

Variaciones hidroclimatológicas en el tramo hidrogeológico Artemisa Quivicán en el período 1981-2010

Hydroclimatological variations in the hydrogeological section Artemisa Quivicán in the period 1981-2010

Dagne Boudet-Rouco[✉], Eduardo Planos-Gutiérrez, Ernesto R. Carrillo-Vitale

Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.

Resumen

Las evidencias observadas demuestran que desde mediados de los años 60 del siglo XX, la temperatura superficial del aire al sur de las provincias de Artemisa y Mayabeque se ha incrementado notablemente. Tal incremento está condicionado por el ascenso de la temperatura mínima, lo que repercute en una importante disminución de la oscilación diaria de la temperatura. En cuanto a las lluvias, existe una muy ligera tendencia al aumento de los valores en los últimos años, no estadísticamente significativa, condicionada por igual comportamiento en el período lluvioso (mayo-octubre donde se concentra el 79.1% del acumulado anual) y una ligera disminución en los valores del período poco lluvioso (noviembre-abril). La evapotranspiración real por su parte, tiene una tendencia global al incremento, fundamentalmente en el período lluvioso, mientras que en el período poco lluvioso esta indica una reducción. Todo esto se traduce en una tendencia (no estadísticamente significativa) a un mayor volumen potencial anual de los recursos hídricos en los últimos años.

Palabras claves: balance hídrico, tendencia climática, variabilidad climática

Abstract

Observed evidence shows that since the mid-1960s the surface air temperature south of the provinces of Artemisa and Mayabeque has increased significantly. This increase is conditioned by the rise of the minimum temperature, which implies an important decrease in the daily temperature oscillation. The rains have a very slight tendency to increase values in the last years, not statistically significant, conditioned by the same behavior of the rainy season (May-October concentrates 79.1% of the annual accumulated) and a slight decrease in the values of the period Dry (November-April). Evapotranspiration has an overall tendency to increase, mainly in the rainy season, however in the dry season there is a reduction. All of this translates into a trend (not statistically significant) to a greater potential annual volume of water resources in recent years in the hydrogeological section Artemisa Quivicán.

Keywords: water balance, climatic trend, climatic variability

[✉] Autor para correspondencia: Dagne Boudet-Rouco. E-mail: dagne.boudet@insmet.cu

Recibido: 28 de octubre de 2016

Aceptado: 8 de mayo de 2017

Introducción

En el caso cubano, los recursos hídricos disponibles por persona anualmente están heterogéneamente distribuidos, siendo las provincias orientales, La Habana, Artemisa y Mayabeque las menos favorecidas. El tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán se encuentra ubicado dentro de la Cuenca Sur, al sur de la provincia La Habana, en el límite entre las provincias Artemisa y Mayabeque, entre las coordenadas 82.67N y 22.97W a 82.55N y 22.66W, y constituye una de las zonas agrícolas más importantes del país y de gran peso en la alimentación de la población, principalmente la capital. A su vez, el área de estudio está enclavada en uno de los acueductos más importante que abastece de agua a La Habana: el Acueducto Cuenca Sur.

Los estudios sobre las tendencias en los elementos climáticos en Cuba comenzaron en la década del 70 del siglo XX, con investigaciones realizadas conjuntamente entre expertos del Instituto de Geografía, del Instituto de Hidroeconomía actual Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos y el asesor soviético I.I. Trusov, quienes estudiaron la ciclicidad de las precipitaciones en Cuba ([Trusov et al., 1983](#)). Del mismo modo, numerosos estudios realizados para asegurar el desarrollo hidráulico del país abordaron profundamente, desde la mencionada década, el comportamiento de las variables climáticas y sus tendencias. A finales de la década del 80 del siglo XX, [Vega et al., \(1987\)](#), encontraron la existencia de una tendencia opuesta entre las precipitaciones de las estaciones lluviosa y poco lluviosa; seguido por otros autores que confirmaron la existencia de tendencias significativas en series de algunas variables climáticas. Este quehacer permitió preparar la primera evaluación de las fluctuaciones del clima en el informe denominado “Variaciones y Cambios del Clima en Cuba”, preparado por un colectivo de autores y editado por [Centella et al. \(1997\)](#). La ejecución posterior de importantes proyectos de

investigación, crearon las condiciones para la elaboración de una segunda evaluación (2da Comunicación Nacional de Cuba a la Convención Marco de Naciones Unidas), que se sustenta en los logros alcanzados entre 1997 y 2008 y en artículos e informes especiales elaborados durante esos años de trabajo.

El procedimiento seguido en este estudio fue el de considerar como punto de partida el informe de la primera evaluación, tomando como cita obligada sus principales afirmaciones, y valorando cuáles de ellas continuaban teniendo validez. A partir de ello se incorporaron de forma resumida los resultados obtenidos por los proyectos y servicios ejecutados en el Instituto de Meteorología (INSMET), a través de un análisis crítico y en busca de la sinergia que requiere tener este tipo de trabajo. En varios casos se realizaron las actualizaciones necesarias de las series de datos, de las tendencias y del nivel significación estadística ([Planos et al., 2013](#)).

El objetivo de este estudio es caracterizar el comportamiento de la temperatura del aire, los acumulados de precipitación y el balance hídrico, así como el análisis de la tendencia de estas variables en los últimos años. Esto ofrece una idea del comportamiento hidroclimático del área de estudio en los últimos años y la disponibilidad de agua en la actualidad.

Este estudio, en conjunto con otras consideraciones, puede servir de base para realizar estudios de impacto de la variabilidad del clima y el cambio climático del que ya hay sobradas evidencia en la región geográfica donde se ubica Cuba, y con ello trazar medidas de adaptación adecuadas.

Materiales y Métodos

Para el análisis de la temperatura, las variables examinadas fueron temperatura máxima, mínima y media mensual en el período 1981-2010 en la estación Güira de Melena, debido a su ubicación dentro del territorio de interés. Esta estación fue utilizada también para

el cálculo de la evapotranspiración real. Para el estudio del comportamiento general de la lluvia, se utilizaron las series de datos de los pluviómetros escogidos dentro de la red básica del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) en el período 1961-2010 (Figura 1).

Para el cálculo de las variables estimadas se utilizaron las siguientes fórmulas

Temperatura del aire

Los valores medios históricos de la temperatura del aire para el período 1981-2010, fueron calculados a partir del promedio de los datos diarios de temperatura máxima, mínima y media. Para calcular la temperatura media se utilizó el promedio de la temperatura máxima y mínima según establece la OMM

(Organización Meteorológica Mundial) (OMM, 2011).

Radiación solar extraterrestre

Si la constante solar (C) se expresa en J/m²-s y la radiación solar extraterrestre (RA) en J/m²-día, este último parámetro viene dado por (Rivero, 2008):

$$RA(n) = (86\,400 / \pi) C (D_m / D)^2 (H \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H)$$

donde:

$$(D_m / D)^2 = 1 + 0.033 \cos (360 n / 365.24)$$

D_m – distancia media de la Tierra al Sol

D – distancia de la Tierra al Sol en el día n

$\delta = 23.45 \sin [360 \cdot (284 + n) / 365]$ – ángulo de declinación solar el día n en grados

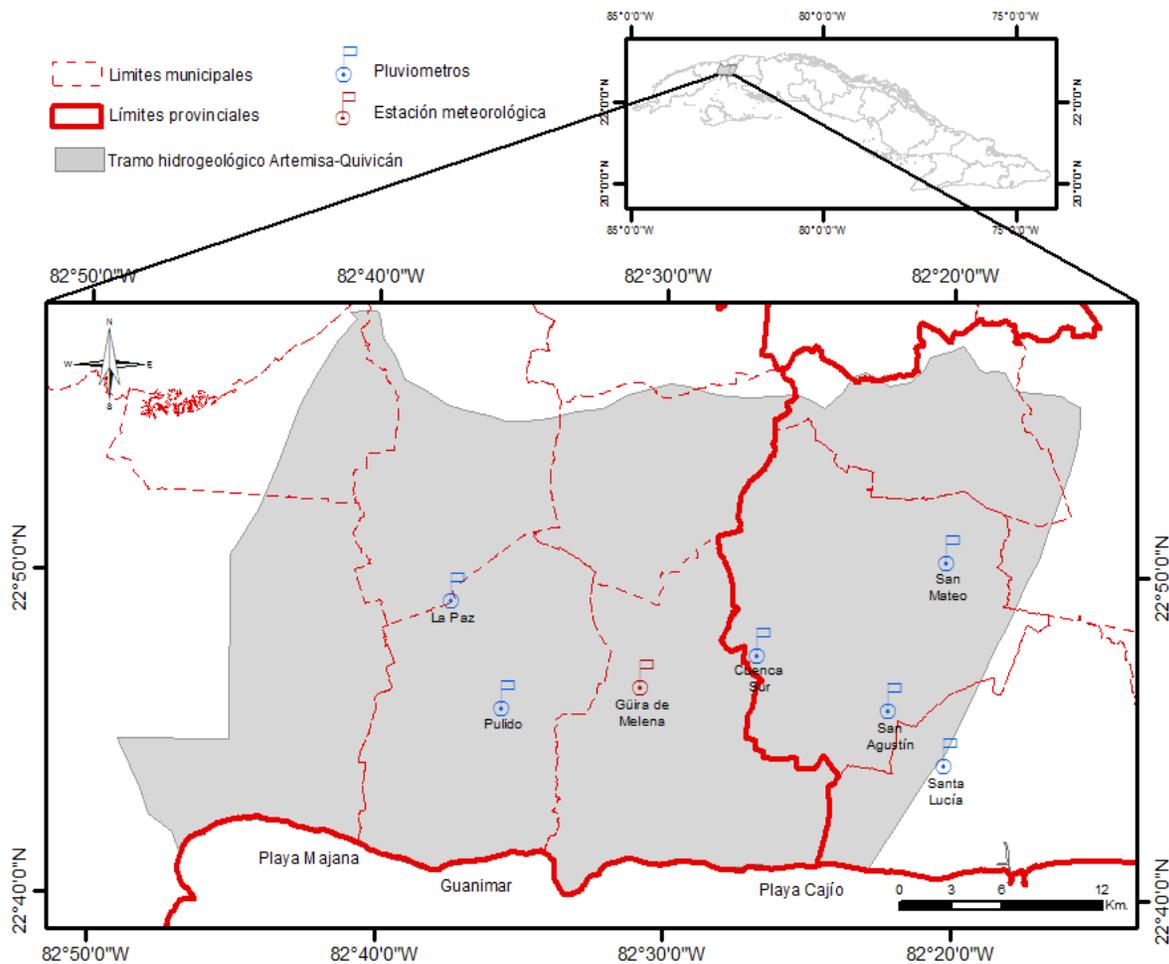


Figura 1. Ubicación de los pluviómetros y estación meteorológica utilizados

$H = \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$ - semiduración del día n
 ϕ - latitud de la localidad en cuestión
 n - día Juliano desde 1 hasta 365
 C = 1370 J/m²-s - constante solar

Los valores medios mensuales de RA (m), donde m = 1, 2, ..., 12, se obtienen dividiendo la suma de todos los valores diarios RA (n) de un mes dado m entre el número de días del mes que se trate.

Los valores de RA (m) en MJ/m²-d pueden llevarse al equivalente en milímetros de agua evaporada por día (mm H₂O/m²-d) dividiéndolos por 2.508.

Balance Hídrico

El modelo de climatología física utilizado ([Budyco, 1970](#)), representa el balance hídrico multianual mediante la ecuación de balance dada por:

$$S = P - E$$

donde:

S - lámina de escurrimiento anual (mm)

P - total anual de precipitaciones (mm)

E - evapotranspiración real anual (mm)

Evapotranspiración potencial (ETP)

Para calcular la evapotranspiración potencial se utilizó la fórmula de Hargreaves ([Hargreaves & Samani, 1985](#)), mediante la expresión:

$$ETP = 0.0023 * (T_m + 17.8) * (T_x - T_n)^{0.5} * R_a$$

donde:

T_m - Temperatura media mensual (°C)

T_x - Temperatura máxima mensual (°C)

T_n - Temperatura mínima mensual (°C)

R_a - Radiación extraterrestre (milímetros por día)

Evapotranspiración real (ETR)

Para su cálculo se utilizó la metodología de Budyko de 1974 a escala mensual y que plantea:

$$ETR = \left\{ P * ETP * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) * \left[1 - \cosh\left(\frac{P}{ETP}\right) + \sinh\left(\frac{P}{ETP}\right) \right] \right\}^{1/2}$$

donde:

P - Acumulado de precipitaciones mensuales

ETP - Evapotranspiración potencial

Análisis estadístico

La esencia del análisis es demostrar que las series son homogéneas y aleatorias para que puedan ser utilizadas en los estudios hidrometeorológicos. Comprobar si las series son estacionarias y aleatorias, es un punto de partida indispensable para la obtención de resultados confiables con el procesamiento estadístico de datos históricos ([Planos et al., 2010](#)).

Examen de la aleatoriedad, homogeneidad y persistencia

Todas las series empleadas fueron examinadas con pruebas estadísticas para la homogeneidad y la aleatoriedad; empleando pruebas paramétricas y no paramétricas, particularmente: Prueba de Helmer para la homogeneidad, y la Prueba de autocorrelación seriada de orden 1 y la Prueba de la Covarianza para la aleatoriedad.

El análisis de la homogeneidad para el caso de la temperatura muestra que la serie cronológica de la estación Güira de Melena no es homogénea y, además, manifiesta una persistencia también significativa. Cuando una serie es no homogénea y tiene además una persistencia relevante, como sucede en este caso, está establecido analizar las causas de esta condición, con el propósito de restaurar la homogeneidad de la serie si ello es consecuencia de errores en la disciplina de la observación, instrumentales o cambios en la posición de las estaciones. La no homogeneidad de la serie está asociada a la inequívoca tendencia incremental de la temperatura del aire; debido a que esto es consecuencia de factores naturales, no es posible restaurar la estabilidad de los estadígrafos de la serie, de manera que la caracterización climática que a

continuación se hará, hay que tomarla con el conocimiento de la tendencia progresiva al aumento de la temperatura en la región.

Para el análisis de la precipitación se trabajó con las seis estaciones pluviométricas contenidas en la tabla 1 las cuales tienen una adecuada distribución y sus datos cubren totalmente sin omisión el período 1961 – 2010. Del mismo modo que para la temperatura, se realizó el análisis de homogeneidad y persistencia; obteniéndose como resultado una situación compleja (Tabla 1). Como se aprecia en la tabla, solo existen tres series de precipitación que cumplen la condición de homogeneidad y no persistencia en los períodos anual, lluvioso y poco lluvioso.

Considerando que el resultado del análisis de la homogeneidad realizado es disímil en una región que físico-geográficamente puede considerarse homogénea, y que, en el caso de las series anuales, la magnitud que califica a las series como no homogénea no es significativa, se decidió restablecer la homogeneidad de las series, utilizando los procedimientos recomendados por la OMM (2011). Esto se hizo con el propósito de obtener una representación regional homogénea de esta variable. En tal sentido debe llamarse la atención que dado la complejidad de la distribución espacio temporal de esta variable, en ella se aprecia de manera menos evidente el carácter evolutivo del clima.

La metodología seguida para el análisis y restablecimiento de la homogeneidad de las series de precipitación es la siguiente:

Tabla 1. Análisis de homogeneidad (Helmert) y persistencia de las series de los pluviómetros contenidos en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán para el período 1961-2010

Pluviómetro	Período lluvioso		Período poco lluvioso		Serie anual	
	Homog.	Persistencia	Homog.	Persistencia	Homog.	Persistencia
San Agustín	No	No	No	Si	No	Si
San Mateo	Si	No	Si	No	Si	No
Santa Lucía	Si	No	Si	No	Si	No
Pulido	Si	No	Si	No	No	No
Cuenca Sur	No	Si	Si	No	No	Si
La Paz	Si	No	Si	No	Si	No

Fuente: Elaborado a partir de los datos procesados de los pluviómetros del INRH.

1. Determinación de homogeneidad (Método de Helmert) y persistencia (Covarianza)
2. Determinación de la correlación entre las series
3. Restablecimiento de la homogeneidad de las series con el método de las dobles acumulaciones entre la serie no homogénea y la serie con la de mejor correlación.
4. Determinación de valores anómalos con el método de los cuartiles.

Se determinaron los coeficientes de correlación entre las estaciones usadas en este trabajo; criterio que se utilizó para seleccionar las estaciones de referencia para restablecer la homogeneidad de las series que no la tuvieran. Una vez restaurada la homogeneidad de las series, se analizaron dos períodos de referencia, el 1961-2010 para tener un período de 50 años y con esta extensión hacer un análisis más exhaustivo en el tiempo de la variabilidad de la precipitación; y el 1981-2010, con 30 años de extensión, escogido por ser la norma climatológica con la que se trabaja en el INSMET y la recomendada por la OMM para el trabajo en climatología.

Tendencia de las series de datos

La tendencia de los datos tanto de las estaciones meteorológicas como los pluviómetros, fue calculada mediante el estadígrafo Mann-Kendall tal como establece la Nota Técnica No. 143 de la OMM (Sneyers, 1990).

Mann-Kendall evalúa si un conjunto de

datos de tiempo ordenado exhibe una tendencia creciente o decreciente, dentro de un nivel predeterminado de significación estadística, en el caso de Cuba se utiliza un valor-p de 0.05.

Cálculo de valores anómalos positivos

Los valores anómalos representan el comportamiento extremo máximo y mínimo de las variables climáticas e hidrológicas. Una vez que se comprueba que estos valores no son errores de la observación, es necesario considerar como son tratados en el análisis de las series de datos, dependiendo fundamentalmente de su frecuencia.

Fueron identificados en las series de datos de lluvia en los años en los que ocurrieron eventos hidrometeorológicos que produjeron grandes precipitaciones (100 mm o más en 24 horas) y que por su peso en el valor anual podían distorsionar los análisis climatológicos, fundamentalmente los de la tendencia global. Para ello se calculó el primer cuartil (Q1, es el dato debajo del cual se encuentra el 25 por ciento de los valores) y tercer cuartil (Q3 son los datos entre el 50 y 75 por ciento de los valores) y a partir de esto se calcularon los

límites superiores de las series de datos de los pluviómetros utilizados.

$$\text{Límite superior} = Q3 + 1.5 * (Q3 - Q1)$$

Una vez identificados los límites extremos en las series, y teniendo en cuenta la baja frecuencia de las magnitudes para tales límites, los valores extremos fueron sustituidos por el valor medio de la serie, con el objetivo de aminorar el sesgo que ellos producían en la distribución de las series. Los cálculos que se realizan en este trabajo se hacen para las series con y sin los extremos máximos y mínimos.

Resultados y Discusión

En correspondencia con la marcha anual de la radiación solar global, la temperatura media del aire en el área de estudio, alcanza su máximo anual en los meses de julio y agosto, mientras que los mínimos en enero y febrero ([Figura 2](#)). La temperatura media en el área de estudio es de 24.9 °C; oscila en el período lluvioso entre 26.4 y 27.8 °C, mientras que en los meses invernales entre 21.5 y 24.0 °C. Teniendo en cuenta las características del relieve en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán, no es de esperar la existencia de

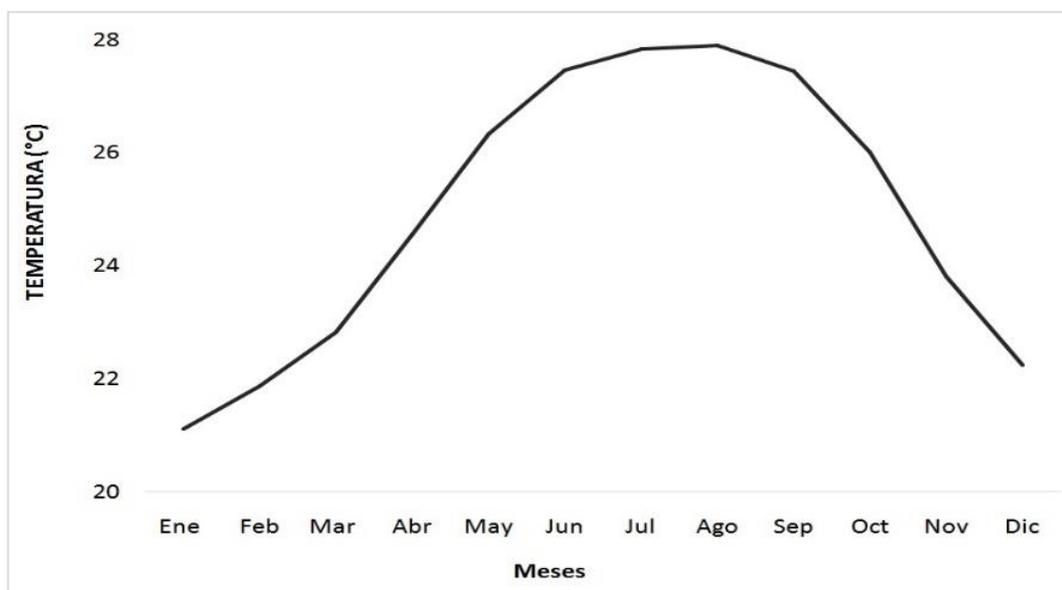


Figura 2. Marcha anual de la temperatura media mensual en el tramo Artemisa-Quivicán para la norma climatológica 1981-2010. Fuente: Datos de la estación meteorológica Güira de Melena del INSMET.

grandes diferencias en la distribución espacial de este elemento climático en dicho territorio. De forma general, las variaciones espaciales de la temperatura no exceden el rango de menos de 1.0 °C en ningún mes del año y la temperatura media tiende a ser más alta hacia la costa sur.

Los mayores valores de amplitud térmica se registran en los meses del período poco lluvioso, cuando las diferencias entre la temperatura máxima y la mínima en el día son mayores, fundamentalmente entre los meses de enero-abril. Sin embargo, en período lluvioso las diferencias diarias entre los extremos de dicha variable se hacen menores, con un valor mínimo en junio ([Figura 3](#)).

Una característica importante son los bajos valores de la temperatura mínima que se registran en esta región durante los meses de enero y febrero, asociadas al enfriamiento nocturno que se produce en la llanura Habana-Matanzas, en dicha época del año. La temperatura mínima media mensual para el período de análisis está por encima de los 20 °C

en todos los meses de período lluvioso (mayo-octubre), mientras que en los invernales (noviembre-abril) no superan los 19.0 °C. Es de destacar que las temperaturas mínimas absolutas registradas en la región son inferiores a los 10 °C entre noviembre y abril. Las temperaturas máximas en el período lluvioso, con valores medios mensuales que sobrepasan los 32 °C en julio, agosto y septiembre. Las máximas absolutas superan los 35 °C entre abril y septiembre.

Esta descripción del comportamiento de la temperatura del aire, hay que asumirla con el conocimiento de que su tendencia al incremento es estadísticamente significativa ([Planos, 2012](#)) y que, las series cronológicas correspondientes al período 1981-2010 no son homogéneas, y muestran persistencia; lo que indica que se está en presencia de un clima evolutivo. La práctica hidrometeorológica establece que la condición de homogeneidad y aleatoriedad son indispensables para procesar series cronológicas, sobre todo si se trata de

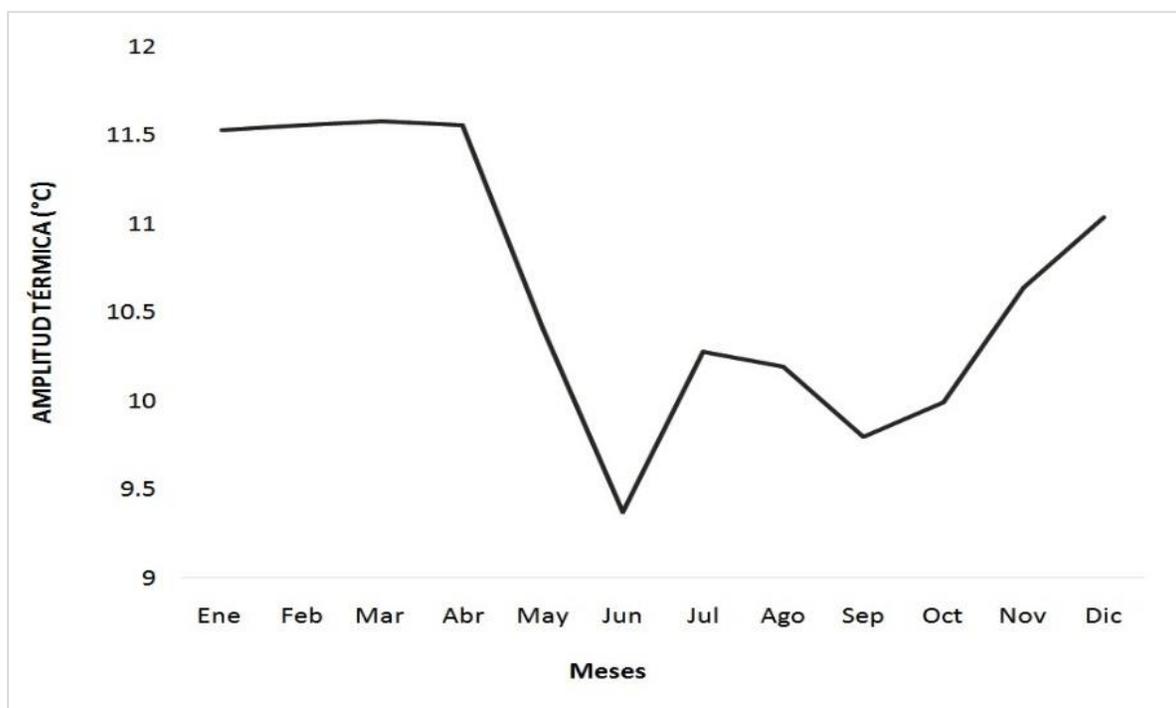


Figura 3. Amplitud térmica de la temperatura media del aire en el tramo Artemisa-Quivicán para la norma climatológica 1981-2010. Fuente: Datos de la estación meteorológica Güira de Melena del INSMET.

modelarlas probabilísticamente o utilizar técnicas de predicción (OMM, 2006), pero bajo ciertas circunstancias, pueden ser trabajadas para caracterizar el régimen de una localidad, con el debido cuidado.

En el área de estudio para el período analizado, la tendencia de la temperatura media del aire ha sido en general al aumento estadísticamente significativa (Figura 4 y Tabla 2), tanto en los valores máximos, mínimos y medios.

La tendencia al aumento y los resultados de las pruebas de homogeneidad y persistencia es dominada por el comportamiento de la variable en los meses de período lluvioso, excepto en el mes de junio. Durante el resto del año también hubo una tendencia al aumento, aunque no estadísticamente significativa, y solo en el mes de noviembre los valores de la Tau de Kendall indican una tendencia a la disminución, aunque igualmente no estadísticamente significativa.

Esta tendencia tanto en los valores extremos como en los medios se debe fundamentalmente al continuo incremento en los valores de las anomalías en los últimos años. A partir del año 2002 la temperatura mínima media mensual presentó valores de anomalías positivas todos los años excepto el 2010, el cual fue un año en el que tanto en enero como en diciembre se presentaron temperaturas extremadamente bajas en todo el país.

La Figura 5, basada en la combinación de la media móvil de 20 años y el coeficiente de variación (Cv), muestra el sostenido incremento del valor medio de la temperatura y a partir del comportamiento del Cv, se puede concluir que hasta finales de la década de los 90 del siglo XX, la variabilidad de las series, expresadas por la diferencia entre los valores máximos y mínimos de la temperatura promedio era alta y creciente, mientras de esa fecha al presente esta variabilidad ha

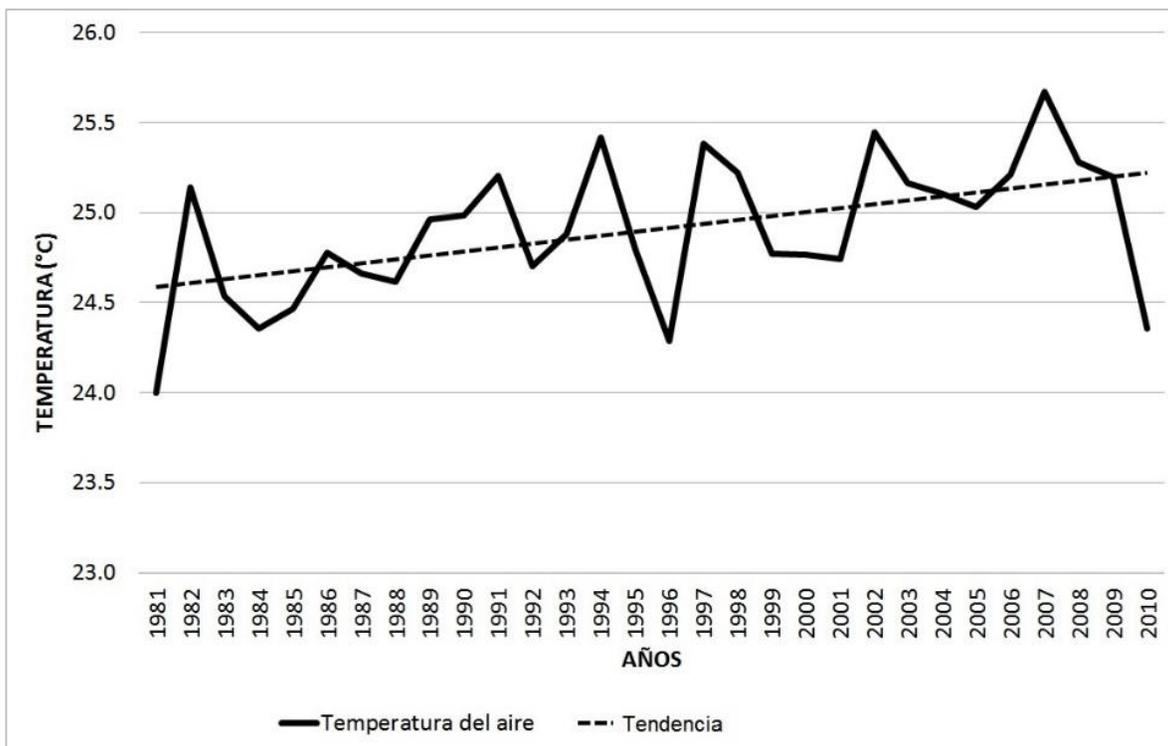


Figura 4. Comportamiento de la temperatura media anual en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán. Norma climatológica 1981-2010. Fuente: Datos de la estación meteorológica Güira de Melena del INSMET.

Tabla 2. Tendencia de la temperatura máxima, mínima y media mensual, estacional y anual según el estadígrafo Kendall-Mann en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán. Norma climatológica 1981-2010.

Meses	Temperatura media		Temperatura mínima		Temperatura máxima	
	Tau de Kendall	Alfa	Tau de Kendall	Alfa	Tau de Kendall	Alfa
Ene	0.446026	0.6556	0.51739	0.6049	1.03478	0.3008
Feb	0.749323	0.4537	0.51739	0.6049	0.785005	0.4325
Mar	1.427282	0.1535	0.677959	0.4978	1.462965	0.1435
Abr	1.195349	0.232	1.248872	0.2117	1.694898	0.0901
May	2.693996	0.0071	2.051719	0.0402	2.479903	0.0131
Jun	1.641375	0.1007	1.55217	0.1206	1.106144	0.2687
Jul	3.264909	0.0011	2.479903	0.0131	1.855467	0.0635
Ago	3.782299	0.0002	2.569108	0.0102	3.175704	0.0015
Sep	3.300591	0.001	2.94377	0.0032	1.462965	0.1435
Oct	2.212288	0.0269	2.479903	0.0131	1.677057	0.0935
Nov	-0.856369	0.3918	-1.141826	0.2535	-0.749323	0.4537
Dic	0.999098	0.3177	1.427282	0.1535	0.374662	0.7079
Período lluvioso	0.608	0.000	0.521	0.000	0.424	0.002
Período poco lluvioso	0.141	0.312	0.070	0.621	0.145	0.284
Anual	0.356	0.005	0.320	0.013	0.287	0.026

Fuente: Elaborado a partir de los datos de la estación meteorológica Güira de Melena del INSMET.

disminuido progresivamente, lo cual es consecuencia de la disminución de la oscilación térmica debido al aumento relevante de las temperaturas mínimas. Por otra parte, esto corrobora estadísticamente la persistencia de la sucesión de valores altos.

Dentro de las variables que componen el clima de un lugar, la lluvia es la más variable tanto espacial como temporalmente y depende principalmente de las características de la circulación atmosférica y la interacción de éstas con los factores físico-geográficas ([Pérez et al., 2010](#)); otro aspecto a tener en cuenta en el análisis de la precipitación, sobre todo de su tendencia, son los valores extremos máximos ocasionados por fenómenos que producen grandes precipitaciones (iguales o mayores de 100 mm en 24 horas), dado que está demostrado

que su ocurrencia no está relacionada con las condiciones climáticas de fondo, de manera que influyen en el volumen total de agua, pero no en las tendencias de las series cronológicas de extensión adecuada ([Planos, 2012](#)). Con relación a esto último, ante la existencia de valores anómalos es necesario analizar sus causas para contemplarlos o no en el análisis de las series cronológicas.

En la mayor parte del territorio cubano su marcha interanual oscila entre una temporada lluviosa (mayo a octubre), donde como promedio se acumula el 80 % del total anual y otra menos lluviosa (noviembre a abril), donde cae aproximadamente el 20 % restante ([Lecha et al., 1994](#)). Esta proporción en la distribución temporal depende en gran medida del comportamiento de la precipitación y está

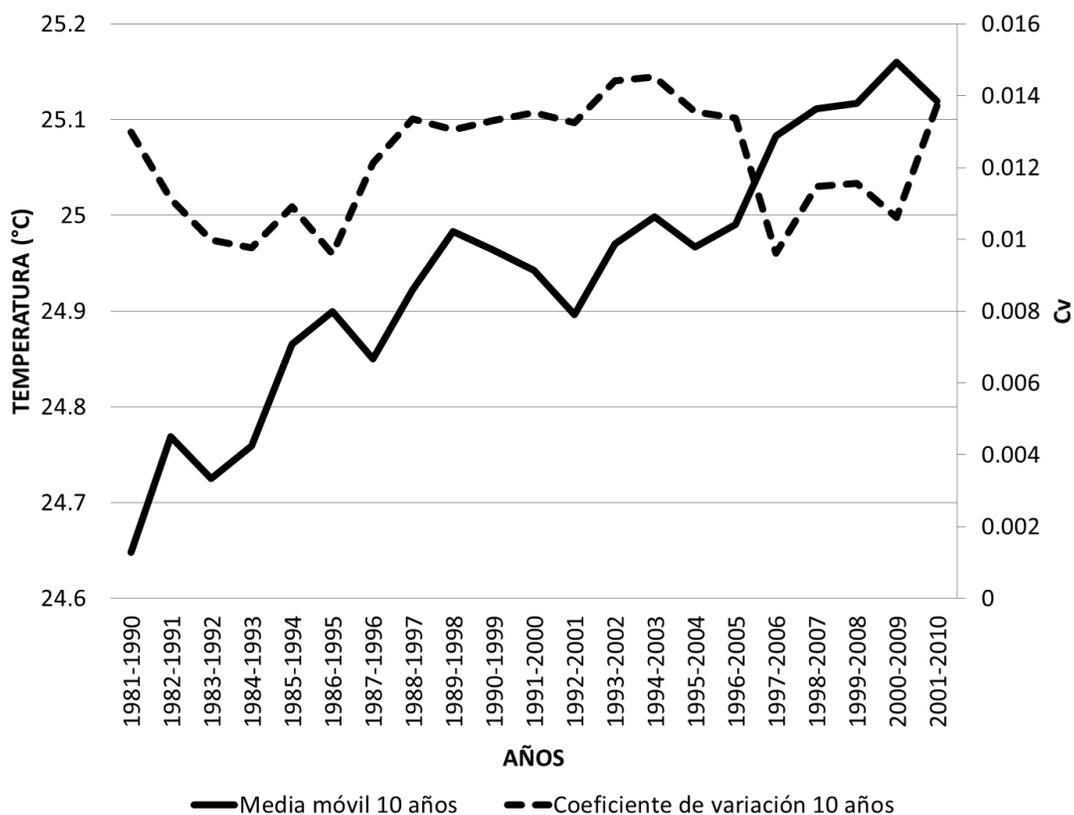


Figura 5. Media móvil de la temperatura media de 10 años y el correspondiente Cv en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán. Período 1981-2010. Fuente: Elaborado a partir de datos de la estación meteorológica Güira de Melena del INSMET.

vinculada a los procesos de intensificación y debilitamiento de los vientos de región nordeste, denominados alisios, cuya variación estacional es provocada por los cambios en posición e intensidad del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte de una estación a otra y que incrementan considerablemente el contraste entre las variables climáticas en ellas (Centella *et al.*, 1997) y en particular la lluvia.

El área de estudio, por encontrarse en la región occidental de Cuba, está más expuesta a la afectación de sistemas de la circulación atmosférica invernal (frentes fríos, bajas extratropicales) y los sistemas ciclónicos procedentes del Atlántico y del Golfo de Honduras. Su cercanía al continente norteamericano implica una mayor influencia extratropical en la época menos lluviosa, con una variabilidad más pronunciada en las condiciones

meteorológicas. Durante el período lluvioso, las características circulatorias están más vinculadas con las particularidades del flujo básico de la periferia del anticiclón subtropical y los sistemas de vientos locales, en interacción con las características físico geográficas del territorio (Pérez *et al.*, 2010). Según estudios realizados por Guevara *et al.* (1998), la brisa marina de ambas costas penetra hacia el interior, conllevando a la formación de una zona de convergencia central (ZCC), que desempeña un papel fundamental en la circulación local y en el desarrollo de la convección profunda, procesos muy vinculados a la presencia de lluvia en la zona que se estudia.

En el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán, en correspondencia con el comportamiento general de la lluvia en Cuba y las características físico geográficas de esta

área, los acumulados anuales medios alcanzan 1365 mm y los extremos mínimo y máximo, 970 mm y 1845 mm respectivamente. Las magnitudes de sus acumulados mensuales reflejan una acentuada estacionalidad, con un período estacional lluvioso de mayo a octubre, que acumula como promedio el 79.1 % del total anual con acumulados medios de 1071 mm y un período poco lluvioso de noviembre a abril donde se registran acumulados medios del orden de los 294 mm, que representan el 20.9 % restante. Un mínimo relativo intraestival en los acumulados de la lluvia, se produce en los meses de julio y agosto, reflejando el carácter bimodal de los mismos en los meses de la estación lluviosa. Los meses más secos son diciembre, enero y febrero, mientras que los más lluviosos son junio y septiembre (Figura 6).

La distribución espacial de los acumulados medios anuales de las lluvias (enero-diciembre) en el período 1981-2010, muestra un aumento regular a medida que crece la distancia a las costas hasta alcanzar sus valores máximos al norte del área de estudio. En las zonas costeras,

los totales medios pueden llegar a ser inferiores a los 1200 mm.

De igual forma, en el periodo poco lluvioso el incremento se produce hacia el noroeste, vinculado a la mayor exposición de esta zona a la afectación de frentes fríos y organismos extra tropicales, que son los responsables de los acumulados de lluvia que se registran en esta época del año. Los valores medios solo llegan a alcanzar los 294 mm, lo cual se asocia a la presencia, en gran parte del período invernal, de la frontera entre los vientos del Este y del Oeste, situación que determina la considerable disminución de las precipitaciones en esta época del año (Lecha *et al.*, 1987).

En el período lluvioso, igualmente los acumulados se incrementan en la medida que aumenta la distancia a las costas, ya que en zonas del interior del territorio es donde se concentran la mayor cantidad de precipitaciones a escala local en esta época del año, debido al efecto de la confluencia de las brisas de la costa norte y sur en horas de la tarde fundamentalmente. Los acumulados medios en este período son de 1110

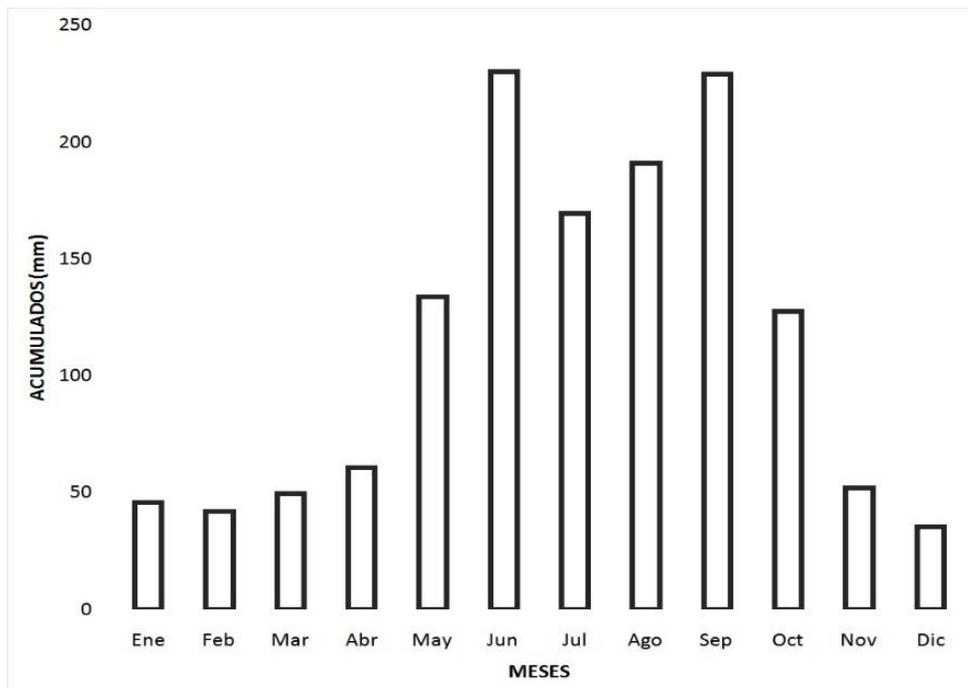


Figura 6. Acumulados de lluvia por meses en el tramo Artemisa-Quivicán para la norma climatológica 1981-2010. Fuente: Elaborados a partir de los datos del INRH.

mm como promedio, con registros inferiores a los 940 mm en las zonas costeras y superior a los 1150 mm al noreste de la zona de estudio.

El análisis de la variabilidad y tendencias de los períodos anual, lluvioso y poco lluvioso se realizó con las series de datos pluviométricos con homogeneidad restaurada. Como resultado del análisis de la tendencia global mediante el estadígrafo de Kendall-Mann en el período anual de la serie 1961-2010, la tendencia es casi inexistente y no estadísticamente significativa en ninguno de los casos. No obstante, es necesario decir que el signo de la Tau de Kendall es negativo. Sin embargo, si analizamos el período 1981-2010, aunque igualmente no estadísticamente significativa la tendencia de esta variable es al aumento.

La [Figura 7](#), muestra las medias móviles de la precipitación de 10 años y el coeficiente de variación (Cv) correspondiente de las series; en él se aprecia claramente entre los años 60 y

mediado de los 80 del siglo XX un período donde la variabilidad de la precipitación promedio de 10 años se mantuvo relativamente estable con poca variación del Cv; desde esta fecha hasta mediados de la década del 90 del siglo XX hubo un periodo de disminución de los acumulados de precipitación aparejado de una disminución del Cv lo que indica que hubo poca variación de los mismos. A mediados de los años 90, se aprecia un incremento en los acumulados de lluvia aparejado con un incremento del Cv, lo que demuestra que los contrastes entre los valores máximos y los mínimos son acentuados, hecho que se corresponde con el calificativo de un clima más extremo en los últimos años dado en [Planos et al. \(2013\)](#).

Igual que para el análisis anual, en el período lluvioso (mayo-octubre) la tendencia global en el período 1961-2010 es casi inexistente, aunque la Tau de Kendall indica un valor



Figura 7. Media móvil de 10 años y 20 años y su coeficiente de variación de los acumulados anuales en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán. Período 1961-2010. Fuente: Elaborado a partir de datos de los datos de pluviómetros del INRH.

negativo no estadísticamente significativo. Al analizar la media móvil de los acumulados de precipitación de 10 años con el correspondiente Cv, se nota un incremento a partir de la década de los 90 de los acumulados de precipitación, y aunque los valores del Cv son bastante estables, presentan una ligera tendencia al incremento. Este hecho puede estar indicando un incremento discreto de los acumulados de precipitación en el período lluvioso en los últimos años; esto se corrobora cuando analizamos la tendencia global de los acumulados de precipitación en dicho período entre 1981 y 2010. En todos los meses entre mayo y octubre (excepto agosto), la tendencia es al incremento (no estadísticamente significativo) (Tabla 3).

Como resultado del análisis para el período poco lluvioso (noviembre-abril) la Tau de Kendall indica una tendencia global al incremento de los acumulados y aunque no es estadísticamente significativa en el período 1961-2010, los valores-p son muy inferiores a

los del período anual y lluvioso, lo que significa que esta inclinación de la tendencia es mayor. La media móvil de 10 años de este período indica un leve pero continuo incremento de los acumulados de las precipitaciones en el período poco lluvioso, con una disminución paulatina del Cv. Es importante señalar que, desde mediados de los años 90, la media móvil comenzó a sufrir una disminución aparejado con un incremento paulatino del Cv, lo que puede explicar que la tendencia global en el período 1981-2010 sea a la disminución de los acumulados, aunque no estadísticamente significativa (Tabla 3).

En el período 1981-2010, tanto en el período anual como en el lluvioso, existen valores anómalos positivos muy por encima del límite superior de la serie anual, pues fueron años en los que afectaron a la región de estudio fenómenos meteorológicos que produjeron acumulados diarios mayores a 100 mm en varios días de esos años. Como parte del análisis de la calidad de las series, se

Tabla 3. Tendencia global de los acumulados de precipitación mensual, estacional y anual según el estadígrafo de Mann-Kendall en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán. Período 1981-2010.

Meses	Precipitación	
	Tau de Kendall	Alfa
Enero	-0.73	0.46
Febrero	-0.48	0.63
Marzo	-0.91	0.36
Abril	-0.02	0.99
Mayo	0.52	0.60
Junio	0.48	0.63
Julio	0.52	0.60
Agosto	-0.02	0.99
Septiembre	1.34	0.18
Octubre	0.23	0.82
Noviembre	-0.27	0.79
Diciembre	-0.02	0.99
Período lluvioso	0.11	0.46
Período poco lluvioso	-0.06	0.70
Anual	0.07	0.60

Fuente: Elaborado a partir de datos de los datos de pluviómetros del INRH.

sustituyeron los valores de los años por encima del límite superior de esta de dos formas; una suplantando el acumulado de dichos años por el valor medio de la serie 1981-2010 en cada pluviómetro afectado (Conjunto A) (OMM, 2006) y otra restándole al acumulado en dichos años los valores diarios de los eventos lluviosos que provocaron acumulados mayores o iguales a 100 mm en 24 horas (Conjunto B).

En los acumulados anuales en el período 1981-2010, sobresalen por encima del límite superior de la serie los años 1982, 1983, 1992, 2002 y 2005 y en el período lluvioso los años 1982 y 2002.

Para la serie original con la homogeneidad restaurada, la del Conjunto A y la del Conjunto B, la tendencia global de los acumulados anuales y en el período lluvioso es al incremento en todos los casos, con valores de la Tau de Kendall muy similares entre si y no estadísticamente significativa en ninguno de los casos (Tabla 4).

En el período poco lluvioso no existen valores que superen el límite superior de la serie, por lo que todos los análisis se harán solo con la serie original con la homogeneidad restaurada.

Teniendo en cuenta que la precipitación es la única fuente de agua en esta área, existe una correspondencia directa entre su comportamiento estacional y el balance hídrico. Se pueden diferenciar dos períodos que coinciden con el poco lluvioso (noviembre-abril, cuando predominan temperaturas más bajas, menor aporte de precipitaciones y menos

radiación solar) y el lluvioso (mayo-octubre, cuando se concentran los mayores acumulados de precipitación, las temperaturas más altas y una mayor incidencia de la radiación solar).

La lámina de escurrimiento promedio anual en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán es de 462 mm, de los cuales el 92% es aportado en el período lluvioso y el 8% por el período poco lluvioso (Tabla 5).

En el período lluvioso, se reportan los mayores valores de evapotranspiración potencial y real y de los acumulados de precipitación. La lámina de escurrimiento mensual promedio tiene dos máximos, uno en junio y otro en septiembre, meses de mayor aporte al acumulado anual, siendo este último mes el más significativo. En este período se concentra el mayor aporte al volumen potencial de los recursos hídricos en el año, ya que en él se concentran las mayores precipitaciones anuales, que superan en todos los meses (excepto en mayo) incluso los valores de evapotranspiración potencial.

En el período poco lluvioso como promedio, la evapotranspiración potencial es de 618 mm, encontrándose el valor mínimo en el mes de enero. La evapotranspiración real en este período como promedio es de 269 mm con un mínimo en el mes de diciembre. El volumen potencial de recursos hídricos para este período es marcadamente bajo con respecto al período lluvioso, en este período solo se registran como promedio 41 Hm³.

La tendencia general de la evapotranspiración real anual en el período

Tabla 4. Tendencia global de los acumulados de precipitación según el estadígrafo de Mann-Kendall en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán. Período 1981-2010

Serie		Anual	Período lluvioso
Homogeneidad restaurada	Tau de Kendall	0.0713	0.1034
	Alfa	0.5959	0.4458
Conjunto A	Tau de Kendall	0.0483	0.0887
	Alfa	0.7238	0.5153
Conjunto B	Tau de Kendall	0.0621	0.0985
	Alfa	0.6459	0.4684

Fuente: Elaborado a partir de datos de los datos de pluviómetros del INRH.

1981-2010 es al incremento, aunque no estadísticamente significativa. En el período lluvioso la tendencia de esta variable es igualmente al ascenso, solo estadísticamente significativa en mayo y agosto, no obstante el valor de la Tau de Kendall es mayor que en el período poco lluvioso, lo que está relacionado con la tendencia de la temperatura del aire en este período (Tabla 6).

En cuanto al balance hídrico, la tendencia anual y en el período lluvioso, es al incremento, mientras que en período poco lluvioso es a la disminución, aunque no estadísticamente significativo en ninguno de los casos, fundamente en los meses del período lluvioso cuando los valores de la Tau de Kendall son más elevados (Tabla 7). Este resultado se traduce en una tendencia al incremento en el

Tabla 5. Balance hídrico en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán. Período 1981-2010.

Variables	Período lluvioso (mayo-octubre)	Período poco lluvioso (noviembre-abril)	Anual (enero-diciembre)
Precipitación (mm)	1082	302	1384
Evapotranspiración potencial (mm)	867	618	1485
Evapotranspiración real (mm)	653	269	922
Lámina de escurrimiento (mm)	429	33	462
Volumen potencial de recursos hídricos w (hm ³)	531	41	572

Fuente: Elaborado a partir de datos de los pluviómetros seleccionados de la red del INRH y la estación meteorológica Güira de Melena del INSMET.

Tabla 6. Tendencia global de la evapotranspiración real mensual, estacional y anual según el estadígrafo de Mann-Kendall en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán. Período 1981-2010.

Meses	Tau de Kendall	Alfa
Enero	-0.124887	0.9006
Febrero	0.124887	0.9006
Marzo	-0.731482	0.4645
Abril	0.303298	0.7617
Mayo	2.836724	0.0046
Junio	0.374662	0.7079
Julio	1.052621	0.2925
Agosto	1.944672	0.0518
Septiembre	-0.410344	0.6816
Octubre	0.410344	0.6816
Noviembre	-0.588754	0.556
Diciembre	0.446026	0.6556
Período lluvioso	1.338077	0.1809
Período poco lluvioso	0.089205	0.9289
Anual	0.374662	0.7079

Fuente: Elaborado a partir de datos de los pluviómetros seleccionados de la red del INRH y la estación meteorológica Güira de Melena del INSMET.

Tabla 7. Tendencia global del balance hídrico mensual, estacional y anual según el estadígrafo de Mann-Kendall en el tramo hidrogeológico Artemisa-Quivicán. Período 1981-2010.

Meses	Tau de Kendall	Alfa
Enero	-0.874211	0.382
Febrero	-0.33898	0.7346
Marzo	-0.909893	0.3629
Abril	-0.089205	0.9289
Mayo	0.553072	0.5802
Junio	0.51739	0.6049
Julio	0.553072	0.5802
Agosto	-0.017841	0.9858
Septiembre	1.266713	0.2053
Octubre	0.196251	0.8444
Noviembre	-0.267615	0.789
Diciembre	-0.196251	0.8444
Período lluvioso	1.373759	0.1695
Período poco lluvioso	-0.553072	0.5802
Anual	0.624436	0.5323

Fuente: Elaborado a partir de datos de los pluviómetros seleccionados de la red del INRH y la estación meteorológica Güira de Melena del INSMET.

volumen potencial de los recursos hídricos anuales, pues las mayores reducciones son el período poco lluvioso el cual como norma solo acumula el 20.1% de los totales anuales por lo que no afecta en gran medida los mismos.

Conclusiones

La tendencia de la temperatura media del aire anual ha sido al aumento y es estadísticamente significativa, tanto en los valores máximos, mínimos y medios en el período 1981-2010. En todos los meses (excepto noviembre) la tendencia de la temperatura media del aire es al incremento, aunque solo estadísticamente significativa en los meses del período lluvioso (excepto junio).

La tendencia de los acumulados de precipitación anual de la serie 1961-2010, es casi inexistente y no estadísticamente significativa, aunque el signo de la Tau de Kendall es negativo. Sin embargo, si analizamos el período 1981-2010, aunque igualmente no estadísticamente significativa, la

tendencia de esta variable es positiva. En el período lluvioso (mayo-octubre) el análisis entre los años 1961-2010 arroja una tendencia global negativa no estadísticamente significativa, mientras que entre los años 1981-2010 es positiva igualmente no estadísticamente significativa, lo que puede estar relacionado con el incremento a partir de los años 90' de los acumulados de precipitación en este período. En el período poco lluvioso (noviembre-abril) entre los años 1961-2010, la tendencia global es al incremento de los acumulados (no es estadísticamente significativa, aunque los valores-p son muy inferiores a los del período anual y lluvioso), mientras que en el período 1981-2010 es negativa aunque no estadísticamente significativa, lo que puede estar relacionado con la disminución de los acumulado de precipitación en este período desde mediado de la década de los 90'.

La tendencia general de la evapotranspiración real en el período 1981-

2010 es al incremento, tanto anual como en ambos períodos estacionales, fundamentalmente en el período lluvioso, condicionado por el incremento significativo de los valores de la temperatura del aire en los últimos años.

Por todo lo antes expuesto, el volumen potencial de los recursos hídricos anuales tienen una tendencia global al incremento, pues las mayores reducciones son el período poco lluvioso el cual como norma solo acumula el 20.1% de los totales anuales por lo que no afecta en gran medida los mismos.

Referencias

- Sellers W. D. (1970). *Physical Climatology*. Instituto del Libro, La Habana, 272 pp.
- Budyco M. I. (1970). Comments on a global climatic model based on the energy balance of the earth-atmosphere system. *J. Appl. Meteor.*, 9, 310 pp.
- Budyco M. J. (1974). *Climate and life*. Academic Press. N.Y., 508 pp.
- Centella A., Naranjo L. y Paz Castro L. (1997). *Variaciones y cambios del clima en Cuba*. Instituto de Meteorología. 57 pp.
- Hargreaves G. and Samani Z. (1985). *Reference crop evapotranspiration for ambient air temperatura*. American Society of Agricultural Engineers. Chicago IL. United States of America. S96-99
- Guevara A.V., Campos A., León A. y Vega R. (1998). El Dique Sur de La Habana (Cuba) y su influencia en el comportamiento de elementos climáticos seleccionados. *Revista Cubana de Meteorología*. Volumen 11, No. 1, pp 93-100.
- Lecha L., Fernández A., Bueno J. y López R. (1987). Algunas particularidades del campo de viento y del régimen de precipitaciones durante mayo de 1979 en la región central de Cuba. *Reporte de Investigación No. 31*, Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba, 22 pp.
- Lecha, L., Paz, L. y Lapinel, B. (1994). *El Clima de Cuba*. Editorial Academia, La Habana. 186 pp.
- OMM No.100. (2011). *Guía de prácticas climatológicas*. ISBN 978-92-63-30100-0. Ginebra, Suiza. 128pp.
- Pérez R., Fonseca C., León A., Guevara V., Santana M., Lapinel B., Cutié V., Limia M. y Vega R. (2010). *Características y variaciones del clima en el sur de La Habana*. Informe científico. Proyecto: Segunda Comunicación de Cuba a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Instituto de Meteorología. La Habana. 74 pp.
- Planos E., Limia M., Vega R., Boudet D. y Hernández M. (2010) *Las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas en Cuba: Causas y características*. Programa Ramal “Análisis y pronóstico del tiempo y el clima terrestre y espacial”. Instituto de Meteorología. 242pp.
- Planos E. (2012). *Hidrología para meteorólogos*. Libro de texto Hidrometeorología. Carrera Licenciatura en Meteorología. INSTEC (en imprenta).
- Planos E., Vega R., Guevara A., Editores (2013) *Impactos del Cambio Climático y medidas de adaptación en Cuba*. Instituto de Meteorología, Agencia de Medio Ambiente. La Habana. Cuba. 430 pp. ISBN: 978-959-300-039-0.
- Rivero R. E. (2008). *Workbook of Climate Change Impacts Assessments in Agriculture: Basic Knowledge, Methodologies and Tools*, CCCCC / INSMET / Commonwealth Secretariat, Belmopan, 148 pp.
- Sneyers R. (1990). *Technical Note No. 143. On the Statistical Analysis of Series of Observations*. WMO No. 415, 192 pp.
- Trusov I. I., Izquierdo A., Díaz L. (1983). *Características espaciales y temporales de las precipitaciones atmosféricas en Cuba*.

Academia de Ciencias de Cuba, La Habana.
150 pp + 10 maps

Vega, R., V. Cutié y A. Centella (1987):
Análisis del comportamiento de los totales

de lluvia caída en Cuba sobre la base de una
clasificación de sequía. Informe Técnico.
Instituto de Meteorología, Cuba. 25 pp.