

Comportamiento de los procesos regionales de la circulación atmosférica que influyen sobre América del Norte desde finales del siglo XIX



<https://cu-id.com/2377/v31n2e02>

Behavior of regional atmospheric circulation processes that influence North America since the end of the 19th century

Edgardo Soler Torres^{1*}, Luis B. Lecha Estela¹, Pedro Roura Pérez²

¹Centro Meteorológico de la Isla de la Juventud, INSMET, Cuba.

²Centro Nacional del Clima, INSMET, Cuba.

RESUMEN: Se establecen las características fundamentales de los grupos de circulación atmosférica en el sector hemisférico de América del Norte, definidos a partir de los Mecanismos Elementales de Circulación de la clasificación creada por B.L. Dzerdzeevskii y colaboradores, para el periodo desde 1899 a 2019 (121 años). El resultado contiene el análisis de los Macroprocesos Regionales de Circulación agrupados según los flujos latitudinales y longitudinales, su variabilidad multianual y estacional, describe el comportamiento del grupo de circulación más frecuente en el año, así como los cambios de flujos identificados durante el periodo de estudio, para finalmente establecer, mediante sus frecuencias medias anuales, los macroprocesos que son representativos de cada uno de los periodos establecidos. Se destaca la relevancia del grupo de circulaciones longitudinales del sur en el incremento del transporte de masa y energía hacia altas latitudes, desde la década de los años 80 del siglo XX; y del macroproceso regional 9, predominante dentro de las longitudinales del norte, en la ocurrencia de las invasiones Árticas repentinas y notables que afectan la región desde el comienzo del siglo XXI. Finalmente, se presentan las características fundamentales que definen las épocas de circulación, según los grupos estudiados para el sector hemisférico de América del Norte, que incluye el área geográfica de bajas latitudes donde se localiza Cuba, marcada por la oscilación estacional de la frontera entre la zona tropical y la extratropical.

Palabras claves: flujos zonales y meridionales, grupos de circulación, macroprocesos regionales de circulación, mecanismos elementales de circulación, tipos de situaciones sinópticas.

ABSTRACT: The fundamental characteristics of the atmospheric circulation groups in the hemispheric sector of North America are established from the Elementary Circulation Mechanisms of the classification created by B.L. Dzerdzeevskii and collaborators, for the period from 1899 to 2019 (121 years). The result contains the analysis of regional circulation macro processes, grouped according to latitudinal and longitudinal flows, their multiannual and seasonal variability, describes the behavior of the most frequent circulation group in the year, as well as the changes in flows identified during the study period; to finally establish, through their average annual frequencies, the macro processes that are representative for each one of the periods considered. The relevance of the group of southern longitudinal circulations in the increase in the transport of mass and energy towards high latitudes, since the 80s of the 20th century, is highlighted; as well as the regional macro process 9, predominant within the northern longitudinal, is relevant in the occurrence of sudden and notable Arctic invasions, that affect the region since the beginning of the 21st century. Finally, the fundamental characteristics that define the circulation eras are presented, according to the groups studied for the hemispheric sector of North America, which includes the low latitude geographic area where Cuba is located, marked by the seasonal oscillation of the border between the tropical and extra tropical zones.

Key words: zonal and meridional flows, circulation groups, regional circulation macroprocesses, elementary circulation mechanisms, types of synoptic situations.

*Autor para correspondencia: Edgardo Soler Torres. E-mail: edgardosoler2@gmail.com

Recibido: 22/11/2024

Aceptado: 12/04/2025

Conflicto de intereses: los autores del artículo declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores: Edgardo Soler Torres y Luis B. Lecha Estela: **han tenido una contribución equivalente en todos los aspectos relativos a la elaboración del artículo, teniendo a su cargo la concepción, redacción, organización del contenido, argumentación y revisión final del texto.** Pedro Roura Pérez: **realizó los análisis de tendencias de las series de frecuencias.**

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

La clasificación de los Mecanismos Elementales de Circulación (MEC) se fundamenta en la presencia o ausencia de procesos de bloqueos anticiclónicos e intercambios ciclónicos, su dirección y número en el hemisferio, así como, en las características de la circulación en el polo. En ella se determina el tipo de circulación dominante en las diferentes regiones geográficas del hemisferio, para lo cual se identifica la dirección principal del flujo de masa y energía en la troposfera baja, a partir de las componentes o dirección predominante del viento en superficie (Dzerdzeevskii, 1962).

Para estudiar las diferentes regiones geográficas se definen los Macroprocesos Regionales de Circulación (MRC) que influyen sobre cada uno de los sectores en que fue subdividido el hemisferio Norte: Pacífico (PAC), América (AME), Atlántico (ATL), Europa (EUR), Asia (ASI) y Lejano Oriente (LOR). Sus límites se establecen teniendo en cuenta las posiciones de los continentes y océanos que determinan el carácter estacional del desarrollo de la circulación atmosférica, según Dzerdzeevskii (1968, 1975).

Es en el sector América del Norte donde se alcanza el máximo de intercambios ciclónicos (24), con prevalencia en el grupo meridionales del norte (12). También, contiene 17 bloqueos anticiclónicos, de ellos 13 en el grupo meridionales del norte; después del sector Asia, que presenta el máximo con 22 bloqueos (Tabla 1).

Esta clasificación de la Climatología Sinóptica está siendo aplicada en diversas partes del mundo. Así lo demuestran los trabajos realizados por 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. Posteriormente, Kononova y Lupo (2020) examinaron las fluctuaciones a largo plazo de la circulación atmosférica global con las teleconexiones en el hemisferio Norte, incluido los procesos de bloqueos, y la temperatura de la superficie en el período 1899-2018.

En Cuba, es escasa la bibliografía sobre aplicaciones de los MEC, sin embargo, los resultados obtenidos por Celeiro (1999) permiten comparar la dinámica de la circulación atmosférica en el hemisferio norte con las anomalías térmicas en el occidente del país. Sus resultados reflejan un aumento

de la temperatura superior a 1,5 ° C desde finales del siglo XVIII (195 años), y demuestran que el clima cubano de los últimos 400 años era más frío y seco, modificándose desde mediados del siglo XIX con precipitaciones más variables y extremas.

Posteriormente, Soler *et al.*, (2020) estudian los MEC que se observan en el sector América del Norte y su relación con las situaciones sinópticas que influyen sobre la mitad occidental de Cuba desde 1971 a 2017. Se logra establecer que las circulaciones atmosféricas en América del Norte presentan una estacionalidad definida y actúan como uno de los principales procesos formadores del clima de Cuba. Además, resulta posible identificar la ocurrencia de un MEC predominante y distinto para cada época del año, lo cual ratifica la existencia de cuatro estaciones bien definidas en el clima de Cuba.

El objetivo del trabajo radica en la caracterización de las circulaciones atmosféricas predominantes que se observan en el sector América del Norte, incluyendo el análisis de sus comportamientos multianual y estacional, a partir de su ocurrencia en las distintas épocas del año. También, se conforman los grupos de circulación (GC) longitudinales y latitudinales que contienen los MRC, según (Barry y Carleton, 2001), presentando su variabilidad multianual y anual, los cambios ocurridos en el grupo de circulación más frecuente y las tendencias de sus series de frecuencias.

MATERIALES Y MÉTODOS

La fuente fundamental de información fue la clasificación de los Mecanismos Elementales de Circulación elaborada por Dzerdzeevskii, que en la actualidad abarca una serie de datos de 121 años (1899-2019) con información diaria. Esta clasificación está integrada por variables nominales, por lo que se aplicó el procedimiento estadístico Tabla de Contingencia (TabCont) para obtener las estratificaciones y grupos de categorías estudiadas (Hoel, 1972).

La designación de cada uno de los 41 MEC incluyó números y letras, el número indica el tipo y las letras las diferencias dentro de un tipo, lo que conformó los subtipos. Las letras a, b, c y d indican diferencias en la dirección (sectores) de las invasiones árticas o de las penetraciones de ciclones desde el sur, mientras,

Tabla 1. Distribución de bloqueos anticiclónicos e intercambios ciclónicos por sectores del hemisferio Norte, según Dzerdzeevskii (1968)

Grupos de Circulación	Tipos MEC	Bloqueos anticiclónicos						Intercambios ciclónicos					
		PAC	AME	ATL	EUR	ASI	LOR	PAC	AME	ATL	EUR	ASI	LOR
Zonal	1 y 2				0			0	4	0	3	2	4
Zonal perturbado	3 al 7	1	4	1	2	5	0	2	8	0	5	5	10
Meridional del norte	8 al 12	7	13	5	7	17	1	10	12	9	12	6	8
Meridional del sur	13				0			0	2	0	2	1	2

w y s (invierno y verano en inglés) representan las diferencias estacionales de los MEC, según el signo de los campos de presión atmosférica sobre los océanos y continentes. Sin embargo, en los tipos MEC 4, 9 y 10, según [Kononova \(2009\)](#), los subtipos 4a, 9b y 10a son de invierno y están designados por las letras iniciales del alfabeto.

Las fronteras del sector América del Norte son: 60°W y 120°W, y en él se desarrollan nueve (9) macroprocesos de circulación, que agrupan los 41 subtipos MEC, siendo el sector que más cantidad de macroprocesos tiene identificados. Los MRC y los subtipos MEC agrupados por cada uno, se organizaron de norte a sur; y según su descripción están representados con una graduación de colores fríos a cálidos respectivamente, con el amarillo asignado al rumbo oeste. El MRC 7 (en blanco) no reportó ningún subtipo MEC para el sector América del Norte por lo que se consideró vacío ([Tabla 2](#)).

En este análisis se aplicó una estructura taxonómica modificada de los GC respecto a los presentados por [Soler et al. \(2020\)](#), la cual agrupó los nueve MRC de este sector en tres grupos de circulación, a saber:

GC I. Latitudinales del oeste (MRC 1): su rasgo fundamental está marcado por la estacionalidad de los patrones dominantes y la ausencia de bloqueos anticiclónicos en este sector.

GC II. Latitudinales del este (MRC 7): no contiene ningún subtipo MEC en el sector América del Norte, por tanto, se consideró nulo o vacío.

GC III. Longitudinales del norte (MRC 2, 6, 8 y 9): se caracteriza por contener todos los subtipos MEC que desarrollan procesos de bloqueos anticiclónicos en el sector América del Norte.

GC IV. Longitudinales del sur (MRC 3, 4, 5 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 del Norte.

RESULTADOS

Los Macroprocesos Regionales de Circulación en América del Norte

En los análisis sinóptico-climatológicos resulta necesario establecer asociaciones graduales entre las escalas de referencia utilizadas, es decir, lograr el ajuste en la clasificación e interpretación de los procesos de la circulación general de la atmósfera (CGA), desde la escala global hasta el nivel de impacto o escala local. Un primer paso imprescindible es trabajar en la clasificación de los macroprocesos que actúan en la región sinóptico-natural a la que pertenece Cuba, que es la ocupada por América del Norte y el Caribe.

Los Mecanismos Elementales de Circulación hemisféricos actúan de forma uniforme y completa mediante los macroprocesos regionales de la circulación, que se identifican según sea la presencia y características climáticas de los bloqueos anticiclónicos e intercambios ciclónicos, así como dependiendo de su ubicación geográfica en el hemisferio Norte ([Kononova, 2010](#)).

Los MRC están conformados por uno o varios subtipos MEC y pueden contener circulaciones diferentes en las distintas partes de un mismo sector ([Dzerdzevskii, 1968](#)). Es decir, dentro de un MRC zonal, podemos encontrar movimiento de ciclones en áreas del norte, mientras, los anticiclones se mueven o estacionan al sur del sector, así como en un MRC meridional, las invasiones árticas en el borde occidental son acompañadas por penetraciones ciclónicas del sur en su parte oriental.

La marcha multianual

La marcha multianual de las frecuencias absolutas de cada uno de los macroprocesos que influyen sobre América del Norte se muestra en la [Fig. 1](#). Un cambio notable en las curvas se observa a partir de la década de los años 70 del siglo XX, cuando disminuyen de forma apreciable las frecuencias anuales de

Tabla 2. Macroprocesos regionales de circulación (MRC) y subtipos MEC agrupados

MRC	Descripción de MRC del sector América del Norte	Subtipos MEC agrupados en los MRC del sector América del Norte
2	Meridional del norte	7aw, 7bw, 10a, 11a, 12cw, 12d
6	Meridional del norte con intercambios en posición estacionaria	9b, 11b, 11c
8	Meridional del norte y zonal del oeste (NW)	7as, 12bs, 12cs
9	Meridional del norte y meridional del sur, en zonas adyacentes, no concurrentes	7bs, 8a, 11d, 12a, 12bw
7	Meridional del norte y zonal del este (NE)	-
1	Zonal del oeste	1a, 4a, 5a, 5b, 8bw, 8cs, 8cw, 8dw
5	Zonal del oeste con intercambios en posición estacionaria	13w
4	Zonal del oeste y meridional del sur (SW)	2a, 2b, 2c, 3, 4b, 4c, 5c, 5d, 6, 8bs, 9a
10	Meridional del sur con intercambios en posición estacionaria	13s
3	Meridional del sur	1b, 8ds, 10b

los macroprocesos más representativos del flujo meridional del norte (2, 6 y 8); mientras, comienza un rápido crecimiento en las frecuencias de los macroprocesos que imponen los flujos meridionales del sur (4, 5 y 10) que se hacen dominantes en los años 80, exceptuando el MRC 3. Posteriormente, ya en la segunda década del siglo XXI, se hace más frecuente el MRC meridionales del norte y del sur, en zonas adyacentes no concurrentes (9).

Los MRC 5 y 10 contienen solo los subtipos MEC 13w y 13s (ambos meridionales del sur), respectivamente. Estos macroprocesos son los únicos con valores de frecuencias anuales igual a cero en 24 y 32 ocasiones, ocurridas durante los primeros 30 y 47 años de la mitad inicial del periodo de estudio. De los restantes MRC solo el 3 y el 8 suman dos casos con cero y el MRC 6 un caso. Este comportamiento evidencia la importancia de las circulaciones meridionales del sur en los cambios experimentados en América del Norte durante los últimos 121 años.

La marcha anual

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 permite establecer patrones de la circulación

atmosférica y expresar su secuencia de ocurrencia en las diferentes estaciones del año.

La marcha anual de los MRC de América del Norte se muestra en la Fig. 2. Como se observa, los meses del verano resultan dominados por los flujos meridionales del sur (MRC 3, 4 y 10), siendo el MRC 4 el de máxima frecuencia en los meses de mayo a septiembre. El período invernal queda caracterizado por el predominio de los MRC 2 y 9, aunque, existe un mayor equilibrio con otros MRC como el flujo zonal del oeste (1) y el meridional del norte con intercambios en posición estacionaria (6), especialmente en el bimestre enero-febrero. En los periodos de transición estacional se aprecian dos estructuras diferentes: el predominio del flujo meridional del norte combinado con el flujo zonal del oeste (8) y de los flujos meridionales del norte y del sur, en zonas adyacentes no concurrentes (9).

Estructura de los grupos de circulación en América del Norte

A partir del método de formación de los grupos de circulación (GC) empleado para el sector América del Norte por Soler *et al.* (2020), se hizo ahora una modificación del contenido de los grupos: los casos del MRC 5 se extrajeron del GC I y se incorporaron al GC IV, para después recalcular las frecuencias absolutas del periodo extendido 1899-2019, que contienen los nueve MRC en este sector.

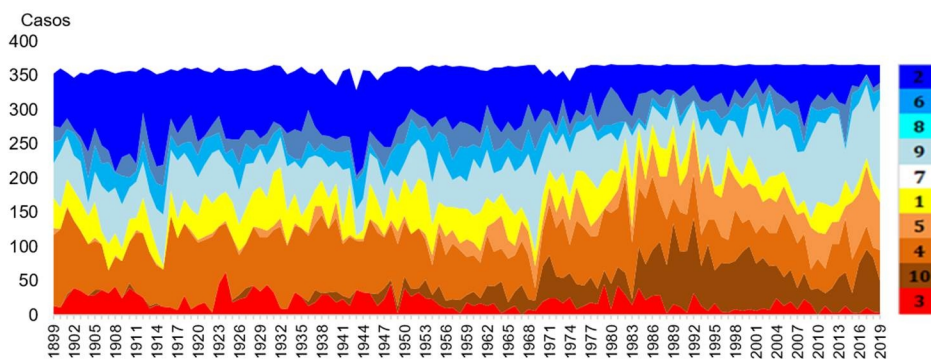


Figura 1. Frecuencias absolutas anuales (apiladas) de los MRC en América del Norte. Durante los años 1899-2019

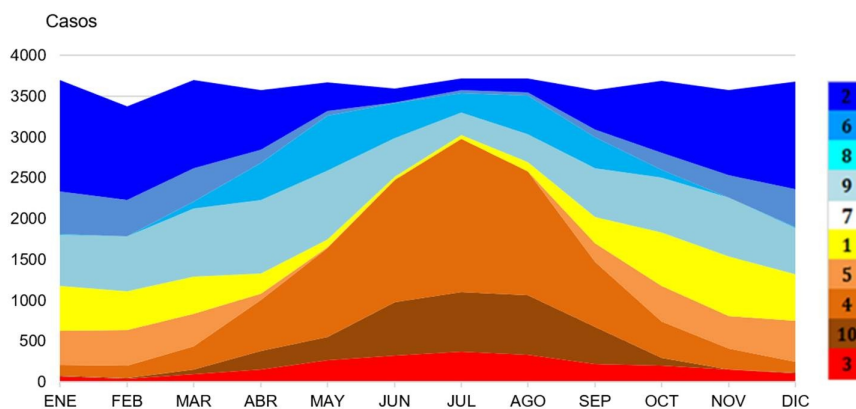


Figura 2. Frecuencias mensuales absolutas (apiladas) de los MRC en América del Norte

Este enfoque modificado permitió establecer con mayor claridad que los MRC con componente zonal del oeste y meridional del sur, están compuestos por los MEC con ausencia de bloqueos anticiclónicos (Tabla 3) y alcanzan un máximo de la frecuencia acumulada del 49.6 % de los casos.

Por su parte, los MRC de componente meridional del norte, que contienen los subtipos MEC con presencia de bloqueos anticiclónicos, ocurren en el otro 50.4 % (Tabla 4), quedando conformados los grupos de circulaciones atmosféricas (GC) para el sector América del Norte que se describen a continuación:

GC I. Latitudinales del oeste (MRC 1): su rasgo fundamental está marcado por la estacionalidad de los patrones dominantes y la ausencia de bloqueos anticiclónicos en este sector. Está compuesto por ocho subtipos que ocurren mayoritariamente en la temporada poco lluviosa del año con una frecuencia de 9.8 %, de ellos solo dos (8cw y 8cs) poseen intercambios ciclónicos en el sector América del Norte.

GC II. Latitudinal del este (MRC 7): no contiene ningún subtipo MEC en el sector América del Norte y se considera nulo o vacío.

GC III. Longitudinales del norte (MRC 2, 6, 8 y 9): se caracteriza por contener todos los subtipos MEC que desarrollan procesos de bloqueos anticiclónicos en el sector América del Norte. El macroproceso meridional del norte y meridional del sur, en zonas adyacentes, no concurrentes (MRC 9) es el único que alcanza la cantidad total de bloqueos e intercambios posibles, presentando un alto valor de frecuencia con 17.3 %, posee como subtipo predominante al 12a; el meridional del norte (MRC 2) presenta el valor máximos de frecuencia de ocurrencia con 20.3 %, está integrado por seis subtipos MEC y

solo uno posee intercambios ciclónicos (12cw); el meridional del norte y zonal del oeste (MRC 8) con el 6.5 % posee dos subtipos con intercambios ciclónicos (7as y 12bs); y solo el meridional del norte con intercambios en posición estacionaria (MRC 6), que alcanza el 6.3 % no desarrolla ningún intercambio ciclónico en este sector del hemisferio norte.

GC IV. Longitudinales del sur (MRC 3, 4, 5 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 del Norte. El macroproceso zonal del oeste y meridional del sur (MRC 4) presenta el valor máximo secundario de ocurrencia (20.1 %), está compuesto por 11 subtipos MEC y todos poseen intercambios ciclónicos sobre el sector; mientras, el meridional del sur con intercambios en posición estacionaria (MRC 10) está integrado solo por un subtipo (13s) y alcanza un valor de ocurrencia de 7.5 % en verano; el zonal del oeste con intercambios en posición estacionaria (MRC 5) solo tiene el subtipo 13w, es de invierno y alcanza un 6.7 %; y el meridional del sur (MRC 3) desarrolla tres intercambios, pero posee el valor mínimo de ocurrencia con 5.4 %.

Como resultado del cambio realizado al contenido de los GC, se ha considerado que el MRC 4 compuesto por 11 subtipos MEC que establecen las corrientes atmosféricas del suroeste y el MRC 5 con un MEC único (13w), que impone vientos de región sur durante la temporada poco lluviosa del año, sean agrupados como longitudinales del sur conjuntamente con los MRC 3 y 10; quedando de esta forma el GC I integrado solo por el MRC 1, compuesto por ocho subtipos MEC, de los cuales ninguno presenta bloqueos anticiclónicos y solo dos poseen zonas de intercambios ciclónicos sobre el sector América del Norte.

Tabla 3. Grupos de circulaciones atmosféricas formados por MRC con subtipos MEC que tienen ausencia de bloqueos anticiclónicos en el sector América del Norte

Grupo de Circulación América "GC"	No MRC	Macroproceso Regional de Circulación (MRC)	Frecuencia relativa de ocurrencia (%)	Subtipos MEC que agrupa cada MRC	MEC con bloqueos anticiclónicos sobre América del Norte	MEC con intercambios ciclónicos sobre América del Norte
I	1	Zonal del oeste	9.8	1a, 4a, 5a, 5b, 8bw, 8cw, 8cs, 8dw	Ninguno	8cw y 8cs
IV	3	Meridional del sur	5.4	1b, 8ds, 10b		Todos
	4	Zonal del oeste y meridional del sur	20.1	2a, 2b, 2c, 3, 4b, 4c, 5c, 5d, 6, 8bs, 9a		
	5	Zonal del oeste con intercambios en posición estacionaria	6.7	13w		
	10	Meridional del sur con intercambios en posición estacionaria	7.5	13s		

Tabla 4. Grupo de circulaciones atmosféricas formado por MRC con subtipos MEC que tienen presencia de bloqueos anticiclónicos en el sector América del Norte

Grupo de Circulación América "GC"	No MRC	Macroproceso Regional de Circulación (MRC)	Frecuencia relativa de ocurrencia (%)	Subtipos MEC que agrupa cada MRC	MEC con bloqueos anticiclónicos sobre América del Norte	MEC con intercambios ciclónicos sobre América del Norte
III	2	Meridional del norte	6.3	9b, 11b, 11c	Todos	Ninguno
	6	Meridional del norte con intercambios en posición estacionaria	20.3	7aw, 7bw, 10a, 11a, 12cw, 12d		12cw
	8	Meridional del norte y zonal del oeste	6.5	7as, 12bs, 12cs		7as y 12bs
	9	Meridional del norte y meridional del sur, en zonas adyacentes, no concurrentes	17.3	7bs, 8a, 11d, 12a, 12bw		Todos

Esta nueva agrupación de los GC I y IV cumple con las condiciones impuestas a las características principales de los MEC y mantiene invariante al GC III respecto a la base de datos original (BD, 2019) y los resultados de Soler *et al.* (2020). Además, se corresponde con los procesos físicos asociados a las direcciones de los flujos de circulación atmosférica, con correlaciones estadísticamente significativas con las anomalías de la temperatura media global, al nivel de confianza de 99 % (Tabla 5), resultado que no se consiguió con la agrupación anterior.

Aunque estas correlaciones no demuestran causalidad, permiten establecer el grado de similitud en la relación existente entre los comportamientos de los procesos formadores del clima, representados en las anomalías de las frecuencias anuales de cada uno de los grupos de circulación y las anomalías de la temperatura media global (GISS, 2023), como expresión del forzamiento externo que representa el calentamiento global sobre el sistema climático.

También, se fundamenta en la relación existente entre los MRC, que componen cada GC, y los tipos de situaciones sinópticas (Lapinel, 1988) que influyen sobre el área geográfica de bajas latitudes que incluye a Cuba; siendo el MRC 1, macroproceso zonal del oeste que conforma el GC I latitudinales del oeste, el que presenta la mayor estabilidad (mínimas anomalías de frecuencias) en sus relaciones con los TSS tropicales y extratropicales para ambas mitades de Cuba, diferenciándose así su comportamiento del resto de los MRC que conforman los grupos longitudinales: GC III (MRC: 2, 6, 8 y 9) del norte y GC IV (MRC: 5, 4 10 y 3) del sur (Fig. 3).

Estos grupos de circulación obtenidos (GC: I, III, IV), contienen el total de las contribuciones regionales de los MEC en el sector América del Norte entre 1970-2019, las que se manifiestan en las distintas estaciones del año y subregiones, mediante bloqueos anticiclónicos e intercambios ciclónicos, y están relacionados de forma particular a los tipos de situaciones sinópticas tropicales y extratropicales que influyen sobre las mitades occidental y oriental de Cuba.

De esta forma fue posible establecer las principales características climáticas de los Grupos de Circulación (GC), que contienen los macroprocesos regionales de circulación (MRC) influyentes sobre la región sinóptico natural de América del Norte, que incluye el área geográfica de bajas latitudes donde se localiza Cuba, marcada por la oscilación estacional de la frontera entre la zona tropical y la extratropical, descritas en los próximos epígrafes. También, se pueden identificar los procesos de la CGA que determinan la variabilidad multianual y estacional del clima cubano, así como, la forma en que han venido cambiando dichos procesos en los últimos 121 años de historia climática regional.

Características de las circulaciones atmosféricas en América del Norte

Las frecuencias anuales absolutas de los grupos de circulación en el sector América del Norte (Fig. 4) muestran que los flujos longitudinales del norte predominan durante un largo periodo de 72 años, con solo dos interrupciones, dominadas por las

Tabla 5. Correlaciones entre las anomalías de los grupos de circulación en América del Norte y las anomalías de la temperatura media global (1899-2019)

Coeficiente de correlación	(BD, 2019)		(Soler <i>et al.</i> , 2020)		Grupos modificados		Grupo invariante
	GC I	GC IV	GC I	GC IV	GC I	GC IV	GC III
Coeficiente de correlación Rho de Spearman	0.034	,599**	,598**	0.176	-,376**	,606**	-,418**
Significación estadística (bilateral)	0.715	0.000	0.000	0.053	0.000	0.000	0.000

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

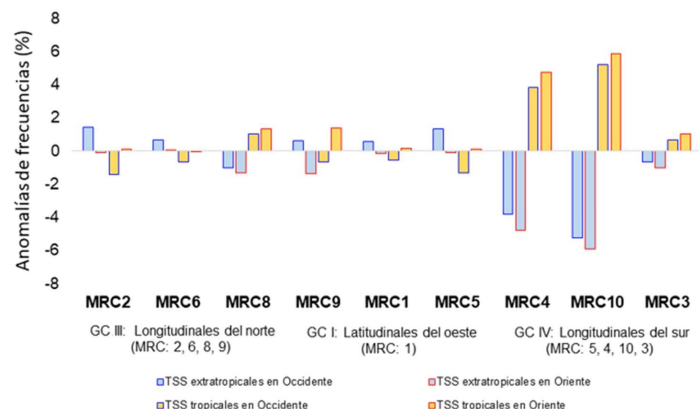


Figura 3. Anomalías de las frecuencias de ocurrencia en las relaciones entre MRC y TSS (tropicales y extratropicales) que influyen sobre el occidente y oriente de Cuba (1970-2019)

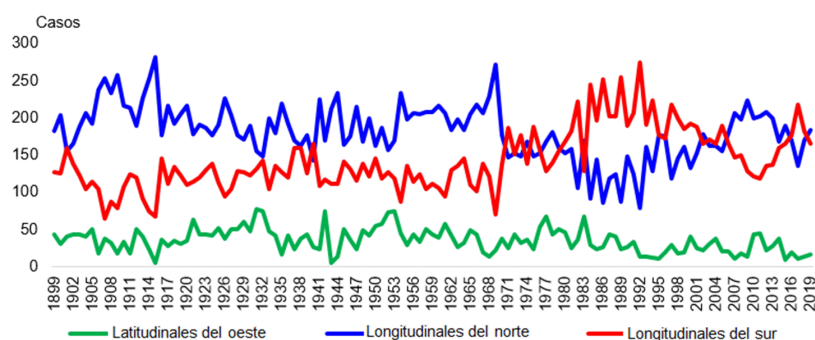


Figura 4. Frecuencias absolutas anuales de los GC (1899-2019)

circulaciones del sur 1901 y 1940. Sin embargo, este grupo no presenta una tendencia definida en el largo periodo de estudio.

El máximo reciente de los flujos longitudinales del norte se observa en el año 2009 (224 días), precisamente en concordancia con la fecha de las primeras invasiones notables del vórtice polar estratosférico en la región de América del Norte, comportamiento que se vincula con *el incremento de los efectos meteoro-tropicales extremos ocurridos en ese periodo*, así como con el mayor número de ciclones tropicales formados en la Cuenca Atlántica y los eventos invernales extraordinarios reportados en el país en enero y diciembre de 2010, que produjeron un aumento significativo de la mortalidad diaria en exceso (Lecha *et al.*, 2022).

Estos flujos longitudinales del norte contienen al macroproceso 9, formado por los subtipos MEC: 7bs, 8a, 11d, 12a, 12bw; siendo el 12a uno de los cuatro subtipos MEC predominantes a nivel del hemisferio norte. Este macroproceso regional de circulación (MRC 9) presenta el mayor aumento de frecuencias de ocurrencias en los últimos 18 años (1,8 %), aunque, todavía no alcanza los incrementos acumulados por los MRC 5 y 10 (longitudinales del sur) en los 50 años transcurridos desde 1970 a 2019, con 5.8 y 7.4 %, respecto al periodo de estudio 1899-2019.

Mientras, los flujos longitudinales del sur poseen tendencia significativa creciente, con punto de cambio en 1969, al nivel de confianza de 95 %. En correspondencia, el comportamiento de este tipo de circulación adquiere relevancia en el periodo 1971-2001, llegando a ser dominantes durante las décadas de los años 80 y 90 del siglo XX.

A comienzos del siglo XXI disminuye su frecuencia y los longitudinales del norte retoman el dominio entre 2006 y 2015, pero, los longitudinales del sur alcanzan un nuevo pico de ocurrencia entre 2016 y 2018.

En décadas recientes, se identifican diversos periodos dominados por los flujos longitudinales del sur: entre 1971 y 1981 con frecuencia media anual de 179 días, ligeramente superior a los longitudinales del norte; entre 1980 y 2001 con marcado predominio (203 días); de 2003 a 2005 en una aparición discreta (175 días); y entre 2016 y 2018 presentan su ultimo pico de ocurrencia con 193 días en el año. Por su parte, los flujos latitudinales del oeste no tienen tendencia definida, pero muestran una disminución sostenida de su frecuencia durante un largo periodo, comprendido desde 1932 hasta 2019.

Varios saltos o cambios bruscos en las frecuencias de ocurrencia de los flujos de circulación regionales se aprecian durante la serie de datos estudiados.

En el comportamiento de los flujos longitudinales estos cambios son inversos y sincrónicos, los ocurridos en 1915, 1969 y 2009, caracterizados por el aumento de las circulaciones del norte; mientras, en 1992 y 2017 por el aumento en las del sur. Los flujos latitudinales no muestran tales cambios.

La Fig. 5 muestra los estadígrafos de Mann-Kendall (serie directa) y Pettitt (punto de cambio) para el GC IV determinados con el programa TrendSoft (Roura *et al.*, 2020), con un R^2 de 0.873, lo que indica un ajuste de alta calidad para el modelo de regresión lineal, donde el predictor explica una proporción elevada de la variación total de los datos de la serie estudiada.

El cálculo de las anomalías anuales de las frecuencias de cada grupo de circulación regional permite apreciar mejor las características de su variabilidad multianual. Como se muestra en la Fig. 6, resulta factible identificar varios ciclos o períodos en los cuales el comportamiento de los grupos de circulación regionales resulta bien diferente. Se pueden destacar, de manera preliminar tres ciclos con predominio de los flujos longitudinales del norte entre los años: 1903-1915, 1954-1969 y 2006-2014. Los dos primeros ciclos tienen como característica fundamental que las diferencias entre las anomalías de los flujos longitudinales del norte y del sur aumenta en el transcurso del tiempo cronológico, mientras, el tercero presenta un máximo a mediados del periodo.

Como segunda característica destacada, las anomalías de los flujos longitudinales del sur muestran su predominio entre los años 1971 y 2006, mucho más acentuado entre 1981 y 1998, periodo en el que ocurrieron los eventos “El Niño” 1982-1983 y 1997-1998, considerados como eventos fuertes o intensos.

Para obtener el comportamiento general de los grupos de circulación en el sector América del Norte, se aplicó a los datos el procedimiento empleado por Kononova (2016) para establecer las épocas de circulación global, el cual parte de calcular las medias móviles cada 10 años (Fig. 7). De esa forma, es posible inferir con claridad las variaciones climáticas demostrativas de la existencia de épocas de la circulación atmosférica.

En las primeras dos décadas del siglo XX el predominio de los flujos longitudinales del norte fue absoluto, en las décadas de los años 20, 30 y 40 se observa un equilibrio entre ambos flujos longitudinales con las anomalías positivas de las circulaciones del norte predominando discretamente, aumentando posteriormente en los años 50 y 60.

En las tres décadas siguientes a 1970 se establece un periodo dominado por las anomalías positivas de las circulaciones longitudinales del sur. Mientras, en la primera del siglo XXI ambos flujos longitudinales presentan valores similares y en la segunda vuelven a predominar las anomalías de los flujos longitudinales del sur. Las anomalías de

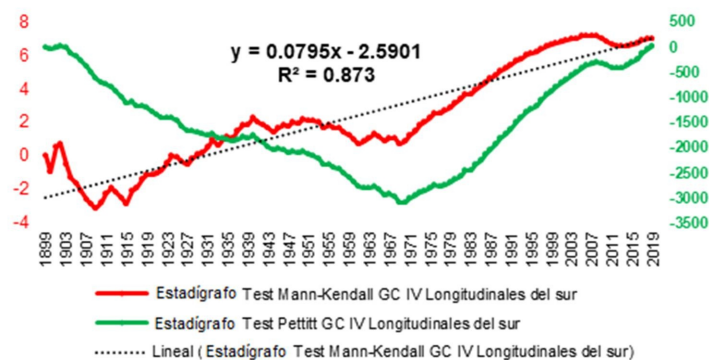


Figura 5. Estadígrafos de Kendall-Mann y Pettitt para GC IV longitudinales del sur (1899-2019)

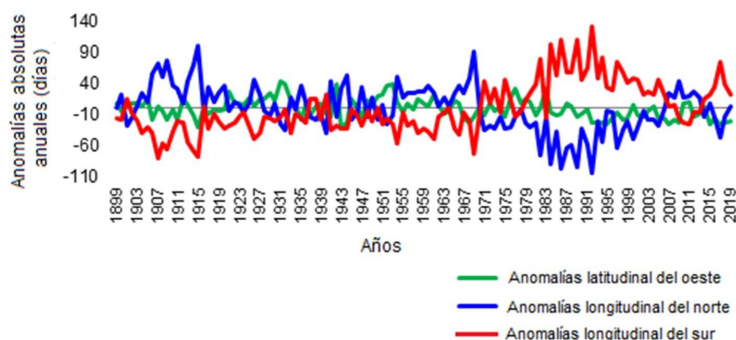


Figura 6. Anomalías absolutas anuales de los GC en el sector América del Norte (1899-2019)

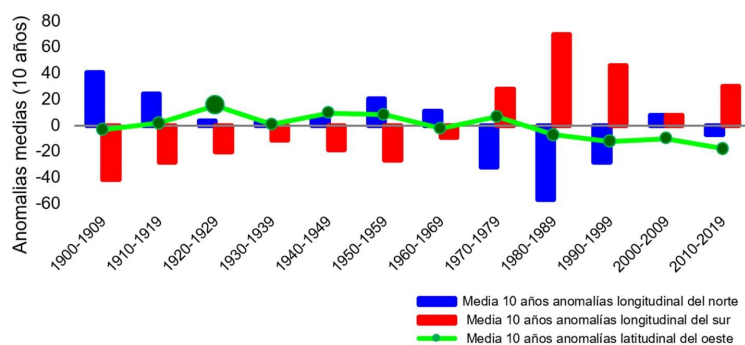


Figura 7. Anomalías medias móviles (10 años) de los GC en el sector América del Norte (1899-2019)

las circulaciones latitudinales del oeste presentan el comportamiento más estable que se demuestra en este estudio de las frecuencias de ocurrencia y las anomalías de los GC, con el decrecimiento durante unos 90 años de datos, siendo sus valores de anomalías anuales negativas desde la década de los años 80 hasta la actualidad.

En la [Tabla 6](#) se relacionan los 21 cambios ocurridos en el grupo de circulación más frecuente, indicando el año inicial y final del periodo de dominio, su duración, frecuencia media anual en días y por ciento respecto a la cantidad total de días.

El análisis de la incidencia anual de los grupos de circulación más frecuentes en el sector América del Norte expuso comportamientos que responden, en cierta medida, a los postulados de [Kononova \(2016\)](#), cuando estableció las épocas de circulación a escala global. También, se observan cambios puntuales que requieren ser analizados más detalladamente mediante

estudios de casos, como sucede con los años: 1972, 1974, 1983, 1995-1996, que representan apariciones de circulaciones longitudinales del norte en un periodo dominado por las longitudinales del sur. Sin mencionar los procesos inversos ocurridos en los años iniciales del periodo 1901 y 1940, por no contar con información de esa época.

El GC III longitudinales del norte muestra el mayor dominio temporal durante el periodo de estudio, al lograr ser el grupo más frecuente en 90 años, con una media anual de 181 días (50.5%), sin embargo, el GC IV longitudinales del sur, que dominó el clima durante solo 31 años alcanzó 184 días (51.1%) como promedio anual, lo que es un indicador de la intensidad de las variaciones ocurridas en los flujos longitudinales del sur, principalmente durante su periodo de dominio (1971-2001). El GC I latitudinales del oeste no logra la mayor frecuencia anual en ningún caso de los 121 años.

Tabla 6. Cambios del grupo de circulación más frecuente en América del Norte (1899-2019)

Cambios	Periodo	Duración	Grupo Circulación	Días al año	%
1	1899-1900	2	Longitudinal Norte	193	54.5
2	1901	1	Longitudinal Sur	159	44.9
3	1902-1939	38	Longitudinal Norte	200	57.7
4	1940	1	Longitudinal Sur	166	49.6
5	1941-1970	30	Longitudinal Norte	200	56.0
6	1971	1	Longitudinal Sur	187	52.1
7	1972	1	Longitudinal Norte	153	44.0
8	1973	1	Longitudinal Sur	176	49.3
9	1974	1	Longitudinal Norte	168	49.1
10	1975-1976	2	Longitudinal Sur	173	47.9
11	1977-1979	3	Longitudinal Norte	169	46.4
12	1980-1982	3	Longitudinal Sur	191	52.1
13	1983	1	Longitudinal Norte	169	46.3
14	1984-1994	11	Longitudinal Sur	222	60.5
15	1995-1996	2	Longitudinal Norte	176	48.2
16	1997-2001	5	Longitudinal Sur	197	53.9
17	2002	1	Longitudinal Norte	178	48.8
18	2003-2005	3	Longitudinal Sur	175	47.9
19	2006-2015	10	Longitudinal Norte	198	54.1
20	2016-2018	3	Longitudinal Sur	193	52.6
21	2019	1	Longitudinal Norte	184	50.4
Resumen por GC más frecuente en América del Norte					
11		90	Longitudinal Norte	181	50.5
10		31	Longitudinal Sur	184	51.1
0		0	Latitudinal Oeste	0	0

Tabla 7. Características de los grupos de circulación en América del Norte

Características fundamentales de los grupos de circulación en América del Norte	Periodos según los cambios del grupo de circulación más frecuente, sus valores de frecuencia media anual y macroprocesos destacados en América del Norte
Dominio absoluto de las circulaciones longitudinales del norte 1899-1970 (72 años)	1899-1901 (3 años): Periodo con cambio en el grupo de circulación más frecuente de longitudinal del norte a longitudinal del sur, con frecuencias medias anuales de 193 días (54.5 % del año) en 1899 y 1900, mientras, en 1901 fue de 159 días (44.9 % del año). 1902-1970 (69 años): Dominio absoluto del grupo de circulaciones longitudinales del norte, con frecuencia media anual de 200 días (56.9 % del año). El valor de frecuencia máxima absoluta anual se alcanzó en 1915 (282 días = 77.2 % del año), seguido de 1969 con 272 días. Se destacan los macroprocesos 2 (longitudinal del norte) que presenta la mayor frecuencia de ocurrencia, y el 4 (zonal del oeste y meridional del sur). Este periodo solo fue interrumpido por un cambio efímero a las circulaciones longitudinales del sur en 1940, cuando alcanzaron una frecuencia anual de 166 días (49.6 % del año).
Rápido crecimiento en la frecuencia de los intercambios longitudinales del sur 1971-2001 (31 años)	1971-1979 (9 años): Primer periodo con el grupo de circulaciones longitudinales del sur como más frecuente, marcado por la alta inestabilidad en las circulaciones, con cinco cambios en nueve años y valores discretos en la frecuencia media anual, que fue de 179 días (49.8 %) para las circulaciones del sur y 163 (46.5%) para las del norte, correspondiendo el máximo absoluto anual a las del sur en 1971 (187 días = 52.1 % del año). Se destacan los macroprocesos 4 (zonal del oeste y meridional del sur) y 9 (meridional del norte y meridional del sur, en zonas adyacentes, no concurrentes), mientras, disminuye la ocurrencia del macroproceso 2 (meridional del norte). 1980-1983 (4 años): Corto periodo con un cambio en los grupos de circulación más frecuentes: longitudinales del sur y del norte respectivamente, con frecuencia media anual elevada para las del sur, 1980-1982 (191 días= 52.1 % del año) y 1983 (169 días= 46.3 % del año). 1984-1994 (11 años): Rápido y máximo incremento del grupo de circulación longitudinales del sur, con una frecuencia media anual de 222 días (60.5 % del año). El valor de frecuencia máxima absoluta anual se alcanzó en 1992 (274 días= 74.9 % del año). Se destacan los macroprocesos 4 (zonal del oeste y meridional del sur) y 10 (meridional del sur con intercambio en posición estacionaria). 1995-2001 (7 años): Inicia con un discreto dominio de las longitudinales del norte en el bienio 1995-1996, con frecuencia media de 176 días (48.2%). En el quinquenio 1997-2001 las longitudinales del sur retoman el control con una frecuencia media anual de 197 días (53.9 % del año). Se destacan los macroprocesos 10 (meridional del sur con intercambios en posición estacionaria) y 5 (zonal del oeste con intercambios en posición estacionaria).
Aumento sostenido de los intercambios longitudinales del norte y del sur, en zonas adyacentes, no concurrentes	2002-2019 (18 años): Se establecen nuevamente las circulaciones longitudinales del norte, con énfasis en el periodo 2006-2015, el año inicial 2002 y el final 2019 (12 años) con frecuencia media anual de 187 días (51.1 %), y sendos trienios alternos dominados por las longitudinales del sur 2003-2005 y 2016-2018, con 184 días (50.3 %). El valor de frecuencia máxima absoluta anual se alcanzó en 2009 (224 días= 61.4 % del año). Se destaca un aumento sostenido en la ocurrencia del macroproceso 9 (meridional del norte y meridional del sur, en zonas adyacentes, no concurrentes) hasta lograr el predominio.

Considerando las tendencias de las frecuencias de ocurrencias, las anomalías anuales de los tres grupos de circulación estudiados y los cambios ocurridos en el grupo de circulación más frecuente entre 1899 y 2019, fue posible describir la evolución de las circulaciones atmosféricas, estableciendo sus características fundamentales y regularidades de sus periodos de influencia en América del Norte (Tabla 7), que incluye el área geográfica donde se localiza Cuba, marcada por la oscilación estacional de la frontera entre la zona tropical y la extratropical; las que contienen el cálculo de los valores de frecuencia media anual y el macroproceso destacado en cada periodo.

En el análisis se aprecia como la interacción o respuesta de la CGA al comportamiento de la temperatura del sistema climático se manifiesta en ciclos o etapas. En los primeros ciclos de la serie temporal analizada, la dinámica de la CGA logró estabilizar el diferencial de energía entre latitudes, pero eso no se logra en el ciclo actual, el cual mantiene desde 1969 una tendencia significativa creciente al aumento de los flujos longitudinales del sur, al nivel de confianza de 95 %, a cambio de una reducción sostenida de los intercambios zonales. Esto se refleja en el aumento reciente de los fenómenos meteorológicos peligrosos y de los efectos meteorológicos.

trópicos extremos que afectan a todo el continente norteamericano, el Caribe y Cuba.

Otro resultado notable, se obtiene al comprobar que a nivel global y especialmente en los decenios transcurridos del siglo XXI, ambos procesos de intercambios longitudinales son totalmente dominantes y han desplazado casi al mínimo la incidencia de los flujos zonales. Este hecho justifica plenamente el proceso de disminución de la duración del invierno cubano, expresado en la transformación cualitativa que se observa en los sistemas frontales que llegan hasta Cuba, dada por una disminución de los frentes clásicos, a cambio del aumento de la incidencia de los frentes casi estacionarios en occidente y en proceso de disipación en el oriente del país, así como, la disminución general de los sistemas frontales que llegan hasta la región más oriental del país (Lecha *et al.*, 2024).

También, a lo largo de toda la serie temporal analizada se aprecia una disminución en la frecuencia de los procesos zonales y en los tres decenios anteriores las anomalías positivas medias de los procesos de intercambio zonal durante el trimestre junio-agosto prácticamente han desaparecido. Esto sugiere la forma gradual y persistente en que han cambiado los mecanismos elementales de circulación que se asocian con la influencia del anticiclón subtropical oceánico del Atlántico Norte, que ha ido aumentando su influencia sobre Cuba y el entorno geográfico adyacente, tanto a través de la configuración del flujo extendido, cuando el anticiclón está lejos de Cuba y la componente del viento en superficie gira al sur o rumbo próximo (flujo longitudinal); como, cuando la cuña anticiclónica penetra profundamente hacia el oeste y cubre toda el área, y el viento en superficie y niveles bajos de la troposfera sobre Cuba es de región este (flujo latitudinal).

El proceso descrito anteriormente está produciendo ya importantes cambios en el clima de la región más oriental del país, el cual va incorporando características del clima de las Antillas Mayores del este (La Española y Puerto Rico). Sin embargo, todavía quedan muchos aspectos por estudiar y esclarecer, a partir de la amplia base de datos disponible y de la necesaria asociación que falta por realizar con los procesos sinópticos que afectan a Cuba.

CONCLUSIONES

1. En el área geográfica de latitudes bajas que incluye a Cuba, dentro del sector América del Norte, los flujos longitudinales del sur son el único grupo de circulación atmosférica que posee tendencia significativa, con signo creciente y punto de cambio en 1969, al nivel de confianza de 95 %.

2. La evolución de los grupos de circulaciones atmosféricas en este sector se resume en las características siguientes: dominio absoluto de las circulaciones longitudinales del norte 1899-1970; rápido crecimiento en la frecuencia de los intercambios longitudinales del sur 1971-2001; y aumento sostenido de los intercambios y bloqueos contenidos en el macroproceso 9 (meridionales del norte y meridionales del sur, en zonas adyacentes, no concurrentes) entre 2002-2019.
3. Estas circulaciones atmosféricas regionales 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: invierno (noviembre a abril), verano (julio y agosto) y dos periodos de transición: verano-invierno (septiembre y octubre, comparable al otoño del hemisferio norte) y el tránsito invierno-verano (mayo y junio, comparable a la primavera).
4. Los cambios observados durante las décadas recientes, en las principales características estacionales y multianuales de las circulaciones atmosféricas, pueden asociarse al incremento del riesgo climático.
5. Los resultados obtenidos satisfacen los objetivos de esta investigación, aportan nuevos conocimientos sobre el clima de Cuba y pueden sustentar nuevos enfoques en el enfrentamiento a los impactos del cambio climático.

REFERENCIAS

- Barry, R. G., y Carleton, A. M. (2001). *Synoptic and dynamic climatology*. Routledge.
- BD. (2019). *Base de Datos MEC 1899-2019*. <https://www.atmospheric-circulation.ru>
- Celeiro, M. (1999). *Oscilaciones de las temperaturas del aire y las precipitaciones desde el pasado histórico en Cuba* [Tesis doctoral, Instituto de Geografía Tropical].
- Dzerdzeevskii, B. L. (1962). Fluctuation of climate and of general circulation of the atmosphere in extra-tropical latitudes of the Northern Hemisphere and some problems of dynamic climatology. *Tellus*, 14(3), 328-336.
- Dzerdzeevskii, B. L. (1968). *Los mecanismos de la circulación de la atmósfera en el hemisferio norte en el siglo XX* [Obra en ruso]. En *Resultados de Investigaciones durante el Año Geofísico Internacional. Circulación Atmosférica*. Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de la URSS.

- Dzerdzeevskii, B. L. (1975). *Selected works: General atmospheric circulation and climate* [Obra en ruso]. Nauka.
- Goddard Institute for Space Studies. (2023). *Base de datos de la temperatura media global*. NASA. <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/temperatura-global/>
- Hansen, J. (2000). *One world: The health & survival of the human species in the 21st century*. Health Press.
- Hoel, P. (1972). *Introducción a la estadística matemática*. Instituto Cubano del Libro.
- Kononova, N. K. (2009). *Clasificación de los mecanismos elementales de circulación del hemisferio norte según el método de B. L. Dzerdzeevskii*. Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Rusia.
- Kononova, N. K. (2010). Long-term fluctuations of the northern hemisphere atmospheric circulation according to Dzerdzeevskii classification. *Geography, Environment, Sustainability*, 3(1), 25-43.
- Kononova, N. K. (2016). Fluctuations of the global atmospheric circulation in the XX-XXI centuries. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 7(10). <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000350>
- Kononova, N. K., y Lupo, A. R. (2020). Changes in the dynamics of the Northern Hemisphere atmospheric circulation and the relationship to surface temperature in the 20th and 21st centuries. *Atmosphere*, 11(3), Artículo 255. <https://doi.org/10.3390/atmos11030255>
- Lapinel, B. (1988). *La circulación atmosférica y las características espacio-temporales de las lluvias en Cuba* [Tesis doctoral, Instituto de Meteorología].
- Lebedeva, M., Lupo, A., Chendev, Y., Krinskaya, O., y Solovyev, A. (2019). Los cambios en las condiciones de las circulaciones atmosféricas y las características regionales del clima en dos localidades remotas durante el siglo XX. *Atmosphere*, 10(1), Artículo 11. <https://doi.org/10.3390/atmos10010011>
- Lecha, L., Guevara, A., Díaz, E. B., Sosa, A., Peña, E., y Pichardo, L. O. (2022). *Cartografía de la mortalidad general en Cuba (2001-2020)* (Informe Técnico P211LH007-016). Instituto de Meteorología de Cuba.
- Lecha, L. B., Soler, E., Sánchez, L. M., y Verdecia, Y. (2024). La climatología sinóptica de Cuba. Parte 2: El catálogo de los tipos de situaciones 1970-2022. *Revista Cubana de Meteorología*, 30(1). ISSN:2664-0880
- Roura, P., Arenas, J. C., Sistachs, V., y Díaz, D. (2020). TrendSoft: Software para el análisis de tendencia y puntos de cambio de variables climatológicas. *Revista Cubana de Meteorología*, 26(3), 1-16. ISSN:2664-0880
- Soler, E., Sánchez, L. M., Lecha, L. B., y Verdecia, Y. (2020). Los mecanismos elementales de circulación en América del Norte y su relación con las situaciones sinópticas que influyen sobre la mitad occidental de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 26(sp), 1-18. <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/544/980>

Edgardo Soler Torres. Centro Meteorológico de la Isla de la Juventud, INSMET, Teléfono: 46324121. E-mail: edgardosoler2@gmail.com

Luis B. Lecha Estela. Centro Meteorológico de la Isla de la Juventud, INSMET. Teléfono: 55008683. E-mail: luis.lecha@gmail.com

Pedro Roura Pérez. Centro Nacional del Clima, INSMET, Teléfono: 52156773. E-mail: pedro.roura@insmet.cu