

Los mecanismos elementales de circulación en América del norte y su relación con las situaciones sinópticas que influyen sobre la mitad occidental de Cuba



The elementary mechanisms of circulation in North America and their relationship with the synoptic situations that influence the western half of Cuba

<https://eqrcode.co/a/IiSgQV>

Edgardo Soler-Torres*, Luis M. Sánchez-Suárez, Luis B. Lecha-Estela, Yuslandis Verdecia-Naranjo
Centro Meteorológico de la Isla de la Juventud, Isla de la Juventud, Cuba

RESUMEN: Para establecer la relación entre los mecanismos elementales de circulación en América del Norte y las situaciones sinópticas que influyen sobre la mitad occidental de Cuba, se emplearon datos diarios de la clasificación de Dzerdzeevskii y de los tipos de situaciones sinópticas que influyen sobre Cuba durante el periodo 1971-2017. El resultado demuestra la estacionalidad de las relaciones establecidas, donde predominan las circulaciones longitudinales y los tipos de situaciones anticiclónicas, con variaciones en la frecuencia de ocurrencia según cada estación climática del año; el invierno (diciembre-febrero) marcado por las circulaciones longitudinales del norte que están relacionadas con las situaciones anticiclónicas migratorias y el verano (junio-agosto) por las circulaciones longitudinales del sur que se relacionan con las situaciones anticiclónicas oceánicas; así como, dos periodos de transición entre esas estaciones donde ocurren los cambios de los tipos de circulaciones longitudinales y es alta la variabilidad de las situaciones sinópticas. Finalmente, se establecieron las tendencias para los tipos de situaciones sinópticas, según su relación con las características de la circulación atmosférica predominante, longitudinal del norte y longitudinal del sur.

Palabras clave: circulación atmosférica, mecanismo elemental de circulación, situación sinóptica.

ABSTRACT: To establish the relationship between the elementary mechanisms of circulation in North America and the synoptic situations that influence the western half of Cuba, daily data from the Dzerdzeevskii classification and the types of synoptic situations that influence Cuba during the period 1971-2017 were used. The result shows the seasonality of the established relationships, where longitudinal circulations and types of anticyclonic situations predominate, with variations in the frequency of occurrence according to each climatic season of the year; winter (december-february) marked by north longitudinal circulations that are related to migratory anticyclonic situations and summer (june-august) by southern longitudinal circulations that are related to oceanic anticyclonic situations; as well as, two transition periods between those stations where changes in the types of longitudinal circulations occur and the variability of synoptic situations is high. Finally, trends were established for the types of synoptic situations, according to their relationship with the characteristics of the predominant atmospheric circulation, longitudinal north and longitudinal south.

Key words: atmospheric circulation, elementary circulation mechanism, synoptic situation.

*Autor para correspondencia: Edgardo Soler-Torres. E-mail: edgardo.soler@ijv.insmet.cu

Recibido: 11/10/2019

Aceptado: 10/09/2020

INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra y su atmósfera reciben el calor del Sol, siendo desigual la distribución de la radiación solar que llega a la superficie terrestre, lo que provoca un mayor calentamiento en las zonas ecuatoriales y tropicales con respecto a las latitudes medias y altas. El intercambio de calor que se lleva a cabo por medio de los movimientos del aire a escala planetaria se denomina circulación general de la atmósfera ([Jáuregui, 2003](#)).

La circulación atmosférica es un factor que determina los climas regionales ya que está vinculada a la génesis de los estados del tiempo diarios predominantes y al movimiento de las masas de aire con diferentes características físicas ([Planos et al., 2013](#)).

Según sea la magnitud del desbalance energético entre latitudes bajas y altas, tanto mayor o menor será el intercambio latitudinal resultante, y tanto más activos o no, serán los procesos de la circulación atmosférica ([Kononova, 2016](#)).

Esta compleja dinámica de la circulación atmosférica cambia en estrecha asociación con las estaciones del año y se manifiesta de manera específica en la génesis y características de los procesos sinópticos típicos o recurrentes en las diferentes regiones del planeta.

Científicos rusos como [Alisov \(1950\)](#), [Dzerdzevskii \(1968\)](#), [Alisov y Poltarau \(1974\)](#) y [Vitvitzkii \(1986\)](#) desarrollaron la climatología de los procesos de la circulación general de la atmósfera en el hemisferio norte, basada en la clasificación de los mecanismos elementales de circulación (MEC), que se fundamenta en la presencia o ausencia diaria de los procesos de bloqueos anticiclónicos e intercambios ciclónicos, su dirección y número en el hemisferio, así como, la circulación predominante en el polo. Fueron definidos cuatro grupos, 13 tipos y 41 subtipos de MEC, que es la unidad básica de clasificación.

[Sábina y Jmelevskaya \(1984\)](#) identificaron los patrones climatológicos del hemisferio norte para cada MEC en el nivel de superficie y en 500 hPa, así como, las características de sus marchas anuales y multianuales.

Los resultados más recientes sobre este tema incluyen la climatología sinóptica de los procesos de ambos hemisferios, ofreciendo una visión global de los intercambios de masa y energía ([Kononova, 2016](#)), lo cual es fundamental para comprender la dinámica actual y tendencias futuras del clima y sus impactos potenciales sobre la vida del hombre en el planeta.

En la actualidad estos resultados están siendo aplicados en diversas partes del mundo, así lo demuestra, la reciente publicación de [Lebedeva et al. \(2019\)](#) sobre los cambios en las circulaciones atmosféricas y las características regionales del clima en dos localidades remotas durante el siglo XX.

Los procesos de la circulación general de la atmósfera determinan a nivel global los tipos y características de las regiones sinóptico naturales, así como, su frecuencia de ocurrencia estacional determina la distribución temporal y las características de los tipos de situaciones sinópticas (TSS), que influyen sobre esas regiones ([Alisov y Poltarau, 1974](#)). Los intervalos de tiempo en que se manifiestan estos procesos, generalmente de varios días, son denominados períodos sinópticos naturales.

El objetivo de esta investigación es determinar los tipos de relaciones predominantes ($\geq 5.0\%$) entre los mecanismos elementales de circulación en América del norte y las situaciones sinópticas que influyen sobre la mitad occidental de Cuba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Gran parte de las investigaciones sobre el diseño y utilización de la clasificación de Dzerdzevskii y sus principales resultados están en idioma ruso. No obstante, a partir de contactos directos con sus autores fue posible localizar los artículos científicos y hacer traducciones de las partes esenciales de algunas de las referencias imprescindibles, para obtener con seguridad las bases metodológicas contenidas en las fuentes originales.

Para estudiar los macroprocesos de circulación, el hemisferio norte fue subdividido en seis

sectores: Europa, Atlántico, América, Pacífico, Asia y Lejano Oriente ([Dzerdzevskii, 1968](#)), con sus límites trazados teniendo en cuenta las posiciones de los continentes y océanos que determinan el carácter estacional del desarrollo de la circulación atmosférica ([Fig. 1](#)).

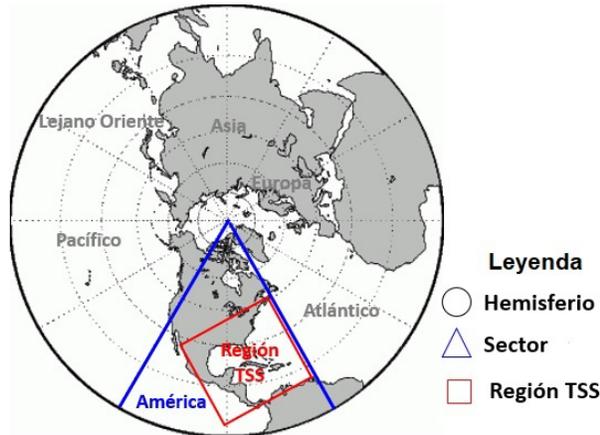


Figura 1. Representación de las escalas espaciales del sector América y la región de los TSS

Las fuentes fundamentales de información fueron la clasificación diaria de los mecanismos elementales de circulación de [Dzerdzevskii \(Kononova, 2009\)](#) y de los tipos de situaciones sinópticas que influyen sobre la mitad occidental de Cuba según la clasificación de [Lapinel \(1988\)](#), para el periodo 1971-2017.

Se realizó el análisis de la información disponible, hasta comprender los aspectos fundamentales de la clasificación de [Dzerdzevskii](#) y caracterizar el periodo de estudio.

Para establecer las relaciones entre los macroprocesos de circulación en el sector América (MCA) y los TSS que influyen sobre la mitad occidental de Cuba, se realizó la agrupación de los MCA, según la presencia o ausencia de bloqueos anticiclónicos, en cuatro grupos de circulación en el sector América (GCA):

GCA I. Latitudinales del oeste (MCA 1 y 5): tiene como rasgo fundamental que está marcado por la estacionalidad de los patrones predominantes, que son aquellos subtipos MEC correspondientes al periodo de invierno que no presentan bloqueos anticiclónicos.

GCA II. Latitudinal del este (MCA 7): no contiene ningún subtipo MEC en el sector América, por tanto, lo consideramos nulo o vacío.

GCA III. Longitudinales del norte (MCA 2, 6, 8 y 9): se caracteriza por contener los subtipos MEC que desarrollan procesos de bloqueos anticiclónicos.

GCA IV. Longitudinales del sur (MCA 3, 4, y 10): se distingue por la presencia de intercambios ciclónicos y la ausencia de bloqueos anticiclónicos en todos los subtipos MEC que lo conforman.

Teniendo en cuenta la posición geográfica de Cuba, en la frontera climatológica meridional entre los procesos tropicales y extratropicales del hemisferio norte, así como, su forma alargada y estrecha, que determinan un mayor impacto de los procesos extratropicales sobre la mitad occidental, se separó la clasificación diaria de las situaciones sinópticas influyentes para ambas mitades de Cuba, empleándose en este trabajo la clasificación para la mitad occidental, extendida desde la provincia de Pinar del Río hasta la provincia de Sancti Spiritus, incluyendo a la Isla de la Juventud.

Siguiendo la metodología de [Lapinel \(1988\)](#) se clasificó en tipos de situaciones sinópticas (TSS) los procesos atmosféricos influyentes sobre la mitad occidental de Cuba en el periodo 1971-2017, elaborando su climatología a partir de los mapas isobáricos diarios de superficie, que conforman una base de datos actualizada ([Lecha et al., 2020](#)).

Para determinar la existencia de asociación entre las variables GCA y TSS se realizó una prueba de independencia estadística de las variables, cumpliendo las condiciones impuestas al nivel de significación para el contraste de hipótesis.

Se aplicó el procedimiento estadístico tabla de contingencia a las variables categóricas previamente definidas. Posteriormente, se identificaron las relaciones, entre cada una de las categorías de estas variables, con frecuencias de ocurrencia iguales o superiores a 5%. Finalmente, se obtuvo la marcha anual de las relaciones GCA-TSS, su variabilidad en la época de circulación

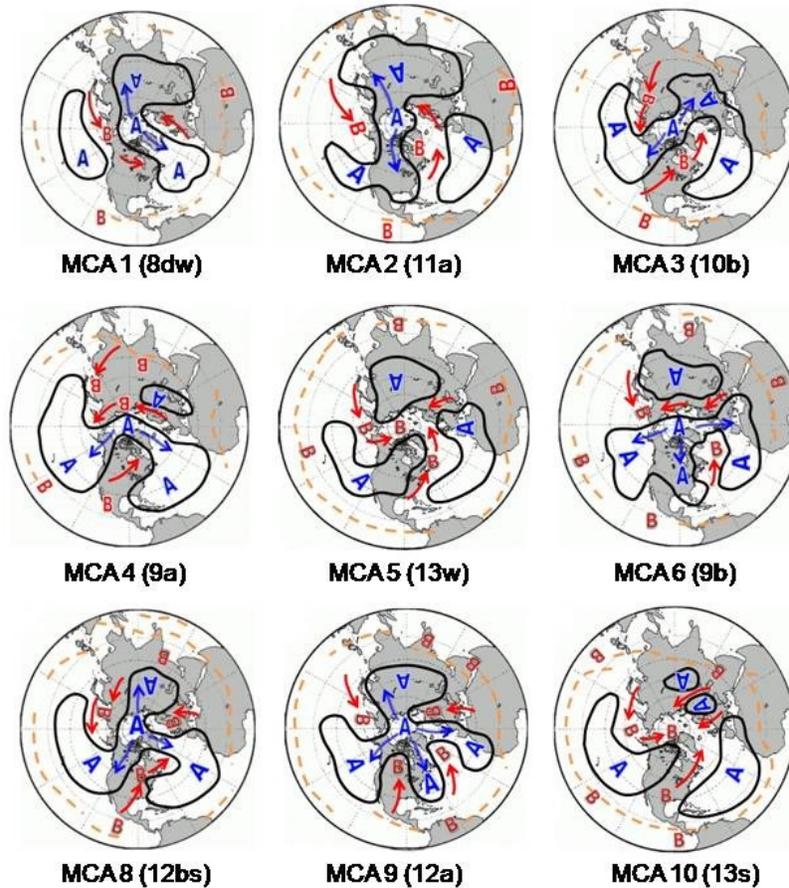


Figura 2. Mapas de los subtipos MEC (Kononova, 2009) más frecuentes para cada uno de los macroprocesos de circulación en el sector América del norte (MCA) durante el periodo 1971-2017

presente y las tendencias de los TSS, según las características de las circulaciones predominantes en el sector América.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los MEC en el sector América

Los MEC actúan de forma uniforme y completa como un macroproceso de circulación, que manifiesta los procesos de bloqueos anticiclónicos e intercambios ciclónicos en sí mismo de diferentes maneras, dependiendo de su ubicación en el hemisferio norte (Kononova, 2010).

Las fronteras del sector América al que pertenece Cuba son: latitud entre 0° y 90°N, longitud entre 60° y 120°W. En él se desarrollan nueve macroprocesos de circulación, que agrupan

de forma única los 41 subtipos de MEC (Dzerdzeevskii, 1968), siendo el sector que más cantidad de macroprocesos tiene identificados.

Los mapas (Fig. 2) corresponden a los subtipos MEC (Kononova, 2009) con la mayor frecuencia de ocurrencia en el periodo 1971-2017 para cada uno de los MCA. En ellos se utilizaron las convenciones siguientes: el límite entre las regiones de altas (A en azul) y bajas (B en rojo) presiones está definido por la isobara (línea en negro) de 1015 hPa, las flechas sólidas (rojas) indican las trayectorias medias generalizadas de los intercambios ciclónicos que penetran en latitudes extratropicales, las flechas de doble luz brillante (azul) las invasiones árticas y la línea discontinua (anaranjada) es la zona de convergencia intertropical.

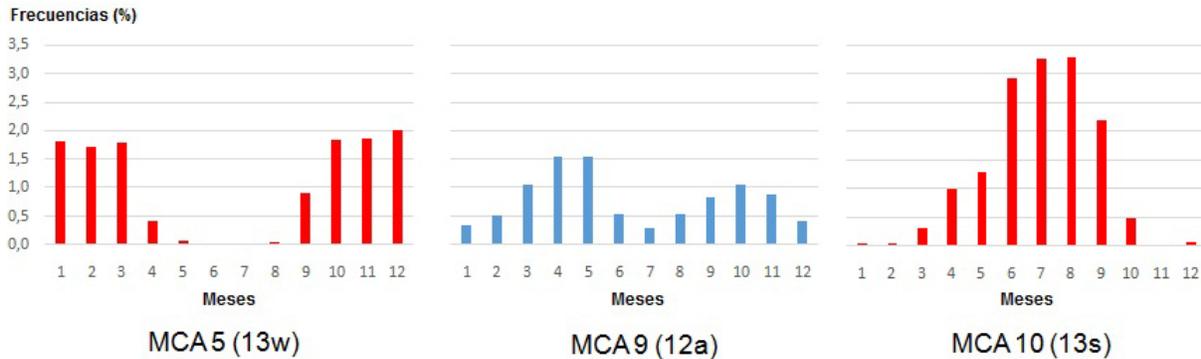


Figura 3. Marcha anual de los subtipos MEC más frecuentes en el periodo 1971-2017, MCA 5 (13w): meridional del sur en invierno, MCA 9 (12a): meridional del norte durante todo el año y MCA 10 (13s): meridional del sur en verano

Estos MCA compuestos por uno o varios subtipos MEC pueden contener circulaciones diferentes en distintas partes del sector ([Dzerdzeevskii, 1968](#)). Es decir, dentro de un MCA latitudinal, podemos encontrar movimiento de ciclones en áreas del norte, mientras, los anticiclones se mueven o estacionan al sur del sector, así como, en un MCA longitudinal, las invasiones árticas en el borde occidental son acompañadas por penetraciones ciclónicas del sur en su parte oriental.

Los MEC predominantes en los nueve MCA pertenecen a los tipos de circulación meridionales, del norte (8 al 12) y del sur (13). De acuerdo a las frecuencias máximas obtenidas por un subtipo MEC específico para cada MCA, aparecen en orden de prevalencia los siguientes: 13s con 14,9% (MCA 10), 13w con 12,5% (MCA 5) y 12a con 9,5% (MCA 9), como los únicos tres mecanismos elementales de circulación con frecuencias de ocurrencia mayores al 5% durante el periodo de estudio, acumulando un significativo 36,9%.

Estos tres subtipos MEC, que dominan el ciclo anual ([Fig. 3](#)), se caracterizaron por sus grandes intercambios de masa y energía entre bajas y altas latitudes, dado el número de invasiones árticas y penetraciones ciclónicas del sur que son capaces de desarrollar; por lo que han jugado un relevante papel en los macroprocesos de circulación predominantes durante los últimos 50 años en el sector América.

La determinación de la estacionalidad es importante en las investigaciones de los procesos atmosféricos, ya que analiza las variaciones periódicas y predecibles para un periodo igual o inferior a un año, lo que permitió establecer patrones de circulación atmosférica y expresar su secuencia de ocurrencia en las diferentes estaciones del año.

La marcha anual de los MCA muestra sus variaciones a partir del análisis de la frecuencia de ocurrencia mensual, lo que permitió establecer que los MCA 1, 2, 5 y 6 son predominantes en el periodo poco lluvioso ([Fig. 4a](#)), mientras, los MCA 8 y 9 presentan comportamientos bimodales ([Fig. 4b](#)), con valores máximos en los meses de transición entre las temporadas del año y los MCA 3, 4 y 10 son patrones típicos de la temporada lluviosa ([Fig. 4c](#)).

La afirmación de que la circulación atmosférica es un factor que determina los climas regionales (...) ([Planos et al., 2013](#)) queda demostrada en el comportamiento diferenciado de los MCA en cuatro estaciones climáticas. Lo anterior tiene su expresión en el comportamiento estacional del régimen térmico de Cuba, así como, en el proceso de adaptación térmica de la población residente ([Lecha, 2019](#)). También, corrobora el resultado de [Lecha y Llanes \(1988\)](#), que demostraron la influencia de la circulación extratropical sobre Cuba durante la temporada poco lluviosa del año y lo establecido por [Lecha et al. \(1994\)](#), sobre las

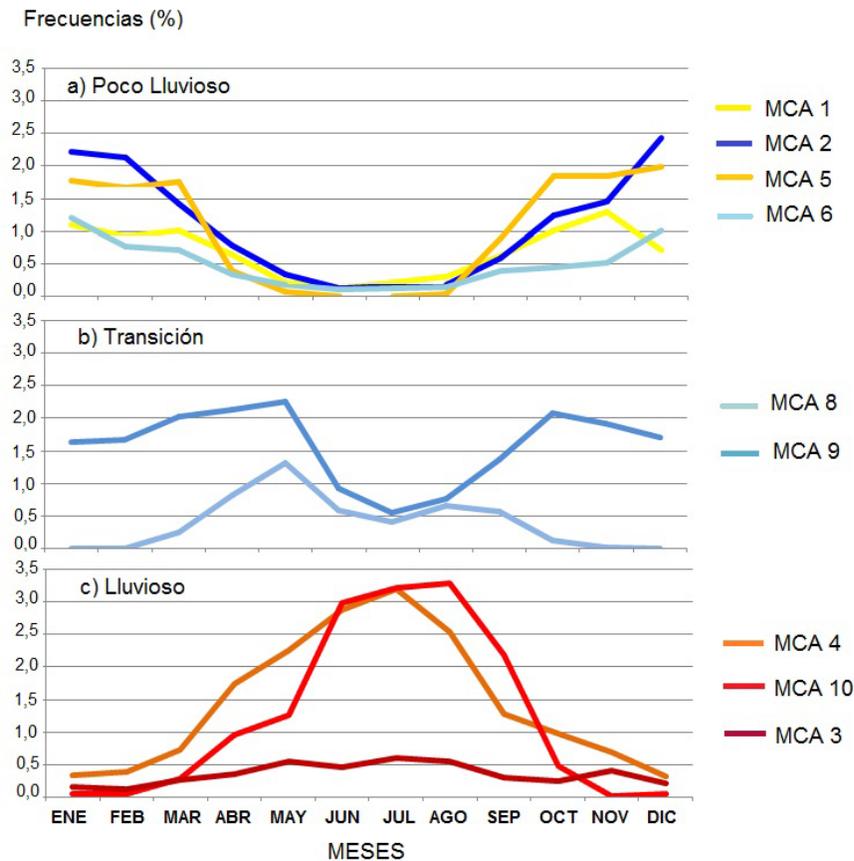


Figura 4. Marcha anual según periodos de predominio de los macroprocesos de circulación en el sector América del norte entre 1971 y 2017

circulaciones atmosféricas y su efecto en la formación del clima local.

Con estos macroprocesos de circulación atmosférica (MCA) se formarán los grupos de circulaciones en el sector América (GCA), los que serán contrastados con los tipos de situaciones sinópticas (TSS) influyentes sobre la mitad occidental de Cuba para determinar sus relaciones predominantes.

Formación de los grupos de circulación (GCA) en el sector América

El análisis de la estructura taxonómica de los macroprocesos de circulación en el sector de América del norte (MCA), conformados por los mecanismos elementales de circulación (MEC) de la clasificación de Dzerdzeevskii, permitió establecer que aquellos con componente latitudinal

del oeste y longitudinal del sur, están compuestos por los MEC con ausencia de bloqueos anticiclónicos (Tabla 1) y alcanzan una frecuencia acumulada del 57.2 % de los casos, mientras, los MCA con componente longitudinal del norte, que contienen los subtipos MEC con presencia de bloqueos anticiclónicos, ocurren en el otro 42.8% (Tabla 2). A partir de este análisis se formaron los grupos de circulación en el sector América (GCA) que se describen a continuación:

GCA I. Latitudinales del oeste (MCA 1 y 5): su rasgo fundamental está marcado por la estacionalidad de los patrones predominantes, que son aquellos subtipos MEC correspondientes al periodo de invierno que no presentan bloqueos anticiclónicos en el sector América. El macroproceso latitudinal del oeste (MCA 1) está compuesto por ocho subtipos que ocurren

Tabla 1. Grupos de circulación formados por MCA con subtipos MEC que tienen ausencia de bloqueos anticiclónicos en el sector América

No GCA	No MCA	Macroprocesos de circulación en América (MCA)	Frecuencias relativas de ocurrencia (%)	Subtipos MEC que agrupa	Cantidad con bloqueos anticiclónicos	Cantidad con intercambios ciclónicos
I	1	Latitudinal del oeste	8,2	1a, 4a, 5a, 5b, 8bw, 8cw, 8cs, 8dw	Ninguno (de 8)	Dos (8cw y 8cs)
	5	Latitudinal del oeste con intercambios en posición estacionaria	12,5	13w	Ninguno (de 1)	Uno (13w)
	3	Longitudinal del sur	4,3	1b, 8ds, 10b	Ninguno (de 3)	Todos (de 3)
IV	4	Latitudinal del oeste y longitudinal del sur	17,3	2a, 2b, 2c, 3, 4b, 4c, 5c, 5d, 6, 8bs, 9a	Ninguno (de 11)	Todos (de 11)
	10	Longitudinal del sur con intercambios en posición estacionaria	14,9	13s	Ninguno (de 1)	Uno (13s)

mayoritariamente en la temporada poco lluviosa del año con una frecuencia de 8.2% y posee dos con intercambios ciclónicos (8cw y 8cs), mientras, el latitudinal del oeste con intercambios en posición estacionaria (MCA 5) solo tiene el subtipo 13w que también es de invierno y alcanza un alto valor de ocurrencia (12.5%).

GCA II. Latitudinal del este (MCA 7): no contiene ningún subtipo MEC en el sector América, por tanto, lo consideramos nulo o vacío.

GCA III. Longitudinales del norte (MCA 2, 6, 8 y 9): se caracteriza por contener los subtipos MEC que desarrollan procesos de bloqueos

anticiclónicos en el sector América. El macroproceso longitudinal del norte y longitudinal del sur, en zonas adyacentes, no concurrentes (MCA 9) es el único que alcanza la cantidad total de bloqueos e intercambios posibles y presenta el valor máximo de frecuencia con 19.1%, teniendo como MEC predominante al 12a; el longitudinal del norte (MCA 2) con 13.1 % de ocurrencia está integrado por seis MEC y solo uno posee intercambios ciclónicos (12cw); el longitudinal del norte y latitudinal del oeste (MCA 8) logra dos intercambios ciclónicos (7as y 12bs) y solo el longitudinal del norte con intercambios en posición

Tabla 2. Grupo de circulación formado por MCA con subtipos MEC que tienen presencia de bloqueos anticiclónicos en el sector América

No GCA	No MCA	Macroprocesos de circulación en América (MCA)	Frecuencias relativas de ocurrencia (%)	Subtipos MEC que agrupa	Cantidad con bloqueos anticiclónicos	Cantidad con intercambios ciclónicos
III	6	Longitudinal del norte con intercambios en posición estacionaria	5,9	9b, 11b, 11c	Todos (de 3)	Ninguno
	2	Longitudinal del norte	13,1	7aw, 7bw, 10a, 11a, 12cw, 12d	Todos (de 6)	Uno (12cw)
	8	Longitudinal del norte y latitudinal del oeste	4,7	7as, 12bs, 12cs	Todos (de 3)	Dos (7as y 12bs)
	9	Longitudinal del norte y longitudinal del sur, en zonas adyacentes, no concurrentes	19,1	7bs, 8a, 11d, 12a, 12bw	Todos (de 5)	Todos (de 5)

estacionaria (MCA 6) no desarrolla ningún intercambio ciclónico en este sector del hemisferio.

GCA IV. Longitudinales del sur (MCA 3, 4, y 10): se distingue por la presencia de intercambios ciclónicos y la ausencia de bloqueos anticiclónicos en todos los subtipos MEC para el sector América. El macroproceso latitudinal del oeste y longitudinal del sur (MCA 4) presenta el valor máximo secundario de ocurrencia (17.3%), está compuesto por 11 subtipos MEC y todos poseen intercambios ciclónicos sobre el sector América, con predominio del 9a; el longitudinal del sur (MCA 3) desarrolla tres intercambios, pero posee el valor mínimo de ocurrencia con 4.3%; sin embargo, el longitudinal del sur con intercambios en posición estacionaria (MCA 10) está integrado solo por un subtipo (13s) que alcanza un alto valor de ocurrencia en verano (14.9%).

Los grupos de circulación formados (GCA: I, III, IV) contienen el total de las contribuciones regionales de los MEC en el sector América, las

que se manifiestan en diversas formas y regiones mediante bloqueos anticiclónicos e intercambios ciclónicos según el grupo al que pertenecen.

Por otra parte, la clasificación de los tipos de situaciones sinópticas (TSS) fue organizada taxonómicamente por [Lapinel \(1988\)](#) en cuatro grupos básicos, ocho tipos y 19 subtipos. Los grupos de TSS están dados por los procesos sinópticos principales: anticiclónicos, frontales, ciclónicos y débiles gradientes de presión.

Los mapas ([Fig. 5](#)) contienen los ocho patrones isobáricos de superficie representativos de los tipos de situaciones sinópticas que influyen sobre Cuba. Sin embargo, cada tipo está compuesto por uno o más subtipos. El TSS I contiene dos subtipos (1 y 2), el II tiene dos (3 y 4), el III uno (5), el IV uno (6), el V dos (7 y 8), el VI cuatro (9, 10, 11 y 12), el VII cuatro (13, 14, 15 y 16) y el VIII tres (17, 18 y 19).

Los tipos I, II y VIII pertenecen al grupo anticiclónico, de ellos el TSS I es anticiclón

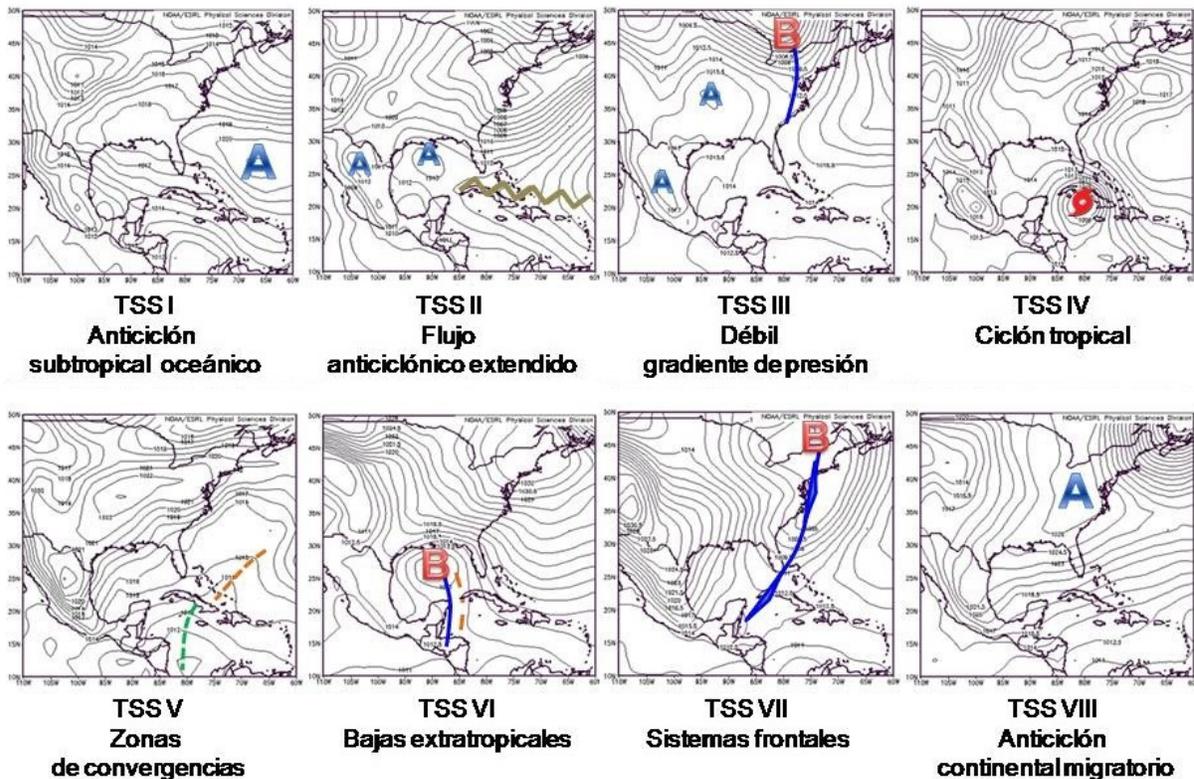


Figura 5. Tipos de situaciones sinópticas que influyen sobre Cuba [Lapinel \(1988\)](#)

subtropical oceánico y el TSS II es flujo anticiclónico extendido, mientras que, el TSS VIII es anticiclón continental migratorio.

Los procesos frontales: clásicos, revesinos, casi-estacionarios y en disipación están contenidos en el TSS VII, mientras que, las zonas de convergencia, ondas tropicales y hondonadas del oeste se agrupan en el TSS V.

El grupo ciclónico está formado por el TSS IV con los ciclones tropicales (bajas, depresiones, tormentas, huracanes) y el TSS VI con las bajas extratropicales (en su sector cálido y sector frío, con pre-frontal y sin prefrontal).

Las situaciones de débiles gradientes de presión pertenecen al TSS III.

Un informe sobre la climatología de los tipos de situaciones sinópticas influyentes sobre la mitad occidental de Cuba durante el mismo periodo de estudio fue publicado [Lecha et al. \(2020\)](#).

Relación entre los GCA y los TSS de la mitad occidental de Cuba

Para determinar si las variables GCA y TSS se encuentran relacionadas estadísticamente se construyó una tabla de contingencia, que se obtuvo al contrastar los casos de las series de las dos variables nominales. La prueba de independencia estadística entre los GCA y TSS acompañada de su medida de significación arrojó una probabilidad de rechazo de la hipótesis nula menor a 0.05; lo que demostró la incompatibilidad de los datos con la hipótesis de independencia, por tanto, se puede afirmar que las variables estudiadas están relacionadas.

Para que el contraste de hipótesis sea estadísticamente válido ([Castañeda et al., 2010](#)), la tabla de contingencia obtenida cumplió las condiciones siguientes: las frecuencias esperadas menores que cinco no superan el 20% y ninguna celda tiene una frecuencia esperada menor que uno.

Las frecuencias observadas marginales indicaron la prevalencia del GCA III longitudinal del norte con 42.8%, seguido por el GCA IV longitudinal del sur con 36.5% y el GCA I latitudinal del oeste con 20.7%.

El análisis de las frecuencias mensuales de las relaciones, entre los grupos de circulaciones atmosféricas en el sector América y las situaciones sinópticas que influyen sobre la mitad occidental de Cuba, permitió construir la marcha anual de las relaciones GCA-TSS ([Fig. 6](#)), donde el color indica la circulación predominante, los números romanos el TSS con el grado de predominio en el mes correspondiente, la línea discontinua los cambios del TSS y la línea continua (gruesa) define las cuatro estaciones del año.

Se establecieron 14 relaciones GCA-TSS que suman 72 casos en el año, con valor de frecuencia igual o mayor a 5% en su mes de ocurrencia, lo que permitió la definición de los periodos y frecuencias de ocurrencia de las relaciones.

Los meses de mayo y septiembre son los de mayor número de relaciones predominantes con siete y ocho grados de predominio $\geq 5\%$ respectivamente, mientras, que junio, julio y octubre con solo cinco grados son los de menor cantidad.

La relación más frecuente es la longitudinal del norte con el flujo anticiclónico extendido (GCA III-TSS II), que ocurre en 11 meses del año, excepto en julio, alcanzando su máxima frecuencia en mayo (17.8%), único mes en que logra el primer grado de predominio, mientras, la menos frecuente es la longitudinal del norte con débiles gradientes de presión (GCA III-TSS III) que solo aparece en septiembre (6.1%) en sexto grado. Aunque, debe señalarse que las situaciones sinópticas ciclónicas TSS IV (ciclón tropical) y TSS VI (bajas extratropicales) están ausentes en las relaciones GCA-TSS, por no alcanzar el umbral de frecuencias establecido en ningún mes del año.

En la marcha anual de las relaciones GCA-TSS se definieron dos estaciones de gran estabilidad en la frecuencia de ocurrencia de los procesos atmosféricos y dos periodos de transición entre ellas.

Un extenso periodo de octubre a abril, con un trimestre invernal en su seno, dominado por la relación longitudinal del norte con anticiclón continental migratorio (GCA III-TSS VIII) que

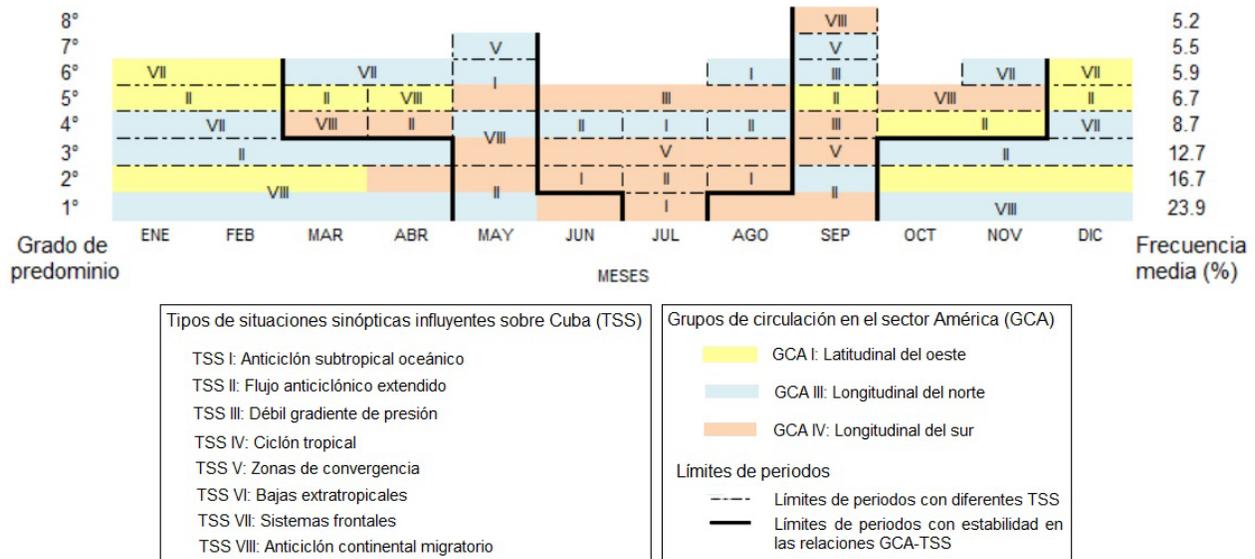


Figura 6. Marcha anual de las relaciones GCA-TSS en el periodo 1971-2017

alcanza su máxima frecuencia en diciembre (29.0%).

Dentro de ese periodo la estación del invierno queda definida como el trimestre diciembre-febrero, donde se repiten en idéntico orden de predominio las seis relaciones que caracterizan este periodo: la circulación longitudinal del norte con la influencia del anticiclón migratorio (GCA III-TSS VIII) predomina en primer grado, seguido por la circulación latitudinal del oeste con la influencia del anticiclón migratorio (GCA I-TSS VIII) en segundo, la longitudinal del norte con el flujo anticiclónico extendido (GCA III-TSS II) en tercero, la longitudinal del norte con el sistema frontal (GCA III-TSS VII) en cuarto, la latitudinal del oeste con el flujo anticiclónico extendido (GCA I-TSS II) en quinto y la latitudinal del oeste con el sistema frontal (GCA I-TSS VII) en sexto.

Lo anterior corrobora el resultado obtenido por Sardiñas et al. (1990) al estudiar la influencia de la circulación atmosférica invernal en el estado del tiempo en Cuba, y el de Planos et al. (2013) que lo define como un periodo con significativa frecuencia de eventos frontales, masas de aire frío y otros eventos de latitudes más altas que incrementan el contraste estacional.

La estación del verano, marcada por la relación longitudinal del sur con anticiclón subtropical

oceánico (GCA IV-TSS I), que en julio alcanza la frecuencia máxima mensual (31.5%) del total de los casos observados, relación que se extiende hacia junio y agosto en segundo grado de predominio.

Durante el trimestre junio-agosto predomina la circulación longitudinal del sur del primer al quinto grado, excepto en el cuarto, relacionándose con: el flujo anticiclónico extendido (GCA IV-TSS II), el anticiclón subtropical oceánico (GCA IV-TSS I), la zona de convergencia (GCA IV-TSS V) y el débil gradiente de presión (GCA IV-TSS III). En el cuarto y sexto grado aparece la circulación longitudinal del norte con el flujo anticiclónico extendido (GCA III-TSS II) y el anticiclón subtropical oceánico (GCA III-TSS I).

Debe aclararse que, no obstante, el valor máximo alcanzado en julio por la relación (GCA IV-TSS I) y su presencia en junio y agosto en el segundo grado de predominio, en el trimestre la relación de mayor frecuencia acumulada es la circulación longitudinal del sur con el flujo anticiclónico extendido (GCA IV-TSS II).

También, fue posible definir dos periodos de transición entre el verano y el invierno, en los cuales se producen los cambios de las circulaciones predominantes y aumenta la variabilidad de las situaciones sinópticas asociadas, que fueron

reconocidos por [Planos et al. \(2013\)](#) como periodos con procesos de interacción entre sistemas meteorológicos tropicales y de latitudes medias fuera de la estación invernal.

En ellos predomina la situación sinóptica flujo anticiclónico extendido (TSS II), que se relaciona con los cambios de circulaciones longitudinales de norte a sur y viceversa, según sea la transición, de primavera u otoño respectivamente.

La transición invierno-verano (primavera) aparece gradualmente extendida de marzo hasta junio, con los mayores cambios en mayo, periodo ya establecido por [Sardiñas et al. \(1990\)](#) en su estudio sobre las características de la influencia invernal en Cuba.

La transición verano-invierno (otoño) se inicia en agosto y culmina en noviembre, aunque, se concentra en septiembre, que es el mes del año con mayor variabilidad de relaciones GCA-TSS predominantes (8) sobre la mitad occidental de Cuba.

Relaciones como longitudinal del sur con anticiclón continental migratorio (GCA IV-TSS VIII), latitudinal del oeste con flujo anticiclónico extendido (GCA I-TSS II) y longitudinal del norte con sistemas frontales (GCA III-TSS VII) aparecen con baja frecuencia de ocurrencia tanto en octubre-noviembre como en marzo-abril, bimestres anterior y posterior a la estación de invierno (diciembre-febrero) respectivamente.

La influencia de los procesos de la circulación atmosférica en la formación del clima de la mitad occidental de Cuba está demostrada en la marcha anual de las relaciones predominantes GCA-TSS, lo que permite argumentar la existencia de cuatro estaciones climáticas en esta parte del país, las que deben ser incluidas en la descripción de las principales características del clima cubano.

El conocimiento de estas relaciones predominantes permite estudiar la génesis de los estados del tiempo diario asociados a cada TSS en localidades específicas de esta parte de Cuba, según las estaciones del año. También, determinar la influencia de estos estados del tiempo en diferentes ramas de la sociedad y la economía, que son susceptibles a las variaciones del tiempo y el

clima, entre las que consideramos relevantes: la salud humana y el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía.

Tendencias de los TSS para los GCA predominantes

Para calcular las tendencias de los TSS se estratificaron los datos en dos series, según su relación con el GCA III (longitudinal del norte) o el GCA IV (longitudinal del sur) del sector América durante el periodo de estudio.

Se encontró que los casos de TSS relacionados con la circulación longitudinal del norte, independientemente de la estación del año donde predomine, poseen una tendencia al incremento de sus frecuencias de ocurrencia en el periodo de estudio, logrando las mayores pendientes el TSS VII (sistema frontal) y el TSS III (débil gradiente de presión). Esto se asocia específicamente al incremento en los días clasificados como frentes fríos casi-estacionarios y de los días con situaciones de débil gradiente, que han tenido un aumento en su frecuencia de ocurrencia.

Por el contrario, los casos de TSS relacionados con el GCA IV (longitudinal del sur) presentaron una tendencia a la disminución de sus frecuencias de ocurrencia, siendo el de mayor pendiente negativa el TSS IV (ciclón tropical). Esto demuestra que el incremento en la frecuencia de las situaciones ciclónicas tropicales ha estado relacionado con las circulaciones longitudinales del norte.

Variabilidad multianual de los MCA y los STSS

La variabilidad multianual de las circulaciones atmosféricas en América y las situaciones sinópticas influyentes sobre la mitad occidental de Cuba también fue analizada en el periodo 1971-2017. Para lo que se emplearon las categorías básicas de la clasificación diaria: los MCA cuyas características fueron discutidas en el epígrafe uno y los subtipos de situaciones sinópticas (STSS) relacionados en el epígrafe dos, que fueron estudiados por [Lecha et al. \(2020\)](#).

Teniendo en cuenta la definición de época de circulación, como un periodo con anomalías positivas o negativas de la circulación zonal respecto a su valor medio a muy largo plazo, se reconocen tres épocas de circulación ([Kononova, 2016](#)), dos anteriores al periodo de estudio y la actual que inició en 1970 y puede dividirse en tres periodos, a los que puede ser asociada la variabilidad presentada por los MCA y los STSS entre 1971 y 2017:

Primer periodo (1971-1986): caracterizado por la alta frecuencia del macroproceso latitudinal del oeste y longitudinal del sur (MCA 4) que pertenece al GCA IV, exceptuando los años 1972 y 1974 (MCA 2) y 1977 (MCA 9). En este periodo la circulación zonal predominó en el sector América y sobre la mitad occidental de Cuba fueron más frecuentes los subtipos de situaciones sinópticas siguientes: flujo anticiclónico extendido (3), ondas tropicales (7), frentes fríos clásicos (13), revesinos (14) y en disipación (16), vaguadas del oeste (8) y bajas extratropicales con y sin líneas prefrontales (11 y 12); siendo un periodo dominado por procesos que provocaron bajas temperaturas durante la estación invernal y la generación de precipitaciones.

Un resultado similar fue obtenido por [Fernández et al. \(2005\)](#) para el bimestre mayo-junio del periodo 1956-1977, donde los patrones de circulación se caracterizaron por la inestabilidad atmosférica.

Segundo periodo (1987-2000): predominio del macroproceso longitudinal del sur con intercambios en posición estacionaria (MCA 10) que pertenece al GCA IV, excepto en 1993 y 1997 (MCA 5), 1995 (MCA 9) y 1998 (MCA 4), lo que produjo un rápido aumento de los intercambios meridionales del sur, que caracteriza a los procesos ciclónicos que se mueven desde bajas latitudes hacia latitudes medias y altas. En la mitad occidental de Cuba un solo STSS fue predominante, la influencia del anticiclón subtropical oceánico (1), que es característico de un tiempo muy cálido, por lo que provocó un incremento sostenido de la temperatura media del aire.

Este comportamiento corrobora el resultado obtenido por [Fernández et al. \(2005\)](#) para el bimestre mayo-junio del periodo 1978-1999, que observó un incremento de la influencia anticiclónica y de la estabilidad en las circulaciones, utilizando otra técnica de tipificación sinóptica-climatológica, la clasificación de procesos sinópticos objetivos (PSO).

Tercer periodo (2001-2017): se ha impuesto el macroproceso longitudinal del norte y longitudinal del sur, en zonas adyacentes, no concurrentes (MCA 9) que pertenece al GCA III, excepto en los años 2005 (MCA 4), 2008 (MCA 2) y 2014 (MCA 4), lo que provocó un aumento en la frecuencia anual de los procesos de bloqueo anticiclónicos. En concordancia sobre la mitad occidental de Cuba fueron predominantes el anticiclón continental migratorio en sus diferentes estados de transformación (17, 18 y 19), los frentes fríos casi-estacionarios (15), las bajas extratropicales en su sector cálido y frío (9 y 10), la influencia del anticiclón subtropical oceánico con flujo del segundo cuadrante y perturbado (2 y 4), los ciclones tropicales (6) y las situaciones de débil gradiente de presión (5).

La observación de un incremento de las situaciones contrastantes en zonas adyacentes no concurrentes, que relacionan las circulaciones meridionales del norte con situaciones sinópticas tropicales y extratropicales, puede estar asociado a la génesis de las condiciones meteorológicas que han provocado situaciones de desastres, como las descritas por [Kotlyakov et al. \(2008\)](#) y [Soler et al. \(2017\)](#).

CONCLUSIONES

Las circulaciones atmosféricas en el sector América presentan una estacionalidad definida y actúan como uno de los principales procesos formadores del clima de Cuba, que está determinado por la existencia de macroprocesos de circulación distintos que predominan en las diferentes estaciones del año. Esta influencia de los procesos de la circulación atmosférica y su relación con los tipos de situaciones sinópticas permite

argumentar la existencia de cuatro estaciones climáticas en la mitad occidental de Cuba, las que deben ser incluidas en la descripción de las principales características del clima cubano.

Los grupos de circulación formados en el sector América contienen el total de las contribuciones regionales de los MEC. Conocer sus relaciones estadísticas predominantes con los tipos de situaciones sinópticas influyentes sobre la mitad occidental de Cuba, permite estudiar la génesis de los estados del tiempo diario asociados a cada TSS en localidades específicas de esta parte del país, así como, determinar la influencia de estos estados del tiempo en diferentes ramas de la sociedad y la economía, que son susceptibles a las variaciones del tiempo y el clima.

En la marcha anual de las relaciones GCA-TSS se establecen dos estaciones de gran estabilidad en la frecuencia de ocurrencia de los procesos atmosféricos: un extenso periodo de octubre a abril, con un trimestre invernal (diciembre-febrero) en su seno, dominado por la relación GCA III-TSS VIII y la estación del verano (junio-agosto) marcada por la relación GCA IV-TSS I. También, dos periodos de transición entre el verano y el invierno, uno en la primavera (marzo-junio) con mayo como mes principal y otro en el otoño (agosto-noviembre) centrado en septiembre; en ellos se alcanza la mayor variabilidad en las circulaciones y situaciones sinópticas asociadas, aunque, en ambos periodos predomina la relación GCA IV-TSS II.

Las tendencias calculadas indican que los casos de TSS relacionados con la circulación longitudinal del norte, independientemente de su estación de predominio en el año, tienden a incrementar sus frecuencias; mientras, los casos de TSS relacionados con la circulación longitudinal del sur presentan una disminución de sus frecuencias de ocurrencia. Por lo que se demuestra que el incremento en la frecuencia de las situaciones ciclónicas tropicales está relacionado con las circulaciones longitudinales del norte.

Dentro de la época actual de circulación se observa una variabilidad multianual de las circulaciones y las situaciones sinópticas que puede asociarse a los tres periodos contenidos en ella, en

los cuales predominan diferentes condiciones climáticas sobre la mitad occidental de Cuba, marcadas en un primer periodo (1971-1986) por el predominio del flujo anticiclónico extendido y situaciones sinópticas extratropicales, en un segundo (1987-2000) por la influencia predominante del anticiclón subtropical oceánico y en el tercero (2001-2017) por la imposición de situaciones contrastantes en zonas adyacentes no concurrentes, que relacionan las circulaciones longitudinales del norte con sistemas extratropicales y tropicales.

REFERENCIAS

- Alisov, B. P. (1950): Zonas climáticas de los países extranjeros [en ruso]. Edit. Geografía, Moscú. 284 pp.
- Alisov, B.P. y B.V. Poltarau (1974): Climatología [en ruso]. Ed. Univ. Estatal de Moscú; 299 pp.
- Castañeda, María B., A. F. Cabrera, Y. Navarro, W. de Vries (2010): Procesamiento de datos y análisis estadísticos utilizando SPSS. Un libro práctico para investigadores y administradores educativos. [Digital] EDIPUCRS, Porto Alegre, Brasil. 165 pp.
- Dzardzeevskii, B.L. (1968): Los mecanismos de la circulación de la atmósfera en el hemisferio norte en el siglo XX [en ruso]. Resultados de Investigaciones durante el Año Geofísico Internacional. Circulación Atmosférica. Ed. Inst. Geog. AC de la URSS, Moscú.
- Fernández, A.J., S. Barcia, G. Orbe y Y. Díaz (2005): Patrones sinópticos de comienzos del periodo lluvioso y su nexa con la variabilidad climática en la segunda mitad del Siglo XX. *Rev. Cubana de Meteorología*, Vol. 12, No 2. La Habana, Cuba. 88-93 pp.
- Jáuregui, E. (2003): Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera. *Investigaciones Geográficas*, No 50, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México. 121-143 pp.
- Kononova, N.K. (2009): Clasificación de los Mecanismos Elementales de Circulación del hemisferio norte según el método de B.L.

- Dzerdzeevskii. Edit. Inst. Geog. AC de Rusia, Moscú. 372 pp. ISBN 978-5-89658-037-9.
- Kononova, N.K. (2010): Long-term fluctuations of the northern hemisphere atmospheric circulation according to Dzerdzeevskii classification. Institute of Geography, Russian Academy of Sciences. Geography Environment Sustainability, No 01. 25-43 pp.
- Kononova, N.K. (2016): Fluctuations of the Global Atmospheric Circulation in the XX-XXI Centuries. Journal of Earth Science and Climatic Change. doi:10.4172/2157-7617.1000350.
- Kotlyakov, V.M., D.S. Asoyan, N.K. Kononova, N.I. Osokin y O.V. Rototaeva (2008): Features catastrophic natural processes in the North Caucasus at the turn of the XXth - XXIth centuries. En: Change of the environment and climate: natural and related to its technological disasters (8th Ed.), Russian Academy of Sciences. 190-209 pp.
- Lapinel, B. (1988): La circulación atmosférica y las características espacio-temporales de las lluvias en Cuba. Tesis en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Geográficas. INSMET, La Habana; 147 pp.
- Lebedeva, M., A. Lupo, Y. Chendev, O. Krimskaya y A. Solovyev (2019): Los cambios en las condiciones de las circulaciones atmosféricas y las características regionales del clima en dos localidades remotas durante el siglo XX. *Rev. Atmosfere*; Disponible en Internet: <http://www.mdpi.com/journal/atmosphere> doi:10.3390/atmos10010011. 23 pp.
- Lecha, L. y A. Llanes (1988): Características estacionales de la circulación atmosférica sobre Cuba. *Rev. Cubana de Meteorología*, Vol. 1, No 1. La Habana, Cuba. 49-56 pp.
- Lecha, L., L. Paz y B. Lapinel (1994): El Clima de Cuba. Edit. Academia, La Habana, Cuba. ISBN 958-02-006-0. 186 pp.
- Lecha, L. (2019): Pronósticos biometeorológicos (eBook). Ed. Citmatel, La Habana; 210 pp. ISBN 978-959-237-752-3.
- Lecha, L., L. Sánchez, Y. Verdecia, E. Soler y A. Sánchez (2020): Variabilidad de los tipos de situaciones sinópticas influyentes sobre el occidente de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 26, No 2, 1-18 pp. ISSN: 2664-0880.
- Planos, E., R. Vega y A. Guevara. Editores (2013): Impacto del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba. Instituto de Meteorología. Agencia de Medio Ambiente. Ministerio de Ciencias. Tecnología y Medio Ambiente. La Habana. Cuba. 430 pp.
- Sábina, S.S. y L.V. Khmelevskaya (1984): La Circulación de la Atmósfera. Dinámica de los procesos de la circulación atmosférica durante el siglo XX [en ruso]. En: Materiales de las Investigaciones Meteorológicas, 9. Ed. Comité Geofísico de la URSS e Inst. Geog. de la AC de la URSS, Moscú; 116 pp.
- Sardiñas, M., M. Nieves, L. Lecha y V. Morozov (1990): Características de la circulación atmosférica invernal influyente en los estados del tiempo. *Rev. Cubana de Meteorología*, Vol. 3, No 1. La Habana, Cuba. 77-86 pp.
- Soler, E., R. Pérez, R. Borrego y D. Pérez (2017): Huracanes que afectaron a la Isla de la Juventud. Cronología desde 1791 a 2015. *Rev. Cubana de Meteorología*, Vol. 23, No.2. 164-177 pp. ISSN: 0864-151X.
- Vitvitzkii, G.N. (1986): Influencias de la circulación atmosférica en la variabilidad del clima de la URSS en el período reciente [en ruso]. *Rev. Invest. AC de la URSS, Serie Geográfica*, 5; 5-20 pp.