la mayor influencia de la circulación meridional sobre las anomalías de lluvia invernales básicamente en los niveles medios y superiores en general en Cuba. Este hecho complementa los resultados obtenidos por Cutié (2002), quien demostró el papel que juegan los procesos meridionales en la generación de anomalías pluviométricas extremas en la primera fase del período lluvioso en Cuba. En el nivel de 850 hPa la mayor influencia es de la circulación zonal.

La interpretación física de estos resultados sugiere que una disminución (incremento) de los acumulados de lluvia se asocia fundamentalmente con una disminución (incremento) de la circulación meridional del sur en los niveles medios y superiores, junto con una disminución (aumento) del flujo zonal del este en los niveles bajos. Si se considera que como promedio de acuerdo con el ciclo anual del índice, en los niveles medios y altos predomina el flujo zonal del oeste y en los niveles bajos el meridional del sur, entonces una disminu-

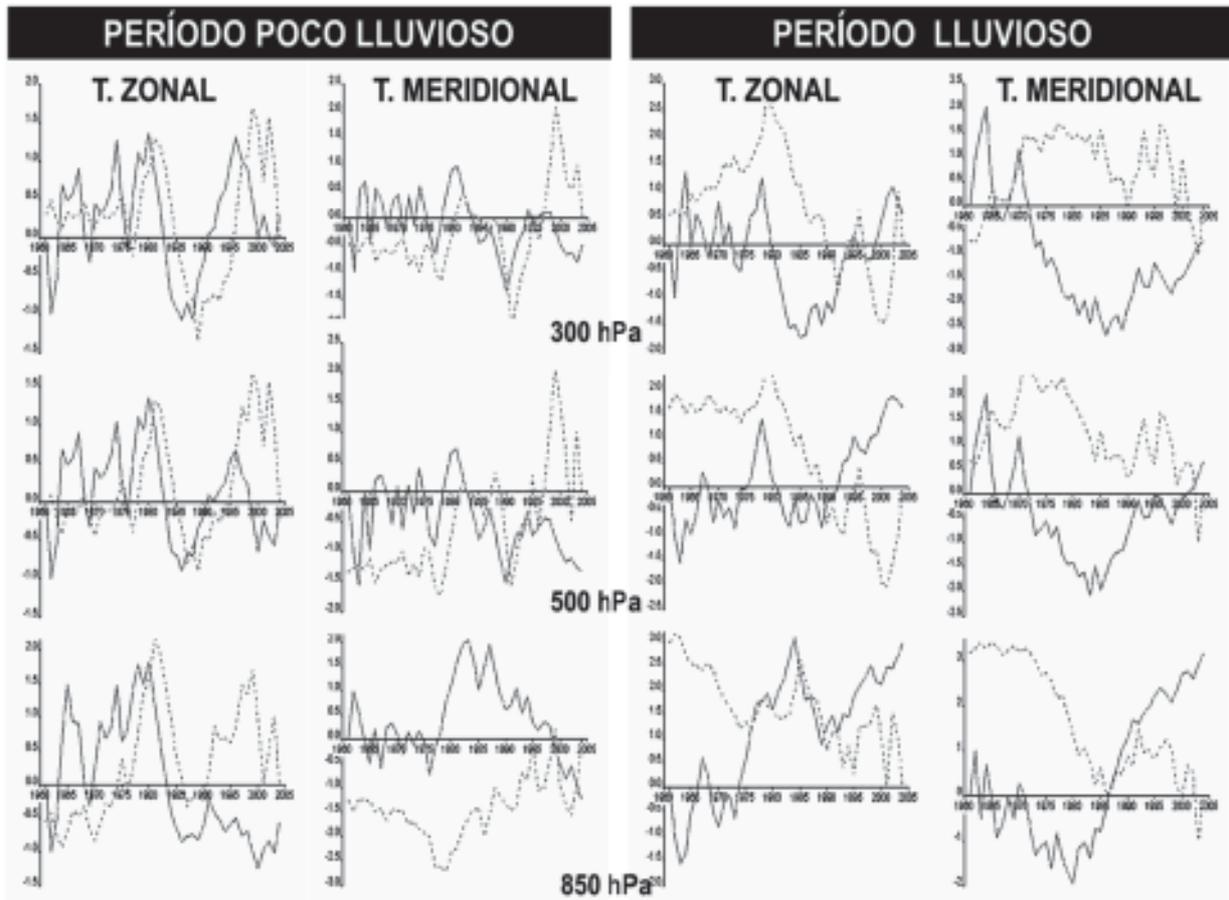


Fig. 3. Análisis detallado de la tendencia en las series de los índices de circulación. Período: 1961-2004.

Tabla 4. Coeficientes de correlación (r) entre los índices de circulación y las anomalías mensuales de lluvia para Cuba y sus regiones occidental, central y oriental

ICA	CUBA	OCCIDENTE	CENTRO	ORIENTE
IZ_300	0,00	-0,02	0,02	-0,00
IM_300	0,27*	0,27*	0,27*	0,11*
IZ_500	0,00	0,00	0,03	-0,02
IM_500	0,28*	0,32*	0,28*	0,09*
IZ_850	0,17*	0,19*	0,19*	0,04
IM_850	0,18*	0,29*	0,19*	-0,04

*pd ≤ 0,05

Tabla 5. Coeficientes de correlación entre los índices de circulación y las anomalías de lluvia de los períodos poco lluvioso y lluvioso para Cuba y sus regiones occidental, central y oriental

ICA	ANCUBA		ANOCC		ANCENT		ANORI	
	P.lluv.	P.p.lluv.	P.lluv.	P.p.lluv.	P.lluv.	P.p.lluv.	P.lluv.	P.p.lluv.
IZ_300	0,04	0,23*	-0,05	0,22*	0,03	0,23*	0,09	0,09
IM_300	0,26*	0,39*	0,25*	0,40*	0,29*	0,37*	0,07	0,23*
IZ_500	0,06	0,18*	-0,01	0,19*	0,05	0,20*	0,09	0,04
IM_500	0,25*	0,34*	0,33*	0,36*	0,27*	0,33*	-0,01	0,20*
IZ_850	0,15*	0,22*	0,15*	0,25*	0,15*	0,25*	0,04	0,06
IM_850	0,20*	0,10*	0,36*	0,20*	0,23*	0,13*	-0,10	-0,06

Período Lluvioso, PpLluv- Período poco Lluvioso, *pd $\leq 0,05$

ción (incremento) de los acumulados de lluvia se asocia con una reducción (incremento) de los flujos del SW en los niveles medios y superiores y del SE en los niveles bajos.

En el período lluvioso del año, los coeficientes también demuestran el papel dominante de la circulación meridional respecto a la lluvia y el papel de la zonalidad en los niveles bajos, fundamentalmente en las regiones occidental y central y por consiguiente para Cuba en su conjunto. La interpretación física de estos resultados es similar a la del período poco lluvioso.

Contribución de los transportes de masa a las anomalías de lluvia

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos a partir del uso del modelo lineal simple, se conformó un análisis de componentes principales o función ortogonal empírica (ACP o FOE). El análisis permitió obtener los factores ortogonales que mejor describen y caracterizan la variabilidad de la lluvia. En la tabla 6 donde se muestra la contribución de cada factor a la varianza total de los datos, puede notarse cómo con sólo dos de ellos se explica más de 80 % de la varianza total de los datos. Sin embargo, es razonable incluir hasta la tercera componente ya que agregando una componente más se gana 13,6 %, con lo que se explica 96,2 % de la varianza total de los datos.

Tabla 6. Número de factores seleccionados y varianza explicada por cada factor

Factores	Valor propio	% Varianza explicada	% Varianza acumulada
1	3,31	55,2	55,2
2	1,64	27,4	82,6
3	0,81	13,6	96,2

De igual manera, el análisis de la correlación de los transportes de masa con cada uno de los factores (Tabla 7) mostró que la primera componente o factor, tiene la mayor correlación positiva con los transportes zonales en los tres niveles. En este factor están mejor representadas las anomalías de precipitación para Cuba y sus regiones occidental y central. La segunda componente tiene la mayor correlación positiva con los transportes meridionales en los niveles medios y superiores. En este segundo factor también están mejor representadas las anomalías de lluvia para Cuba, occidente y centro. La tercera componente tiene la mayor correlación positiva con los transportes meridionales en 850 hPa, y con una mayor representación de las anomalías de lluvia de la región oriental.

Tabla 7. Matriz de correlación entre los transportes de masa y los factores

ICA	Factor 1	Factor 2	Factor 3
IZ3	0,89	-0,39	-0,001
IM3	0,65	0,66	-0,32
IZ5	0,91	-0,35	-0,01
IM5	0,64	0,74	-0,14
IZ8	0,80	-0,48	-0,02
IM8	0,42	0,36	0,83
*AnCub	0,32	0,18	-0,13
*AnOcc	0,34	0,20	-0,03
*AnCen	0,33	0,16	-0,08
*AnOri	0,13	0,12	-0,19

El hecho de que la primera componente represente las características de la circulación zonal en los tres niveles estudiados y explique un poco más de 30 % de la variabilidad de la lluvia en la mitad occidental del país en este período del año, está vinculado a las perturbaciones frecuentes en el flujo básico que se producen como consecuencia de la influencia de sistemas de latitudes medias como bajas extratropicales y anticiclones migratorios,

que en mayor o menor medida producen cambios en el régimen de viento.

Asimismo, que en esta primera componente estén mejor representadas las anomalías de precipitación de la mitad occidental del territorio cubano, evidencia una vez más la mayor respuesta de esta zona del país respecto a la mitad oriental, a determinados procesos circulatorios del Caribe Occidental. La variación temporal de las anomalías de precipitación y los valores de la primera componente (Fig. 4) muestran la frecuente correspondencia de períodos con anomalías positivas (negativas) con valores también positivos (negativos) de la primera FOE.

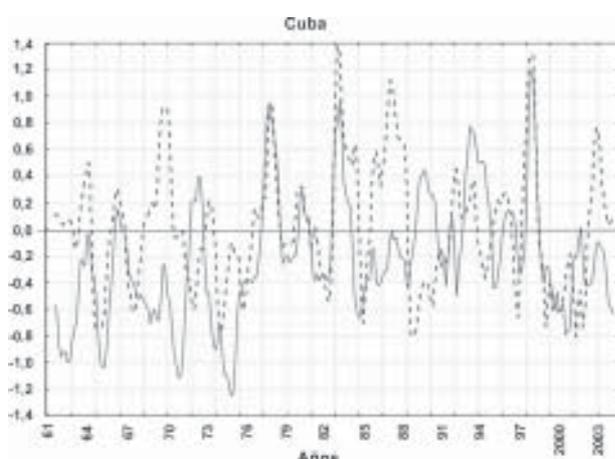


Fig. 4. Variación temporal de las anomalías de precipitación y los valores de la primera componente para el período poco lluvioso en Cuba.

Respecto a las CP2 y CP3, que explican un poco más de 13 % de la variabilidad de la lluvia, son descriptoras de la circulación meridional para la mitad occidental en los niveles medios y altos y para la región oriental en los niveles bajos. Esto se corresponde con los resultados obtenidos en el modelo lineal simple para la parte occidental de Cuba y está asociado con la mayor actividad frontal y las invasiones de masas de aire continentales característicos de esta época del año. La explicación se puede encontrar en el comportamiento de los flujos del norte que transportan masas frías, secas y estables que afectan considerablemente la eficiencia de las precipitaciones. También se explica en la mayor incidencia de los sures en parte de este período, que son flujos cálidos y cargados de aire húmedo.

En el período lluvioso, según la varianza explicada por cada uno de los factores (Tabla 8), también es razonable adoptar las tres primeras componentes, ya que con ellas se explica 94,3 % de la varianza

total de los datos. La primera componente (CP1), que aporta 53,5 % de la varianza, tiene la mayor correlación negativa con los transportes zonales en los tres niveles analizados (-0,78, -0,92 y -0,91), sin embargo, las anomalías de precipitación no están bien representadas en este factor.

Tabla 8. Número de factores seleccionados y varianza explicada por cada factor

Factores	Valor propio	% Varianza explicada	% Varianza acumulada
1	3,21	53,5	53,5
2	1,51	25,1	78,6
3	0,94	15,7	94,3

La segunda componente (CP2), que tiene 25,1 %, aporta la mayor correlación de signo negativo (-0,63 y -0,79) con los transportes meridionales en los niveles medios y superiores y una mejor representación de las anomalías para Cuba y sus regiones occidental y central. La tercera componente, con 15,7 % de la varianza, tiene la mayor correlación positiva (0,83) con los transportes meridionales en 850 hPa y donde mejor se representan las anomalías para la región occidental y oriental.

Durante este período, si bien es cierto que la mayor contribución al primer factor es de los transportes zonales, la circulación meridional es la que explica el mayor porcentaje de la variabilidad de la lluvia en la mayor parte del país. Este hecho indica el papel de los transportes meridionales en el período lluvioso del año y está asociado con el predominio de los transportes meridionales del sur y el peso dominante en esta época del año de las contribuciones a los acumulados de lluvia de aquellos procesos como ciclones, ondas tropicales y hondonadas, entre otros, que se desplazan en el flujo básico y que en buena medida dependen también de otros factores.

De lo anterior se desprende que tanto en un período como en otro, las asociaciones entre los transportes de masa y las anomalías de lluvia, pueden abordarse adecuadamente a partir de las tres primeras componentes, pues, a ellas se vincula el mayor porcentaje de la varianza total del fenómeno. Estos resultados permiten decir que, un alto porcentaje de la variabilidad de la lluvia en Cuba está condicionada por los transportes de masas. Por lo tanto, los procesos o patrones de la variabilidad climática condicionan los transportes atmosféricos y son estos los que reflejan los principales cambios en las variables climáticas.

Conclusiones

Se confirmó que entre 1961 y 2004, los acumulados de lluvia para Cuba y sus tres regiones mostraron una tendencia al incremento en el período poco lluvioso. En el período lluvioso, sin embargo, la tendencia general fue a la disminución, salvo en la región occidental donde los acumulados reflejaron una tendencia al incremento. Las tendencias sólo fueron estadísticamente significativas en la región central en el período poco lluvioso y la oriental en el período lluvioso.

Se demostró que la circulación zonal en los tres niveles estudiados explica más de 30 % de la variabilidad de la lluvia del período poco lluvioso en la mitad occidental de Cuba. En el período lluvioso, la circulación meridional explica más de 40 % en general en toda Cuba.

Se demostró el papel de los transportes meridionales en el período lluvioso del año, relacionados principalmente con los flujos cálidos y húmedos de componente sur, que se asocian en los niveles bajos y medios con la mayor persistencia del anticiclón subtropical en esta época del año.

Se logró encontrar y explicar asociaciones importantes entre la lluvia en Cuba con diferentes aspectos que se relacionan con características de la circulación atmosférica en el área de estudio. El hallazgo de estas relaciones constituye un aporte notable en el intento futuro de perfeccionar los esquemas de predicción de la precipitación en Cuba, que brinda la posibilidad de incorporar estos indicadores como otros predictores potenciales del comportamiento de los totales de lluvia en el país.

Bibliografía

- Aroche, R.; N. Varela; B. Lapinel; I. Pérez y I. Hernández (1999): «Subsistema para el cálculo de Índices de Circulación de Katz en las variantes de las intersecciones o de rejillas de la información barométrica de cualquier región o nivel de la atmósfera». ICT, Proyecto 013 01 017, Programa Nacional de Cambios Globales.
- Aroche, R., et al. (2002a): *Monografía: Variabilidad multianual de los campos de circulación sobre el Gran Caribe y sus repercusiones sobre el régimen pluviométrico en Cuba*. Programa Ramal de Investigación del INSMET, Proyecto 49 201 204, ICT, 80 p.
- Aroche, R.; I. Pomares; N. Masó y N. Fernández (2002b): «El Índice de Circulación de Katz. Una aplicación en investigaciones sobre variabilidad climática regional». Programa Ramal de Investigación del INSMET, Proyecto 49 201 204 (inédito).
- Aroche, R.; N. Varela; B. Lapinel; I. Pérez y I. Hernández (2003): «CIRC-2003. Subsistema para el cálculo de Índices de Circulación de Katz en las variantes de las intersecciones o de rejillas de la información barométrica de cualquier región o nivel de la atmósfera». Informe del Resultado 02 del Proyecto «Causas de la sequía en Cuba y su pronóstico», Instituto de Meteorología, Cuba (inédito).
- Centella, A. et al. (1997): «Variaciones y Cambios del Clima en Cuba. Informe Técnico». Centro del Clima, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.
- Centella, A.; J. Llanes y L. Paz (2001): «Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático», Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba, 169 pp.
- Centella, A. et al. (2006): *La sequía meteorológica y agrícola en la República de Cuba y la República Dominicana*, pp. 1-89.
- Chan, Y. H. (2003): «Biostatistics 104: Correlational análisis». *Singapore Med. J.* Vol. 44(12) 614-619 pp.
- Cutié V. (2002): «Las discontinuidades en la circulación atmosférica regional y su asociación con la ocurrencia de eventos extremos del régimen pluviométrico de Cuba». Tesis presentada en opción al título de Máster en Ciencias Meteorológicas, Facultad de Física de la Universidad de La Habana, 48 p.
- Fonseca, C. (2001): «Cambios en la posición e intensidad del Anticiclón del Atlántico y modificación del régimen de las lluvias en la región del Caribe». Tesis en opción al título de Máster en Ciencias Meteorológicas, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba, 48 p.
- _____ (2007): «La Oscilación del Atlántico Norte, los Índices de Circulación Atmosférica y la lluvia en Cuba», inédito.
- Folland, C.K., T.R., Vinnikov y K. Ya (1991): *Observed climate variations and Change*, Climate Change. Cambridge, University Press, Cambridge, 99-233 pp.
- Huerta, J. y H. Fernández (1978): «Red Pluviométrica Nacional». Proyecto de su diseño, Instituto de Hidroeconomía, 25 p.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
- Kalnay, E. (1996): «The NCEP/NCAR 40 year Reanalysis Project». *Bulletin of the American Meteorology Society* 77(3) 437-471.
- Katz (1960): *Cambios estacionales de la circulación de la atmósfera y el pronóstico a largo plazo*, Editorial Hidrometeorológica de Leningrado, pp. 270.
- Lapinel B. et al. (2003): *La sequía en Cuba*. Monografía. Centro del Clima, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba, 243 p.
- Mardia, K.V.; J.T. Kent y J.M. Bibby (1979): *Multivariate Analysis*. Academic Press, Londres, 521 p.

- Mellado, E. y I. Borrajero (1997): «WinStat.exe, Programa para el cálculo de índices de tendencia en series temporales». Versión 2.0 (Beta).
- Naranjo L. (1994): «Uso de los índices de circulación para la caracterización de las condiciones atmosféricas en las inmediaciones de Cuba», Reporte de Investigación. Grupo Nacional de Pronóstico a Largo Plazo, Instituto de Meteorología, Cuba, 50 p.
- Naranjo, L. y A. Centella (1998): «Recent trends in the climate of Cuba». Published by *Royal Meteorological Society, Weather*, vol. 53 (3).
- Orlansky, (1975): «A racional subdivisión of scales for atmospheric processes». *Bulletin American Meteorological Society*, 56(5): 527-530.
- Sneyers, R. (1990): *On the statistical analysis of series of observations*. Technical Note No. 143. WMO-415. 192 p.
- Trusov A. Izquierdo y L. R. Díaz, (1983): *Características espaciales y temporales de las precipitaciones atmosféricas en Cuba*. Editorial Academia, La Habana, Cuba, 150 p.
- WMO (1994): *Guide to Hydrological Practices*, 5th edition, WMO-No. 168, WMO, Geneva.
- _____ (1996): *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (6th edition), WMO-No.8., World Meteorological Organization, Geneva.

Abstract

Based on a previous estimation of Circulation Atmospheric Index, the variations on regional atmospheric circulation and the rainfall over Cuba for 1961-2004 period were assessed. The relationship between rainfall and circulation mechanisms was established through a simple linear model as well as using a Principal Component Analysis methodology. The results shown that zonal circulation explain more that 30% of the precipitation variability over the western of Cuba in winter, while the variability of rainfall in summer is explained in more than a 40% by the meridional circulation process. The meridional flows also play a determined role on the precipitation behavior during summer, mainly in association with the warm and wet south flows associated in the low levels with the persistence of the Atlantic High Pressure.

Key words: Atmospheric Circulation Index (ACI), Mass Transport, Circulatory Process.