

Dinámica de la precipitación, la temperatura y la razón de aridez (1973-2011) en un escenario de cambio global en la isla de la vieja Providencia, Colombia: ¿qué está cambiando?

Jorge Ruiz*

University of California, Santa Barbara - Estados Unidos

Nicolás Molano-González**

Universidad del Rosario, Bogotá - Colombia

Resumen

Se hizo un análisis estadístico de la tendencia de la precipitación, temperatura media mensual y la razón de aridez anual para el periodo 1973-2011, en Providencia Isla, Colombia. Los dieciséis datos mensuales faltantes se imputaron con un modelo SARIMA. Los resultados sugieren que la precipitación no presenta tendencia, mientras que su varianza inequívocamente está en aumento. La temperatura muestra una pendiente pronunciada hasta 1981 y la prueba de Mann-Kendall exhibe una tendencia positiva y altamente significativa para toda la serie, aunque no según la prueba de Dickey-Fuller. La evidencia de la varianza de temperatura va en aumento. En el caso de la razón de aridez anual, la demostración de tendencia es contradictoria y no se observó efecto alguno de El Niño Southern Oscillation (ENSO).

Palabras clave: cambio climático, Colombia, El Niño, precipitación, Providencia Isla, razón de aridez, temperatura.



DOI: [dx.doi.org/10.15446/rcdg.v26n1.56019](https://doi.org/10.15446/rcdg.v26n1.56019)

RECIBIDO: 18 DE NOVIEMBRE DEL 2014. ACEPTADO: 19 DE NOVIEMBRE DEL 2015.

Artículo de investigación sobre el impacto del cambio climático a micro-escala en la temperatura, la precipitación y la razón de aridez en la isla de Providencia. Se establece un método para abordar el ubicuo problema de datos faltantes.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO: Ruiz, Jorge, y Nicolás Molano-González. 2017. "Dinámica de la precipitación, la temperatura y la razón de aridez (1973-2011) en un escenario de cambio global en la isla de la vieja Providencia, Colombia: ¿qué está cambiando?" *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 26 (1): 25-35. doi: 10.15446/rcdg.v26n1.56019.

* Dirección postal: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Grupo de Investigación Caldas, Escuela de Ciencias Sociales, Área de Geografía, Edificio Central, oficina 301, Avenida Central del Norte n.º 39-155, Tunja, Boyacá. Correo electrónico: jorge.ruiz@uptc.edu.co, jorge.ruiz@geog.ucsb.edu
ORCID: 0000-0003-0376-8608.

** Dirección postal: Centro de Estudio de Enfermedades Autoinmunes (CREA), Escuela de Medicina y Ciencias de la Salud, Universidad del Rosario, calle 12 C n.º 6-25 Bogotá, Colombia. Correo electrónico: nicolas.molano@urosario.edu.co
ORCID: 0000-0001-7002-8795.

Dinâmica da precipitação, da temperatura e da razão de seca (1973-2011) num cenário de mudança global na ilha da velha Providencia, Colômbia: o que está mudando?

Resumo

Foi realizada uma análise estatística da tendência da precipitação, da temperatura média mensal e da razão de seca anual para o período de 1973-2011 na Ilha de Providência (Colômbia). Os dezesseis dados mensais faltantes foram coletados com um modelo com SARIMA. Os resultados sugerem que a precipitação não apresenta tendência, enquanto sua variação inequivocamente está em aumento. A temperatura mostra uma inclinação pronunciada até 1981 e o teste Mann-Kendall exibe uma tendência positiva e altamente significativa para toda a série, embora não segundo o teste Dickey-Fuller. A evidência da variação de temperatura está em aumento. No caso da razão de seca aridez anual, a demonstração de tendência é contraditória e não foi observado efeito algum do El Niño Southern Oscillation (ENSO).

Palavras-chave: Colômbia, El Niño, mudança climática, precipitação, Ilha de Providencia, razão de seca, temperatura.

Precipitation, Temperature and Dryness Ratio (1973-2011) in the island of Vieja Providencia, Colombia in a Global Warming Scenario: What is Changing?

Abstract

The article examines the statistical analysis of mean monthly precipitation and temperature and the annual dryness ratio for the period 1973-2011 in Providencia Isla, Colombia, in order to look for significant trends. 16 missing monthly values were imputed using a SARIMA model. Results suggest that there was no significant trend in precipitation, although its variance has undoubtedly increased. Temperature showed a pronounced increase from 1973 to 1981 and the Mann-Kendall test exhibited a positive and highly significant trend for the entire study period although the Dickey-Fuller test was non-significant. Temperature values also displayed increasing variability. Analysis of the Annual Dryness Ratio trend produced contradictory results, and no ENSO effect was observed.

Keywords: climate change, Colombia, El Niño, precipitation, Providencia Isla, dryness ratio, temperature.

Introducción

El Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC 2014) sugiere que los eventos extremos como sequías prolongadas o precipitaciones elevadas van a ser más comunes. Este aumento de variabilidad afectará el ciclo del agua, como lo subrayan Chaouche et ál. (2010). Asimismo, el IPCC (2014) es taxativo respecto al aumento de temperatura durante las últimas décadas. Este cambio tendrá un impacto en la ecología, incluida la humana. Lo anterior se colige de cara a que la precipitación y la temperatura son los parámetros climáticos más importantes para la presencia de la biota (Lovejoy 2010). Los cambios de temperatura y precipitación afectan además la fenología de los bosques. Con el aumento de la temperatura del aire aumenta la temperatura del suelo y eso lleva a una reducción del C del suelo y a un aumento del CO₂ atmosférico (Bond-Lamberty y Thomson 2010). El aumento de la temperatura está asociado a una mayor evapotranspiración (Abtey y Melese 2013). Adicionalmente, el aumento de la temperatura del suelo aumenta exponencialmente la respiración y la descomposición de este (Raich y Schlesinger 1992). En otras palabras, nos enfrentamos a un bucle de retroalimentación positiva respecto al C, del suelo a la atmósfera. No menos importante es el hecho que el aumento de la temperatura afecta a los microorganismos con un pico en 27,5 °C y menor actividad microbiana a temperaturas tanto menores como mayores (Ramos y Zúñiga 2008). Lo anterior, a su vez, necesariamente afectará otros ciclos y la biota como su distribución, sin lugar a dudas, será otra; así, se sugiere un reto sin precedentes para la biogeografía.

El presente estudio pretende establecer si existen cambios, a la luz del calentamiento global, que se puedan observar en las series cronológicas mensuales de precipitación y temperatura, anuales para la razón de aridez. Este último es controlado por el clima (Milly 2001) y para efectos del presente estudio se operacionaliza siguiendo a Budyko (1974) como la razón de evapotranspiración potencial sobre la precipitación. Para este trabajo, las hipótesis nulas o H₀ son las siguientes:

1. Las series mensuales de precipitación y temperatura y la razón de aridez anual exhiben una tendencia estacionaria respecto al tiempo.
2. La varianza anual para temperatura y precipitación ha permanecido constante durante la serie observada.
3. Finalmente, ni los fenómenos de El Niño o La Niña han tenido efecto alguno sobre la razón de aridez.

A la luz del calentamiento global, es importante conocer y mostrar una aproximación estadística con un estudio de caso de lo que está ocurriendo en dos indicadores climáticos tan importantes para la ecología como lo son precipitación y temperatura, y la razón de aridez anual como indicador compuesto de estos dos. Finalmente, en términos metodológicos, es importante mostrar con un ejemplo cómo abordar el problema de datos faltantes en una serie, común en las estaciones meteorológicas en países en desarrollo.

Materiales y métodos

Providencia es un archipiélago colombiano en el Caribe occidental, con las siguientes coordenadas geográficas: 13° 21' N y 81° 21' W, localizado a 714 km al noroccidente de Cartagena de Indias en Colombia continental y a 230 km de América Central. Su área es de tan solo 22,2 km², comprendidos entre las islas de Providencia y Santa Catalina; esta última de tan solo 1,2 km². Estas dos islas fueron originalmente una sola, llamada Santa Catalina por los españoles y habitada permanentemente por puritanos ingleses desde diciembre de 1629 y rebautizada "Providence". En el cuello arenoso que unía los dos extremos de la isla, los puritanos ingleses construyeron un canal en el siglo XVII que dividió a la isla en dos. Lo anterior de cara a la preocupación por una invasión española motivada por las actividades de piratería, lo que finalmente ocurrió (Kupperman 1992; Parsons 1956). La isla es un volcán extinto del mioceno (Geister 1992), de andesita, basalto (Kerr 1978; Proctor 1950), e incluso caliza coralina (Parsons 1956); con una abrupta topografía cuya cima más alta es de 365 m. El ecosistema dominante es el Bosque Seco Tropical (BsT) (IAVH 1998; Ruiz y Fandiño 2007; Ruiz, Fandiño y Chazdon 2005a) aunque quedan algunos relictos de manglar, sobre todo en jurisdicción del Parque Nacional Old Providence y McBean Lagoon (Ruiz et ál. 2005b).

Se tomaron los datos de precipitación y temperatura de la estación meteorológica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ubicada en el aeropuerto El Embrujo de Providencia, desde julio de 1973 a septiembre del 2011, no obstante, para las cifras anuales se presentan tan solo los cálculos con base de 1974 a 2009, una ventana de observación de 36 años. La serie, por tratarse de más de tres décadas, es lo suficientemente larga para evaluar el cambio climático. Empero, la precipitación presentaba datos incompletos para nueve meses y la temperatura, por su parte, tenía siete meses

de datos faltantes. Con el propósito de determinar si la serie posee algún tipo de tendencia, se hizo necesario imputar los datos faltantes en ambas series. Para esto se realizaron pronósticos ajustando un modelo *Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average* —en adelante, SARIMA— en R (R Core Team 2014) a la subserie de datos de precipitación anteriores al dato faltante. Esto se justifica de cara a que las series tanto de precipitación como de temperatura se caracterizan por ser estacionales, como se observará más adelante. Así, para el primer dato faltante, enero de 1988, se ajustó un modelo SARIMA con todos los datos anteriores y con base en ese modelo se realizó un pronóstico para la fecha requerida. Para el segundo dato faltante, junio de 1988, se procedió de la misma manera, ajustando un modelo sarima con todos los datos anteriores, incluyendo la primera imputación, y con base en el modelo seleccionado se realiza un pronóstico para imputar el valor faltante en esta fecha. En el caso en el que los datos faltantes son consecutivos, estos se estiman como pronósticos bajo el mismo modelo usando los datos completos anteriores a los faltantes. Se procedió así sucesivamente para los demás datos faltantes en ambas series.

Una vez completada la serie de precipitación y temperatura se procedió al cálculo de la razón de aridez anual. Esta última mide el estrés hídrico del medio ambiente. Hay varias razones disponibles, pero para efectos del presente estudio se calculó una siguiendo a Thaiutsa y Granger (2015), que es la razón de la evapotranspiración potencial —en adelante, ETP— sobre la precipitación. Esto quiere decir que a mayores niveles de la razón de aridez, mayor estrés hídrico. La ETP fue acuñada por Thornthwaite (1948) como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación. Holdridge (1967) introdujo el concepto de biotemperatura por vez primera con miras a extrapolarlo a distintas latitudes, con los parámetros que esta contaba por debajo del punto de congelación y por encima de los 30 °C. Toda vez que no hay temperaturas de 0 °C o inferiores, como es el caso de Providencia, la temperatura media anual es equiparable con la biotemperatura “ t^{bioH1} ”. Holdridge (1987) introdujo una modificación para el cálculo de la biotemperatura con la siguiente fórmula (el H_2 es introducido por los autores para distinguir la biotemperatura H_1):

Ecuación 1

$$t^{\text{bioH2}} = \frac{t \text{ media } ^\circ\text{C} - (0.3) (\text{°latitud}) (t \text{ media } ^\circ\text{C} - 24)^2}{100}$$

Donde:

t^{bioH2} = biotemperatura

$t \text{ media}$ = temperatura media anual

La ETP se obtiene siguiendo el protocolo de Holdridge como el producto de la biotemperatura por la constante 58,93 (Yin y Brook 1992). De tal forma se obtuvieron dos estimados del ETP H_1 y H_2 para los 37 años de la serie con base en las temperaturas medias anuales; estas últimas, a su vez, arrojaron dos estimados de la razón de aridez anual H_1 y H_2 , con base en las precipitaciones medias anuales. A la serie completa de precipitación y temperatura, así como a la razón de aridez H_1 y H_2 se les calculó la estadística descriptiva y la prueba de Grubbs (1950) para detectar datos extremos. Esta última se llevó a cabo en Excel con la hoja de cálculo escrita por Rustad (2015).

Debido a la naturaleza estacional de las series y a la necesidad de obtener una serie completa de precipitación (razón de aridez y temperatura), se aplicó la prueba de Dickey-Fuller que tiene como hipótesis nula que existe al menos una raíz unitaria en la serie, lo cual se asocia a una tendencia no estacionaria (Mahadeva y Robinson 2009; Said y Dickey 1984).

La selección del modelo para el cálculo de la tendencia se realizó con la función *Autoregressive Integrated Moving Average* —en adelante, ARIMA— del paquete *forecast* en R, en él se exploran los posibles valores de los parámetros del modelo SARIMA y con base en el criterio de información de Akaike (1974), como medida de la calidad relativa de este, se selecciona el modelo más parsimonioso. Una vez imputados los datos de la serie se procedió a realizar la prueba de raíz unitaria aumentada de Dickey-Fuller. Bajo la hipótesis de que en algún momento el comportamiento de la precipitación, la razón de aridez y la temperatura cambiaran, en términos de tendencia, se realizó un análisis de subseries con el propósito de buscar una fecha a partir de la cual pudiera detectarse alguna tendencia. Para tal efecto se diseñó un programa en R (R Core Team 2014) que retiraba los datos de precipitación y temperatura mensual de atrás hacia adelante, hasta obtener una última serie de doce meses (de julio del 2010 a julio del 2011); a las subseries resultantes, cada vez más recientes, se les aplica las pruebas de Mann-Kendall (Mann 1945) y Dickey-Fuller (Dickey y Fuller 1979), con el objetivo de detectar alguna tendencia creciente en la serie. Las pruebas de estacionalidad de las series se llevaron a cabo en el programa R y se tomó un nivel alfa de significancia del 5% para aceptar o rechazar la hipótesis nula.

Para poner a prueba la hipótesis de que la varianza anual de las precipitaciones, temperatura y razón de aridez anual es estacionaria, se calcularon en R (R Core Team 2014) las varianzas para cada año entre 1974 y 2010, y se construyó una serie temporal con estas varianzas. Adicionalmente, se estudió el posible efecto de los fenómenos de El Niño y La Niña sobre la razón de aridez anual, por medio de un análisis de varianza a una vía en donde la variable de respuesta es la razón de aridez anual y el factor son los años identificados por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA 2012) como años “El Niño” y “La Niña”.

Resultados

El modelo SARIMA permitió imputar los dieciséis datos faltantes, cabe resaltar 1988 con cinco datos faltantes de precipitación media mensual y 2010 con cinco datos faltantes de temperatura media mensual. Durante los 36 años de la serie, el clima de Providencia presentó una temperatura promedio de 27,6 °C y una precipitación de 1.631,9 mm anuales (tabla 1). Según la prueba de Grubbs (1950), ninguno de los datos fue identificado como extremo. No obstante, al calcular la razón de aridez, la mínima precipitación observada en 1988 tiene como resultado que ambos datos son extremos, con más de 2,5 desviaciones estándar de la media. Este año es particular ya que exhibe el mayor número de meses faltantes de información en precipitación (cinco en total).

La razón de aridez promedio es de 1,08 si se usa la igualdad entre la temperatura media anual y la biotemperatura y de 1,8 si se utiliza la ecuación 1 mencionada anteriormente (tabla 1). En cualquiera de los dos casos, siguiendo a Trewartha (1954), la isla de Providencia se podría categorizar como de clima mayormente seco, por exhibir una razón de aridez superior a 0,9.

A pesar de la imputación de los datos no fue posible un pleno ajuste de un modelo ARIMA a la serie de precipitación media mensual ya que los residuales del modelo nunca cumplieron los supuestos de este, sobre todo las pruebas de normalidad fueron sistemáticamente rechazadas. A primera vista, la serie de precipitación media mensual parece ser estacional (figura 1). Al realizar la prueba de Mann-Kendall se obtuvo un p-valor de 0,22395, con lo cual no se puede rechazar la hipótesis nula, en este caso, se acepta que la serie de precipitación es estacionaria. En otras palabras, no puede aceptarse la hipótesis alterna de una tendencia en cuanto a la precipitación media mensual. Adicionalmente, la prueba de raíz unitaria aumentada de Dickey-Fuller arrojó un p-valor menor a 0,01, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula de presencia de raíz unitaria, es decir, la serie es estacionaria, lo que confirma el resultado de la prueba anterior. En el caso de las subseries de precipitación, la prueba de Mann-Kendall nunca fue rechazada, mientras que la de Dickey-Fuller fue aceptada (p-valor de 0,0636) desde noviembre del 2008 y mostró una tendencia positiva.

Tabla 1. Estadística descriptiva para la precipitación media anual, temperatura y razón de aridez H1 y H2 (referirse al texto para cada uno) y pruebas de tendencia de los valores medios mensuales y de varianza de la temperatura, precipitación y razón de aridez H1 y H2 en la isla de Providencia, Colombia (1974-2010)

Variable/ Estadístico	Media	Mínima	Máxima	Desviación Estándar	Prueba de tendencia para los valores medios mensuales		Prueba de varianza para los valores anuales		
					Mann- Kendall	Dickey -Fuller	Mann- Kendall	Dickey- Fuller	Modelo
Precipitación media anual en mm	27,5	26,4	28,0	0,4	0,22395	<0,01	0,016691**	0,06877**	IMA(1,1)**
Temperatura media anual en °C	1.712,5	996,9	2.653,3	421,7	<0,0001**	<0,01	0,47999	0,08301**	ARI(3,1)**
Razón de aridez H1	1,1	0,6	2,8	0,4	0,037568**	0,08669**	n.a.	n.a.	IMA (1,1)**
Razón de aridez H2	1,8	0,5	4,9*	0,8	0,66603	0,3348**	n.a.	n.a.	

* Denota que este dato es extremo según la prueba de Grubbs.

** Denota que la serie no es estacionaria.

n.a. = no aplica.

De otro lado, se notan cambios en la cantidad de la precipitación, tanto menores como mayores, toda vez que las pruebas de Mann-Kendall (p-valor = 0,016691) y de Dickey-Fuller (p-valor = 0,06877) confirman respectivamente la presencia de una tendencia positiva en la prueba de la varianza de la precipitación (figura 2 y tabla 1). Esta tendencia fue confirmada al ajustar un modelo *Integrated Moving Average* —en adelante, IMA— de parámetros (1,1), el cual cumplió con todos

los supuestos del modelo. El modelo ajustado es el siguiente: sea V_t la varianza de las precipitaciones en el año t y sea Z_t una variable aleatoria distribuida $N(0, \sigma)$. Entonces:

Ecuación 2

$$V_t = V_{t-1} + Z_t - 0,9262 * Z_{t-1}$$

Donde σ^2 estimado es 104055614.

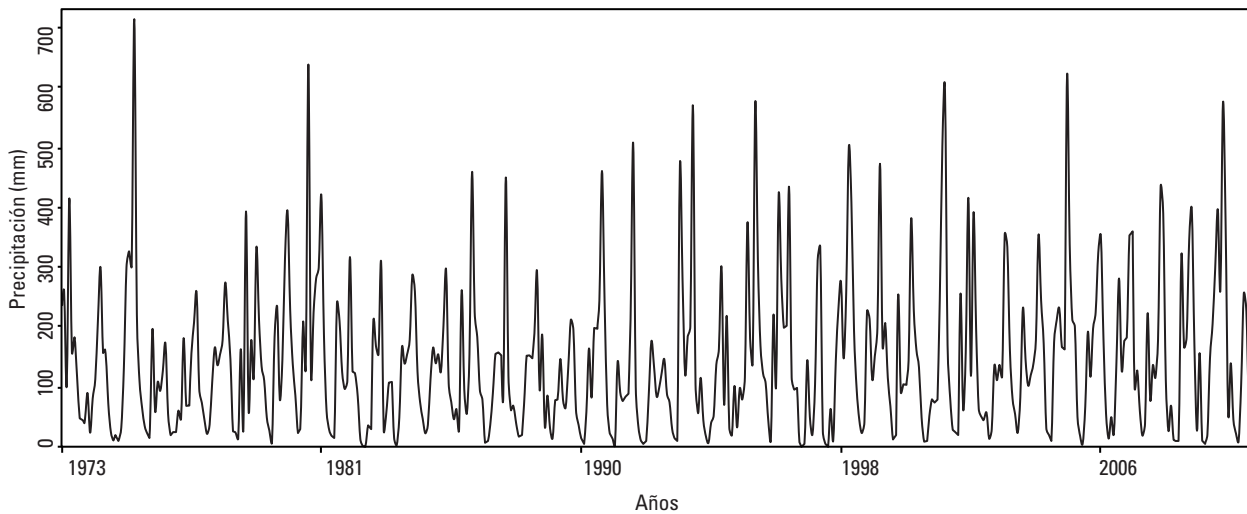


Figura 1. Serie cronológica de precipitaciones medias mensuales, agosto de 1973 a julio del 2011. Datos: estación meteorológica del IDEAM en el aeropuerto El Embrujo de Providencia Isla, con datos imputados. Nota: la serie no presenta tendencia alguna estadísticamente significativa a un nivel alfa del 5%.

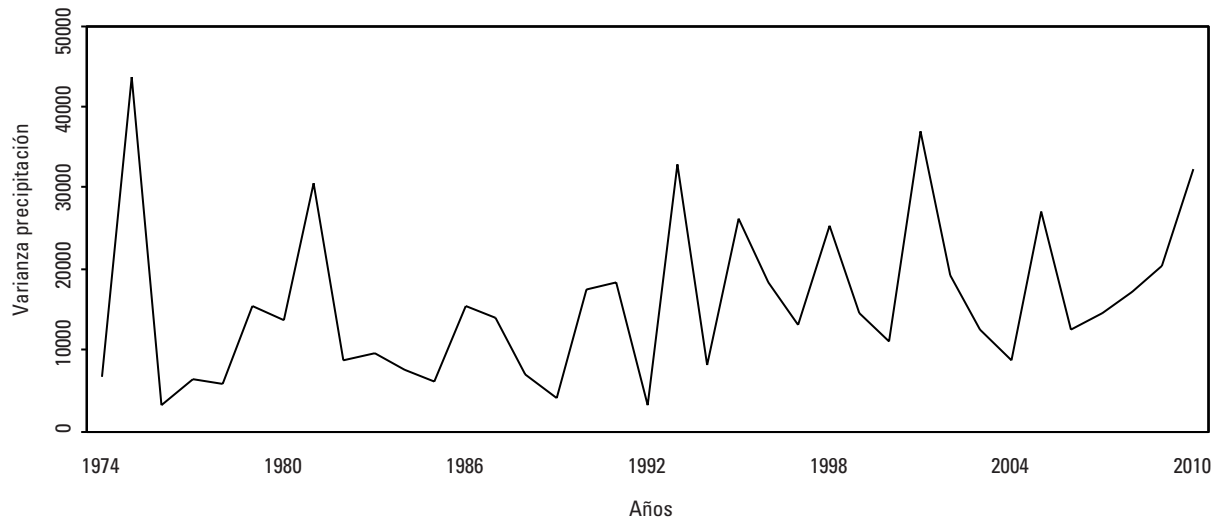


Figura 2. Serie temporal de las varianzas anuales de precipitación, agosto de 1973 a julio del 2011. Datos: estación meteorológica del IDEAM en el aeropuerto El Embrujo de Providencia Isla. Nota: tendencia positiva y estadísticamente significativa según las pruebas Mann-Kendall (p-valor = 0,016691) y de Dickey-Fuller (p-valor = 0,06877).

La temperatura y la precipitación se caracterizan a simple vista por ser estacionales (figuras 1 y 3). Adicionalmente, la temperatura muestra que está en aumento y con una pendiente pronunciada hasta aproximadamente 1981 (figura 3). Desde 1978 no se vuelven a observar temperaturas medias anuales por debajo de los 27 °C. Al realizar la prueba de Mann-Kendall se obtuvo un p-valor menor a 0,0001 con lo cual se puede rechazar la hipótesis de estacionalidad de la serie (tabla 1). El análisis de series quebradas de temperatura muestra que si se consideran los datos a partir de enero de 1981 en adelante no se detecta tendencia. Esta última vuelve a ser detectada considerando los datos a partir de abril del 2002 y desaparece una vez se consideran los datos a partir de junio del 2003. Finalmente, vuelve a ocurrir tendencia al considerar los datos a partir de agosto del 2010 (es decir, que el último año la temperatura parece aumentar). Esto puede indicar la presencia de periodos súbitos de aumento de las temperaturas seguido de periodos de estacionalidad. No obstante, la prueba de Dickey-Fuller (p-valor <0,01) sugiere la carencia de tendencia en la serie. De igual forma, las evidencias para la serie de varianzas anuales de temperatura son contradictorias. La prueba de Mann-Kendall (p-valor = 0,47999) no endosa tendencia, mientras que la de Dickey-Fuller (p-valor = 0,08301) sí lo hace. Empero, esta serie pudo ser ajustada a un modelo *Autoregressive*

Integrated—en adelante, ARI— de parámetros (3,1) el cual cumplió con todos los supuestos del modelo, revelando una tendencia creciente en la serie. El modelo ajustado es el siguiente:

Sea V_t la varianza de las precipitaciones en el año t y sea Z_t una variable aleatoria distribuida $N(0, \sigma)$. Entonces:

Ecuación 3

$$V_t = 2V_{t-1} - V_{t-2} - 0,7048 (V_{t-1} - V_{t-2}) - 0,5557 (V_{t-2} - V_{t-3}) - 0,4022 (V_{t-3} - V_{t-4}) + Z_t$$

Donde $\hat{\sigma}^2$ estimado es 0,03041.

La varianza de la temperatura, al igual que la precipitación, exhibe una tendencia asociada a un modelo ARI de parámetros (3,1) (figura 4). En otras palabras, la variación en la temperatura está aumentando. Cabe destacar que el parámetro que determina la no estacionalidad en un modelo ARIMA (p, d, q) es el parámetro d, el cual determina el orden de las diferencias que deben ser aplicadas para volver estacionaria la serie. En ambos casos (varianza de temperatura y varianza de precipitación) este parámetro es 1, lo cual indica que una diferenciación de primer orden debe ser aplicada a la serie para volverla estacionaria, señalando así la tendencia creciente de la serie, tabla 1.

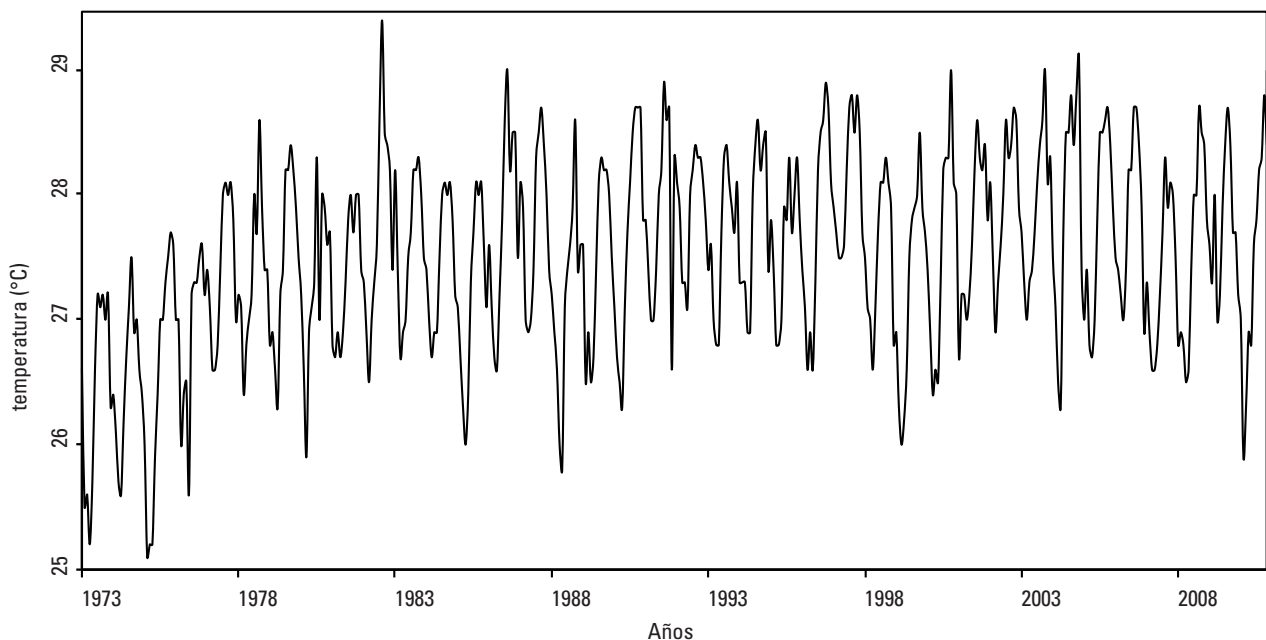


Figura 3. Serie cronológica de temperatura media mensual, agosto de 1973 a julio del 2011.

Datos: estación meteorológica del IDEAM, Aeropuerto el Embrujo, Providencia isla, con datos imputados.

Nota: tendencia significativa según la prueba Mann-Kendall $p < 0,0001$.

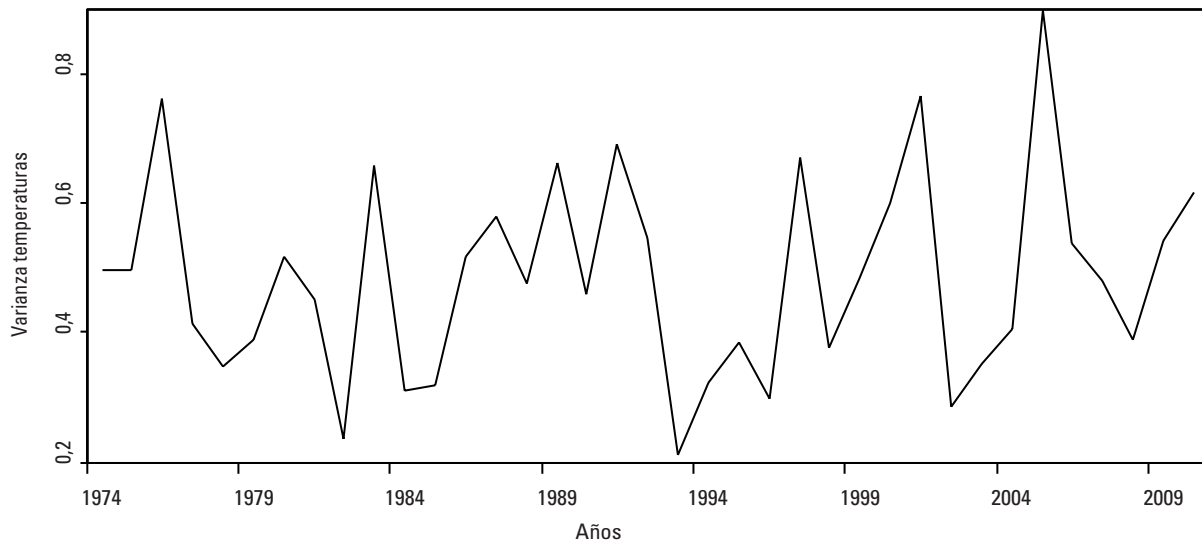


Figura 4. Varianza de la serie de temperatura para la serie cronológica de 1974 a 2010. Datos: estación meteorológica del IDEAM, Providencia Isla. Nota: la serie tiene tendencia asociada a un modelo ARI de parámetros (3,1) y es estadísticamente significativa según la prueba Dickey-Fuller $p = 0,08301$.

Finalmente, el análisis de la serie anual de la razón de aridez H_1 sugiere (Mann-Kendall: p -valor de 0,376; Dickey-Fuller: p -valor = 0,867) que hay tendencia negativa, esto es, que la razón de aridez ha ido disminuyendo (tabla 1 y figura 5). Enseguida se ajusta un modelo IMA (1,1) que cumple con todos los supuestos del modelo. El modelo ajustado es el siguiente: sea S_t la razón de aridez en el año t y sea Z_t una variable aleatoria distribuida $N(0, \sigma)$. Entonces:

Ecuación 4

$$S_t = 2S_{t-1} + S_{t-2} + Z_t - 0,8678 * Z_{t-1}$$

Donde σ^2 estimado es 0,0683.

La tendencia observada indica que la sequedad ha ido disminuyendo a través del tiempo. Por su parte, los resultados de la razón de aridez H_2 muestran que no hay tendencia según la prueba Mann-Kendall, pero sí es significativa para Dickey-Fuller y lo que es más grave, con tendencia positiva, en franca contradicción a lo anteriormente encontrado.

La prueba de Box-Pierce (p -valor 0,8904) indica que los datos se pueden considerar como una muestra independiente de una distribución (i.i.d), en otras palabras, no se presenta autocorrelación temporal, por lo cual se puede realizar una ANOVA para determinar si hay efecto

o no por parte de los fenómenos de El Niño y La Niña sobre la razón de aridez. No se encontraron diferencias significativas de esta última entre estos dos fenómenos (p -valor = 0,5286). También se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y coincide en no detectar diferencias significativas (p -valor = 0,2307). Por calcularse la razón de aridez anualmente, a este no se le llevó a cabo la prueba de estacionalidad de la varianza.

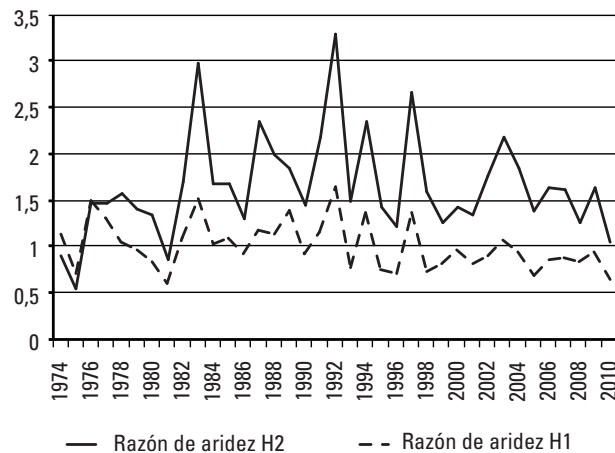


Figura 5. Razón de Aridez H_1 y H_2 1974-2010 para la isla de Providencia. Nota: referirse al texto para las definiciones.

Discusión

El modelo SARIMA permitió reconstruir la serie de datos de precipitación y temperatura media mensual. Este escenario es común en las estaciones meteorológicas tanto en Colombia como en el Tercer Mundo y es frecuente dudar sobre cómo proceder con estos años y meses sin información. Al efectuar la imputación, con un modelo estadístico robusto, se pudo reconstruir toda la serie sin descartar año alguno.

La discusión que sigue a continuación se colige de una aproximación a micro escala y esa es su fuerza, pero al mismo tiempo su debilidad. Para el primer caso, es importante conocer lo que ocurre con la tendencia y variación de la precipitación y la temperatura en la isla de Providencia. No obstante, fenómenos regionales como El Niño pueden no capturarse con los datos usados.

Los resultados obtenidos, como era de esperarse de cara al cambio climático, sugieren un aumento en la temperatura, presentando una pronunciada pendiente hasta 1981. Esta tendencia está en sintonía con lo observado a nivel global por la Climatic Research Unit de la Universidad de East Anglia (2015). Paralelamente, la variación de la precipitación y la temperatura está en aumento, particularmente para la primera al ser endosada por cada una de las tres pruebas estadísticas empleadas. En el caso de la varianza de la precipitación, con la evidencia presentada sería extremadamente improbable cometer un error tipo II, esto es, un falso negativo. El aumento de la varianza en la precipitación se traduce en que los raizales deben prepararse para periodos de extrema sequía así como lluvias torrenciales, pues estos serán más frecuentes en comparación a lo que han sido en el pasado. Con el aumento de la temperatura atmosférica es previsible el aumento de la temperatura del mar, lo que en el Caribe puede traducirse en una mayor frecuencia de huracanes.

Por su parte, la precipitación no presenta tendencia alguna y los resultados de las pruebas estadísticas aquí usadas harían poco probable cometer un error tipo I, falso positivo. En otras palabras, si bien en términos generales se está recibiendo aproximadamente la misma precipitación, esta llega en periodos acentuados, unos muy secos otros muy lluviosos. Luego, cuando se considera el efecto conjunto de la precipitación y la temperatura con la razón de aridez H_1 , se encontró que todos los datos estadísticos apuntan hacia un suelo más húmedo,

contrariamente a lo esperado. Esto es lo que indica la razón de aridez H_2 , que con la estadística Dickey-Fuller sugiere mayor sequía en el suelo. En otras islas del Caribe el clima se ha tornado seco, como en St. Kittis y Nevis y en las Granadinas, lo que está reduciendo su producción agrícola (UNEP 2008). En otras palabras, se nota que en algunos casos la evidencia estadística de las tendencias no es concluyente. El clima de Providencia se caracteriza por ser primordialmente seco y es de esperarse que esta característica se afiance en un futuro como resultado de una precipitación estacionaria pero una creciente temperatura.

La creciente variabilidad en la precipitación implicaría que lo más predecible es que solo sobrevivan en el bosque aquellas especies adaptadas al estrés hídrico, la flora leñosa de Providencia tiene representantes de Bosque Seco Tropical así como de especies de bosque húmedo. Debido al estrés hídrico, es probable que estos últimos eventualmente reduzcan su participación en el portafolio leñoso.

Finalmente, no se encontraron efectos de los fenómenos de El Niño y La Niña, seguramente por tratarse de tan solo una estación meteorológica. Como se mencionó arriba, este es el precio que se paga al tratar de vincular eventos regionales con una estación en particular. Empero, hay evidencia de que estos fenómenos afectan la variación en la precipitaciones en la región Caribe (Gianinni, Kushnir y Cane 2000), así como la oscilación Madden-Julian (Martin y Schumacher 2011).

Con esta contribución desde la óptica del clima, los autores desean aportar un grano de arena a la sustentabilidad de esta esmeralda en el Caribe y sus gentes. El cambio climático está ocurriendo y los raizales deben agregar este hecho a sus agendas. Providencia, por su tamaño, es particularmente vulnerable a eventos meteorológicos extremos, y tal vez por su abrupta topografía, el aumento del nivel medio del mar no será tan devastador. La deforestación que aumentó en la última década solo exacerbará la vulnerabilidad a los peligros naturales.

Agradecimientos

Se agradecen los comentarios y correcciones de dos jurados anónimos a una versión anterior de este manuscrito; así como a Daniel Erwin por la traducción del resumen al inglés y a Leila Carvalho la traducción del resumen al portugués.

Referencias

- Abteu, Wossenu, y Assefa Melesse. 2013. "Evaporation and Evapotranspiration." En *Climate Change and Evapotranspiration*, 197-202. Dordrecht: Springer.
- Akaike, Hirotugu. 1974. "A New Look at the Statistical Model Identification." *IEEE Transactions on Automatic Control* 19 (6): 716-723. doi: 10.1109/TAC.1974.1100705, MR 0423716.
- Bond-Lamberty, Ben, y Allison Thomson. 2010. "Temperature-Associated Increases in the Global Soil Respiration Record." *Nature* 464 (7288): 579-583. doi: 10.1038/nature08930.
- Budyko, Mikhail Ivanovich. 1974. *Climate and Life*. San Diego: Academic Press.
- Chaouche, Keltoum, Luc Neppel, Claudine Dieulin, Nicolas Pujol, Bernard Ladouche, Eric Martin, Dallas Salas, e Yvan Caballero. 2010. "Analyses of Precipitation, Temperature and Evapotranspiration in a French Mediterranean Region in the Context of Climate Change." *Comptes Rendus Geoscience* 342 (3): 234-243. doi: 10.1016/j.crte.2010.02.001.
- Dickey, David A., y Wayne A. Fuller. 1979. "Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root." *Journal of the American Statistical Association* 74 (366): 427-431.
- Geister, Jorn. 1992. "Modern Reef Development and Cenozoic Evolution of an Oceanic Island/Reef Complex: Isla de Providencia (Western Caribbean Sea, Colombia)." *Facies* 27 (1): 1-17. doi: 10.1007/BF02536804.
- Giannini, Alessandra, Yochanan Kushnir, y Mark A. Cane. 2000. "Interannual Variability of Caribbean Rainfall, ENSO, and the Atlantic Ocean." *Journal of Climate* 13 (2): 297-311. doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<0297:IVOCR E>2.0.CO;2.
- Grubbs, Frank E. 1950. "Sample criteria for testing outlying observations." *The Annals of Mathematical Statistics* 21 (1): 27-58. doi:10.1214/aoms/117729885.
- Holdridge, Leslie R. 1967. *Life Zone Ecology*. San José: Tropical Science Center.
- Holdridge, Leslie R. 1987. *Ecología basada en zonas de vida*. San José: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA).
- IAVH (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.) 1998. *El bosque seco tropical (Bs-T) en Colombia*. Bogotá: Programa de Inventario de la Biodiversidad, Grupo de Exploraciones y Monitoreo Ambiental (GEMA).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. *Cambio climático 2014: impactos, adaptación y vulnerabilidad - Resumen para responsables de políticas; Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*, editado por Christopher Field, Vicente Barros, David Jon Dokken, Katharine J. Mach, Michael D. Mastrandrea, T. Eren Bilir, Monalisa Chatterjee, Kristie Ebi, Yuka Estrada, Robert Genova, Betelhem Girma, Eric Kissel, Andrew Levy, Sandy MacCracken, Patricia Mastrandrea y Lesly L. White. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial.
- Kerr, James Jr. 1978. "The Volcanic and Tectonic History of La Providencia Island, Colombia." Tesis de Maestría en Ciencias, Rutgers University, New Brunswick.
- Kupperman, Karen Ordahl. 1992. *Providencia Island: the Other Puritan Colony, 1630-1641*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lovejoy, Thomas E. 2010. "Climate change." En *Conservation Biology for All*, editado por Navjot S. Sodhi y Paul R. Ehrlich, 153-162. Oxford: Oxford University Press.
- Mahadeva, Lavan, y Paul Robinson 2009. *Ensayo 76: prueba de raíz unitaria para ayudar a la construcción de un modelo*. México D.F.: Centro de Estudios Monetarios Latinoamericanos.
- Milly, Paul Christopher Damian. 2001. "A Minimalist Probabilistic Description of Root Zone Soil Water." *Water Resources Research* 37 (3): 457-463. doi: 10.1029/2000WR900337.
- Mann, Henry B. 1945. "Nonparametric Tests Against Trend." *Econometrics* 13 (3): 245-259. doi: 10.2307/1907187.
- Martin, Elinor R, y Courtney Schumacher. 2011. "Modulation of Caribbean Precipitation by the Madden-Julian Oscillation." *Journal of Climate* 24:813-824. doi: 10.1175/2010JCLI3773.1.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2012. "El Niño y la Niña (El Niño Southern Oscillation)." *Climate.gov*. Consultado en septiembre de 2012. <http://www.elnino.noaa.gov/>
- Parsons, James J. 1956. *San Andres and Providencia, English Speaking Islands in the Western Caribbean*. California: University of California Press.
- Proctor, G. R. 1950. "Results of the Catherwood-Chaplin West Indies expedition, 1948: Part I. Plants of Cayo Largo (Cuba), San Andrés and Providencia." *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia* 102 (1950): 27-42.
- R Core Team. 2014. "R: A language and environment for statistical computing." R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.
- Raich, James W., y William H. Schlesinger 1992. "The Global Carbon Dioxide Flux in Soil Respiration and its Relationship to Vegetation and Climate." *Tellus B* 44 (2): 81-99. doi: 10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.x.

- Ramos, Elena, y Doris Zúñiga. 2008. "Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio." *Ecología Aplicada* 7 (1-2): 123-130.
- Ruiz, Jorge V., y María Claudia Fandiño. 2007. "Plantas leñosas del bosque seco tropical de la Isla de Providencia, Colombia, Caribe sur occidental." *Biota Colombiana* 8 (1): 87-98.
- Ruiz, Jorge V., María Claudia Fandiño, y Robin L. Chazdon. 2005a. "Vegetation Structure, Composition, and Species Richness Across a 56-year Chronosequence of Dry Tropical Forest on Providencia Island, Colombia." *Biotropica* 4 (37): 520-530. doi: 10.1111/j.1744-7429.2005.00070.x.
- Ruiz, Jorge V., María Claudia Fandiño, Thomas H. Meyer, y I. Morty Ortega. 2005b. "Cambio de la cobertura boscosa en Providencia." *Revista de Investigación, Universidad de La Salle* 5:141-153.
- Rustad, Pal. 2015. "Register the figures in column A." Consultado en septiembre 2015. pweb.furst.no/norip/nkk/slenger.xls.
- Said, Said E., y David A. Dickey. 1984. "Testing for Unit Roots in Autoregressive-Moving Average Models of Unknown Order." *Biometrika* 71 (3): 599-607. doi: 10.2307/2336570.
- Thaiutsa, Bunvong, y Orman Granger. 2015. "Climate and the Decomposition rate of-Tropical Forest Litter." Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Consultado en julio. <http://www.fao.org/docrep/n6845e/n6845e05.htm>
- Thorntwaite, Charles W. 1948. "An Approach toward a Rational Classification of Climate." *Geographical Review* 38 (1): 55-94. doi: 10.2307/210739.
- Trewartha, Glenn T. 1954. *An Introduction to Climate*. New York: McGraw-Hill.
- University of East Anglia. 2015. *Climatic Research Unit*. <http://www.cru.uea.ac.uk/>
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2008. "Climate Change in the Caribbean and the Challenge of Adaptation." Ciudad de Panamá: UNEP. http://www.pnuma.org/deat1/pdf/Climate_Change_in_the_Caribbean_Final_LOW200oct.pdf
- Yin, Zhi-Yong, y George A. Brook. 1992. "Evapotranspiration in the Okefenokee Swamp watershed: a comparison of temperature-based and water balance methods." *Journal of Hydrology* 131 (1-4): 293-312. doi: 10.1016/0022-1694(92)90223-I.

Jorge Ruiz

Especialista en Manejo Integrado del Medio Ambiente de la Universidad de los Andes (Colombia), Magíster en Demografía de la Georgetown University, Washington D.C. (Estados Unidos de América) y Doctor en Recursos Naturales de la University of Connecticut (Estados Unidos de América). Desde el 2007 es profesor de geografía en la Escuela de Ciencias Sociales de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y es coordinador del grupo de investigación Caldas. En la actualidad cursa el posdoctorado en geografía como *Research Scholar* en el *Human Environment Dynamics Laboratory* del Departamento de Geografía de la University of California, Santa Barbara (Estados Unidos de América).

Nicolás Molano-González

Biólogo y Estadístico de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá) y Magíster en Estadística. Actualmente se desempeña como estadístico del Centro de Estudio de Enfermedades Autoinmunes (CREA) de la Escuela de Medicina y Ciencias de la Salud de la Universidad del Rosario en Bogotá. Ha publicado sus investigaciones en biología y medicina en revistas nacionales e internacionales.