

Actividad solar y su asociación con el régimen de lluvias en El Salvador



Solar activity and its association with the rain regime in El Salvador

Sierra Figueredo, Pablo; Marinero Orantes, Edgar Antonio; Sol Sánchez, Ángel; Editor Académico Prof. Dr. Juan Manuel Zaldívar Cruz

Pablo Sierra Figueredo

sierra@iga.cu

Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA, Cuba, Cuba

Edgar Antonio Marinero Orantes

edgar.marinero@ues.edu.sv

Instituto de Investigación Vulcanológica, Facultad Multidisciplinaria Paracentral, Universidad de El Salvador, El Salvador

Ángel Sol Sánchez

sol@colpos.mx

Colegio de Postgraduados, México. Campus Tabasco, México

Editor Académico Prof. Dr. Juan Manuel Zaldívar Cruz

Colegio Postgraduados, México

Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua, Nicaragua

ISSN-e: 2410-7980

Periodicidad: Semestral

vol. 3, núm. 6, 2017

czuniga@ev.unanleon.edu.ni

Recepción: 31 Octubre 2017

Aprobación: 14 Diciembre 2017

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/394/3941753001/index.html>

DOI: <https://doi.org/10.5377/ribcc.v3i6.5948>

Autor de correspondencia: sierra@iga.cu

Resumen: Numerosas publicaciones muestran evidencias sobre los posibles vínculos entre la variabilidad de la Actividad Solar y el clima terrestre, manifestado en acumulados de precipitación pluvial, presión atmosférica y temperatura, entre otros parámetros para diferentes latitudes geográficas y épocas. La variabilidad del clima, incluyendo la tendencia observada, es conocido que tiene una componente dependiente del calentamiento global de origen antropogénico en la era moderna, lo cual al parecer, está modulado por la acción externa del Clima Espacial, el que imprime fluctuaciones —desde afuera—, imponiendo ritmos que se superponen a los endógenos, lo que se evidencia en los registros multianuales de las variables climáticas. Se plantea la hipótesis de asociación entre los agentes cósmicos y el clima del planeta. Con este trabajo elaborado durante los años 2016 y 2017, resultado del análisis estadístico clásico de registros de acumulados pluviales de 8 estaciones brindados por la Dirección General del Observatorio Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (DGOA-MARN), hemos querido, como objetivo, mostrar su comportamiento para un período de 45 años (1971-2015) y analizar su posible asociación con la variabilidad de la Actividad Solar y Geomagnética en la región de Centroamérica, para cuya región no hemos encontrado publicaciones originales anteriores donde se acometa dicho análisis. Se muestran los resultados estadísticos clásicos de las series de tiempo obtenidas, para cada una de las Estaciones y en su conjunto, ofreciendo las conclusiones positivas de los autores en cuanto a la validez de la hipótesis de asociación.

Palabras clave: Variabilidad climática, Clima Espacial, Actividad Geomagnética.

Abstract: Numerous publications show evidences about the possible links between the variability of the Solar Activity and the terrestrial climate, manifested in accumulated rainfall, atmospheric pressure and temperature, among other parameters for different geographical latitudes and epochs. Climate variability, including the observed trend, is known to have a component dependent on global warming of anthropogenic origin in the modern era, which apparently is modulated by the external action of the Space Weather, which prints fluctuations "from outside", Imposing rhythms that overlap the

endogenous ones, which is evidenced in the multi-year records of the climatic variables. The hypothesis of association between the cosmic agents and the climate of the planet is proposed. With this work developed during the years 2016 and 2017, result of the classic statistical analysis of accumulated rainfall records of 8 stations provided by the General Direction of the Environmental Observatory, Ministry of the Environment and Natural Resources of El Salvador (DGOA- MARN), we have wanted, as objective, to show its behavior for a period of 45 years (1971-2015) and analyze its possible association with the variability of Solar and Geomagnetic Activity in the Central American region, for whose region we have not found previous original publications where undertake said analysis. The classic statistical results of the time series obtained are shown for each of the Stations and as a whole, offering the positive conclusions of the authors regarding the validity of the association hypothesis.

Keywords: Climatic variability, Space Weather, Geomagnetic Activity.

INTRODUCCION

La variabilidad del clima del planeta, además de ser obvia a partir de prolongadas observaciones históricas registradas desde tiempos remotos, también ha sido demostrada por numerosos autores, Giorgi (2002), Marengo (2004), mediante análisis de las series de tiempo en la era contemporánea. En las últimas décadas el tema de la variabilidad climática ha sido abordada con mayor intensidad debido a la amenaza del calentamiento global como consecuencia de la actividad antropogénica incrementada, lo cual ha traído como consecuencia una tendencia al incremento de los gases de efecto invernadero y una notable alteración del natural equilibrio de los elementos que integran el clima del planeta y su relación íntima con los diferentes ecosistemas y las biosfera en general, lo cual es actualmente conocimiento científico establecido, a pesar de algunas publicaciones contradictorias. Diferentes aspectos de la Bioeconomía y los Cambios Climáticos han sido abordados ampliamente en un libro publicado recientemente en el que se aborda el aspecto titulado —Actividad Solar, Clima y Productividad Agrícola. Posibles Vínculos II—, en el que se ofrecen referencias a la temática de la que trata el presente trabajo, (Sierra, 2014).

De manera que a esta tendencia de la era moderna se superpone la variabilidad natural del clima debido a factores endógenos y lo que es muy importante, a los ciclos que impone nuestra condición de vulnerabilidad a las influencias que vienen del Cosmos y en particular del Sol, cuya actividad responde a fenómenos de su interior, no bien conocidos aún, pero que se manifiesta fundamentalmente en ciclos que van desde el orden de 7-14-28 días hasta prolongados ciclos multianuales, principalmente los de 10-12 y 22 años, Friis- Christensen and Lassen (1991); Beer et al. (1990); Hua Lu et al. (2017). los más conocidos y estudiados, todo lo cual impacta en el Clima Espacial, medio en que navega el planeta con sus escudos protectores (magnetosfera, ionosfera, capa de ozono), que no siempre logran contrarrestar completamente los embates del viento solar, rayos cósmicos, radiación UV, X y otros elementos de alta energía, produciéndose en el planeta diversos efectos de respuesta en la tecnología, el clima y en la biosfera, muchas veces dramáticos pero generalmente poco tenidos en cuenta al no ser percibidos directamente por nuestros sentidos, (Oughton et al. 2017)

NOTAS DE AUTOR

sierra@iga.cu

Las interrogantes que se presentan y que son abordadas continuamente, vienen dadas últimamente como inquietudes acerca del origen de dicha variabilidad, que sumada a la implícita debido a las Estaciones provocadas por el movimiento de traslación del planeta alrededor del Sol, hacen que el fenómeno en cuestión sea muy complejo al presentarse una variabilidad—variable, con ciclos identificados pero inestables en el tiempo y el espacio. Esto es, los ritmos temporales encontrados en investigaciones climáticas no son generalmente estables para una misma región y por otra parte, se muestran diferentes para latitudes y localidades distantes, lo que en ocasiones es erróneamente mal interpretado como contradicciones en los resultados y en los modelos elaborados localmente. Lockwood (2012) aborda este tema analizando comparativamente su aspecto global y regional, lo que es muy importante según el punto de vista de los autores del presente trabajo.

Ahora bien, el tema que nos ocupa de la asociación entre la Actividad Solar y Geomagnética, ya abordado en una investigación conjunta por los mismos autores, Sierra et al. (2016) mostró la posible asociación entre la variabilidad climática en una localidad de El Salvador y la actividad geomagnética y solar para un largo período de observación (30 años). La importancia que atribuimos a esta contribución radica en que este tipo de trabajo se ha llevado a cabo en numerosos países y publicado desde hace ya algunas décadas por diversos autores que confirman la hipótesis de asociación de la actividad solar con diferentes variables climáticas, Svensmark et al. (2009); Svensmark et al. (2016); Jianping (2014), incluyendo la asociación de los ciclos solares con la presencia e intensidad de los eventos ENOS y la respuesta invernal en el oriente de Asia, Jianping (2014), pero ninguno de los encontrados en la literatura ha sido elaborado con datos climáticos de la región de Centroamérica, la que tiene una peculiaridad interesante por su situación geográfica, su estrechez territorial y proximidad a la región oceánica donde ocurre el fenómeno de —El Niño, por lo cual consideramos que los resultados obtenidos deben ser tenidos en cuenta y comparados con otros precedentes en Sur y Norteamérica y con otras regiones del planeta. Consideramos que en la temática de comportamiento climático no es factible la generalización de modelos para vastas regiones.

A nuestro entender, que coincide con el criterio de otros autores, ya en la actualidad no es tema de discusión si tal asociación existe o no, sino en qué grado ello ocurre y si es de consideración y digno de tener en cuenta para fines prácticos y lo otro es el controvertido tema de los posibles mecanismos que median entre el Clima Espacial y sus perturbaciones debido a las tormentas solares y el Clima del Planeta. En la literatura se encuentran resultados que se contradicen, al menos en algunos de sus planteamientos y conclusiones. Por ejemplo, la hipótesis de la relación entre la variabilidad de los rayos cósmicos galácticos (RCG) y la generación de nubes que provocan lluvias ha sido investigada muy recientemente y con profundidad empleando tecnología satelital y terrestre, encontrando autores como Svensmark (2016), que tal relación es positiva, mientras que otros como Qun Z. et al. (2013) anteriores a éste, muestran resultados que lo contradicen. Téngase en cuenta que el flujo de RCG que llega a la atmósfera proveniente del fondo cósmico galáctico varía en consonancia con las perturbaciones solares (Decremento Forbusch) y anticorrelaciona perfectamente con los ciclos undecenales de la AS, de manera que la medición de los mismos en la superficie terrestre es una muestra indirecta muy fidedigna de la AS y como variable física es utilizada frecuentemente para fines de diagnóstico y pronóstico del impacto de la AS en el planeta. Entre los numerosos recursos utilizados para evidenciar el fenómeno que nos ocupa, se encuentra el análisis detallado del ancho de los anillos de árboles antiguos, en los que se ha encontrado, en numerosas investigaciones, evidencias del crecimiento cíclico de los mismos en diferentes regiones del planeta, siendo el más reciente encontrado el encabezado por Perone et al. (2016), quienes presentan, en una amplia investigación con muestras de varios países de Suramérica, cómo los ciclos de la Actividad Solar dejan, sin dudas, su firma en este libro de la Naturaleza vegetal.

En enero del año 2013, la National Research Council o NRC, por su sigla en idioma inglés), reunió a un nutrido grupo de científicos de numerosos países para debatir concretamente el tan controvertido tema que ahora nos ocupa. El grupo estaba constituido por especialistas de diversas disciplinas involucradas y se emitieron importantes criterios recogidos en un informe denominado "Los Efectos de la Variabilidad Solar

permitiría una mejor representatividad para cada año, obviando volúmenes de lluvia de menor peso debidos a eventos esporádicos en meses fuera de ese período. (BID, 2016)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		B-01	B-06	B-10	C-09	P-16	U-06	U-11	V-09	Promedio
2		-88.75	-88.64	-88.91	-88.92	-89.05	-88.47	-88.58	-88.59	
3		13.98	13.87	13.93	13.71	13.43	13.48	13.34	13.6	
4	1971-01	16.7	0	0	6.3	0	0.3	0	9.2	4.0625
5	1971-02	0.2	0	0	0.9	10	0	0	0.2	1.4125
6	1971-03	4.2	4.9	5	1	25	1.6	0	0.1	5.225
7	1971-04	24	6.7	20	5.5	30	1.1	0	5.9	11.65
8	1971-05	122.7	268.2	200	152.6	200	189.2	114	173.6	177.5375
9	1971-06	413.3	297.6	250	318.4	250	208.9	246	279.8	283
10	1971-07	361	323	210	318.6	275	174.5	155	143.1	245.025
11	1971-08	408.7	574.3	325	364	350	308.5	319	217.9	358.425
12	1971-09	299.3	291.5	225	243.5	250	467.6	355	242.3	296.775

FIGURA 2

Estructura de la base de datos de acumulados de lluvia mensual original
fuente de la presente investigación.

Adicionalmente utilizamos herramientas del Microcal Origin 6.0 para obtener algunos de los resultados estadísticos mostrados más adelante.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Antes que todo, hicimos una caracterización de las variables de acumulado mensual de precipitación, obteniendo al final los valores básicos (Promedio mensual, valores máximos mensuales por estación, así como la Desviación Estándar para cada caso) para cada una de las estaciones (Tabla 1).

TABLA 1

Caracterización general de las 8 estaciones registradas en el trabajo. Las cifras se refieren a los acumulados mensuales en mm. (D.E.: Desviación Estándar).

	B-01	B-06	B-10	C-09	P-16	U-06	U-11	V-09	Promedio
Máximos	637.6	727.7	667.1	574.7	927	1348.5	829	650	677.725
Promedio	165.07	163.02	153.96	141.77	142.1	161.33	147.93	131.77	150.87
D.E.	165	164.79	153.33	141.62	159.29	176.74	174.48	136.72	148.26

Elaboración propia

Del gráfico de la Fig. 3 podemos observar la amplia variabilidad, de año en año del acumulado para la muestra de estaciones utilizadas, algunas ocasiones más del doble del acumulado de unos años respecto a otros. No se aprecia una franca tendencia, sino más bien un régimen mantenido durante los 45 años, aunque cuando se analiza cada estación individualmente si se puede observar tendencia a un incremento en el acumulado, sobre todo a partir de la década de los 90.

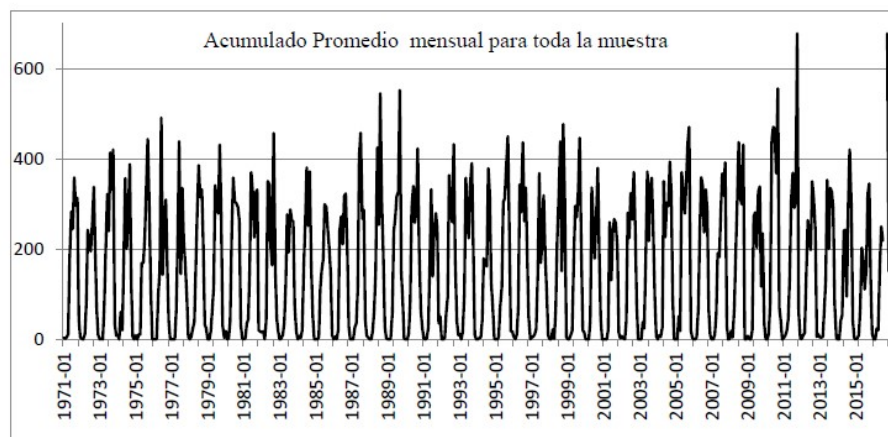


FIGURA 3

Serie de tiempo de 45 años de los acumulados mensuales (mm) promedio de las 8 Estaciones
Elaboración propia

Es obvia la estacionalidad de la variable lluvia respecto al promedio mensual total para el período, que es de 150,8 mm. Se observa que los años más secos fueron principalmente 1983, 1991 y 2001 y los más lluviosos 1976, 1988-89, 1998, 2005, 2010-11. Se evidencia que al menos para el período registrado, los años lluviosos, son cada vez más lluviosos, a pesar de que la tendencia general apenas va en crecimiento, mientras que si observamos la serie de tiempo de los acumulados promedios anuales (Fig. 4) de todas las estaciones, vemos en primer lugar que se manifiesta una sensible tendencia de incremento de los acumulados, lo que se observa en todas las estaciones, salvo en una de ellas, la B-06, cuya tendencia es a un ligero decremento, en segundo lugar vemos que hay una notable variabilidad respecto al promedio, alcanzando picos positivos en el año 2005 y 2011 valores de una y dos sigmas por fuera de la desviación estándar, mientras que en el año 2001 se rebasó negativamente una sigma, siendo estas las anomalías más destacadas para esta serie de tiempo, justificadas al parecer por eventos meteorológicos extremos ocurridos en esos años. La estación V-09 muestra una notable tendencia al incremento sostenido de los acumulados anuales, al punto de que como tendencia, cada año se ve incrementada en algo más de 10 mm, interpretándose como que los años secos son cada vez menos secos y los lluviosos, cada vez más lluviosos (Fig. 5). (Naomi O, 2004)

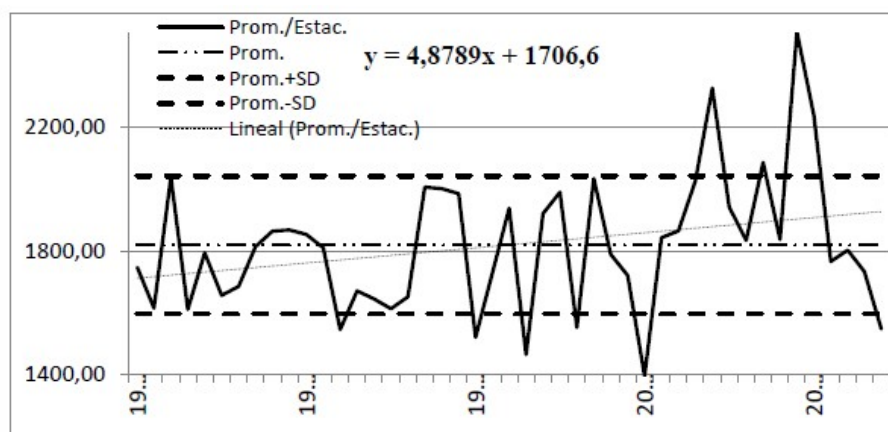


FIGURA 4

Promedios anuales del acumulado por estación (mm.)
Elaboración Propia

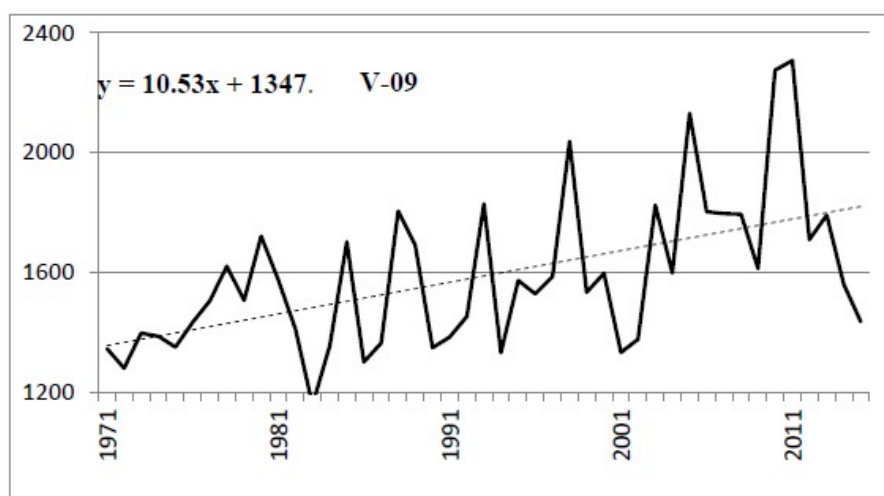


FIGURA 5

Acumulados anuales (mm.) de la Estación V-09. La línea punteada representa la tendencia lineal ajustada cuya ecuación se muestra en la esquina superior izquierda.

Elaboración propia

Los propios gráficos de las figuras 4 y 5 permiten observar la marcada variabilidad que se presenta en el régimen lluvioso de año en año, lo cual nos lleva más adelante a analizar la presunta periodicidad multianual y su posible asociación con los períodos presentes en la Actividad Solar y Geomagnética.

En un análisis de estacionalidad para toda la muestra, se encontró que los mayores valores acumulados de precipitación, por encima de los 150mm., ocurren entre los meses de mayo a octubre, siendo el resto de los meses de muy escasa precipitación, lo cual se puede apreciar en el caso mostrado en la Fig. 6, siendo los demás muy semejantes, todo lo cual concuerda con la información brindada en el Informe Nacional del BID sobre el Perfil de Riesgo de Desastres por Inundaciones para El Salvador en la pág. 32, BID (2016). El registro absoluto de acumulado mensual se lo anota la Estación U-06 con 1348.5mm en octubre del 2011, justificado por la Depresión Tropical DT12. También reportado en (19) en la pag. 67, lo cual causó numerosos desastres en amplias regiones del país, mientras que el año 2001 resultó ser poco lluvioso para todas las estaciones, lo que contribuyó a que fuera el menos lluvioso para el promedio de toda la muestra. Con respecto a la estación V-09, registró una precipitación anómala en el año 2009 que se relaciona con un fenómeno hidrometeorológico que se focalizó en la zona norte del volcán San Vicente (Chinchontepec), denominado tormenta IDA.

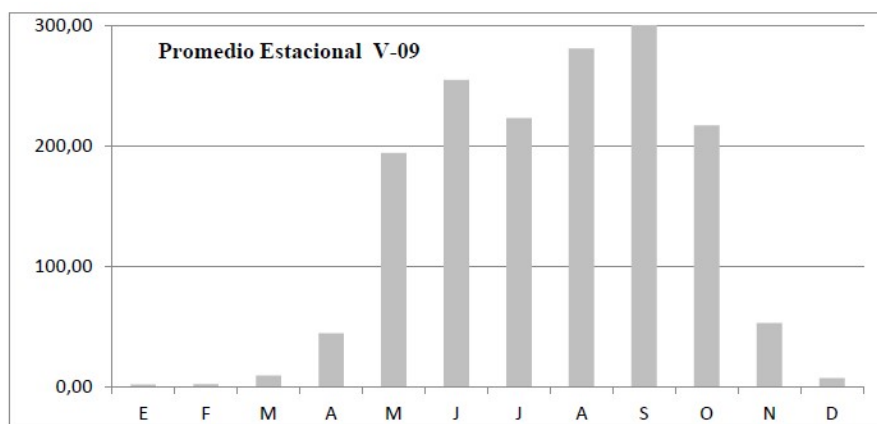


FIGURA 6

Muestra del comportamiento estacional del promedio acumulado mensual (mm), en este caso para V-09, las demás son muy semejantes. El resultado se obtiene de la superposición de los 45 años observados.

Elaboración propia

Por otra parte, tomamos, como variable independiente representativa de la actividad geomagnética, el Índice Geomagnético Ap tomado de los reportes internacionales de Clima Espacial, utilizado comúnmente para servicios e investigaciones relacionadas con el tema. Para esta variables también se creó la base de datos en formato EXCEL utilizando los promedios mensuales, a partir de los cuales se obtuvo promedios anuales, lo que nos permitió obtener series de tiempo comparativas para el acumulado total de la muestra y para cada una de las estaciones meteorológicas así como los coeficientes de correlación correspondientes que se muestran en la tabla 2.

En el conjunto de gráficos mostrados en la Fig. 8 llama la atención la tendencia en el comportamiento del índice Ap, en la cual se observa una franca disminución en las últimas décadas, lo que es también representativo de la Actividad Solar, fenómeno éste debatido últimamente por los medios científicos de Clima Espacial y Física Solar ya que al parecer nos dirigimos a un Gran Mínimo de la Actividad Solar y consecuentemente geomagnética, con implicaciones en el planeta aún no muy claras para las próximas décadas, incluyendo el comportamiento futuro del clima terrestre. En la Fig. 9 se muestra el comportamiento del promedio anual de un índice directo de la Actividad Solar (Flujo de Radioemisión en 10,7 cm. de longitud de onda) y su relación con los promedios anuales de precipitación; en el mismo se evidencia una correlación positiva significativa entre estas variables hasta principios de la década de los años 90, mientras que a partir de esos años la misma pasa a ser negativa aunque con menor significación, lo que coincide con la fase de franca tendencia a una disminución general de la actividad solar hasta la fecha del presente, lo que constituye, hasta ahora, una incógnita para la ciencia, ya que se trata de un comportamiento anómalo de nuestra estrella, el Sol, como se mencionó más arriba.

Los propios gráficos de la Fig. 8 conjuntamente con la tabla 2, nos permiten observar que los valores de correlación directa entre las variables son negativos y bajos, salvo la Estación P-16 que arroja un valor positivo; sin embargo, con un análisis más detallado de los gráficos se puede ver cómo en general aparece durante una parte del período un sincronismo positivo, el cual desaparece, surgiendo a continuación un desfase, en ocasiones de contrafase entre las curvas, lo cual podríamos decir que es lo más común y por ello las cifras de correlación son, en general bajas, salvo V-09, la que mantiene durante todo el período una franca oposición de fase (correlación negativa) con respecto a los ciclos de la actividad geomagnética, a la vez que una mantenida y notable tendencia al incremento lluvioso.

Por las razones que se evidencian claramente en la Fig.8 consideramos que para la obtención de resultados más firmes, no es posible utilizar promedios de diversas estaciones alejadas entre ellas pues se obtienen cifras que no serán representativas realmente del comportamiento climático para una región amplia. Esto, al menos

para Centroamérica, en que por las razones señaladas en la introducción, recibe influencias de fenómenos meteorológicos tanto del Caribe, el Atlántico y del Océano Pacífico, lo cual hace que sea muy peculiar y variable, comparado con el comportamiento del Clima en regiones continentales más estables y con una mayor — inercia del clima.

Consideramos que sería conveniente realizar una exploración semejante a la presente pero con al menos 100 años de datos para confirmar si el comportamiento descrito arriba es temporal o no, ya que como se ha visto en registros históricos de la actividad solar, la misma presenta ciclos largos, los que si la hipótesis de asociación es cierta, aquella pudiera imprimir una modulación muy compleja en la variabilidad del clima, como ha sido reportado en algunos trabajos recientes como el de Lockwood (2012), donde se muestra incluso, para la era moderna, la intromisión antropogénica en los ritmos que impone la Naturaleza del Sol en el Clima.

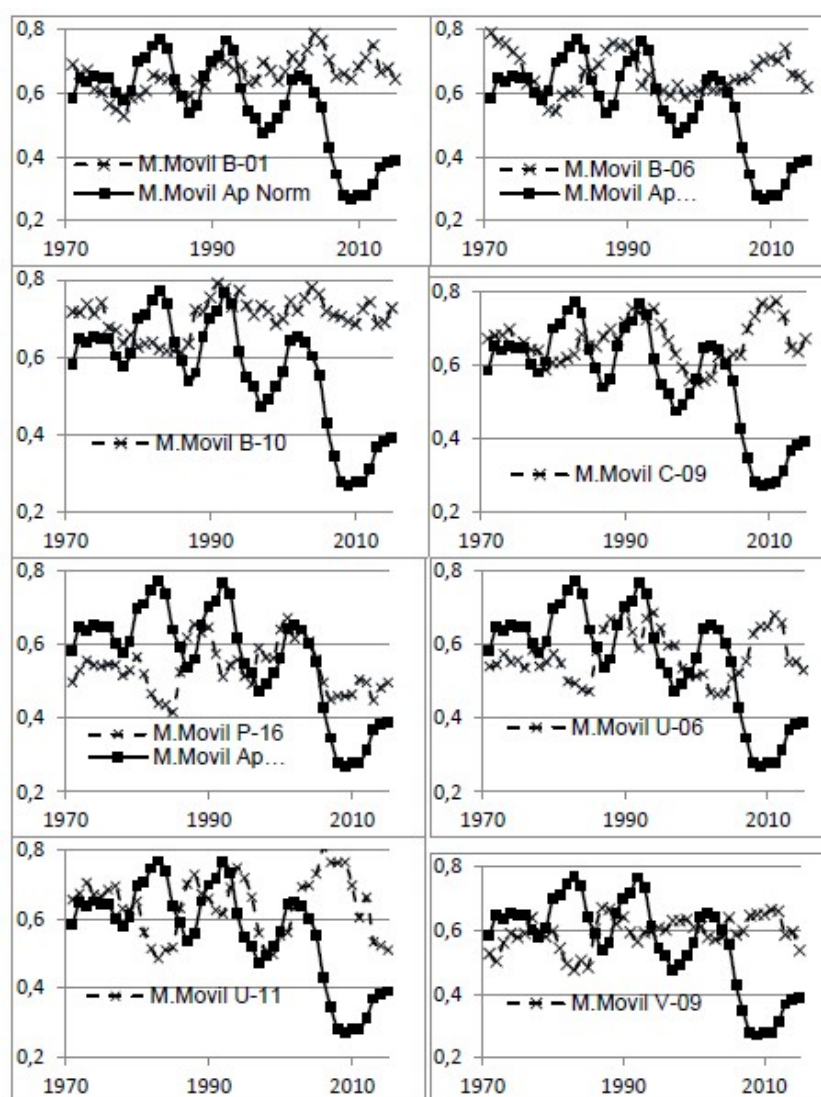


FIGURA 8

Relación temporal entre los promedios anuales (normalizados y suavizados) del índice geomagnético Ap y los acumulados de lluvia de los meses de agosto + septiembre (normalizados y suavizados) para las 8 estaciones utilizadas.

Elaboración propia

Los dos gráficos mostrados en la Fig. 10 (a y b) muestran las regresiones lineales entre el Flujo Solar y el Acumulado Promedio total de precipitación para los segmentos de tiempo comprendidos entre 1971 a 1990

y entre 1991 a2015, en los cuales se evidencia lo observado en la Fig. 9. La correlación entre estas variables es positiva para la primera serie y negativa y con mucha dispersión en la segunda, fenómeno que por ahora no encontramos explicación.

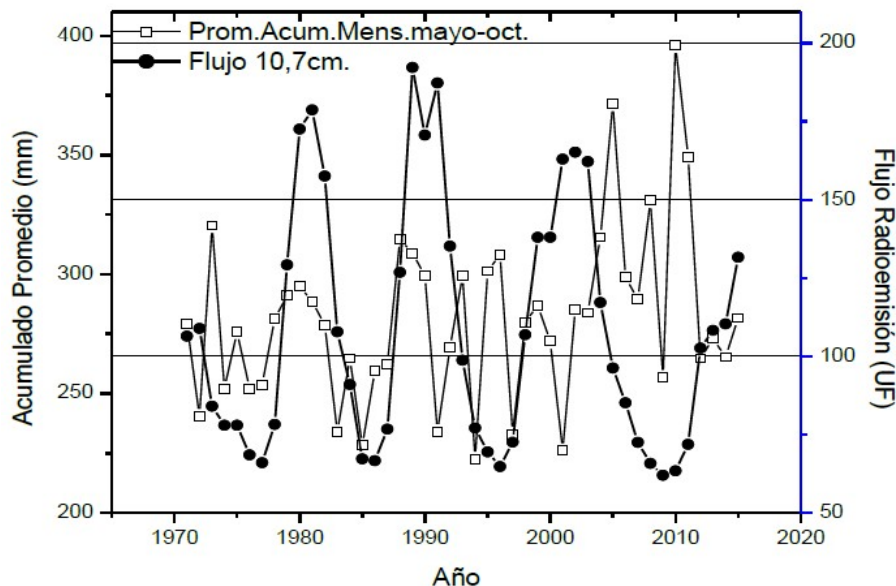


FIGURA 9

Comparación de valores anuales del Flujo de Radioemisión Solar y el acumulado promedio anual de precipitación para toda la muestra. La línea con círculos negros corresponde al Flujo Solar y la de cuadrados sin relleno al Promedio Acumulado. (1 UF= 10^{-22} W/m².Hz⁻¹).

Elaboración propia

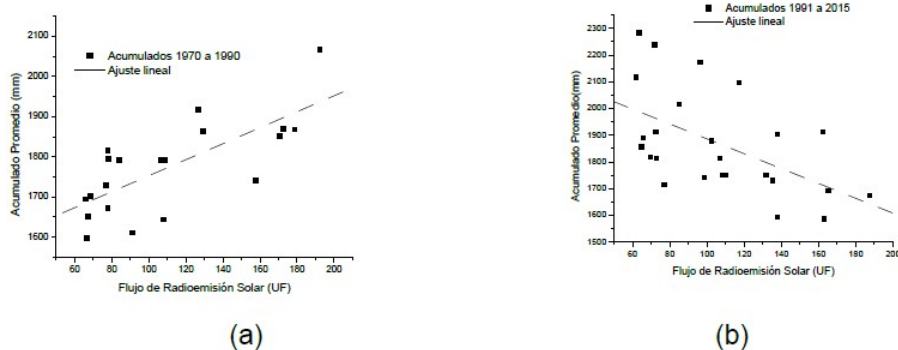


FIGURA 10

Regresión lineal que muestra el comportamiento de “asociación positiva” entre las variables Flujo de Radioemisión Solar vs Acumulado de Precipitación, en el gráfico superior (a) para el período 1971 a 1990 y en el (b) para los años 1991 a 2015 (1 UF = 10^{-22} W/m².Hz⁻¹).

Elaboración propia

En este tipo de investigación generalmente se calculan los períodos presentes en las series de tiempo que se analizan, ya que esta información no es revelada a no ser por autocorrelación o por este método de periodograma. En nuestro caso, calculamos los periodogramas de Ap. y de cada una de las 8 Estaciones para las series anuales, obteniendo el resultado mostrado en la Tabla 3. De aquí podemos observar que B-10 y P-16 contienen períodos coincidentes con Ap. (10.7 y 5.33 años), valores también presentes en la variable solar del Flujo de radioemisión. Salvo U-11 todas las Estaciones contienen período de 5.33 años coincidente con Ap, siendo este un período fundamental en esta relación, el cual, salvo en U-11 siempre aparece (habría

que analizar qué factor en especial hay para el entorno de U-11 que la diferencia de todas las demás en este análisis). Son interesantes otros períodos menores de 4 años, los que existen para todas las Estaciones y también para Ap, así como el de 8 años que no existe en Ap, pero si en todas las estaciones y generalmente con potencia considerable en los espectros (periodogramas) obtenidos. Sería agregar demasiado material a este trabajo, pero resultaría recomendable analizar lo concerniente a la influencia de El Niño y La Niña en la variabilidad analizada.

TABLA 3

Períodos encontrados mediante Transformada Rápida de Fourier, para las series de acumulados puros anuales para las 8 Estaciones en la primera columna (Todas las cifras representan años enteros y fracción). Columnas 2 a la 10 son los períodos clasificados.

B-01			8	5.33	4	3.29	3.05		
B-06			8	5.33		3.6	3.2	2.46	2.21
B-10		10.7	8	4.6-5.33			3.2	2.78	2.2-2.3
C-09	21,3		8	4.92			3.2	2.56	2.06
P-16		10.7-12.8	8	5.53		3.6	3.05	2.46	2.06
U-06	16		8	5.33	4.27	3.76	3.2	2.46	
U-11			8		4.27		3.05	2.46	
V-09			8	5.33	4.27	3.76		2.46	
Ap		10.7		5.33	4.0		2.9	2.37	

Elaboración propia

Una última exploración que realizamos, de las muchas que se pueden acometer en este complejo tema, fue la de los acumulados anuales de lluvia para cada una de las Estaciones para cada uno de los 8 puntos que componen la muestra y para el acumulado total de la misma, con lo cual filtramos la variabilidad de más cortos períodos, revelándose mejor la tendencia durante los 45 años analizados en relación con la actividad solar y geomagnética bajo el mismo tratamiento. En la Fig. 11 se puede observar el resultado representativo de dos de las Estaciones, el que revela lo ya analizado a partir de las series temporales anuales, que es el predominio de la tendencia al incremento de lluvias en general.

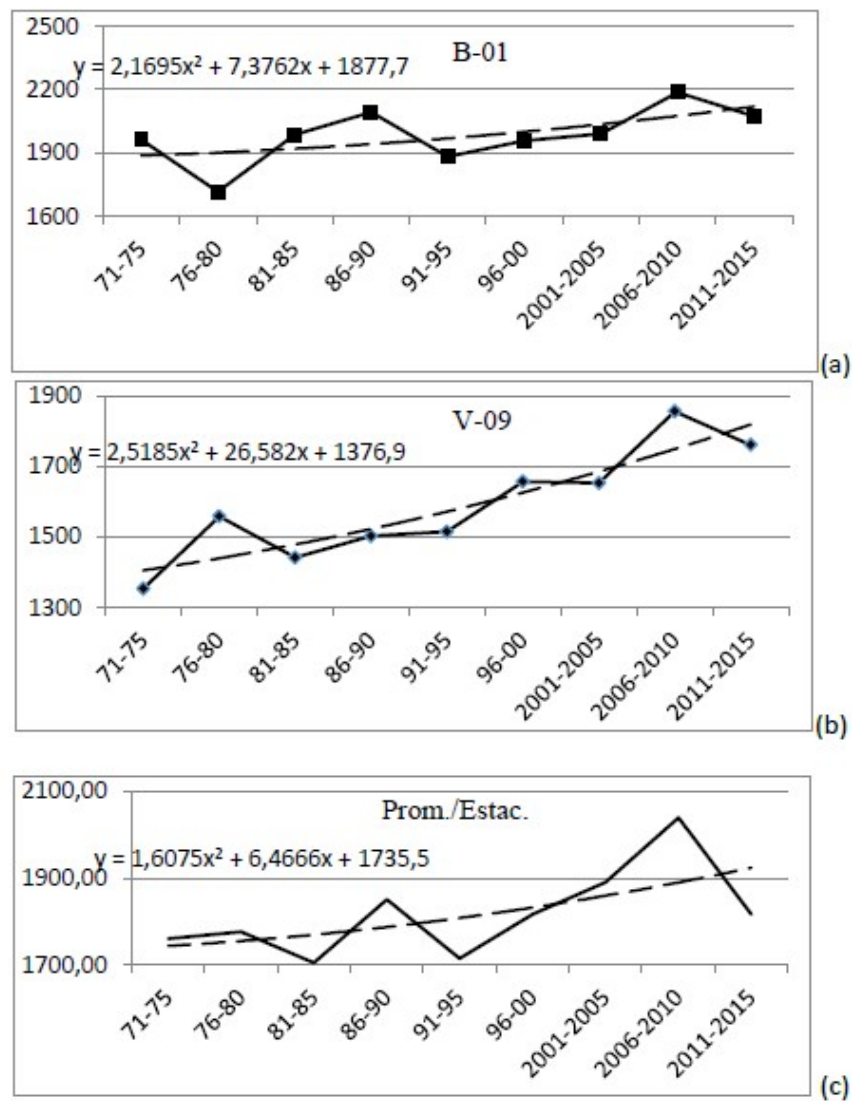


FIGURA 11

Acumulados promedios anuales (mm) por lustro para las Estaciones que se muestran (a y b) y para el conjunto de las 8 Estaciones (c). Las líneas de ajustes polinomiales se representan por líneas de guiones y cuyas ecuaciones aparecen en la parte superior de cada gráfico.

Elaboración propia

En la Tabla 4 se ofrece un cuadro del análisis de correlación entre los valores promedios anuales de Ap. y los acumulados anuales promedio para cada una de las Estaciones.

TABLA 4
Resultado del análisis de correlación entre los promedios anuales de
Ap y los acumulados promedios anuales para todas las Estaciones

	B-01	B-06	B-10	C-09	P-16	V-06	V-09	U-11
R	-0.24	-0.09	-0.269	-0.24	0.137	-0.4	-0.59	-0.46
SD	0.078	0.084	0.075	0.082	0.1129	0.1	0.079	0.117
N	45	45	45	45	45	45	45	45
P	0.11	<0.535	<0.0736	<0.111	<0.37	<0.006	<0.0001	<0.0015

Elaboración propia

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos y presentados en el acápite anterior, consideramos que si bien las evidencias de asociación entre la Actividad Solar y Geomagnética con el régimen de lluvias no son robustas, si podemos concluir que para la mayoría de las Estaciones contempladas en este trabajo, se observa una asociación causa efecto que nos permite afirmar que son fenómenos asociados dentro de un conglomerado de otras variables, que en su conjunto actúan sobre el comportamiento del clima para el territorio analizado en cuanto a su comportamiento real. Al no tener, en el presente trabajo un control estricto sobre las demás variables, no las podemos sustraer para hacer más clara la asociación objeto de estudio, no obstante haber explorado la secuencia de ocurrencia de eventos como los huracanes, erupciones volcánicas de magnitud considerable y los reportes de presencia de los eventos El Niño y La Niña, no encontramos asociación clara de los mismos con el comportamiento cíclico de las lluvias, salvo en el caso de la baja tropical de octubre de 2011 con notables inundaciones, los huracanes Mitch en 1998, Stan en 2005 y tormenta IDA en 2009, los que al parecer contribuyeron a un mayor acumulado pluviométrico durante esos años, pero solamente en dos o tres Estaciones y no en las demás. Seguramente los eventos de El Niño y La Niña provocan ciertas anomalías en el régimen lluvioso pero es muy difícil discriminar su magnitud en particular debido a la irregularidad de los mismos y la incertidumbre en el tiempo de presencia no hay una cuantificación que nos permita ahora tenerlos en cuenta.

En cuanto a tendencia en el régimen lluvioso, aunque no podamos afirmar que se trate de una asociación, si queremos señalar, a partir de los resultados, que la inflexión en la misma hacia un marcado aumento (en 7 de las 8 Estaciones) que ocurre a partir de los años 90 coincide con un franco decremento en la Actividad Solar y Geomagnética mientras que respecto a la variabilidad se observa que precisamente durante esos mismos años 90 ocurre una inversión de la correlación entre el acumulado de lluvia anualmente y las variables independientes utilizadas y lo mismo ocurre respecto a la dispersión de los datos de lluvia, esto es, los años lluviosos son cada vez más lluviosos y los secos cada vez más secos en relación con la línea de tendencia.

Consideramos que el impacto que pueda tener este tipo de investigación es obvio, ya que con el conocimiento de la variabilidad climática y su posible asociación con los agentes físicos cósmicos tenidos en cuenta, se hace posible prever, al menos tentativamente los futuros períodos anómalos de precipitación, con las consecuencias económicas y sociales implícitas, por lo cual recomendamos dar continuidad a este tipo de investigación en diferentes puntos de la región que nos ocupa.

De manera que, según los autores, la hipótesis de asociación es válida para el régimen de lluvias con la muestra utilizada. Consideramos prudente y necesario, extender este tipo de investigación a otros países de la región que cuenten con bases de datos de 50 años o más, lo que permitiría dar mayor validez a los resultados obtenidos en el presente trabajo, que aunque modestos, dan alguna luz a este controvertido tema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan agradecimiento por la colaboración para el logro de esta investigación a todos los que tienen que ver con la colección y custodia de los valiosos datos climáticos brindados y en especial a la Dirección General del Observatorio Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (DGOA-MARN), considerando que la base de datos facilitada es estable y de buena calidad.

LITERATURA CITADA

- BID (2016) Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Perfil de riesgo de desastre por inundaciones para El Salvador / Banco Interamericano de Desarrollo, p. cm. — (Nota técnica del BID; 877). 157 p.
- Beer J.; Blinov A. et al. (1990). Use of ^{10}Be in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity, *Nature* 347, 164 – 166, 1990. doi:10.1038/347164a0.
- Friis- Christensen E. and Lassen K. (1991). Length of the Solar Cycle: An Indicator of Solar Activity Closely Associated with Climate, *Science, New Series*, Vol. 254, No. 5032 (Nov. 1, 1991), pp. 698-700.
- Giorgi F. (2002). Variability and trends of sub-continental scale surface climate in the twentieth century. Part I: observations, *Climate Dynamics* (2002) 18: 675-691, <https://doi.org/10.1007/s00382-001-0204-x> http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/home.html <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data>
- Hua Lu et al. (2017). Stratospheric Response to the 11-year Solar Cycle: Breaking Planetary Waves, Internal Reflection and Resonance. *Journal of Climate*, vol.30, n.18 <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0023.1>. Published Online: 14 June 2017. Corresponding author Email: hlu@bas.ac.uk
- Jianping D. (2014). A 449 year warm season temperature reconstruction in the southeastern Tibetan Plateau and its relation to solar activity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Volume 119, Issue 20 27, October 2014, Pages 11,578–
- Lockwood M. (2012). Solar Influence on Global and Regional Climates. *Surv Geophys* (2012) 33:503–534, DOI 10.1007/s10712-012-9181-3.
- Marengo, J., (2004). Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theor Appl Climatol* (2004) 78: 79. <https://doi.org/10.1007/s00704-004->
- Meehl G.A.; Arblaster J.M.; Matthes K.; Sassi F. and van Loon H. (2009). Amplificando la respuesta del sistema climático del Pacífico a la pequeña influencia del ciclo solar de 11 años. *Science* 325: 1114-1118, 2009
- Naomi O. (2004). The Scientific Consensus on Climate Change, *Science* 03 Dec 2004: Vol. 306, Issue 5702, pp. 1686, DOI: 10.1126/science.1103618.
- Oughton, E. J.; A. Skelton, R. B.; Horne, A. W.; Thomson, P. and Gaunt C. T. (2017), Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure, *Space Weather*, 15,65–83,doi:10.1002/2016SW001491.
- Perone A. et al. (2016). Evidence of solar activity and El Niño signals in tree rings of *Araucaria araucana* and *A. angustifolia* in South America., *Global and Planetary Change* 145 (2016) 1–10.
- Qun Z.; Wen Ch. and Wen Zhou. (2013). Solar cycle modulation of the ENSO impact on the winter climate of East Asia. *Journal of Geophysical Research*. Volume 118, Issue 11, 5111–5119. 16 June 2013. DOI: 10.1002/jgrd.50453.
- Sierra P. (2014). Actividad Solar, Clima y Productividad Agrícola. Posibles Vínculos. Estado del Arte de la Bioeconomía y el Cambio Climático. Red CYTED, Red de Bioeconomía y Cambio Climático (REBICAMCLI) Estado del arte de la Bioeconomía y el cambio climático / Red de Bioeconomía y Cambio Climático (REBICAMCLI); Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-León, Coordinador. -- León, Nicaragua: Editorial Universitaria, 2014. 312 p.: cuadros y gráficas. P.p. 123-149.
- Sierra P., et al. (2016). Régimen de lluvias en El Salvador y su posible asociación con la Actividad Solar. Primer Congreso Iberoamericano de Bioeconomía y Cambio Climático 2016, 17 a 21 de Octubre 2016, Veracruz, México.

- Svensmark, H., Bondo T. and Svensmark J. (2009). Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15101, doi:10.1029/2009GL038429.
- Svensmark, J., M. Enghoff B., Shaviv N. and Svensmark H. (2016). The response of clouds and aerosols to cosmic ray decreases, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 8152–8181, doi: 10.1002/2016JA022689.