

CARACTERIZACIÓN DE LA IRRADIANCIA ERITÉMICA DIARIA BASADA EN MODELOS DE SERIES TEMPORALES Y DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE UV EN EL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL PARAGUAY

CHARACTERIZATION OF THE DAILY ERYTHEMIC IRRADIANCE BASED ON TIME SERIES MODELS AND DETERMINATION OF UV INDEX IN THE CENTRAL DEPARTMENT OF PARAGUAY

VIVIANA ISABEL DÍAZ ESCOBAR¹

¹Departamento de Estadística. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción. E-mail: viviana1712@gmail.com

Resumen: Las radiaciones solares ultravioletas (UV) son las más energéticas que llegan a nivel de la superficie terrestre, produciendo acciones biológicas de importancia. En esta investigación se analizaron series de valores máximos diarios de irradiancia eritémica, utilizando técnicas de análisis de series temporales, para estimar modelos que caractericen el comportamiento de dicha variable, realizar predicciones y determinar los índices UV para el departamento Central del Paraguay. Los registros fueron obtenidos mediante un piranómetro UVB-1 de la marca YES en el Laboratorio de Investigación de la Atmósfera y Problemas Ambientales (LIAPA) de la FACEN - UNA. Se presentan ciclos anuales desde el año 1997 hasta finales de 2011 de los valores máximos diarios de irradiancia eritémica. La serie de valores máximos diarios de radiación ultravioleta eritémica (UVER) fue ajustada mediante el método de descomposición clásica, utilizando un modelo aditivo, en el cual fueron consideradas las componentes: tendencia, estacional y aleatoria. Fueron obtenidos pronósticos de la variable estudiada. Las dosis diarias máximas de UVER se observan en los meses estivales. Los pronósticos diarios de los índices UV se obtienen a partir de las predicciones de valores máximos diarios de UVER, de acuerdo con los criterios actuales recomendados por las organizaciones internacionales. Las estimaciones del índice UV, que se alcanza en las horas centrales del día, oscila entre valores máximos de 8 - 11 durante los meses estivales y valores entre 2 - 5 en los meses de invierno. De este modo es posible informar acerca del comportamiento de la irradiancia eritémica, así como sobre el índice UV y alertar a la población sobre el nivel de radiación ultravioleta esperado, considerando la escasez de información relacionada a estos temas.

Palabras claves: irradiancia eritémica, índice UV, series temporales, descomposición clásica, modelos ARMA.

Abstract: The ultraviolet Solar radiations are the most energetics arriving to the earth's surface, producing important biological effects. In this research analyzes series of daily maximum values of erythemic irradiance by using temporal analysis techniques to estimate models that characterize the behavior of this variable, to make forecasts and to determine the UV index for the Central department of Paraguay. Data were obtained using a pyranometer UVB-1 of the YES brand located at the Laboratory of Atmospheric Investigation and Environmental Issues (LIAPA) of the School of Natural and Exact Sciences (FACEN) of the National University of Asuncion (UNA). Yearly cycles from 1997 until the end of 2011 of the daily maximum values of erythemic irradiance are shown. The series of daily maximum values of ultraviolet erythemic radiation (UVER) was fitted by classical decomposition methods, using additive model and considering the following components: trend, seasonal and random. Forecasts values of the variable were obtained. The highest levels of UVER were obtained during the summer months. The daily forecasts of UV indexes were obtained from the predictions of daily maximum values of UVER, according to the current criteria recommended by international organizations. The maximum values for UV index estimates, which are reached at central hours of the day, ranges in between 8 - 11 during summer months and in between 2 - 5 during winter months. Therefore, it is possible to report about the erythemic irradiance behavior, as well as the UV index and alert the general public about the expected level of ultraviolet radiation, despite the paucity of information related to these issues.

Keywords: erythemic irradiance, UV index, time series, classical decomposition, modelos ARMA.

INTRODUCCIÓN

Las radiaciones solares ultravioletas son las más energéticas que llegan a nivel de la superficie terrestre por fotón incidente y en consecuencia producen acciones biológicas de importancia sobre materiales y sustancias. La energía de estos fotones, particularmente los ultravioleta B (UVB), es suficientemente alta como para romper ligaduras de las moléculas que componen ciertas sustancias expuestas a esta radiación. Entre ellas, la de mayor significación es la molécula de ADN, íntimamente relacionada con los seres vivos, que tiene su máximo de acción biológica debida a la radiación solar en el entorno 305-310 nm (nanómetros) (Jagger, 1985).

La radiación solar ultravioleta tiene efectos nocivos sobre los organismos vivos. En particular estos efectos se manifiestan en los seres humanos principalmente sobre la piel, pero también pueden actuar sobre los ojos o incluso sobre el sistema inmunológico (Diffey, 1991). De estos efectos el más común es el eritema o quemadura solar cuyo espectro de acción muestra un máximo absoluto en los 297 nm (McKinlay y Diffey, 1987).

El índice ultravioleta ha adquirido recientemente un alto interés como consecuencia de la disminución del contenido de ozono estratosférico y el consiguiente aumento de la radiación UVB y sus efectos nocivos sobre la población (Marín *et al.*, 2003).

En este trabajo se estudian las características de las series de valores máximos diarios de irradiancia eritémica en el departamento Central del Paraguay, correspondientes al periodo 1997-2011; además se obtiene la estimación del índice UV para la zona. Todo ello se lleva a cabo mediante la optimización de diferentes técnicas de análisis de series temporales.

Las series de tiempo poseen características diferentes de la mayoría de los métodos estadísticos utilizados para tratar temas referentes al área ambiental o climatológica. La suposición básica que soporta el análisis de series temporales es que los factores que han ocasionado patrones o tendencias en el pasado y en el presente continuarán haciéndolo, más o menos de la misma forma en el futuro.

Por lo tanto, los principales objetivos del análisis de series temporales consisten en identificar y aislar tales factores de influencia con el propósito de realizar proyecciones, es decir, estimar los valores futuros de la variable en estudio.

En general, la temática de la radiación solar ultravioleta y los riesgos de exposición al sol han adquirido una importancia especial, considerando que la actividad del hombre está efectivamente alterando el medio físico del planeta. En efecto, hoy no solamente existe evidencia acumulada sobre los cambios globales - climáticos, sino también un extenso marco legal adoptado por la comunidad internacional para evitar mayores impactos negativos incluyendo los posibles riesgos a la salud.

Asimismo, ante la disminución de la capa de ozono y el consecuente incremento de la radiación solar ultravioleta que alcanza la superficie terrestre, la sociedad demanda información e investigación en torno a esta problemática, así como medidas preventivas basadas en los resultados de estos estudios.

Basado en estos argumentos, la problemática que se encara en este trabajo de investigación es la escasez de información sobre el comportamiento de la irradiancia eritémica, así como también acerca del índice UV en el departamento Central, considerando los efectos nocivos que pueden causar a la población en general la exposición prolongada a los rayos solares.

Existen evidencias experimentales del progresivo deterioro que ha sufrido la capa de ozono estratosférico a partir de la década de los 80 (Bojkov y Fioletov, 1995; Fioletov *et al.*, 2002).

Rivas *et al.* (2011) afirman que cada año en el hemisferio sur, a comienzos de la primavera, sobre la región antártica se produce la destrucción del mayor porcentaje de ozono estratosférico del planeta, lo cual ha disminuido el espesor de la capa de ozono en todas las latitudes. Por consiguiente, es factible el incremento de los niveles de UVB que llegan a la superficie terrestre, lo cual hace que sea de vital importancia el seguimiento de la evolución del comportamiento de la radiación solar ultravioleta, en particular de la irradiancia eritémica, ya que es posible que el incremento de los mismos tengan

importantes consecuencias sobre los seres vivos, debido principalmente al aumento de los niveles de radiación solar ultravioleta B (UVB: 280-320 nm) atenuada por la capa de ozono (Madronich y Flocke, 1997).

Normalmente la información del índice UV se proporciona con indicación de los valores alcanzados previamente, pero también sobre los valores alcanzables en los días posteriores, para lo cual se precisa la utilización de algún modelo de predicción. Precisamente esta posibilidad de predicción de valores es lo que hace que el índice adquiera su valor práctico pudiéndose así convertir en una herramienta eficaz para informar a la población sobre los riesgos que cabe esperar en un día determinado (Marín *et al.*, 2003).

El propósito principal de esta investigación es estimar un modelo de series temporales que caractericen el comportamiento diario de los valores máximos de irradiancia eritémica, permitiendo pronosticar sus valores en el futuro y determinar los índices UV para el departamento Central del Paraguay.

De esta forma, el estudio que se presenta permite caracterizar la radiación solar eritémica, en una importante región del Paraguay, como es el departamento Central. Así mismo, se considera la relevancia que puede tener una investigación utilizando diversas técnicas de series temporales, para la estimación de los parámetros de modelos que permitan caracterizar el comportamiento de los valores máximos diarios de irradiancia eritémica en la zona estudiada.

Mediante la obtención de dichos modelos será posible realizar predicciones de los valores de la variable estudiada, además de pronosticar los índices UV para dicha zona, contribuyendo de esa manera a que los habitantes de la misma y la sociedad en general puedan acceder a informaciones sobre el tema en cuestión y se fomente el aumento de campañas de concienciación sobre los riesgos de exposición a la radiación solar.

MATERIALES Y MÉTODOS

La población de estudio es el conjunto de datos de

irradiancia eritémica, registrados en el Laboratorio de Investigación de la Atmósfera y Problemas Ambientales (LIAPA) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN) de la Universidad Nacional de Asunción (UNA). Los datos de UVER fueron almacenados en planillas electrónicas EXCEL. La base cuenta con registros de irradiancia eritémica (mW/m^2) promediados cada 15 minutos y con las siguientes informaciones: año, mes, día, día juliano, valores mínimos horario y diario, valores máximos horario y diario, promedio horario y diario, desviación estándar horaria y diaria, número de datos por hora y día, horas en que se registraron los valores mínimos y máximos de cada intervalo horario y del día.

La muestra constituye la base de datos de irradiancia eritémica, en formato digital, correspondientes al periodo 1997 - 2011, facilitada por el LIAPA de la FACEN - UNA. Se analizaron los valores máximos diarios registrados alrededor del mediodía local.

Los datos de UVER han sido registrados con el sensor de radiación ultravioleta modelo UVB-1 de la marca YES (*Yankee Environmental Systems*) que se encuentra instalado en la estación del LIAPA de la FACEN - UNA. La institución está ubicada en el Campus Universitario de la ciudad de San Lorenzo (Latitud: 25,20°S, Longitud: 57,31°O, Altitud: 123 m.snm).

El sensor UVB-1 es un radiómetro de precisión que mide la radiación solar UVB y la UVER en mW/m^2 . Es un instrumento de banda ancha cuyo intervalo espectral abarca las longitudes de onda comprendidas entre 280 y 320 nm (región ultravioleta B) con una respuesta de coseno superior al 5% para valores del ángulo cenital inferiores a 60°. El UVB-1 es un aparato muy robusto especialmente diseñado para asegurar su estabilidad durante largos periodos de tiempo sin mantenimiento, lo que lo hace idóneo para medidas de campo continuas y a la intemperie. El sensor se encuentra estabilizado a una temperatura de 40°C. El mismo fue instalado en la estación del LIAPA en julio de 1996 y fue calibrado por última vez en noviembre de 2010.

La recolección de datos es continua durante las

24 horas del día, todos los días del año. Los datos fueron grabados en promedios cada 15 minutos. Las mediciones del instrumento corresponden directamente a irradiancia eritémica, es decir, según el espectro de acción de la piel definido por McKinlay y Diffey (1987).

Dado que no es posible realizar la manipulación de los datos de manera arbitraria en cuanto a sus valores, puesto que éstos son fijos, ya que son los registros históricos de la serie de tiempo de la irradiancia eritémica medida en el Campus Universitario de San Lorenzo, este estudio no es experimental sino observacional. Además, como el objeto de estudio es una serie de tiempo, el análisis es en consecuencia longitudinal. Inherentemente este estudio es diacrónico puesto que se usan los datos históricos, mismos que se emplean para predecir los valores de la serie en el tiempo.

Los datos considerados son los registros históricos de irradiancia eritémica, debido a que se quiere mostrar la aplicación de las técnicas de análisis de series temporales a este tipo de fenómenos. Se consideraron los registros dentro del periodo del 1 de enero de 1997 al 31 de diciembre de 2011. Se utilizaron técnicas estadísticas de análisis de series temporales, dado que los registros de irradiancia eritémica fueron tomados a través del tiempo y bajo las mismas condiciones. Para el análisis y procesamiento de los datos se ha utilizado el software R-project, versión R 2.11.1.

El análisis exploratorio de la serie de irradiancia eritémica consiste en detectar, por medios gráficos, la homogeneidad de la serie y la existencia o no de alguna tendencia y/o cambio, estacionariedad y estacionalidad. Se representa el plot de la serie y se observa si es estacionaria, es decir, si presenta media y varianza constantes. Si la serie no es estacionaria habría que transformarla tomando logaritmos para estabilizar la varianza, y/o diferenciaciones para estabilizar la media (diferencia regular).

La base de datos que compone la muestra del presente estudio, corresponde a registros de irradiancia eritémica y se inicia el 1 de enero de 1997. Los valores máximos de UVER muestran un comportamiento estacional muy característico.

Con relación al componente estacional, la irradiancia eritémica alcanza su mayor nivel en los meses de verano, siendo enero y febrero los meses más predominantes de cada año.

En este contexto, es posible modelar la serie diaria de valores máximos de irradiancia eritémica utilizando el método de descomposición clásica, analizando las componentes de tendencia y estacionalidad, así como la componente aleatoria. Se buscará extraer la estacionalidad y la tendencia (en caso de comprobarse que esta es significativa), para luego obtener la componente aleatoria, que constituiría una serie estacionaria a ser ajustada mediante modelos del tipo ARMA (p, q) o su equivalente ARIMA ($p, 0, q$), siguiendo los pasos de la metodología propuesta por Box y Jenkins (1976).

Posteriormente se procede a la validación de cada modelo, para ello se comprueba si los parámetros de los mismos son significativos, mediante el cálculo de los intervalos de confianza de dichos parámetros.

En el modelo seleccionado, se calculan los residuos y mediante el ACF y PACF, se comprueba si éstos se comportan como un ruido blanco, que es un requisito de partida del modelo. También se utiliza el test de Box-Ljung para comprobar la ausencia de autocorrelaciones entre los residuos. En este caso, el modelo es adecuado y se está en condiciones de realizar la predicción.

Una vez hecho el procedimiento descrito anteriormente, se pueden realizar predicciones de los niveles de irradiancia eritémica, y por consiguiente, estimaciones de los valores del índice UV en el futuro, calculando también sus correspondientes intervalos de confianza.

Las técnicas de pronóstico de series de tiempo por los métodos estadísticos tradicionales permiten llevar a cabo la obtención de predicciones, como por ejemplo, por medio de la metodología Box-Jenkins, la cual permite obtener buenas aproximaciones, ya que esta metodología tiene una parte de arte en el sentido de que el proceso es iterativo hasta alcanzar el mejor modelo de acuerdo a la experiencia del investigador.

Los pasos a seguir para obtener las prediccio-

nes con los modelos de series temporales son los siguientes: a) Análisis de la serie, b) Identificación y elección del modelo a emplear, c) Estimación de los parámetros del modelo, d) Validación del modelo, e) Predicción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la serie de valores máximos diarios de UVER

La serie de valores máximos diarios de irradiancia eritémica se presenta en la Figura 1. Se observa claramente que existe una variación estacional en el comportamiento de los valores de la serie, se registra un “pico” en cada verano y una “depresión o caída” en todos los inviernos.

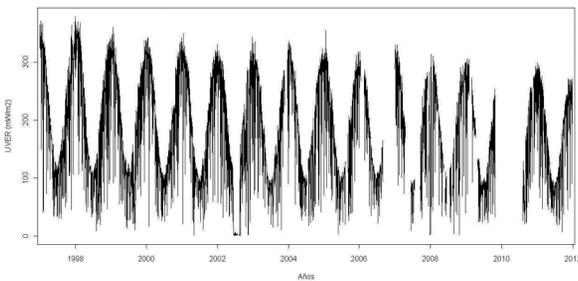


Figura 1. Valores máximos diarios de UVER, 01/1997-12/2011.

El gráfico muestra además que la serie no es estacionaria en media, ya que existe una leve tendencia decreciente que empieza a notarse aproximadamente en el mes de enero del año 2000. Cabe destacar que la variabilidad parece no aumentar con el tiempo y tampoco con el nivel de la serie. Esta serie temporal puede ser descrita mediante un modelo aditivo, ya que las fluctuaciones estacionales son

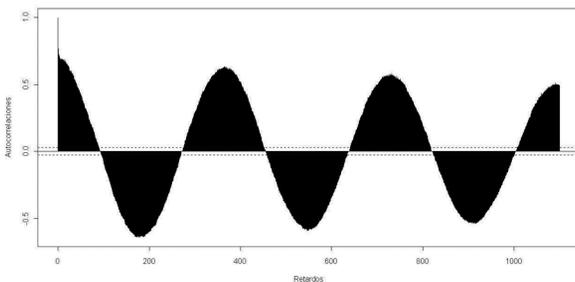


Figura 2. Función de autocorrelación de la serie de valores máximos diarios de UVER.

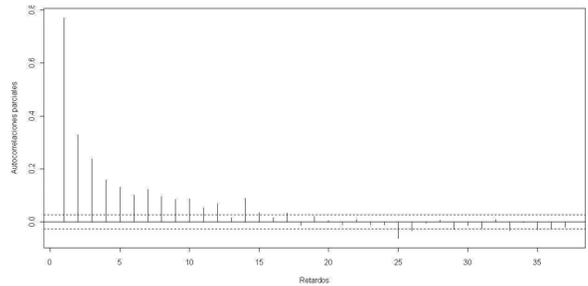


Figura 3. Función de autocorrelación de la serie de valores máximos diarios de UVER (lag max = 1100).

más o menos constantes en el tiempo y no parecen depender del nivel de la serie y las fluctuaciones aleatorias también se muestran constantes con el tiempo.

En las Figuras 2 y 3, correspondientes a la estimación de la función de autocorrelación de la serie de valores máximos diarios de irradiancia eritémica, se observa que los coeficientes decaen en forma de onda seno-coseno amortiguada; en la parte regular los mismos presentan un decrecimiento lento y gradual, además, en los retardos 365, 730, 1095 se nota un decrecimiento lento de los coeficientes, indicando la presencia de un componente estacional de período 365.

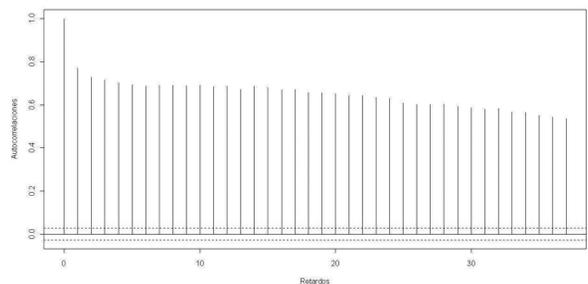


Figura 4. Función de autocorrelación parcial de la serie de valores máximos diarios de UVER.

La función de autocorrelación parcial de la serie de valores máximos diarios de UVER, se presenta en la Figura 4. Se observa que varios coeficientes son significativos, además los mismos decrecen rápidamente.

Se estimaron las componentes de la serie mediante el método de descomposición clásica. En efecto, se ha considerado un modelo aditivo (1)

que represente a la serie original, para después eliminar las componentes de tendencia y estacional, quedando únicamente la componente residual con la cual se realizó el análisis, siguiendo la metodología Box-Jenkins.

$$X_t = T_t + S_t + Y_t \quad (1)$$

donde: X_t representa el valor máximo de irradiancia eritémica (mW/m^2) en el día t , T_t es la componente de tendencia, S_t es la componente estacional, Y_t es una serie estacionaria con media igual a cero que puede ser ajustada mediante un modelo ARMA (p, q).

Para estimar la componente estacional de la serie, se utilizó un filtro de medias móviles de orden 365, dado por la expresión:

$$MMc_t^{365} = \frac{X_{t-182} + X_{t-181} + X_{t-180} + \dots + X_{t+180} + X_{t+181} + X_{t+182}}{365} \quad (2)$$

donde $183 < t < 5293$.

Se calcularon los índices de estacionalidad, que posteriormente fueron reescalados, de manera que la suma de los mismos sea igual a cero, lo que llevó a la estimación de la componente estacional S_t .

Para ajustar la tendencia T_t se utilizó el método de mínimos cuadrados ordinarios. Luego, la componente de tendencia se ha representado a través de:

$$T_t = 196,08 - 0,006 t \quad (3)$$

donde ambos coeficientes son significativos con un 95% de confianza.

Las componentes de tendencia y estacionalidad fueron eliminadas de la serie original, quedando solamente la componente aleatoria, Y_t , representada mediante la expresión:

$$Y_t = X_t - T_t - S_t \quad (4)$$

La serie desestacionalizada y sin tendencia (Y_t) ha sido ajustada mediante un modelo ARMA (p, q). Para determinar los posibles valores de p y q se tuvieron en cuenta los gráficos de la función de autocorrelación simple (ACF) (Figura 5) y de la función de autocorrelación parcial (PACF) (Figura

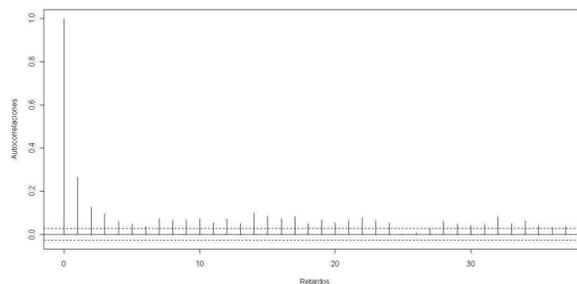


Figura 5. ACF de la serie estacionaria Y_t (desestacionalizada y sin tendencia).

6) de Y_t .

La Figura 5 muestra la función de autocorrelación de la serie estacionaria Y_t . Se observa un decrecimiento rápido de los valores de los coeficientes, lo que sugiere un modelo MA de orden 1 ó 2. La Figura 6 muestra la función de autocorrelación parcial de la serie estacionaria Y_t . Se observan varios coeficientes no nulos, indicando estructura AR que debe ser al menos de orden 2. Cabe destacar además, que son significativos los coeficientes que corresponden a los retardos 7, 14, 25 y 32, para la selección de los valores de p .

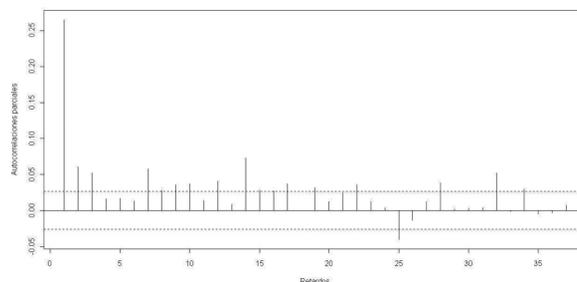


Figura 6. PACF de la serie desestacionalizada y sin tendencia.

En total fueron ajustados sesenta y cuatro modelos ARMA (p, q), tomando todas las combinaciones posibles de valores de p y q , $p \in \{1, 2, \dots, 32\}$ y $q \in \{1, 2\}$. La estimación de los coeficientes de cada modelo fue posible mediante la maximización de la función de verosimilitud. Una vez obtenidos todos los ajustes, se ha utilizado el Criterio Información de Akaike (AIC) y fueron escogidos aquellos modelos con valores de AIC más pequeños. Los mismos se muestran en la Tabla 1.

Considerando la Tabla 1, se ha seleccionado

Tabla 1. Modelos ARMA ajustados con menores valores de AIC.

Modelos ajustados	Valores de AIC
ARMA (25, 2)	49025,58
ARMA (24, 2)	49026,93
ARMA (32, 1)	49028,37
ARMA (32, 2)	49028,42
ARMA (7, 1)	49028,86
ARMA (15, 1)	49029,03
ARMA (14, 1)	49029,30

el modelo ARMA (25; 2) que obtuvo el valor más bajo de AIC = 49025,58. Fueron analizados la significatividad de sus coeficientes, para lo cual se han calculado los intervalos de confianza de los mismos, cuyos resultados se muestran en la Tabla 2.

En la Tabla 2 se observa que aparecen varios coeficientes que no son significativos, como los estimados para: ar4, ar5, ar6, ar7, ar8, ar9, ar10, ar11, ar13, ar15, ar18, ar20, ar21, ar22, ar23, ar24 y el intercepto, ya que sus correspondientes inter-

valos de confianza contienen al cero. Luego ha sido seleccionado el siguiente modelo con AIC más bajo, el ARMA (24, 2).

Los coeficientes del modelo ARMA (24, 2) también fueron analizados, mediante el cálculo de sus intervalos de confianza, encontrándose varios coeficientes no significativos. El análisis de la significatividad de los coeficientes fue hecho para todos los demás modelos ajustados con menores valores de AIC (Tabla 1), pudiendo comprobarse que en todos los casos existía determinada cantidad de coeficientes no significativos.

Por tanto, se ajustaron nuevamente los modelos que aparecen en la Tabla 1, teniendo en cuenta solamente aquellos coeficientes que fueron significativos en el primer ajuste, aquellos que no resultaron significativos fueron excluidos. Es decir, se volvieron a ajustar modelos, imponiendo que algunos coeficientes sean cero, y por tanto, utilizando menos coeficientes (modelos más parsimoniosos). En algunos casos se ha considerado un nivel de significación de 0,10 para la selección de

Tabla 2. Coeficientes del modelo ARMA (25, 2) y sus IC.

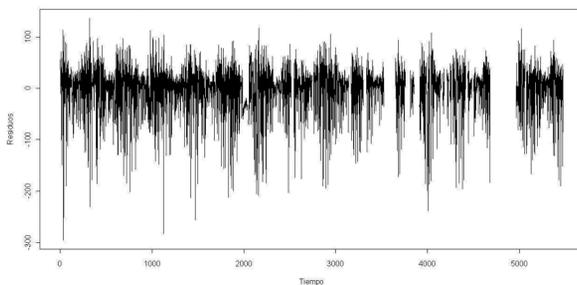
Coef.	Estim.	IC		Coef.	Estim.	IC	
		Li	Ls			Li	Ls
ar1	0,6993	0,4188	0,9798	ar15	-0,0143	-0,0604	0,0318
ar2	-0,7486	-1,0428	-0,4544	ar16	0,0520	0,0294	0,0746
ar3	0,1873	0,1158	0,2588	ar17	0,0539	0,0114	0,0964
ar4	0,0144	-0,0297	0,0585	ar18	-0,0179	-0,0620	0,0262
ar5	0,0285	-0,0150	0,0720	ar19	0,0631	0,0186	0,1076
ar6	-0,0035	-0,0458	0,0388	ar20	-0,0116	-0,0547	0,0315
ar7	0,0380	-0,0043	0,0803	ar21	0,0331	-0,0094	0,0756
ar8	-0,0022	-0,0457	0,0413	ar22	0,0290	-0,0133	0,0713
ar9	0,0346	-0,0085	0,0777	ar23	0,0124	-0,0299	0,0547
ar10	0,0352	-0,0075	0,0779	ar24	0,0329	-0,0081	0,0739
ar11	0,0016	-0,0417	0,0449	ar25	-0,0352	-0,0703	-0,0001
ar12	0,0520	0,0091	0,0949	ma1	-0,4585	-0,7386	-0,1784
ar13	-0,0232	-0,0663	0,0199	ma2	0,6784	0,4216	0,9352
ar14	0,0880	0,0449	0,1311	Intercept	0,3444	-3,4411	4,1299

Tabla 3. Coeficientes del modelo ARMA (32, 1) y sus IC.

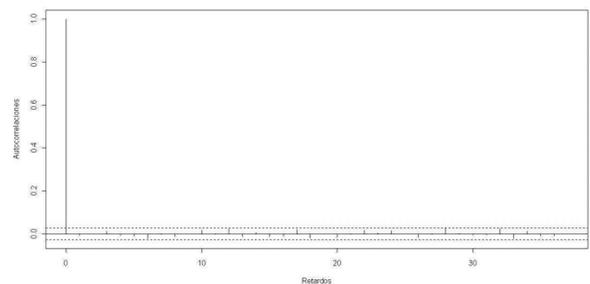
Coef.	Estim.	IC		Coef.	Estim.	IC	
		Li	Ls			Li	Ls
ar1	0,938	0,7651	1,1113	ar25	-0,046	-0,0774	-0,0151
ar2	-0,133	-0,1949	-0,0711	ar26	0,033	0,0011	0,0639
ar7	0,031	0,0082	0,0532	ar32	0,022	0,0010	0,0434
ar14	0,045	0,0201	0,0699	ma1	-0,697	-0,8672	-0,5274
ar19	0,019	0,0004	0,0376				

los coeficientes significativos que fueron incluidos en el nuevo ajuste.

De esta forma, se volvió a utilizar el Criterio de Información de Akaike (AIC), teniendo presente además el principio de parsimonia, y se encontró que el modelo con menor valor de AIC fue el ARMA (32, 1) con un AIC = 49007,99. Este modelo tiene todos sus coeficientes significativos ($\alpha = 0,05$), el coeficiente estimado para ar19 es significativo con un 90% de confianza. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

**Figura 7.** Residuos de la serie estacionaria Y_t .

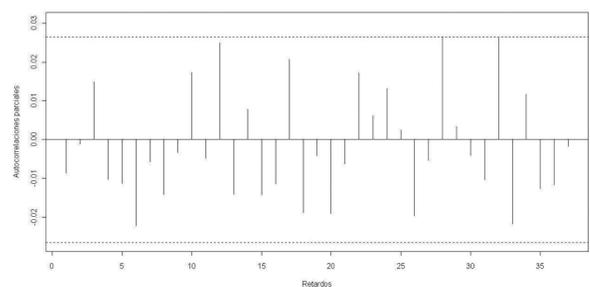
Para la validación del modelo ARMA (32,1) seleccionado, fueron calculados y representados gráficamente los residuos (Figura 7), así como también la ACF (Figura 8) y la PACF (Figura 9) de los mismos. Se observa que los residuos presentan un comportamiento correspondiente a un ruido blanco. Además, puesto que no hay residuales significativos a través de los diferentes retardos, en la ACF ni en la PACF, se puede considerar que no existe autocorrelación entre los residuos, es decir, no queda dependencia serial en los datos a partir

**Figura 8.** ACF de los residuos de la serie estacionaria Y_t .

del modelo estimado.

Para confirmar la ausencia de autocorrelación entre los residuos, se ha ensayado el test de Box-Ljung. Se obtuvo el estadístico $Q = 58,93$ con un p -valor = 0,5148 (los grados de libertad ($g.l.$) del estadístico Q resultan de $g.l. = h - n = 60 - 9 = 51$, siendo h el número de lags considerados y n el número de parámetros estimados), por lo que no se rechaza la hipótesis de que no existe autocorrelación entre los residuos.

El modelo ARMA (32,1) fue validado, puede representarse a través de la expresión:

**Figura 9.** PACF de los residuos de la serie estacionaria Y_t .

$$\begin{aligned}
 Y_t = & 0,938Y_{t-1} - 0,133Y_{t-2} + 0,031Y_{t-7} + \\
 & + 0,045Y_{t-14} + 0,019Y_{t-19} - 0,046Y_{t-25} + \\
 & + 0,033Y_{t-26} + 0,022Y_{t-32} + Z_t - 0,697Z_{t-1}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Luego, la serie de valores máximos diarios de irradiancia eritémica se representa mediante el siguiente modelo:

$$\begin{aligned}
 X_t = & 196,08 - 0,006t + 0,938Y_{t-1} - 0,133Y_{t-2} + \\
 & + 0,031Y_{t-7} + 0,045Y_{t-14} + 0,019Y_{t-19} - \\
 & - 0,046Y_{t-25} + 0,033Y_{t-26} + 0,022Y_{t-32} + \\
 & + Z_t - 0,697Z_{t-1} + S_{tj}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

donde:

X_t es la estimación del valor máximo de irradiancia eritémica en el día t ,

Y_{t-i} ($i = 1, 2, 7, 14, 19, 25, 26, 32$) representa la memoria del sistema, es decir, lo ocurrido hasta 32 días en el pasado está correlacionado con el presente,

Z_t y Z_{t-1} son los términos de ruido blanco o factores externos, y

S_{tj} es la componente estacional para cada día juliano ($j = 1, 2, \dots, 365$).

El modelo estimado (6) permitió obtener predicciones razonables de los valores máximos diarios de irradiancia eritémica para el departamento Central del Paraguay.

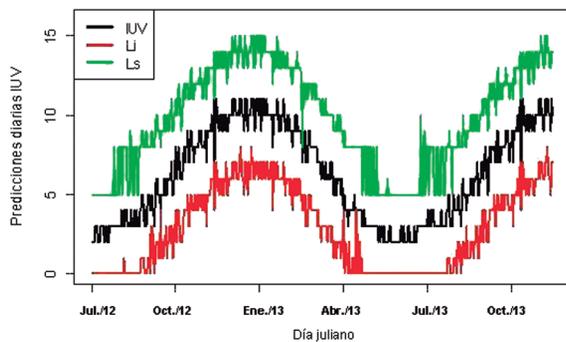


Figura 10. Predicciones de valores máximos diarios de UVER para dos años y sus respectivos intervalos de confianza.

Las predicciones para dos años se presentan gráficamente en la Figura 10 .

Pronósticos de índices UV para el departamento Central del Paraguay

Predicciones diarias del índice UV

Para el cálculo de pronósticos diarios de los índices UV, se consideraron las predicciones obtenidas para valores máximos diarios de irradiancia eritémica (mW/m^2). Se tuvo en cuenta además, que el índice UV es una cantidad adimensional definida como 40 veces la irradiancia eritémica (medida en W/m^2), según ha establecido la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2002). Las predicciones diarias de los índices UV y sus correspondientes intervalos de confianza, para el período comprendido entre Julio 2012 y Diciembre 2013, se presentan gráficamente en la Figura 11.

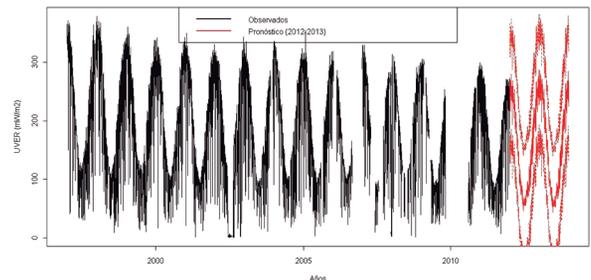


Figura 11. Predicciones diarias de índices UV y sus intervalos de confianza (Julio 2012 a Diciembre 2013).

CONCLUSIONES

El desarrollo de esta investigación se basó fundamentalmente en el análisis de series de tiempo, para describir el comportamiento de series temporales de valores máximos diarios de irradiancia eritémica, a través del método de descomposición clásica.

La serie diaria de valores máximos de irradiancia eritémica presenta comportamiento estacional, con una leve tendencia decreciente. Los valores más altos de UVER ($293,16 - 378 mW/m^2$) se registran en los meses de verano (Diciembre, Enero, Febrero), mientras que en los meses de invierno (Junio, Julio, Agosto) se llegan a los valores más bajos ($1,37 - 30,43 mW/m^2$).

Se utilizó el método de descomposición clásica,

representándose la serie diaria mediante un modelo aditivo, en el cual fueron consideradas las componentes: tendencia, estacionalidad y una componente aleatoria o irregular.

Se realizó la extracción de la tendencia, utilizando el método de mínimos cuadrados; en tanto que para extraer la componente estacional se utilizó un filtro de medias móviles de orden 365. La componente aleatoria se convirtió en una serie estacionaria, que fue ajustada mediante un modelo ARMA (p, q).

El modelo obtenido para la estimación de los valores máximos diarios de irradiancia eritémica fue el siguiente:

$$X_t = 196,08 - 0,006t + 0,938Y_{t-1} - 0,133Y_{t-2} + 0,031Y_{t-7} + 0,045Y_{t-14} + 0,019Y_{t-19} - 0,046Y_{t-25} + 0,033Y_{t-26} + 0,022Y_{t-32} + Z_t - 0,697Z_{t-1} + S_{tj}$$

La serie diaria ha presentado una leve tendencia significativa, que probablemente se estabilizaría con el tiempo. Esto podría deberse a la aparición de algunos fenómenos cíclicos, como por ejemplo “El niño”, que trae consigo una importante cantidad de días lluviosos e inundaciones, lo que ocasionan numerosos días con bastante nubosidad o totalmente cubiertos, por lo que la radiación podría verse bastante atenuada.

Debido a la incerteza del fenómeno, fueron obtenidas algunas predicciones diarias con error estándar elevado y por tanto, unos intervalos de confianza muy grandes. Aun así, los valores de dichas predicciones son bastante razonables.

Mediante la obtención de predicciones para valores máximos diarios de irradiancia eritémica fue posible estimar los índices UV para el departamento Central del Paraguay, teniendo en cuenta lo establecido por la OMS (2003). Las estimaciones del índice UV, que se alcanza en las horas centrales del día, oscila entre valores máximos de 8-11 durante los meses estivales y valores de 2-5 en los meses de invierno. Cabe destacar que, durante la mayor

parte del año se registran índices considerados como “ALTOS” según los estándares internacionales; llegando incluso a alcanzar las valoraciones “MUY ALTO” y “EXTREMADAMENTE ALTO” durante los días correspondientes a los meses de verano.

AGRADECIMIENTOS

Al Prof. Dr. Pere Puig Casado, de la Universidad Autónoma de Barcelona, al Prof. Lic. Constantino N. Guefos Kapsalis, MAE, Decano de la FACEN – UNA, a los directivos y funcionarios del Laboratorio de Investigación de la Atmosfera y Problemas Ambientales (LIAPA) de la FACEN – UNA, al Prof. Dr. Alfonso Pino Graell, Director del Laboratorio de Física de la Atmósfera de la Universidad de Panamá, al Prof. MSc. Genaro Coronel, y a la Prof. Lic. Juana Hernández, Directora del Departamento de Matemática, de la FACEN - UNA, por toda la colaboración y el apoyo brindado.

LITERATURA CITADA

- Aguirre J.A. (1994). Introducción al tratamiento de Series Temporales. Aplicación a las Ciencias de la Salud. Editorial Díaz de Santos. España.
- Akaike, H.A. (1974). New look at statistical model identification. Institute of Statistical Mathematics, Minato-Ku, Tokyo, Japan. pp.716-723.
- Bojkov, R.D. & Fioletov, V.E. (1995). Estimating the global ozone characteristics during the last 30 years. En: Journal Geophysical Research, vol.100, pp.16, 537-16,551.
- Box, G.E.P. & Jenkins, G.M. (1976). Time Series Analysis: Forecasting and Control. Holden-Day.
- Brockwell, P.J. & Davis, R.A. (1996). Introduction to Time Series and Forecasting. Ed. Springer.
- Chatfield, C. (2003). The Analysis of Time Series: An Introduction. Ed. Chapman and Hall. Londres, Inglaterra.
- Cryer, J. & Chang, K. (2008). Time Series Analysis with applications in R. Ed. Springer.
- Diffey, B.L. (1991). Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. En: Phys. Med.

- Biol., vol.36, pp.299-328.
- Fioletov, V.E., Bodeker, G.E., Miller, A.J., Mc Peters, R.D. & Stolarski, R. (2002). Global and zonal total ozone variations estimated from ground-based and satellite measurements: 1964-2000. En: *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, doi: 10.1029/2001JD001350.
- Gonzalez C., M. (2009). *Análisis de Series Temporales: Modelos ARIMA*. Universidad del País Vasco.
- Jagger, J. (1985). *Solar UV actions on living cells*. Editorial Praeger, New York.
- Kirchgaessner, G. & Wolters, J. (2007). *Introduction to Modern Time Series Analysis*. Ed. Springer.
- Ljung, G. & Box, G. (1979). On a Measure of Lack of Fit in Time Series Models. En: *Biometrika*, vol.66, pp.265-270.
- Madronich, S. & Flocke, S. (1997). Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the earth's surface. *Solar Ultraviolet Radiation*. En: *NATO ASI Series*, pp.23-48. Springer. Berlin, Alemania.
- Marin, M.J., Martinez-Lozano, J.A., Tena, F. & Utrillas, M.P. (2003). Evolución del Índice UV en Valencia para el año 2002. Comparación de valores reales y simulados. En: *Óptica Pura y Aplicada*, vol.36, pp.39-44.
- Mc Kinlay, A.F. & Diffey, B.L. (1987). A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. En: *CIE Journal*, vol.6, num.1, pp.17-22.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2003). *Índice UV solar mundial: Guía práctica*. Organización Mundial de la Salud. p.29.
- Peña Sanchez De Rivera, D. & Arnaiz Tovar, G. (1981). Criterios de selección de modelos ARIMA. En: *Trabajos de Estadística y de Investigación Operativa*, vol.32, num.1, pp.70-93.
- Peña, D. (1989). Sobre la interpretación de modelos ARIMA univariantes. En: *Trabajos de Estadística*, vol.4, num.2, pp.19-45.
- Peña, D. (2005). *Análisis de Series Temporales*. Alianza Editorial, Madrid. España.
- Puig, P. (2010). *Notas de clase Análisis de Series Temporales*. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Pukkila, T., Koreisha, S. & Kallinen, A. (1990). The identification of ARMA models. En: *Biometrika*, vol.77, pp.537-548.
- R Development Core Team. (2010). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL <http://www.Rproject.org>.
- Rivas, M.; Leiva, C. & Rojas, E. (2011). Estudios de series temporales de energía solar UV-B de 305 nm y espesor de la capa de ozono estratosférico en Arica norte de Chile. En: *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol.19, num.2, pp.168-173.
- Uriel, E. (1985). *Análisis de Series Temporales - Modelos ARIMA*. Colección Abaco. Editorial Paraninfo.
- Villavicencio, J. (2005). *Introducción a Series de Tiempo*. Instituto de Estadísticas de Puerto Rico.
- WHO (Organización Mundial de la Salud). (2002). *World Health Organization. Global Solar UV Index: A Practical Guide*. Disponible en: http://www.who.int/pehuv/Solar_UV_Index_Guide_Final.pdf.