

El ciclo de las manchas solares y la precipitación en la Región Central Cafetera de Colombia

Fernando Alfonso González Lozano*

Resumen

Con el propósito de identificar posibles efectos del ciclo de la actividad solar en el clima de la Región Central Cafetera de Colombia (Eje Cafetero), se estableció mediante correlaciones una relación inversa entre el índice de las manchas solares y la precipitación anual en las estaciones climáticas: Cenicafé, Naranjal, La Bella, Miguel Valencia. Esta relación presenta alta significación estadística para las tres primeras estaciones, mayor con la serie del índice solar rezagada en uno y dos años. Las auto-correlaciones y los semivariogramas calculados, hasta 24 rezagos para las series de precipitación anual, muestran un ciclo de 10-11 años para Cenicafé y Naranjal, para La Bella se evidencia el ciclo en los rezagos 6 y 16 con relación inversa. Los espectros de frecuencias de las precipitaciones obtenidos mediante la transformada rápida de Fourier, muestran que el espectro de Cenicafé insinúa el ciclo de 11 años entre otros ciclos, el de Naranjal privilegia el ciclo de 11 años, y el de La Bella destaca ciclos de 22 y 11 años. Finalmente, para comprobar un acoplamiento entre las lluvias regionales y el ciclo solar, se realizó una comparación estadística entre el promedio de precipitación de los años coincidentes con los mínimos del ciclo solar y el promedio de precipitación de los años coincidentes con los máximos del ciclo, la cual resultó con una alta significación para las series de Cenicafé, Naranjal y La Bella. Corroborándose la influencia de la actividad solar en las precipitaciones, de utilidad en el pronóstico de la disponibilidad hídrica regional.

Palabras clave: Ciclos precipitación, variabilidad climática, auto-correlación, precipitación anual.

Abstract

In order to detect a possible influence of the solar activity cycle on the Region del Eje Cafetero climate, it is established by correlations, an inverse relation between the sunspots index and the annual precipitation in the stations: Cenicafé, Naranjal, La Bella, Miguel Valencia. This relation evidences a high statistical significance for the first three stations being higher with the sunspot index series delayed one and two years. The autocorrelations and the semivariograms calculated until 24 delays for the Cenicafe, Naranjal and La Bella stations' series clearly show a cycle of 10 or 11 years for the first two stations. For La Bella station it is evident the cycle in the delays with inverse relation, delays 6 and 16. The frequency spectra, obtained by the rapid Fourier transform, show remarkable results, the Cenicafé's frequency spectrum denotes the cycle of 11 years between others cycles, the Naranjal's frequency spectrum favors a cycle of 11 years, and La Bella shows the strong presence of cycles of 22 and 11 years. Finally, to prove a coupling between regional precipitation and the 11-year solar cycle, it is performed a statistical comparison between the precipitation average of the coincident years with the minimum values of the sunspot cycle and the precipitation average of the coincident years with the peaks of this cycle. This comparison evidences a high significance for the Cenicafe, Naranjal and La Bella. Demonstrating the influence of the sunspot cycle in the rain. This result is useful in the prevision of regional hydric availability.

Keywords: sunspot, rain cycle, Region of the Eje Cafetero, climate variability, autocorrelated.

* Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Profesor titular. fagonzalez@unal.edu.co

La influencia de la actividad solar en el clima de la Tierra ha sido objeto de análisis, y en no pocos casos de controversias, entre los científicos y estudiosos del clima. Las manchas solares son un indicativo de las variaciones en la actividad solar; si bien la contribución de los ciclos de las manchas solares (11 años), a la variación del balance de energía en la baja troposfera es de apenas 0,1%, unos $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ según mediciones satelitales (8), estudios recientes presentan evidencias crecientes de que la actividad solar tiene una influencia en el clima terrestre mediante una conexión entre la estratosfera y la troposfera, como influencia de los ciclos solares (2, 3).

Algunos autores han postulado a las fluctuaciones de la incidencia sobre la Tierra de los rayos cósmicos galácticos, como una posible causa de variaciones climáticas, incidencia que es controlada por la actividad solar, cuando ésta aumenta (disminuye) los rayos cósmicos incidentes disminuyen (aumentan). Los rayos cósmicos, a su vez, afectarían el clima terrestre propiciando la formación de amplias coberturas de nubes bajas; Dorman (8) presenta una síntesis de los avances en esta temática y cita los principales autores. Mediante la concentración de radiocarbono ^{14}C , una medida indirecta de la intensidad de los rayos cósmicos, se ha logrado establecer que durante período medieval cálido, 1000-1300 DC, cuando los vikingos se establecieron en Groenlandia, la actividad solar fue alta y la incidencia de rayos cósmicos baja. Luego, la actividad solar decreció y la incidencia de rayos cósmicos aumentó hasta llegar a los mínimos de Spörer 1460-1550 y de Maunder 1645-1715, con la ausencia total de manchas solares, reflejo de una baja actividad solar, y también el de Dalton, 1795-1825, con escasas manchas solares. El continente Euroasiático y Norteamérica, por lo menos, entraron en un período frío de cerca de cuatro siglos 1450-1840, denominado la Pequeña Edad del Hielo, que cobija tanto el mínimo de Spörer como el de Maunder y el de Dalton (8, 14, 19).

La Pequeña Edad de Hielo también se manifestó en el territorio colombiano, en general, y en el Eje Cafetero, en particular, como lo demuestran los hitos geomorfológicos en el Parque Natural los Nevados, en especial las morrenas recientes de las laderas del Nevado Santa Isabel, que se encuentran a los 4.400 m de altitud (9, 11). Las crónicas de los historiadores de Indias y algunos documentos coloniales sobre prácticas agrícolas del entonces, dan noticia de una época claramente más fría que los subsiguientes siglos XIX y XX (11).

Habida una posible conexión entre la actividad solar y el clima regional, cabe preguntarse: ¿Los ciclos de 11 años de las manchas solares y los ciclos de 22 años del campo magnético solar afectan el clima de la Región del Eje Cafetero? Para contestar esta pregunta se recurre a la aplicación de varios métodos estadísticos: correlación, coeficientes de Pearson y Spearman, entre la serie del número de las manchas solares (SunSpot Number -SSN-) y las series de precipitación anual de cuatro estaciones climatológicas operadas por Cenicafé, con más de 60 años de registros; auto-correlaciones, coeficientes de Pearson y Spearman, semivariogramas, análisis del espectro de frecuencias mediante la aplicación de la transformada rápida de Fourier y, finalmente, comparación estadística entre el promedio de precipitación de los años coincidentes con los mínimos en el ciclo de las manchas solares y el promedio de los años coincidentes con los máximos en ese ciclo.

La detección de un ciclo de baja frecuencia, 11 o 22 años, en la dinámica de las precipitaciones regionales se hace dispendiosa por la variabilidad temporal y espacial que otros factores le imponen al clima en Colombia, velando el efecto que pueda tener el ciclo de la actividad solar. Factores como la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), El Niño – Oscilación del Sur (ENSO), la Oscilación Cuasi – Biental (QBO), la corriente superficial del Chocó, el calentamiento global, los

sistemas convectivos de mesoescala, la oscilación de Madden-Julian, las circulaciones valle-montaña, las características fisiográficas locales, el cambio en el uso de la suelo, la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), actúan en diferentes escalas y con distinta profundidad (11, 17, 22).

En la literatura científica mundial se encuentran numerosos artículos que dan cuenta de lugares de la Tierra con influencia del ciclo de las manchas solares en la precipitación, correlación positiva y negativa, y de lugares en los que no se presenta esta relación (1, 6, 7, 10, 16, 18, 24, 25). En contraste, son escasos los estudios colombianos sobre la temática. Peña *et al.* (20), mediante técnicas matemáticas descriptivas, determinaron que se detecta la señal de ciclos entre 10 y 30 años, en series de precipitaciones del Eje Cafetero, e imputan como posibles causas las oscilaciones periódicas del Océano Pacífico y de la actividad solar. Peña *et al.* (21), calcularon autocorrelaciones de series pluviales de la zona cafetera colombiana, buscando evidencias de ciclos interanuales, sin hallar correlaciones con significancia estadística. En Colombia no se cuenta con estudios que hayan comprobado con datos pluviométricos nacionales el efecto del ciclo de la actividad solar o un comportamiento cíclico alrededor de los 11 años, en las precipitaciones locales.

Además del interés científico por desentrañar posibles acoplamientos entre el ciclo de las manchas solares y las precipitaciones regionales, el detectar un comportamiento recurrente en las lluvias asociado a la actividad solar, con ciclos de 11 y 22 años, sería de gran utilidad en el pronóstico a largo plazo de la disponibilidad hídrica regional. El ciclo solar es absolutamente predecible por su regularidad marcada, lo que permite con una alta certidumbre su pronóstico a mediano y largo plazo, y por ende, también puede pronosticarse su efecto pluviométrico (6, 10). No sucede así con las recurrencias del ENSO, a la que algunos autores califican de caótica, entre dos y diez años, no de ciclos o variaciones periódicas de este fenómeno (4).

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos

- a) Como índice de la actividad solar se utilizó el *SunSpot Number* (SSN), total promedio anual, ubicado en la fuente: “WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels”, en su versión 2.0, vigente desde el primero de julio del 2015.
- b) Se tomaron los datos de precipitación, anuales y mensuales, de cuatro estaciones climatológicas, operadas por Cenicafé, por su largo período de cubrimiento, más de 60 años, y la cuidadosa depuración y crítica de su información: Estación climática Cenicafé 1942-2014 (5° 00' N, 75° 34' W, 1310 m), Estación climática Naranjal 1951-2014 (4° 58' N, 75° 39' W, 1380 m), Estación climática La Bella 1950-2014 (4° 30' N, 75° 40' W, 1450 m) y Estación climática Miguel Valencia 1953-2011 (5° 36' N, 75° 51' W, 1620 m). Todas las estaciones climáticas están ubicadas en la cuenca del Cauca Medio, en la Región del Eje Cafetero, las tres primeras en las estribaciones de la Cordillera Central vertiente occidental y la última en la vertiente oriental de la Cordillera Occidental. Información pluviométrica publicada en el Anuario Meteorológico Cafetero. Los estudios en diferentes regiones del mundo sobre el tema se basan en extensos períodos de cubrimiento, la mayoría con 90 años o más (7, 10, 16, 18, 24). Las series de las cuatro estaciones relacionadas son las más extensas de la Región, y son de las más largas de Colombia.

c) Índice mensual de la anomalía de la temperatura superficial del mar (SST) en el paralelogramo Niño3 (5°N - 5°S, 150°W – 90°W). Fuente: *National Oceanic and Atmospheric Administration –NOAA-, USA*. Se seleccionó la anomalía SST Niño3, como índice del ENSO, porque este índice de la anomalía de la temperatura superficial del océano Pacífico Tropical posee alta correlación con las series pluviométricas regionales y porque este paralelogramo o bloque es adyacente a la Costa Pacífica colombiana (11).

Métodos

Se aplicaron métodos de la estadística descriptiva convencional como son: los promedios mensuales multianuales, la correlación entre series y la auto-correlación, con base en los estadísticos de Pearson y Spearman, y la comparación clásica entre los promedios de dos poblaciones. También se aplicó el método descriptivo del semivariograma y el método de análisis espectral con base en la transformada rápida de Fourier. Estos métodos se aplicaron haciendo uso del paquete estadístico *IBM SPSS Statistics versión 22*, excepto el semivariograma que se programó. A continuación se describen de manera resumida los métodos aplicados y representados en figuras mediante la hoja de cálculo *Excel Office*:

- Para caracterizar el régimen pluviométrico multianual e ilustrar la magnitud de las lluvias mensuales, se calcularon los promedios mensuales multianuales de las cuatro estaciones climatológicas, con los cuales se construyó una figura ilustrativa.
- Correlaciones, coeficientes de Pearson y Spearman, entre las series de precipitación anual de las cuatro estaciones, la serie de las manchas solares promedios anuales (SunSpot Number) y sus primeros tres rezagos, la serie de la anomalía de la temperatura superficial del mar en Niño3 y su primer rezago. Como el presente es un estudio exploratorio se emplearon ambos coeficientes: el de Pearson, lineal, y el de Spearman que puede dar cuenta de relaciones no-lineales entre las variables.

El coeficiente de correlación de Pearson se simboliza con la letra $\rho_{X,Y}$. Su expresión matemática se presenta en la Ecuación <1>:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} < 1 >$$

Donde:

σ_{XY} : Covarianza de (X, Y)

σ_X : Desviación típica de la variable X

σ_Y : Desviación típica de la variable Y

El coeficiente de correlación de Spearman es una medida no-paramétrica de la asociación entre dos variables, cuando la función es monótona creciente o decreciente infiere una correlación perfecta. En contraste, el coeficiente de Pearson sólo infiere correlación perfecta cuando la función es lineal. El coeficiente de Spearman es menos sensible a valores atípicos y logra detectar relaciones no-lineales, que el coeficiente de Pearson desecharía. Parte de ordenar las dos variables; X, Y y para cada par medir la distancia entre la ubicación de x_i y y_i , de ahí su

nombre en inglés: *Spearman's rank correlation coefficient*. Su expresión matemática se presenta en la Ecuación <2>:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)} < 2 >$$

Donde:

d_i : Diferencia en el orden entre x_i y y_i

n : Número de parejas

- Auto-correlación de las series de precipitación anual de las estaciones climatológicas Cenicafé, Naranjal y La Bella, con sus 24 primeros rezagos, haciendo uso de los coeficientes de Pearson y Spearman.
- Semivariograma de las series de precipitación anual de las estaciones climáticas Cenicafé, Naranjal y La Bella. Función de distancia utilizada en la interpolación espacial, pero que aquí se hizo uso de ella, para medir similitudes no en el espacio sino en el tiempo, de la serie y sus rezagos, tal como lo planteado por Peña *et al.* (20, 21), donde se describe en detalle el método. Su expresión matemática se presenta en la Ecuación <3>:

$$\gamma(h) = \frac{\sum (Z(t+h) - Z(t))^2}{2n} < 3 >$$

Donde:

$\gamma(h)$: Semivarianza

h : Rezago en años

$Z(t)$: Valor de la función

n : Cantidad de pares separados un tiempo h

El semivariograma se gráfica dividiendo la semivarianza por la varianza muestral. Su interpretación es distinta a la de la correlación: valores inferiores a uno indican alta similitud de la serie y su rezago, valores alrededor de uno muestran que no existe relación entre la serie y su rezago, y valores altos, superiores a uno, una relación inversa entre la serie y su rezago. Este método se programó, debido a que el paquete estadístico *SPSS* no cuenta con él.

- Espectro de frecuencia de las series anuales de precipitación de Cenicafé, Naranjal y La Bella, SSN y anomalías SST Niño3. El análisis espectral de una señal digital consiste en identificar sus distintos componentes dentro del dominio de la frecuencia, lo cual se obtiene mediante la transformada rápida de Fourier (Ecuación <4>):

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn} \quad k = 0, \dots, N-1 < 4 >$$

En las ecuaciones los números complejos X_k representan la amplitud y fase de diferentes componentes sinusoidales de la señal x_n , es decir, de la serie.

- Comparación entre medias. La prueba de diferencia entre dos muestras se utiliza para decidir si las medias de dos poblaciones son iguales. Se definieron así las dos poblaciones para cada una de las cuatro estaciones: Cenicafé, Naranjal, La Bella y Miguel Valencia:
 - a) Precipitaciones de los años coincidentes con los mínimos solares y de los dos años subsiguientes.
 - b) Precipitaciones de los años coincidentes con los máximos solares y de los dos años subsiguientes.

Se planteó la hipótesis nula $H_0: \mu_x = \mu_y$, o su equivalente, $H_0: \mu_x - \mu_y = 0$. El estadístico t para probar si las medias poblacionales son distintas puede calcularse como se presenta en la Ecuación <5>:

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S_{\bar{X} - \bar{Y}}} = \sqrt{\frac{S_x^2}{n_x} + \frac{S_y^2}{n_y}} < 5 >$$

Donde:

n_x, n_y : Tamaño de las muestras

\bar{X}, \bar{Y} : Estimadores muestrales de las medias

S_x^2, S_y^2 : Estimadores muestrales de las varianzas

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados

El patrón o régimen pluviométrico multianual de las cuatro estaciones climáticas analizadas se caracteriza por una forma de doble onda o bimodal, de la distribución de las lluvias en el transcurso del año, típica del Ecuador climático, cuyos máximos coinciden con el mayor calentamiento atmosférico que sucede en los días posteriores a las dos posiciones cenitales del sol sobre la región. El patrón pluviométrico de doble onda típico del Ecuador climático de la Región del Eje Cafetero, ocasionado por el doble paso de la ZCIT, sufre variaciones según prevalezca la influencia de los vientos Alisios del Norte o de los Alisios del Sur. En el norte de la Región del Eje Cafetero, en la estación Miguel Valencia (5° 36' N), se registra un período de relativa sequía más pronunciado a final del año, en el trimestre Diciembre-Enero-Febrero. En el Sur, en la estación La Bella (4° 30' N), ocurre a la inversa, el período de relativa sequía más pronunciado se registra a mitad del año, en el trimestre Junio-Julio-Agosto. En las estaciones Cenicafé (5° 00' N) y Naranjal (4° 58' N) el régimen pluviométrico multianual presenta gran similitud entre los dos semestres del año, indicativo de la ubicación geográfica del Ecuador climático (11, 12). La Figura 1 muestra lo anterior e ilustra la magnitud de las lluvias mensuales.

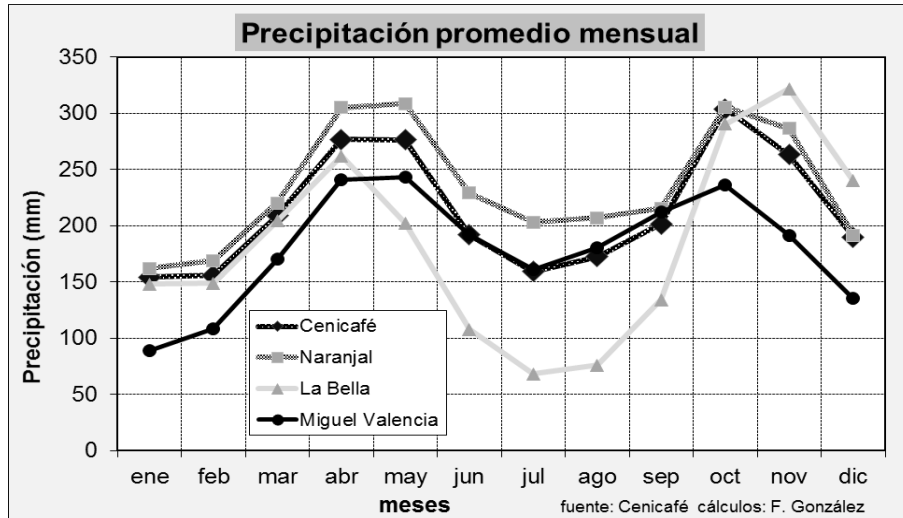


Figura 1. Regímenes de precipitación Región del Eje Cafetero.

La Tabla 1 muestra las correlaciones y coeficientes de Pearson y Spearman, entre las series de precipitación anual de las cuatro estaciones climáticas, el SSN y sus tres primeros rezagos, y la serie de la anomalía SST Niño3 y su primer rezago.

Las correlaciones entre las series pluviométricas son altas, estadísticamente significativas al 99%. La mayor de 0,870, se registra entre Cenicafé y Naranjal estaciones cercanas, y la menor de 0,593, entre las estaciones más alejadas: La Bella y Miguel Valencia.

Las series pluviométricas están estrechamente relacionadas con el SSN y sus dos primeros rezagos, salvo la serie de Miguel Valencia que sólo tuvo una correlación significativa al 95% con el segundo rezago, calculada con el coeficiente de Spearman. Las correlaciones de las series de Cenicafé, Naranjal y La Bella, con las series del SSN y sus rezagos, son estadísticamente significativas, en especial, con el primer y segundo rezagos, con significancia del 99%. Las correlaciones con el tercer rezago no poseen significancia estadística, excepto la de Naranjal.

Tabla 1. Correlaciones Precipitación Anual - SunSpotNumber - AnomalíaSSTNiño3 (coef. Pearson, Spearman)

			Precipitaciones anuales			SunSpotNumber (SSN), índice y rezagos				AnomalíaSSTNiño3, rezago	
			Naranjal	La Bella	Miguel Valencia	SSN	SSN (-1)	SSN (-2)	SSN (-3)	AnomNiño3	AnomNiño3 (-1)
Cenicafé	Pearson	coef.	0,867	0,724	0,729	-0,317	-0,374	-0,349	-0,187	-0,505	-0,038
		p.valor	0,000	0,000	0,000	0,006	0,001	0,003	0,113	0,000	0,764
	Spearman	coef.	0,861	0,636	0,732	-0,318	-0,377	-0,351	-0,173	-0,490	-0,013
		p.valor	0,000	0,000	0,000	0,006	0,001	0,002	0,144	0,000	0,919
	n	año	64	64	59	73	73	73	73	65	64
Naranjal	Pearson	coef.	1	0,682	0,699	-0,328	-0,435	-0,408	-0,266	-0,412	-0,025
		p.valor		0,000	0,000	0,008	0,000	0,001	0,033	0,001	0,845
	Spearman	coef.	1	0,607	0,691	-0,318	-0,444	-0,444	-0,280	-0,400	-0,018
		p.valor		0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,025	0,001	0,887
	n	año		64	59	64	64	64	64	64	64
La Bella	Pearson	coef.		1	0,593	-0,319	-0,417	-0,334	-0,211	-0,452	-0,101
		p.valor			0,000	0,010	0,001	0,007	0,094	0,000	0,429

	Spearman	coef.		1	0,609	-0,337	-0,413	-0,320	-0,179	-0,495	-0,046
		p.valor			0,000	0,006	0,001	0,010	0,157	0,000	0,716
	n	año			59	64	64	64	64	64	64
Miguel Valencia	Pearson	coef.			1	-0,131	-0,228	-0,248	-0,189	-0,538	0,161
		p.valor				0,324	0,083	0,058	0,153	0,000	0,223
	Spearman	coef.			1	-0,114	-0,197	-0,270	-0,190	-0,531	0,172
		p.valor				0,388	0,135	0,038	0,150	0,000	0,194
	n	año				59	59	59	59	59	59
SSN	Pearson	coef.				1	0,799	0,370	-0,126	0,065	
		p.valor					0,000	0,001	0,289	0,609	
	Spearman	coef.				1	0,794	0,355	-0,133	0,078	
		p.valor					0,000	0,002	0,263	0,539	
	n	año					75	74	73	65	
AnomNiño3	Pearson	coef.					0,118	0,141	0,055	1	0,083
		p.valor					0,350	0,262	0,651		0,514
	Spearman	coef.					0,114	0,160	0,079	1	0,087
		p.valor					0,365	0,203	0,529		0,496
	n	año					65	65	65		64

La serie de la estación climática Miguel Valencia cuenta con 59 años de información. Se comprobó que las correlaciones de las series de las otras estaciones con el SSN y sus dos primeros rezagos, calculadas en el mismo período de cubrimiento que el de la estación Miguel Valencia, no sufren cambios que afecten su significación estadística. No es por poseer un período de cubrimiento menor, que Miguel Valencia presenta un comportamiento diferente a las otras estaciones, con respecto a la relación con el SSN.

La relación entre las precipitaciones regionales y el ENSO es estrecha, como lo comprueban las altas correlaciones negativas entre las series pluviométricas y la anomalía SST Niño3. Hecho que lo han manifestado numerosos estudios para Colombia y para el Eje en Cafetero, en particular Poveda (22) y González (11). No hay relación entre las precipitaciones anuales regionales y la serie de la anomalía SST Niño3 rezagada.

La correlación de SSN, serie anual, con su primer rezago es muy alta y aún tiene alta significación estadística con su segundo rezago. No así, la anomalía SST Niño3 anual con su inmediato rezago; lo que tiene importancia al construir modelos de pronóstico de lluvia con plazo de años.

Las correlaciones entre las anomalías SST Niño3 y el SSN y sus rezagos son bajas y estadísticamente despreciables, lo que indica una baja o nula relación entre el ENSO y el ciclo solar. Algunos estudios han llegado a esta conclusión empleando métodos más elaborados (13).

Con miras a tener una cuantificación que permita comparar el efecto del SSN y del ENSO en las lluvias regionales se construyó la Tabla 2, donde se advierte, en el R^2 del modelo de regresión lineal univariado, que la influencia del ENSO es mayor que la del ciclo solar. Pero en tres estaciones climatológicas: Cenicafé, Naranjal y La Bella, el efecto del ciclo solar no es nada despreciable, incluso en Naranjal es superior al del ENSO.

Tabla 2. Variación explicada modelo de regresión lineal R^2

precipitación		SSN (-1)	SSN (-2)	AnomNiño3
Cenicafé	R ² (%)	14,0	12,2	25,5
	ANOVA p.valor	sí	sí	sí
Naranjal	R ² (%)	18,9	16,7	17,0
	ANOVA p.valor	sí	sí	sí
La Bella	R ² (%)	17,1	11,2	20,4
	ANOVA p.valor	sí	sí	sí
Miguel Valencia	R ² (%)	5,2	6,2	28,9
	ANOVA p.valor	no	no	sí
sí: estadísticamente significativo al nivel del 99% de confianza				
no: estadísticamente NO significativo al nivel del 95% de confianza				

Los resultados anteriores advierten de un posible acoplamiento entre el ciclo solar y las lluvias regionales. Cabe preguntarse entonces, si el ciclo solar de 11 años se manifiesta en la dinámica de las precipitaciones, para lo cual se calcularon las auto-correlaciones, coeficientes de Pearson y Spearman, de las series de precipitación anual de las estaciones climáticas Cenicafé, Naranjal y La Bella, que presentaron correlaciones estadísticamente significativas con el SSN (Figuras 2, 3 y 4).

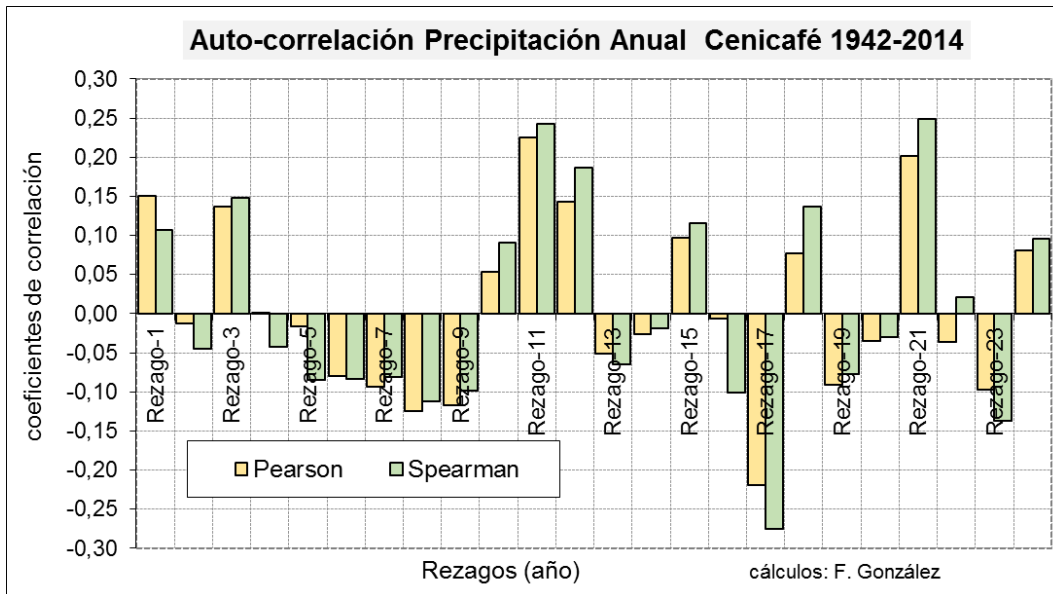


Figura 2. Auto-correlación, serie precipitación anual de la estación climática Cenicafé (24 rezagos).

La Figura 2 advierte que las mayores correlaciones positivas se encuentran con los rezagos de orden 11 y 21. Con el rezago 17, al estar en la fase inversa del ciclo, los valores de la correlación son negativos. La correlación de este rezago calculada con el coeficiente de Spearman es estadísticamente significativa al nivel del 95%.

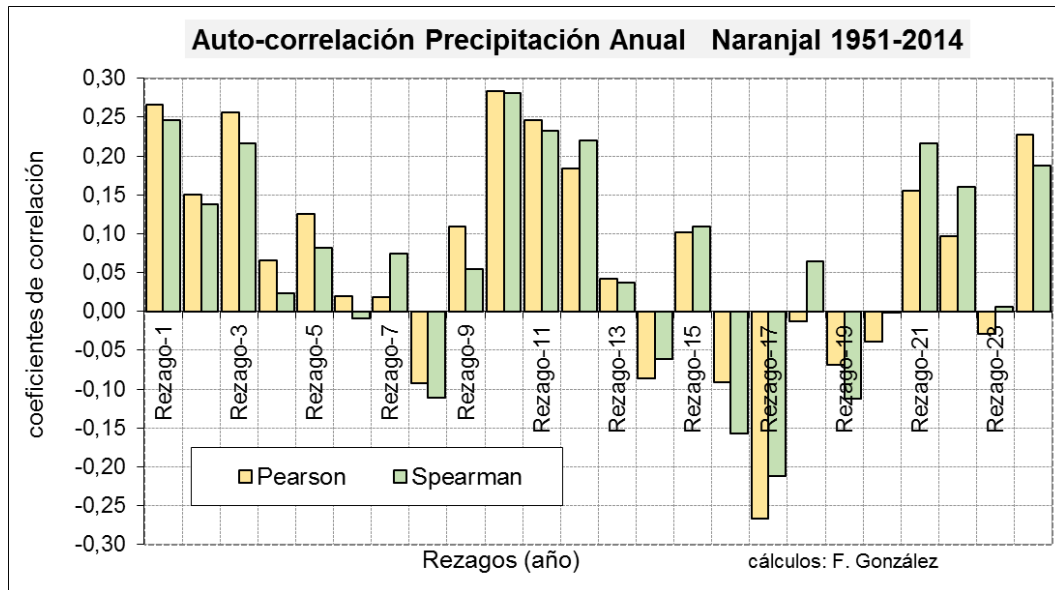


Figura 3. Auto-correlación, serie precipitación anual de la estación climática Naranjal (24 rezagos).

La auto-correlación de Naranjal (Figura 3), es estadísticamente significativa al 95% con el coeficiente de Pearson, para los rezagos 1, 3 y 10, para el rezago 10 es estadísticamente significativa con el coeficiente de Spearman, y evidencia de un posible ciclo decadal.

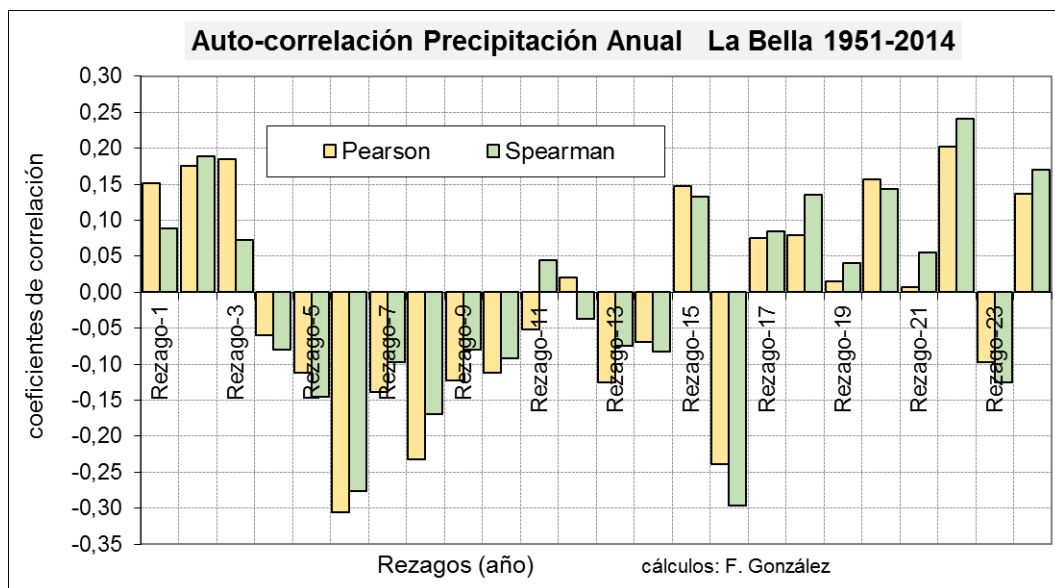


Figura 4. Auto-correlación, serie precipitación anual de la estación climática La Bella (24 rezagos).

La Figura 4 muestra correlaciones negativas altas en los rezagos 6 y 16, que se encuentran en la fase inversa del ciclo, correlaciones que son estadísticamente significativas al 95% con los dos coeficientes.

La auto-correlaciones de la precipitación anual de las tres estaciones climáticas (Figuras 2, 3 y 4) muestran correlaciones altas y positivas en rezagos alrededor del ciclo decadal, rezagos 10 y 11, o en la fase inversa del ciclo correlaciones negativas, rezagos 6, 16 y 17, que alcanzan a tener

significación estadística. Lo anterior no es prueba amplia y suficiente de un ciclo de 11 años en las precipitaciones regionales, pero sí es un indicio importante de la existencia del ciclo.

Recientemente se ha aplicado la función de distancia denominada semivariograma, para detectar ciclos de baja frecuencia en las precipitaciones regionales (20). Aquí se hizo uso de la misma técnica descriptiva con las series de precipitación anual de Cenicafé, Naranjal y La Bella, pero sin la suavización de promedios móviles que allí se aplicaron. La Figura 5 muestra el semivariograma de las tres series de precipitación.

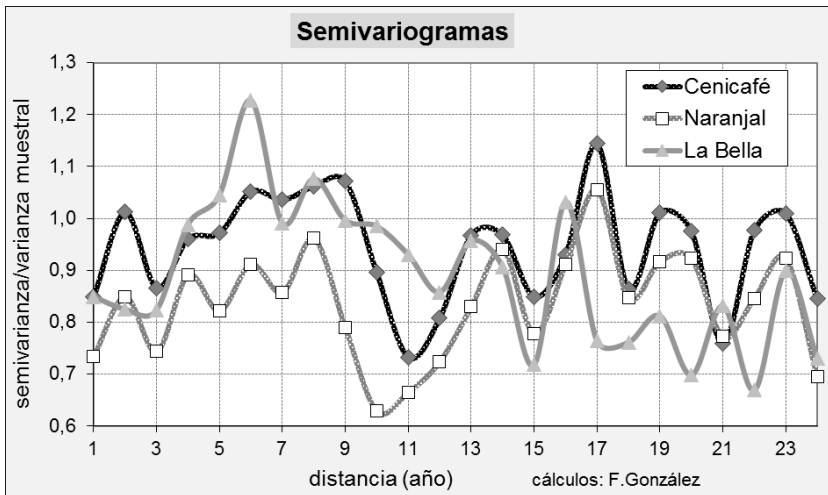


Figura 5. Semivariogramas de precipitación anual de las estaciones climáticas Cenicafé, Naranjal y La Bella.

Los semivariogramas de las tres series corroboran, *sensu lato*, lo hallado en las auto-correlaciones. Advierte acercamientos notorios en los rezagos 10 y 11 en la serie de Naranjal y en el rezago 22 de la serie de La Bella. Alejamientos notorios en el rezago 6 de la serie de La Bella y en el rezago 17 de Cenicafé, rezagos en la fase inversa del ciclo (Figura 5). El semivariograma es una función de distancia, entre más cercana a cero, mayor es la similitud de la serie con su rezago, valores superiores a uno indican una relación inversa. Resultado que evidencia la existencia de un ciclo de 11 años.

Una técnica matemática para identificar densidades de frecuencias asociadas a períodos de recurrencia es el análisis espectral de una señal digital, las cuales se obtienen mediante la transformada rápida de Fourier. En este estudio se aplicó la técnica a las series de precipitaciones anuales de las estaciones climáticas Cenicafé, Naranjal, La Bella, el SSN, y la anomalía SST Niño3 (Figuras 6, 7, 8, 9 y 10).

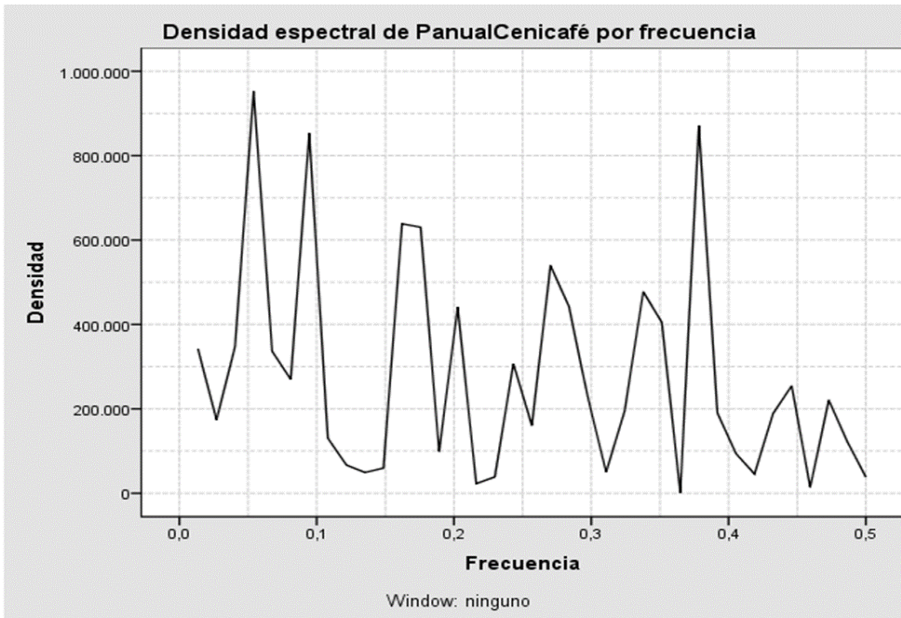


Figura 6. Densidad espectral por frecuencia *P* anual de la estación climática Cenicafé.

El espectro de frecuencias de Cenicafé privilegia un ciclo de unos 19 años, otro de 2,7 años, y también el ciclo de 11 años. El primer ciclo, posiblemente asociado a la nutación terrestre debida a la atracción gravitacional lunar, cuyo período es de 18,6 años (6).

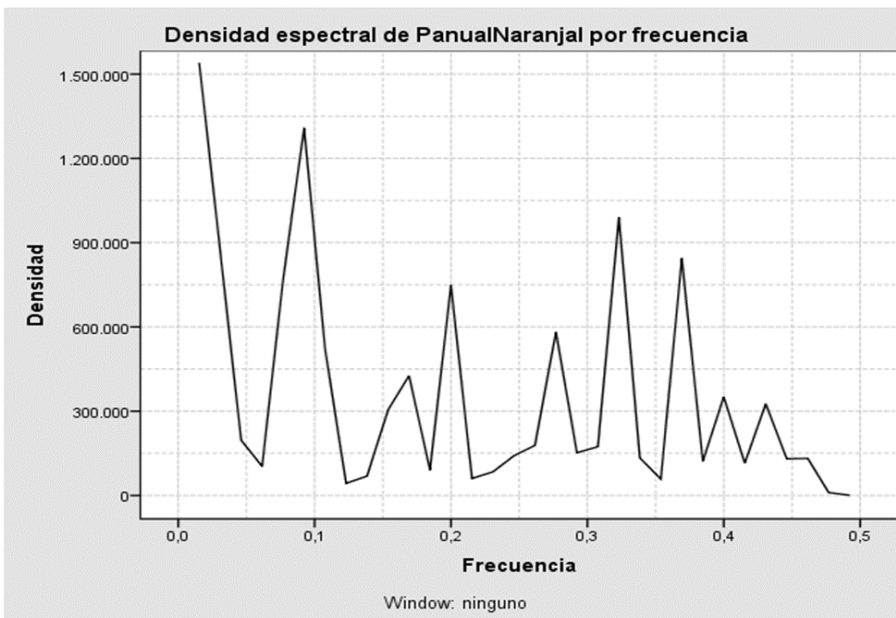


Figura 7. Densidad espectral por frecuencia *P* anual de la estación climática Naranjal.

La densidad espectral de Naranjal muestra cómo el ciclo de mayor relevancia es el de los 11 años. Posee menor intensidad otro ciclo de 3,1 años.

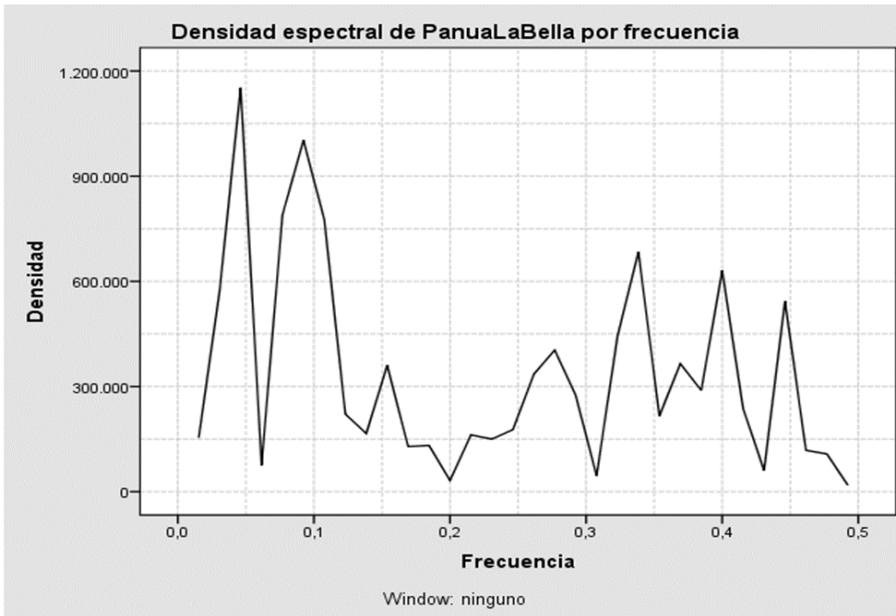


Figura 8. Densidad espectral por frecuencia P_{anual} de la estación climática La Bella.

La densidad espectral de La Bella (Figura 8) privilegia, de manera notoria, dos ciclos: el de los 22 años y de los 11 años.

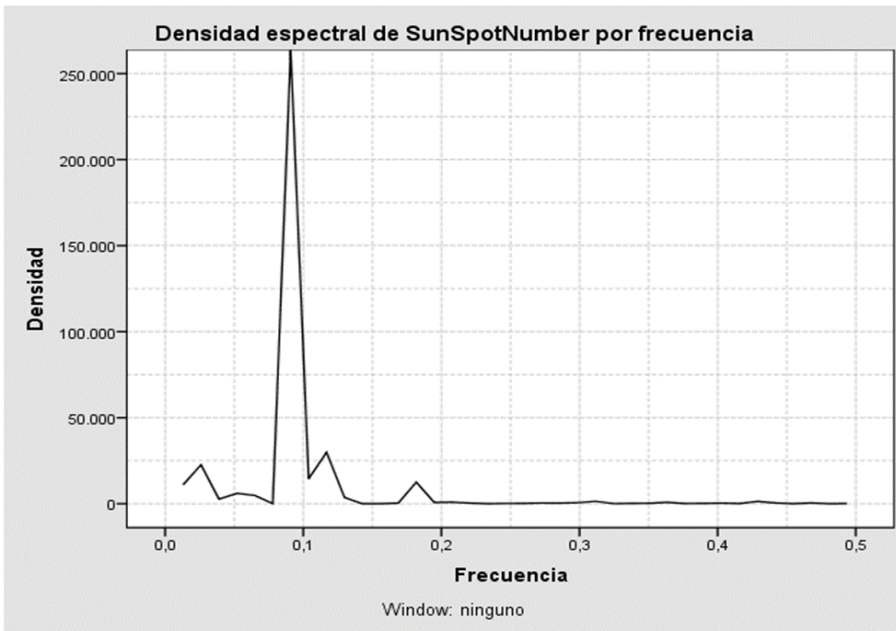


Figura 9. Densidad espectral por frecuencia SSN.

La Figura 9 de la densidad espectral del SSN, advierte, de manera notable, de su ciclo de 11 años.

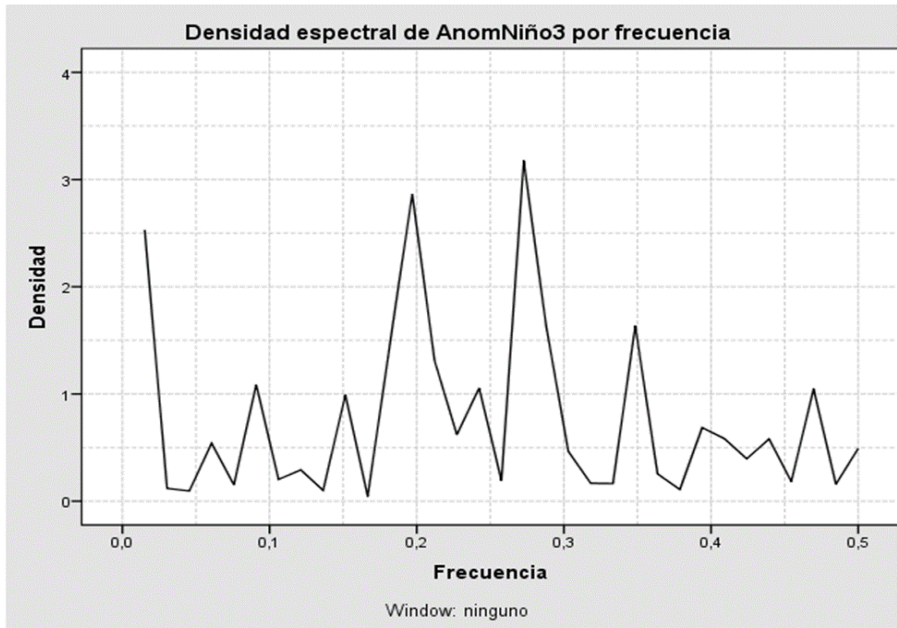


Figura 10. Densidad espectral por frecuencia AnomNiño3.

La densidad espectral de AnomNiño3, Figura 10, privilegia dos ciclos: uno de 3,7 años y otro de unos 5,1 años.

En conclusión, la densidad espectral de las series de precipitación anual regionales, no “heredan” las propiedades de la densidad espectral de AnomNiño3. Las series de las estaciones climáticas Cenicafé, Naranjal y La Bella, muestran el ciclo de 11 años, coincidente con el ciclo del SSN.

Por último, para corroborar la influencia del ciclo solar en las lluvias aforadas en las estaciones climáticas Cenicafé, Naranjal, La Bella y Miguel Valencia, y cuantificar su efecto, se tomaron dos poblaciones de precipitaciones anuales, considerando la correlación inversa estadísticamente significativa de las precipitaciones regionales con el SSN y sus dos primeros rezagos:

- a) P.Solmin: Precipitaciones de los años coincidentes con los mínimos solares y de los dos años subsiguientes (Figura 11).
- b) P.Solmax: Precipitaciones de los años coincidentes con los máximos solares y de los dos años subsiguientes (Figura 11).

El máximo del año 1957 en la serie SSN se extendió a los años de 1958 y 1959 por sus valores extremos, los mayores de la serie. De manera similar, el mínimo profundo del año 2007 se extendió a los años 2008 y 2009, los menores valores de la serie.

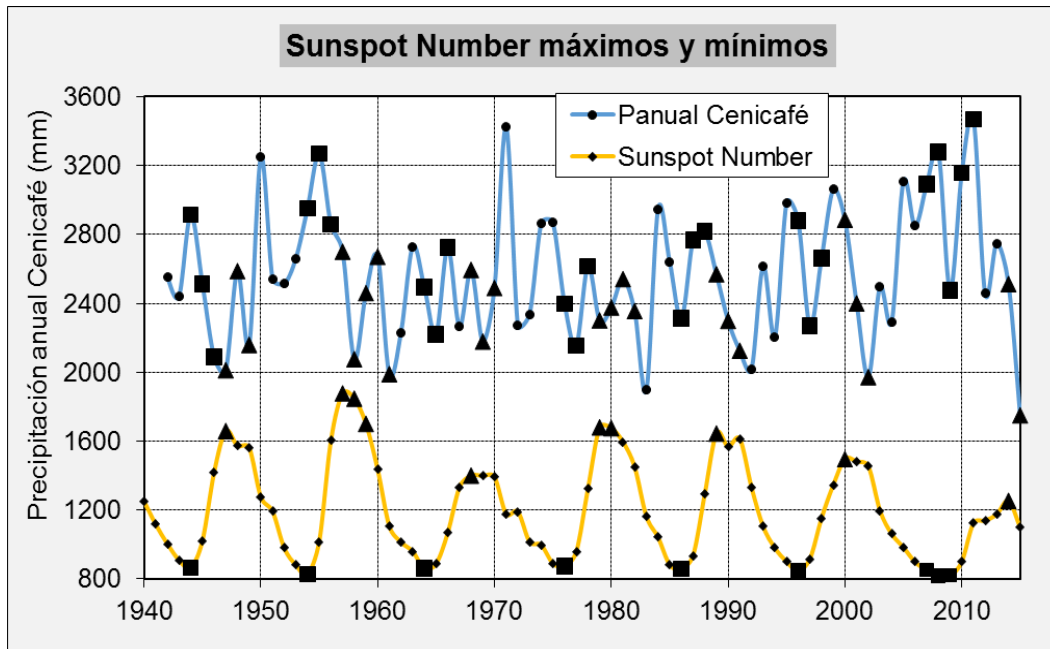


Figura 11. Series de precipitación Cenicafé (arriba) y SSN (abajo) con sus máximos (▲) y mínimos señalados (■).

La Figura 12, el gráfico de box-whisker muestra estadísticos de las dos poblaciones de precipitación anual en Cenicafé (serie con el período de cubrimiento más largo, 73 años): valor mínimo, cuartil inferior, media, mediana, cuartil superior y valor máximo.

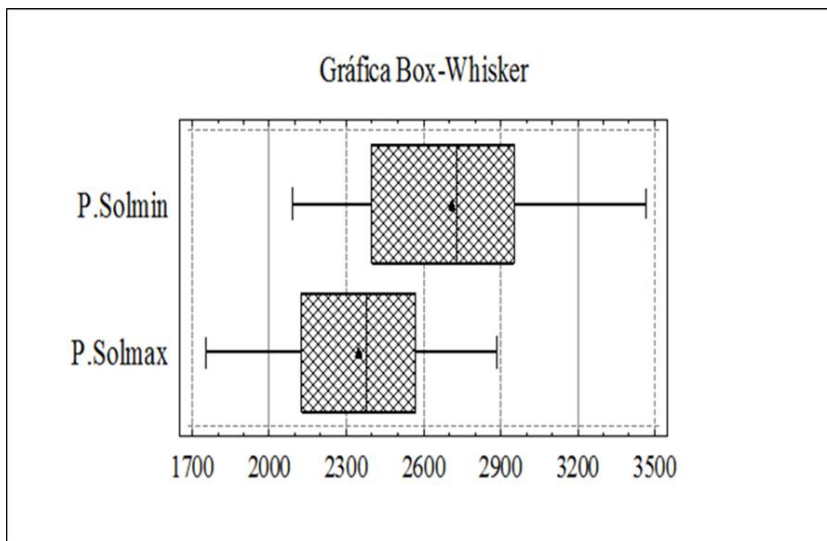


Figura 12. Cenicafé, P.Solmin y P.Solmax gráfico box – whisker (mm).

A esas dos poblaciones: P.Solmin y P.Solmax de precipitaciones anuales de las cuatro series de precipitación: de las estaciones climáticas Cenicafé, Naranjal, La Bella y Miguel Valencia, se les aplicó la prueba de diferencia de medias. Los resultados se muestran en la Tabla 3, nótese el intervalo del 99% de confianza, estrictamente positivo de la diferencia de medias de las estaciones: Cenicafé, Naranjal y La Bella, es decir, que las poblaciones tienen medias diferentes desde el punto

de vista estadístico. No así la estación Miguel Valencia, que al 95% de confianza, las medias de P.Solmin y P.Solmax no difieren.

Tabla 3. Prueba de diferencia de medias entre P.Solmin y P.Solmax

estaciones		Precipitación (mm.año ⁻¹)				Intervalo de confianza del 95%		Intervalo de confianza del 99%	
		N (año)	Media	Desviación estándar	Media del error estándar	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
Cenicafé	P.Solmin	23	2.712	385	80	2.546	2.879	2.486	2.938
	P.Solmax	23	2.348	279	58	2.227	2.469	2.184	2.512
	diferencia de medias		364		99	164	565	96	632
	Se concluye que las medias son diferentes al 99% de confianza								
Naranjal	P.Solmin	20	2.974	444	99	2.766	3.182	2.690	3.258
	P.Solmax	20	2.550	332	74	2.394	2.705	2.337	2.762
	diferencia de medias		424		124	173	676	87	762
	Se concluye que las medias son diferentes al 99% de confianza								
La Bella	P.Solmin	20	2.360	495	111	2.128	2.592	2.043	2.677
	P.Solmax	20	1.954	284	63	1.821	2.087	1.773	2.136
	diferencia de medias		406		128	145	666	55	757
	Se concluye que las medias son diferentes al 99% de confianza								
Miguel Valencia	P.Solmin	20	2.238	410	92	2.046	2.430	1.975	2.500
	P.Solmax	18	2.050	224	53	1.939	2.161	1.897	2.203
	diferencia de medias		188		106	-28	404	-103	479
	No se concluye que las medias sean diferentes al 95% de confianza								

El promedio de las precipitaciones anuales de Cenicafé coincidentes con los mínimos SSN y dos años subsiguientes, supera en un 15,5%, al promedio de las precipitaciones coincidentes con los máximos SSN y dos años subsiguientes. En Naranjal esa diferencia es del 16,6%, en La Bella 20,8%, en Miguel Valencia apenas es del 9,2%.

Discusión

Las correlaciones inversas estadísticamente muy significativas del SSN con las precipitaciones anuales en las estaciones de Cenicafé, Naranjal y La Bella, la auto-correlación y el semivariograma de las tres series que evidencian un ciclo decadal; las densidades espectrales de Naranjal y La Bella que muestran de manera clara el ciclo de 11 años; la diferencia de medias con alta significancia estadística entre las precipitaciones en las tres estaciones de los años coincidentes con los mínimos de las manchas solares y los dos años subsiguientes (P.Solmin) y las precipitaciones coincidentes con los máximos y los dos años subsiguientes (P.Solmax), advierten de una modulación importante de las lluvias regionales por el ciclo solar. Cuando el ciclo SSN está en su mínimo las precipitaciones tienden a ser mayores que cuando el ciclo está en su máximo.

Es notable la coincidencia de la auto-correlación y el semivariograma de las precipitaciones anuales en las estaciones climáticas Cenicafé, Naranjal y La Bella (Figuras 2, 3, 4 y 5). En ellas se aprecian similitudes de las series con sus rezagos de orden decadal o bidecadal, rezagos 10, 11, 21 y 22, alejamientos en la fase inversa del ciclo, rezagos 6, 16 y 17. Hecho que unido al ciclo de 11 años

que muestran las densidades espectrales de Naranjal, La Bella y aún de Cenicafé, evidencian un comportamiento cíclico de 11 años en las precipitaciones regionales.

La aparición de otros ciclos en la gráfica de la densidad espectral de las precipitaciones de Cenicafé, además del ciclo de 11 años, puede deberse a la influencia del ENSO, aún mayor que la del SSN, según el valor de las correlaciones y la varianza explicada por el modelo de regresión lineal univariado (Tablas 1 y 2). La densidad espectral de las anomalías SST en Niño3, muestra varios ciclos, los más destacados de 3,1 y 5,7 años, que tampoco se manifiestan en la densidad espectral de las lluvias en Cenicafé. Artículos de la literatura especializada hablan de los límites de los métodos espectrales en la detección de frecuencias de oscilación y proveen ejemplos de series con idénticos periodogramas pero distintas frecuencias de oscilación (15, 23).

Si bien, según los análisis hechos se infiere un efecto del ciclo solar con las lluvias de la Región del Eje Cafetero, en la estación Miguel Valencia, la más alejada del conjunto de estaciones, que se encuentra ubicada a unos 75 km en línea recta de la estación Cenicafé, en dirección NNW, el efecto es mínimo. Lo que indica que este acoplamiento posiblemente no se extiende a toda la zona andina colombiana. En China, donde se ha estudiado en profundidad el fenómeno, gracias al largo cubrimiento temporal de sus series pluviométricas y el gran número de ellas, se han detectado zonas con correlación positiva, estadísticamente significativa, entre el SSN y las lluvias, con correlación nula o no significativa y con correlación negativa estadísticamente significativa (24, 25).

¿Qué tanto abarca del territorio colombiano el acoplamiento entre manchas solares y precipitación? Para contestar la pregunta es necesario estudiar series de estaciones pluviométricas ubicadas en otros lugares, pero éstas deben cumplir la condición de tener un período extenso de cubrimiento, al menos 70 años continuos, para cubrir seis ciclos solares, buena calidad en su información y que su vecindario no haya sufrido modificaciones importantes.

Lo expuesto en este artículo es novedoso para la hidroclimatología colombiana. En la literatura climatológica mundial numerosos trabajos dan cuenta del efecto del ciclo solar en las lluvias. La bibliografía citada evidencia dicho efecto en India (6, 16), Rumania (7), Kenia (10), Argentina (18) y China (24, 25). Estudios basados, la mayoría, en 90 años de registros o más.

Al menos para la hidrología regional del Eje Cafetero, no se sabe si para otras zonas de Colombia, el establecer un acoplamiento del ciclo solar en la variabilidad pluviométrica es de suma importancia, puesto que posibilita construir modelos de pronóstico de largo plazo. Gachari *et al.* (10), proponen un modelo de pronóstico de lluvias con base SSN para Kenia.

Los esfuerzos por aplicar técnicas matemáticas más “robustas”, en la detección de modos de variabilidad en la hidrología colombiana, que los periodogramas de densidad espectral calculados con la transformada rápida de Fourier, tienen gran importancia (5). Pero aquí se ha demostrado que los métodos de la estadística clásica como: correlaciones, auto-correlación, pruebas de diferencia de medias y técnicas descriptivas sencillas como el semivariograma, son capaces de dar cuenta de modos de variabilidad climática, hasta ahora no bien identificados, y de medir su efecto. Ha sido elusiva a la comprensión científica la relación entre la actividad solar y el clima en la Tierra, se hace necesario recurrir a las técnicas matemáticas disponibles para establecer los efectos, cuando los hay, de esa relación en distintos lugares del globo. Parafraseando un adagio popular; “es preciso la combinación de todas las formas de... análisis”.

LITERATURA CITADA

1. BAL, S.; BOSE, M. A climatological study of the relations among solar activity, galactic cosmic ray and precipitation on various regions over the globe. *Journal Earth Systems Science* 119 (2): 201–209. 2010.
2. BALDWIN, M.; DUNKERTON, T.J. The solar cycle and stratosphere-troposphere dynamical coupling. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67: 71-82. 2012.
3. BRUGNARA, Y.; BRÖNNIMANN, S.; LUTERBACHER J.; ROZANOV, E. Influence of the sunspot cycle on the Northern Hemisphere wintertime circulation from long upper-air data sets. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13: 6275–6288. 2013.
4. BURROUGHS, W. *Weather Cycles: Real or Imaginary?*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2004. 310 p.
5. CARMONA, A.; POVEDA, G. Aplicación de la Transformada de Hilbert-Huang en la detección de modos de variabilidad hidroclimática en Colombia. *DYNA* 175: 72-80. 2012.
6. CHATTOPADHYAY, S.; CHATTOPADHYAY G. The possible association between summer monsoon rainfall in India and sunspot numbers. *International Journal of Remote Sensing* 32 (3): 891–907. 2011.
7. DOBRICA, V.; DEMETRESCU C.; BORONEANT, C.; MARIS, G. Solar and geomagnetic activity effects on climate at regional and global scales: Case study—Romania. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 71: 1727– 1735. 2009.
8. DORMAN, L. I. Cosmic rays and space weather: effects on global climate change. *Annales Geophysicae* 30: 9-19. 2012.
9. FLÓREZ, A. Los glaciares residuales en Colombia -enfoque geohistórico y situación actual-. *Revista Zenit* 3: 35-45. 1992.
10. GACHARI, F.; MULATI, D.M.; MUTUKU, J.N., Sunspot numbers: Implications on Eastern African rainfall. *South African Journal of Science* 110 (1-2): 69-73. 2014.
11. GONZÁLEZ, F.A. *Hidroclimatología del Departamento de Caldas. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.* 2014. 305 p.
12. GONZÁLEZ, F.A. Regímenes Pluviométricos de la Región del Eje Cafetero. *Revista informativa del proyecto SIG-PAFC IGAC*, 13: 31-70. 1997.
13. HAAM, E.; TUNG, K.K. Statistics of Solar Cycle – La Niña Connection: Correlation of Two Autocorrelated Time Series. *Journal of the Atmospheric Sciences* 69: 2934 -2939. 2012.
14. HAIGH, J. D. The sun and the earth's climate. *Living Reviews in Solar Physics* 4: 1-62. 2007.
15. HERNÁNDEZ, G., Times series, periodograms, and significance. *Journal of Geophysic* 104 (5): 10355-10368. 1999.
16. HIREMATH, K.M.; MANJUNATH, H.; SOON W. Indian summer monsoon rainfall: Dancing with the tunes of the sun. *New Astronomy* 35: 8–19. 2015.
17. HURTADO, A.F.; MESA, O.J. Reconstrucción de los campos de precipitación mensual en Colombia. *DYNA* 81 (186): 251-258. 2014.
18. MAUAS P.J.D.; BUCCINO, A.P.; FLAMENCO E. Long-term solar activity influences on South American rivers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 73: 377–382. 2010.

19. MÉNDEZ, A.L. An overview the solar activity and climate changes, *Revista Cubana de Física* 28 (2): 123-127. 2011.
20. PEÑA, A.J.; JARAMILLO, A.; PATERNINA, M.J. Detecting low frequency cycles in rainfall series from Colombian coffee-growing area by using descriptive methods. *Earth Sciences Research Journal Meteorology* 15 (2): 109 –114. 2011.
21. PEÑA, A.J; PATERNINA, M.J. Señales de variabilidad y cambio en algunas series anuales de precipitación de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 61(2): 173-185. 2010.
22. POVEDA, G. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista Academia Colombiana Ciencias* 28 (107): 201-222. 2004.
23. ROSSEBERG, A.G. On the Limits of Spectral Methods for Frequency Estimation. *International Journal of Bifurcation and Chaos* 14 (6): 2115-2123. 2004.
24. ZHAO, L.; WANG, J.; ZHAO, H. Solar Cycle Signature in Decadal Variability of Monsoon Precipitation in China. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 90 (1): 1–9. 2012.
25. ZHAO, L.; WANG J. Robust Response of the East Asian Monsoon Rainband to Solar Variability. *Journal of Climate American Meteorology Society* 27: 3043-3051. 2014.