

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE Y DE LA ETP PARA UNA ZONA DEL CARIBE COLOMBIANO

Leonardo GÓNIMA, Melisa PÉREZ VILORIA

Departamento de Física y Electrónica. Grupo de Materiales y Física Aplicada. Universidad de Córdoba, Colombia

lgonima@correo.unicordoba.edu.co; meliperezv@hotmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza detalladamente la variabilidad climática, a escala local, de gran parte de la cuenca media y baja del río Sinú (Departamento de Córdoba-Caribe colombiano). Se seleccionaron series de datos (promedios mensuales) de la temperatura del aire T , entre 1968 y 2011, de cuatro estaciones meteorológicas representativas, las cuales fueron previamente sometidas a rigurosos análisis estadísticos y climáticos para evaluar su calidad. Posteriormente, se calcularon promedios anuales de T y con estos se estimó ETP (Thornthwaite modificado), para cada uno de los 44 años seleccionados. El análisis de variabilidad climática muestra que la zona de estudio está fuertemente influenciada por los fenómenos de El Niño y La Niña, identificándose además una tendencia al aumento de T y ETP desde 1968, relacionada con la ocurrencia del calentamiento global en dicha zona desde esa época y que responde a la gran intervención antrópica que ésta experimenta desde el año 1960. Se encontraron incrementos de T y ETP, calculados por medio de la tendencia lineal, diferentes para cada una de las estaciones seleccionadas, mientras que para la zona de estudio integrada el aumento de T fue de $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}$, equivalente a $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década, valor similar al reportado por la WMO a nivel global. Similarmente, la ETP calculada aumentó en 144 mm (9.2%) ó 33 mm/déc para los 44 años estudiados. Así mismo y con base en el análisis de tendencia, se determinó que no fue la década 2001-2010 la más caliente, sino la correspondiente a 1991-2000. Por otra parte, los promedios decadales calculados de T y ETP no explican completamente la gran variabilidad climática local y el efecto producido por el fenómeno del calentamiento global. Finalmente, un análisis estadístico más detallado de las tendencias temporales parciales de T y ETP, permitió identificar evidencias del posible inicio en 1974, del calentamiento global en la zona de estudio.

Palabras clave: Variabilidad climática, calentamiento global, temperatura del aire, evapotranspiración potencial, tendencias estadísticas.

ABSTRACT

In the present work was analyzed at local level, the climatic variability of a large part of the middle and lower basin of the Sinú river (Departamento de Córdoba-colombian Caribbean). Monthly mean data series of the air temperature T (1968-2011) of four representative meteorological stations were selected, which were previously undergoing rigorous statistical and climatological tests, in order to evaluate its quality. After calculation of annual mean data of T for each of the selected 44 years, ETP values (Thornthwaite modified) were estimated. The climatic

variability analysis shows that the study area is strongly influenced by the phenomena of El Niño and La Niña, being identified also a rising T and ETP trend since 1968, which is related to the global warming occurrence in this zone since that time, and that responds to the great anthropogenic intervention experienced from the year 1960. Different increments, calculated by means of linear trend, were found in T and ETP for each of the selected stations, while the increase of T for the integrated studied zone was 0.75 °C, equivalent to 0.17 °C per decade, value similar to that reported by the WMO on a global level. Similarly, the calculated ETP increased in 144 mm (9.2%) or 33 mm/dec during the studied 44 years. Likewise and based on trend analysis, it was determined that the 1991-2000 decade was the warmest and not the following 2001-2010. On the other hand, the calculated decadal averages of T and ETP do not explain completely the great local climatic variability and the effect produced by the global warming phenomena. Finally, a more detailed statistical analysis of the partial temporal tendencies of T and ETP allowed to identify in 1974, evidences of the possible beginning of the global warming in the studied zone.

Key words: Climatic variability, global warming, air temperature, potential evapotranspiration, statistical trends.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el estudio de la variabilidad climática ha adquirido una gran importancia al estar relacionada con alteraciones en el régimen climático de una región o zona en particular, que a la vez han comenzado a afectar negativamente la cobertura vegetal, la composición y el estado de los suelos, la disminución en la disponibilidad y calidad del agua, así como también a los patrones de vida de los animales. Como consecuencia de esta situación, diversos organismos internacionales, como por ejemplo, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), la FAO de las Naciones Unidas y la Organización Meteorológica Mundial (WMO), han venido estimulando y apoyando la realización de estudios sobre la variabilidad climática y sus implicaciones ambientales global (IPCC, 2007; Gerber et al., 2013; WMO, 2013).

En este sentido, la gran preocupación de la comunidad científica mundial por los cambios que está experimentando el clima a nivel global, regional y aún local, se está manifestando por un sinnúmero de investigaciones sobre la relación entre la variabilidad climática y el calentamiento global. Es así como varios de los estudios realizados sobre la variabilidad climática se han centrado en el análisis de la temperatura del aire T y del contenido de vapor de agua de la interfase suelo-vegetación. Una muestra de éstos es el de Pereira y Oregon-Pruitt (2004), los cuales utilizan T y la ETP de Thornthwaite (modificada) para la descripción y análisis de climas áridos. Vadillo-Fernández (2006), basándose en T, ETP y el balance de energía de Thornthwaite, clasifican climáticamente la región del Bierza en España. En su estudio sobre el seguimiento de la cobertura vegetal en España, García-Haro et al. (2009) clasificaron el país en 9 regiones húmedas, a partir de la determinación de variables biofísicas de la vegetación (LAI y Fracción de Cobertura Vegetal) derivadas de imágenes de satélite procesadas, el análisis de T y la precipitación pp, el cálculo de la ETP de Thornthwaite y de índices de humedad y aridez. Olcina-Cantos y Martínez-Ibarra (2009) realizaron un diagnóstico del clima y su relación con el desarrollo socioeconómico de la Provincia de Alicante (España), a partir del análisis de variables climáticas como T, pp y ETP de Thornthwaite, entre otras. Para la clasificación de regiones áridas en el mundo Maliva y Missimer (2012) utilizaron el esquema de Thornthwaite, basado en el cálculo de la ETP, para calcular índices de humedad y aridez. Recientemente, Coppola et al.

(2014) hacen un análisis de las variaciones en la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Po (Italia), como consecuencia del calentamiento global, mediante el cálculo de la escorrentía superficial, la ETP de Thornthwaite, el punto de fusión y la infiltración de agua por la superficie.

En Colombia se han venido realizando estudios sobre la variabilidad climática, la mayor parte de ellos realizados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), utilizando modelos globales y regionales para el análisis de T, pp y el contenido de humedad del aire (Pabón, 2008; Ruiz-Murcia, 2010). Respecto al estudio de la evapotranspiración potencial, Hurtado-Moreno (2000) utilizó varios métodos de estimación de dicha variable, entre ellos el de Thornthwaite, para describir la distribución y el comportamiento de ésta a escala nacional. A nivel regional y debido a la gran complejidad climática existente en la cuenca media y baja del río Sinú, Gónima (2009) encontró evidencias del calentamiento global en el Caribe colombiano, representadas por variaciones de T, pp, ETP (Thornthwaite) y el déficit hídrico. Por otra parte, Padilla (2011) analizó el efecto del calentamiento global (variaciones de T, pp, ETP de Thornthwaite y el déficit hídrico) sobre la producción agrícola del cultivo de arroz en el Distrito de Riego de la Doctrina (Departamento de Córdoba). Recientemente, en Pérez y Gónima (2014) se demuestra la importancia de la relación entre la variabilidad climática (T y contenido de humedad del aire) y el calentamiento global a escala local en zonas tropicales.

Con base en lo anterior, en el presente trabajo se analiza climática y estadísticamente el comportamiento, entre 1968 y 2011, de la temperatura del aire y la evapotranspiración potencial (Thornthwaite modificada) de la interfase suelo-vegetación, para determinar la variabilidad climática local en gran parte de la cuenca media y baja del río Sinú.

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Zona de estudio

La Fig. 1 muestra parte de la cuenca media y baja del río Sinú, con una extensión aproximadamente plana de 2800 km² y una altura media de 20 msnm. Para la realización del estudio se seleccionaron las estaciones meteorológicas de Turipaná, El Salado, Lórica y La Doctrina, como representativas del clima de la zona (IDEAM, 2005). La zona que tiene temperatura media de 27.5 °C y precipitación anual de 1300 mm, está caracterizada por ser parte de la llanura de inundación del río Sinú y un extenso complejo lagunar (ciénagas), cuya cobertura vegetal, que se extiende aproximadamente al 85% del área de estudio, está constituida principalmente por pastos (ganadería) y en menor extensión por cultivos tropicales diversos y áreas pequeñas de bosques (CVS et al., 2006).

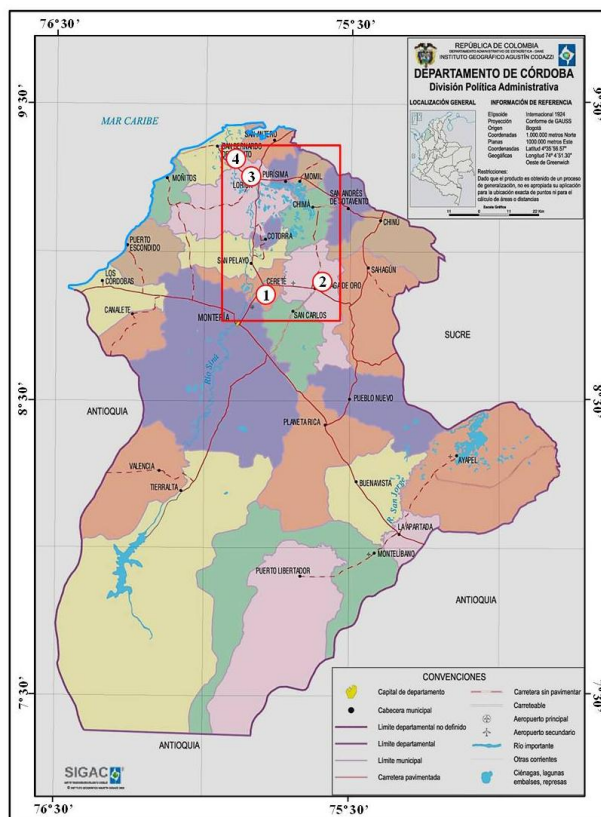


Fig. 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio (rectángulo en rojo) y localización de las estaciones meteorológicas seleccionadas: 1. Turipaná, 2. El Salado, 3. Lorica y 4. La Doctrina (Pérez y Gónima, 2014).

2.2 Datos y procedimientos utilizados

El contenido de vapor de agua en atmósferas tropicales es de gran importancia para la descripción y análisis de la variabilidad climática de una región o zona en particular (New *et al.*, 1999; Pérez y Gónima, 2014). Por consiguiente, al ser este contenido dependiente de la evaporación directa de los ríos y humedales, de la evaporación de agua del suelo y de la transpiración de la vegetación existentes en la zona de estudio seleccionada, las variaciones a escala local de T y del contenido de agua de la interfase suelo-vegetación, determinado a través de ETP, fueron utilizadas para el estudio de la respectiva variabilidad climática. De acuerdo con lo anterior, una vez adquiridas las series de datos mensuales de T, entre 1968 y 2011 (44 años), de las estaciones meteorológicas de Turipaná, El Salado, Lorica y La Doctrina, se procedió a someterlas a un riguroso análisis de calidad de acuerdo con la metodología de la WMO (valores medios, diferencias, desviaciones estándar, análisis de rachas, persistencia, homogeneidad, test t de Student, correlación de Spearman, análisis de regresión, filtros). Después de completar las series de datos por medio de análisis de regresión entre estaciones meteorológicas, se calcularon

nuevas series de promedios mensuales multianuales y anuales de T, las cuales fueron evaluadas nuevamente respecto a su calidad estadística, por medio del proceso descrito anteriormente.

Definidas las series de datos de T óptimas para el estudio, se procedió al cálculo de la evapotranspiración potencial ETP mensual de la interfase suelo-vegetación, utilizando la ecuación de Thornthwaite (Fernández, 1995), modificada introduciendo en ella T_{ef} en vez de la temperatura del aire media mensual T (Camargo et al. 1999):

$$ETP = 16 \left(\frac{10 T_{ef}}{W} \right)^{\alpha} K \quad (1)$$

T_{ef} : temperatura media mensual efectiva en °C, $T_{ef} = 0.72[T + \Delta T]$.

ΔT : amplitud media mensual de la temperatura del aire en °C.

W: índice de calor anual en función de T_{ef} .

$$\alpha = 0.492 + 0.0179W - 0.0000771W^2 + 0.000000675W^3$$

K: factor de corrección que incluye la latitud geográfica y la duración del día para cada mes del año.

Entonces, a partir de los datos anuales calculados de T y ETP, conjuntamente con acumulados anuales de la precipitación pp (1971-2010), verificados en su calidad estadística y completados posteriormente por medio de los métodos mencionados anteriormente, se realizó el estudio de la variabilidad climática en la cuenca media y baja del río Sinú (1968-2011), basado en el análisis del comportamiento multianual de las variables mencionadas. En concordancia con lo anterior, para identificar la tendencia temporal de las variables climatológicas seleccionadas, se utilizaron un filtro de suavizado (Savitzky-Golay), análisis de tendencia lineal, cálculo de incrementos y promedios decadales durante los 44 años, así como un análisis estadístico detallado (correlación de Spearman y distribución t de Student) para la identificación de tendencias temporales parciales de T y ETP.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El análisis de la variabilidad climática de la zona de estudio a partir de T y ETP, se dividió en dos secciones: la primera relativa a cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas y la segunda respecto a la zona integrada como un todo. Se debe anotar que el análisis y los resultados obtenidos para T, en cada una de las secciones mencionadas, se extrajo de lo expuesto en Pérez y Gónima (2014) sobre esta variable.

3.1 Estaciones meteorológicas seleccionadas

Uno de los aspectos importantes que contribuyen al análisis de la variabilidad climática de una determinada región o zona geográfica, es la identificación del régimen climático imperante en ella. En cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, el clima está caracterizado por tener dos periodos secos (diciembre-marzo y junio-julio) y dos lluviosos (abril-mayo y septiembre-noviembre), con amplitudes de T que varían entre 0.8 °C y 1.1 °C. Por otra parte, si se analiza el comportamiento de T y ETP durante el periodo de tiempo entre 1968 y 2011 (Fig. 2),

se observa claramente que ambas variables muestran una marcada tendencia al aumento (datos, filtro de Savitzky-Golay y tendencia lineal), lo cual es un indicativo de la existencia del fenómeno del calentamiento global que está experimentando la zona de estudio.

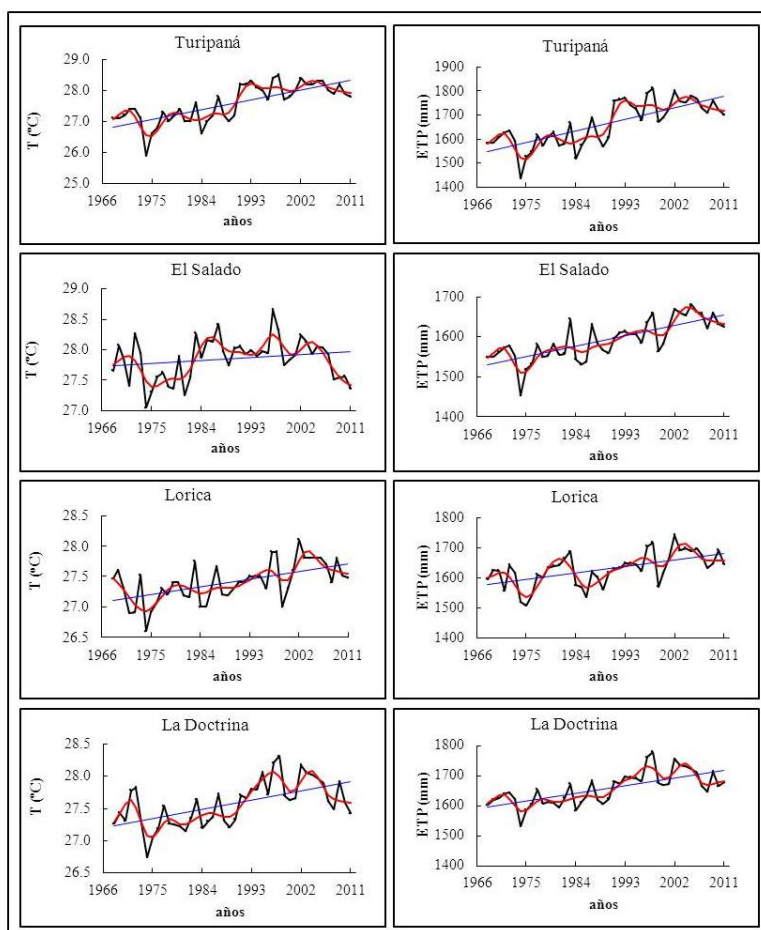


Fig. 2. Variación interanual (1968-2011) de la temperatura del aire T y la evapotranspiración potencial ETP para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas (línea roja: filtro de Savitzky-Golay de orden 8, línea azul: tendencia lineal).

Analizando más detalladamente la Fig. 2, se puede determinar que existe una estrecha relación entre la ocurrencia del fenómeno ENSO con los máximos y mínimos de T y ETP, para todas las estaciones meteorológicas. La Tabla 1 muestra la relación existente entre el comportamiento temporal del índice ONI (NOAA, 2014) y el de las variables mencionadas.

Fenómeno	ONI	T	ETP
El Niño	0.8-2.4	77%	70%
La Niña	0.9-2.0	77%	85%

Tabla 1. IDENTIFICACIÓN DEL FENÓMENO ENSO EN LA ZONA DE ESTUDIO (1968-2011).

De acuerdo a la Tabla 1, el estado de la atmósfera (T) como el de la interfase suelo-vegetación (ETP) se ven afectados por el fenómeno ENSO en la mayoría de los casos. En particular en la zona de estudio, la ETP es más sensible a La Niña que a El Niño, debido a que al precipitarse una mayor cantidad de lluvia y disminuir T (características de La Niña) sobre la interfase suelo-vegetación, ésta aumenta en forma relativamente rápida su capacidad de absorber radiación solar, disminuyendo consecuentemente la evapotranspiración posterior. Respecto a El Niño, la capacidad de retención de agua de los suelos durante el año, contrarresta algunas veces el incremento parcial de T producida por dicho fenómeno, impidiendo el respectivo aumento de ETP.

Continuando con el análisis de la variabilidad climática de la zona de estudio, la Tabla 2 muestra la magnitud de los cambios experimentados por T y ETP durante los 44 años seleccionados.

Estación	ΔT (°C)	ΔT (%)	ΔETP (mm)	ΔETP (%)
Turipaná	1.49	5.5	288	14.7
El Salado	0.23	0.8	105	8.2
Lorica	0.61	2.2	122	7.7
La Doctrina	0.68	2.5	144	9.3

Tabla 2. DIFERENCIAS ABSOLUTAS Y PORCENTUALES DE LA TEMPERATURA DEL AIRE ΔT Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL ΔETP (1968-2011), CALCULADAS MEDIANTE LAS ECUACIONES DE TENDENCIA LINEAL (LÍNEA AZUL DE LA FIG. 2).

Los diferentes incrementos de T y ETP para cada una de las estaciones (Tabla 2), que son representativos de la diversidad climática existente en la zona de estudio seleccionada, están relacionados con los diferentes grados de intervención antrópica sobre el territorio, representado principalmente por la desecación de humedales y por la magnitud de la precipitación en cada lugar en particular. En la estación de Turipaná el mayor incremento de T y ETP, comparado con las demás, es la consecuencia de drásticos cambios en el uso del suelo realizados para la implementación de la actividad agrícola y ganadera, ocurridos desde los años 60's (Pérez, 2012). Al secarse los humedales por deforestación o por la construcción de canales artificiales de drenaje, se producen dos fenómenos radiativos que explican el incremento de T y ETP en dicha estación: de una parte, aumenta la cantidad de radiación solar que es reflejada por los suelos emergidos, mientras que por otra, éstos al absorber mayor cantidad de radiación solar incidente que las antiguas superficies de agua o forestadas, también emiten una mayor cantidad de calor proveniente de su interior, calentando la atmósfera y produciendo al mismo tiempo una mayor evapotranspiración de la interfase. Respecto a la estación El Salado, a pesar de que este lugar también ha sido intervenido antrópicamente, es la magnitud de la precipitación la que explica el menor incremento en T y ETP. Para esta estación la lluvia acumulada durante el periodo de tiempo 1971-2010 fue equivalente a 55536 mm, mientras que para Turipaná, Lorica y La Doctrina representó 51372 mm, 52211 mm y 52630 mm, respectivamente. En concordancia con el IPCC (2013), los resultados anteriores sobre la variabilidad climática de la zona de estudio, son una demostración de que el fenómeno del calentamiento global es un hecho en ella y de que éste no sólo afecta el estado de la atmósfera, sino también las condiciones ambientales de la interfase suelo-vegetación.

Otro de los métodos utilizados para el análisis de la variabilidad climática y que es recomendado por la WMO (2013), es el cálculo de promedios decadales de las variables climatológicas definidas para tal fin. Los resultados obtenidos a partir de los promedios decadales de T y ETP se muestran en la Tabla 3.

Estación	Variable	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010
Turipaná	T (°C)	27.0	27.2	28.1	28.1
	ETP (mm)	1579	1599	1741	1750
	pp (mm)	11453	13179	12871	13869
El Salado	T (°C)	27.6	27.9	28.0	27.9
	ETP (mm)	1547	1571	1606	1652
	pp (mm)	13433	13909	13233	14961
Lorica	T (°C)	27.1	27.2	27.5	27.7
	ETP (mm)	1586	1607	1643	1682
	pp (mm)	11254	14056	12450	14451
La Doctrina	T (°C)	27.3	27.4	27.9	27.9
	ETP (mm)	1611	1625	1700	1702
	pp (mm)	11785	13832	12939	14074

Tabla 3. PROMEDIOS DECADEALES CALCULADOS DE LA TEMPERATURA DEL AIRE T Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL ETP, Y PRECIPITACIÓN DECADAL ACUMULADA PP (1971-2010).

Analizando la Tabla 3, se observa que para todas las estaciones, se presentó un aumento gradual de T y ETP desde 1971 hasta 2000, mientras que entre 2001 y 2010 no se identificó un patrón climático común en T (invarianza, aumento y disminución indistintamente), aunque la ETP siguió incrementándose respecto a las décadas anteriores. Respecto a la década 1991-2000 para todas las estaciones, la Tabla 3 muestra que ésta fue la más caliente de todas y en la cual la precipitación disminuyó respecto a las décadas 1981-1990 y 2001-2010, lo que se confirma observando detalladamente el comportamiento cualitativo de T y ETP en las dos últimas décadas de tiempo (Fig. 2). El que el mayor aumento de T se haya presentado durante la década 1991-2000 y no entre 2001 y 2010 como lo afirma la WMO (2013), demuestra que los promedios decadales no son suficientemente representativos de la gran variabilidad climática local existente en cada una de las estaciones seleccionadas. En particular, la década 2001-2010 fue la más lluviosa de todo el periodo de tiempo analizado (1971-2010), lo cual estuvo en cierta medida determinado por la ocurrencia de intensos fenómenos La Niña (ONI: -1.5) en 2007-2008 y 2010-2011, este último causantes de grandes y graves inundaciones en el país (IDEAM, 2011).

Por otra parte y como complementación de la discusión anterior se calcularon, a partir de los resultados de la Tabla 3, las variaciones de T y ETP entre 1971 y 2010 para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas (Tabla 4).

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE Y DE LA ETP
PARA UNA ZONA DEL CARIBE COLOMBIANO

Estación	ΔT (°C)		ΔETP (mm)	
	promedio decadal	tendencia lineal	promedio decadal	tendencia lineal
Turipaná	1.11	1.57	171	197
El Salado	0.30	0.35	105	122
Lorica	0.62	0.76	96	118
La Doctrina	0.61	0.73	91	113

Tabla 4. VARIACIONES DE T Y ETP ENTRE 1971 Y 2010, CALCULADAS POR MEDIO DE LOS PROMEDIOS DECADALES Y DE LAS ECUACIONES DE TENDENCIA LINEAL (LÍNEA AZUL DE LA FIG. 2).

Comparando los resultados de ΔT y ΔETP calculados por medio de los dos métodos (Tabla 4), se observa que los obtenidos a partir de los promedios decadales de la Tabla 3 son significativamente menores que los estimados por medio de la tendencia lineal de la Fig. 2. Esto podría interpretarse como una nueva confirmación de la inadecuada representatividad de los promedios decadales para la descripción de la variabilidad climática de zonas tropicales a escala local.

Finalmente, se obtuvo otro resultado a partir del estudio temporal parcial de las variables T y ETP, relacionado con la identificación del posible inicio del calentamiento global en la zona de estudio alrededor del año 1974. Analizando cualitativamente las series de datos de T y ETP con un mayor detalle (Fig. 2), se identificaron dos tendencias temporales diferentes: una negativa (disminución) entre 1968 y 1974, y otra positiva (aumento) desde 1975 y hasta 2011. Dicho comportamiento coincide con la ocurrencia, entre 1973 y 1974, del evento más intenso de La Niña de toda la historia (ONI: -2.0), reportado por NOAA (2014). Este resultado, aunque no permite asegurar completamente la validez de la identificación del posible inicio del fenómeno mencionado, debido a que desafortunadamente no existen datos climatológicos anteriores a 1968 en las estaciones seleccionadas, puede considerarse como relativamente probable de acuerdo al análisis estadístico realizado para verificar la independencia de las series de datos de T y ETP entre 1968-1974 y 1975-2011 (Tabla 5).

Estación	T		ETP	
	P(0.05)	τ	P(0.05)	τ
Turipaná	0.000370	0.045751	0.001213	0.084967
El Salado	0.080652	-0.045751	0.0049411	0.150326
Lorica	0.01389	0.019607	0.0000116	0.346405
La Doctrina	0.012337	0.058823	0.0001371	0.215686

Tabla 5. VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL PARCIAL DE T Y ETP ENTRE 1968-1974 Y 1975-2011 (P-VALOR Y COEFICIENTE DE CORRELACIÓN T DE KENDALL).

A excepción del p-valor de T para El Salado (Tabla 5), los demás p-valores y todos los τ coeficientes se encuentran por debajo del umbral de significancia estadística de 0.05 para el p-valor y 0.61 para τ (Förster y Rönz, 1979), lo que demuestra que las tendencias parciales de cada

una de las series de datos de T y ETP (1968-1974 y 1975-2011) son estadísticamente independientes.

3.2 Zona de estudio integrada

El comportamiento climático de la zona de influencia de las cuatro estaciones meteorológicas seleccionadas (Fig. 1) fue analizado integralmente, promediando los valores anuales de T y ETP de las cuatro estaciones mencionadas. De esta forma, el área que abarca la zona integrada, que es de aproximadamente 2800 km² de extensión, podría ser representativa de un modelo climático regional (50 km x 50 km).

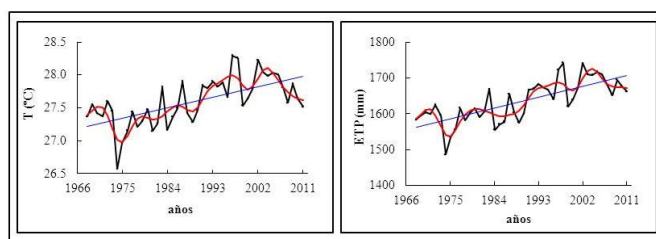


Fig. 3. Variación interanual (1968-2011) de la temperatura del aire T y la evapotranspiración potencial ETP para la zona integrada (línea roja: filtro de Savitzky-Golay de orden 8, línea azul: tendencia lineal).

El análisis cualitativo de la Fig. 3 corrobora la tendencia al aumento de T y ETP (datos, filtro y tendencia lineal) durante el periodo de tiempo de 44 años. El incremento calculado entre 1968 y 2011, por medio de las ecuaciones de tendencia lineal (línea azul: Fig. 3), que para T fue de 0.75 °C (2.7%) ó 0.17 °C/déc, y para ETP de 144 mm (9.2%) o 33 mm/déc, demuestran la existencia del fenómeno del calentamiento global en la zona de estudio. Así mismo, las series de datos de T permiten identificar el 85% de los eventos El Niño y La Niña 85%, mientras que en ETP se reconocen el 77% de El Niño y el 85% de La Niña, lo que demuestra la fuerte dependencia de la variabilidad climática de la zona de estudio integrada con el fenómeno ENSO.

A diferencia de lo obtenido por medio del cálculo de los promedios decadales para cada una de las cuatro estaciones (Tabla 3), de acuerdo a la Tabla 6 la zona integrada muestra un aumento continuo de T y ETP entre las décadas 1971-1980 y 2001-2010, lo que significaría que la década 2001-2010 fue la más caliente del periodo 1971-2010. Aunque este resultado coincide con lo expuesto por la WMO (2013) respecto a esta última década, la tendencia real de los datos de T y ETP mostrada en la Fig. 3 (disminución), demuestra nuevamente la deficiente representatividad de los promedios decadales en la descripción de la variabilidad climática de la zona de estudio (integrada).

Variable	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010
T (°C)	27.3	27.4	27.8	27.9
ETP (mm)	1581	1601	1672	1697

Tabla 6. PROMEDIOS DECADALES CALCULADOS DE LA TEMPERATURA DEL AIRE T Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL ETP DE LA ZONA DE ESTUDIO INTEGRADA.

Respecto a las variaciones decadales de T y ETP entre 1971 y 2010 (Tabla 6), éstas fueron para T de 0.6 °C (0.15 °C/déc) y de 116 mm (29 mm/déc) para ETP. La tasa calculada de aumento para T de 0.15 °C/déc, al ser negativa la tendencia de T entre 2001 y 2010 (Fig. 3), pierde validez como representativa del comportamiento de dicha variable durante el periodo de tiempo mencionado.

Finalmente y de acuerdo con el análisis de las dos tendencias parciales de la Fig. 3 (1968-1974 y 1975-2011), verificadas con los tests de independencia estadística correspondientes (p-valores de 0.03027 y 0.00303 para T y ETP, y τ coeficientes de 0.00653 y 0.03267 para T y ETP), también se pudo identificar el posible inicio del fenómeno del calentamiento global en la zona de estudio integrada, a partir del año 1974.

4. CONCLUSIONES

El análisis de variabilidad climática de los promedios anuales de la temperatura del aire y la evapotranspiración potencial, previa evaluación estadística de la calidad de las respectivas series de datos originales, demuestra que no solamente cada una de las estaciones meteorológicas por separado sino también la zona de estudio integrada (2800 km²), se encuentran bajo la influencia del fenómeno del calentamiento global posiblemente causado por la fuerte intervención antrópica (deseccación de humedales). Este fenómeno, que entre 1968 y 2001 significó un incremento de la temperatura del aire variable para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, representa para la zona de estudio integrada un aumento de 0.75 °C (tendencia lineal), equivalente a 0.17 °C por década, valor similar al reportado por la WMO para el Planeta.

Al mismo tiempo, los resultados muestran que esta variabilidad está estrechamente relacionada con la ocurrencia del fenómeno ENSO, el cual modifica temporalmente el clima de la zona de estudio. En particular, para la zona de estudio integrada, el comportamiento de la temperatura del aire y de la evapotranspiración potencial permitió reconocer, respectivamente, el 77% y 70% de los eventos El Niño y el 77% y 85% de los de La Niña. Aunque en todos los casos los eventos El Niño estuvieron relacionados con altas temperaturas parciales del aire y La Niña con fuertes precipitaciones causantes de inundaciones, el análisis realizado demuestra claramente que el fenómeno del calentamiento global muestra su propia dinámica climática independientemente de la variabilidad representada por el ENSO.

Al calcular los incrementos de la temperatura del aire y la evapotranspiración potencial para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, se observa la gran diversidad climática local existente en la zona de estudio. El mayor efecto del calentamiento global se observa en la interfase suelo-vegetación, a través de la evapotranspiración potencial, al mostrar esta variable los mayores incrementos porcentuales en el periodo de tiempo analizado, en comparación con los respectivos incrementos de la temperatura del aire.

El análisis cualitativo por décadas de las dos últimas de ellas, 1991-2000 y 2001-2010, mostró que la década 1991-2000 fue la más caliente del periodo 1971-2010, no sólo para las cuatro estaciones por separado, sino también para la zona de estudio integrada, en contraposición con lo expuesto por la WMO sobre que fue 2001-2010 la década más caliente del mismo periodo de tiempo a nivel mundial. Este resultado nuevamente confirma las particularidades climáticas locales de la zona de estudio seleccionada y la insuficiente representatividad de dichos promedios en la adecuada descripción del fenómeno del calentamiento global existente en ésta.

Finalmente, el posible inicio del fenómeno del calentamiento global en la zona de estudio, coincidente con el evento más intenso de La Niña de la historia (ONI de -2.0), sucedido entre

1973 y 1974, fue identificado cualitativa y estadísticamente, tanto para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas, como para la zona integrada.

5. BIBLIOGRAFIA

- Camargo, A.P.; Marin, F.R.; Sentelhas, P.C. y Picini, A.G. (1999). Ajuste da equacao de Thornthwaite para estimar a evapotranspiracao potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 7, pp 251–257.
- Coppola, E.; Verdecchia, M.; Giorgi, F.; Colaiuda, V.; Tomassetti, B. y Lombardi, A. (2014). Changing hydrological conditions in the Po basin under global warming. *Science of the Total Environment*, pp 1-14.
- CVS; PNN; CARSUCRE y Universidad de Córdoba (2006). Fases de prospección y formulación del Plan de Ordenamiento y Manejo Integral de la Cuenca Hidrográfica del Río Sinú (POMCA-RS). Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge (CVS), Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN), Corporación Autónoma Regional de Sucre (CARSUCRE) y Universidad de Córdoba, Montería.
- Fernández, F. (1995). *Manual de climatología aplicada*. Ed. Síntesis, Madrid.
- Förster, E. y Rönz, B. (1979). *Methoden der Korrelations- und Regressionsanalyse*. Verlag die Wirtschaft, Berlin.
- García-Haro, F. J.; Moreno, A., Pérez-Hoyos; A., Gilabert, M. A.; Meliá, J.; Belda, F.; Poquet, D.; Martínez, B. y Verger, A. (2009). Seguimiento de la cubierta vegetal en la península ibérica a partir de sensores de nueva generación y su interrelación con variables climáticas. *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible, Proceedings XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, pp 365-368.
- Gerber, P. J.; Steinfeld, H.; Henderson, B.; Mottet, A.; Opio, C.; Dijkman, J.; Falcucci, A y Tempio, G. (2013). *Hacer frente al cambio climático a través de la ganadería – Evaluación global de las emisiones y las oportunidades de mitigación*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma.
- Gónima, L. (2009). Evidencias del calentamiento global en el Caribe Colombiano. *Meteorología Colombiana*, 13, pp 1-10.
- Hurtado-Moreno, G. (2000). *Caracterización agroclimática de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá.
- IDEAM (2005). *Atlas Climático de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá.
- IDEAM (2011). *Boletín informativo sobre el monitoreo del fenómeno de "La Niña"*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Boletín número 30, Bogotá.
- IPCC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Intergovernmental Panel on Climate Change Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra.
- IPCC (2013). *Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policymakers*. http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf
- Maliva, R. y Missimer Th. (2012). *Arid lands water evaluation and management*. Beck Fachbuchhandlung, Alemania.
- NOAA (2014). *ENSO cycle: recent evolution, current status and predictions*. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/enso_evolution-status-fcsts-web.pdf

- New, M.; Hulme, M. y Jones, P. (1999). Representing 20th century space-time climate variability. I: Development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, 12, pp 829-856.
- Olcina-Cantos, J. y Martínez-Ibarra, E. (2009). Cambio climático: efectos en el territorio alicantino. Universidad de Alicante, DT 2009-4.
- Pabón, J. (2008). Escenarios de cambio climático para 24 regiones de Colombia. Informe presentado en el marco del proyecto Integrated National Adaptation Pilot (INAP). Conservación Internacional – Departamento de Geografía (Universidad Nacional de Colombia), Bogotá.
- Padilla, M. (2011). Definición de indicadores de cambio climático para la cuenca baja del río Sinú: Distrito de Riego de la Doctrina. Tesis de Maestría, Universidad de Manizales, Manizales.
- Pereira, A. R. y Oregon-Pruitt, W. (2004). Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 66, pp 251–257.
- Pérez, M. (2012). Nuevas evidencias del calentamiento global en el Caribe colombiano. El Cambio Global: su expresión e impactos en Colombia, Memorias del X Ciclo Anual de Conferencias. Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Pérez, M. y Gónima, L. (2014). El contenido del vapor de agua de la atmósfera como indicador del calentamiento global en una zona del caribe de Colombia. *Cuadernos de Investigación Geográfica* (en prensa).
- Ruiz-Murcia, J. F. (2010). Cambio Climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011-2100). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá.
- Vadillo-Fernández, L. (2006). Acuerdo específico de colaboración entre el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para la restauración ambiental de la región del Bierzo. Ministerio de Educación y Ciencia (España).
- WMO (2013). *The global climate 2001–2010: a decade of climate extremes*. World Meteorological Organization, WMO-No. 1103, Ginebra.