

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Facultad de Construcciones.

Departamento de Ingeniería Hidráulica.



Trabajo de Diploma.

Título: "Análisis de las sequías en la cuenca hidrográfica del río Zaza".

Autor: Lázara Lismary González Marín.

Tutores: Dr. Ing. Lamberto Álvarez Gil.

MSc. Lic. Osvaldo Norman Montenegro.

Santa Clara

2017

“El progreso o decadencia de un pueblo se juzga por la forma en que éste acepta y utiliza sus recursos naturales. Los suelos y las aguas pueden usarse de tal modo que constituyan bienes perdurables, capaces de rendir utilidades perpetuas. Por otro lado, los recursos pueden ser destruidos como fuentes de ingreso; pueden aún utilizarse en tal forma que se conviertan en factores de su propia destrucción. La humanidad se halla ante una alternativa.”

H.S.Person.

Agradecimientos.

Primeramente a Dios por darme la posibilidad de dar este gran paso en mi vida.

A mi mamá por ser una guía constante en mi camino, alentándome a seguir adelante y soportando todas mis majaderías.

A mi papá que aunque no está mi lado, siempre ha estado pendiente de cada detalle.

A toda mi familia, especialmente a mi hermano Lisbán.

A mi esposo que me ha brindado su apoyo incondicional y ha soportado todo mi estrés con paciencia y amor.

A mis suegros y amigos que me apoyan en lo que necesite.

A todos los que me ayudaron en el arduo trabajo de la investigación en especial a mis tutores Osvaldo Norman y Lamberto Álvarez, y a mi asesor Ariel E.

Ramos, a los que siempre estuvieron presente para brindarme una mano amiga.

A todos los profesores de la carrera por haberme formado como profesional y como persona.

A mis compañeros de aula por estos cinco años maravillosos junto a ellos.

A todas las personas que siempre han estado a mi lado, que me han sostenido, aconsejado, guiado y querido incondicionalmente,

Por ustedes hoy estoy camino a una meta.

Por su entrega constante, por su ayuda incondicional,

GRACIAS.

A mi mamá y mi papá.

Resumen

Las sequías son fenómenos esencialmente meteorológicos que se transmiten a través de las componentes del ciclo hidrológico. Esta relación de causalidad puede ser modelada en primera aproximación en forma lineal mediante un modelo de función de transferencia. Las características de estos modelos pueden aprovecharse para establecer relaciones entre los déficit de escurrimientos y precipitación siendo estas dos series de tiempo. La aplicación al caso de una cuenca en la provincia de Sancti Spíritus evidencia estas relaciones.

Abstract

Droughts are essentially meteorological phenomena that are transmitted through the components of the hydrological cycle. This causal relationship can be modeled in first approximation by a linear form thru a transfer function model. The characteristics of these models can be used to establish relations between runoff and precipitation deficits, these being two time series. The application to the case of a basin in the province of Sancti Spíritus evidences these relations.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación	5
1.1. Tipos de sequías.	7
1.2. Sequía meteorológica.....	9
1.3. Sequía hidrológica.....	10
1.4. Métodos para determinar las sequías en diferentes épocas.	11
1.5. Medidas para mitigar las sequías.	14
1.6. Modelos aplicados a la hidrología.	15
1.7. Aplicación de softwares en la modelación Hidráulica.....	22
Capítulo 2: Descripción de la metodología. Teoría de Box-Jenkins.....	25
2.1 Teoría de Box-Jenkins.....	26
Capítulo 3: Estudio de la cuenca hidrográfica del río Zaza.....	36
3.1. Aplicación del software SPSS.	37
3.2. Resultados obtenidos a partir de los datos propuestos.....	40
Conclusiones	44
Recomendaciones	45
Bibliografía.....	46
Anexos.....	47

Introducción.

La sequía es considerado uno de los eventos meteorológicos más nocivos conocidos en el planeta, pues, a pesar de ser una afectación climática que tradicionalmente la sociedad ha enfrentado, en los últimos años su acrecentada influencia ha dado lugar a que se le considere como uno de los mayores desastres naturales del mundo, el más frecuente y persistente, de mayores efectos negativos para la producción agrícola, el consumo humano, además de impactos adversos reales y potenciales sobre el medio ambiente.

Es el sector de los recursos hídricos, por su dependencia del clima, uno de los más vulnerables a cualquier anomalía en el comportamiento de este elemento de la naturaleza. La ocurrencia de fenómenos, como las sequías y las grandes precipitaciones, impactan directamente la distribución espacio-temporal de las variables hidrológicas y, por tanto, a todas las actividades relacionadas con el agua. Por esa razón, el manejo de este recurso tiene que hacerse con una visión integral, para lograr una solución armoniosa de la relación que se establece entre el clima, la disponibilidad de agua, su entrega y demanda, el desarrollo socioeconómico y la protección del medio ambiente(INSMET, 2000). Las sequías son fenómenos de origen esencialmente meteorológico, cuyos efectos se transmiten luego a través de todos los componentes del ciclo hidrológico, de manera que las causas de estas deben buscarse en el comportamiento global de la atmósfera, las cuales no están del todo dilucidadas(Fernández, 2003).

En el país existen 632 cuencas hidrográficas de dimensiones superiores a los 5 km² (Panorama Ambiental de Cuba 2000, 2001) en(Arellano Acosta, 2002). La mayoría de ellas son pequeñas, sólo 14 superan los 1000 km². En Cuba se considera la cuenca hidrográfica como unidad básica funcional y ámbito de aplicación de los programas y planes de manejo integral de los recursos naturales, en su vínculo con el desarrollo económico y social. Con la creación en 1997 del Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas por acuerdo del Consejo de Ministros, se inició un nuevo estilo en el trabajo ambiental del país, considerándose la cuenca como la unidad básica para evaluar el trabajo de gestión ambiental integral.

La cuenca hidrográfica del río Zaza (figura 1) está ubicada en las provincias de Sancti Spíritus y Villa Clara, en la zona central de la Isla de Cuba y constituye una de las 8 cuencas hidrográficas prioritizadas en el país por las afectaciones ambientales que presenta, su amplia actividad económica y su desarrollo social.

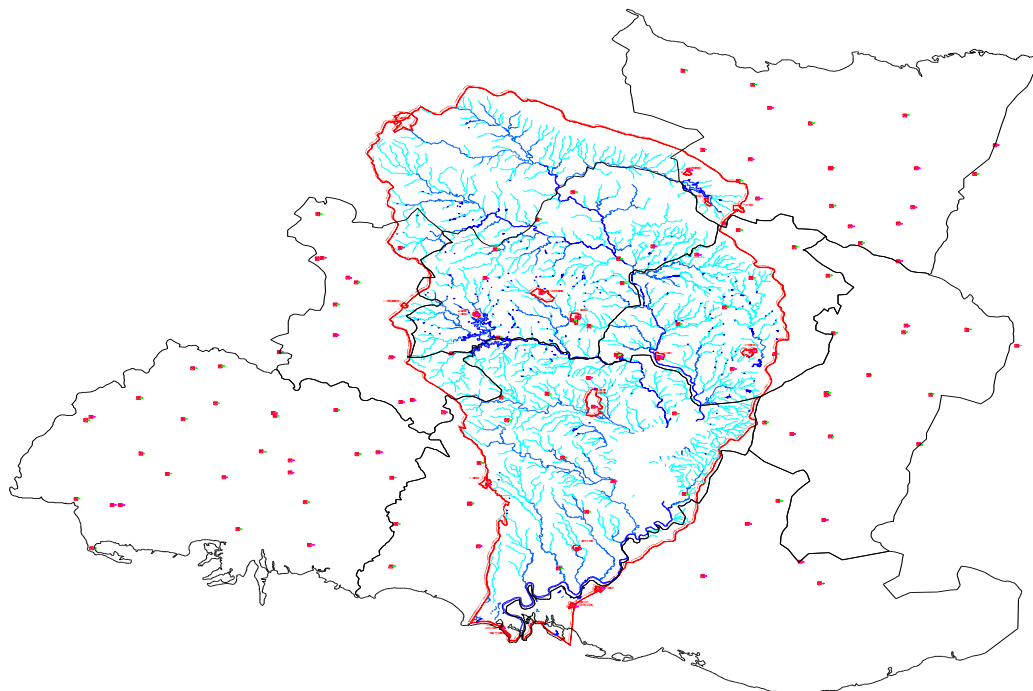


Figura 1: Cuenca hidrológica del río zaza.

En esta cuenca de explotación se ha presentado una conjugación de factores naturales y antropogénicos que llevó a evaluarla en estado muy crítico en 1997 (Consejo de Cuenca Provincial, 2002):

Factores naturales:

1. Diversidad de tipos de suelos en general muy erosionables;
2. Densidad de cauces que supera a veces los 5 Km/Km² (figura 1);
3. Presencia de fuertes pendientes;

Factores antrópicos:

1. Existencia de un creciente proceso de deforestación debido a una intensa explotación agropecuaria.
2. Alteración de la estabilidad ecológica de sus cauces naturales por la construcción de presas y micropresas, reduciéndose al 14 % el aporte de agua en la desembocadura del río principal.

3. Desarrollo de una infraestructura agroindustrial y de asentamientos poblacionales sin una solución efectiva a la generación de residuales.

La conjugación de ambos factores comparten la responsabilidad del deterioro actual de esta cuenca que hoy muestra el 88.5 % de sus suelos afectados por la erosión hídrica y una cobertura boscosa de solo el 5.83 %, lo que ha provocado el asolvamiento de embalses y cauces superficiales y la ocurrencia de inundaciones debido a grandes avenidas de los ríos por el aumento del coeficiente de escurrimiento del terreno y la pérdida de la capacidad de retención del agua de los suelos desnudos (Provincial, 2002)

Desde la perspectiva de los fenómenos hidrológicos, las sequías son problemas complejos, persistentes en el tiempo y de amplia cobertura espacial, cuya caracterización requiere definiciones objetivas y gran cantidad de información. La complejidad del fenómeno, la necesidad de recurrir a técnicas especiales para manejar la información en su doble dimensión temporal y espacial, y entregar resultados que puedan compararse objetivamente, genera un interesante espacio para trabajar la investigación.

Por ello vale la pena estudiar este fenómeno detenidamente, empleando así el uso de un modelo matemático como alerta para la prevención de desastres con mayores impactos en el futuro, ya que la crisis de sequía en estos tiempo está alcanzando su máximo colapso en todas las áreas directamente involucradas.

Problema Científico:

Los problemas de sequía aumentan cada vez más, por ello existe la necesidad de proponer procedimientos sobre bases científicas y tecnológicas que posibiliten la modelación de procesos hidrológicos a partir de encontrar la relación entre las variables escurrimientos y precipitaciones para pronosticar los fenómenos de sequías.

Hipótesis.

Si se definen pronósticos de sequías a partir del empleo de herramientas, como los modelos matemáticos ARIMA de series de tiempo, se logrará minimizar los daños que estos efectos provocan.

Objetivo General.

Proponer una metodología que permita determinar el comportamiento del escurrimiento a partir de la lluvia para el pronóstico de la sequía hidrológica en cuencas hidrográficas.

Objetivos Específicos.

1-Establecer el marco teórico de la investigación sobre la base de una búsqueda bibliográfica en temáticas tales como concepto de sequías, aplicación de modelos matemáticos en la caracterización de las sequías hidrológicas y el empleo de software para estos fines.

2-Aplicar la metodología propuesta a un caso real para mostrar la forma de proceder a manera de ejemplo.

3-Realizar el análisis de los resultados obtenidos sobre la base de criterios ingenieriles.

Tareas de investigación

- Estudios de los conceptos básicos para la sequía.
- Estudio de modelos de pronósticos.
- Estudio de metodología empleada para el pronóstico de la sequía por las ciencias hidrológica.
- Aplicación para un ejemplo real de la metodología.
- Análisis de los resultados obtenidos de la aplicación metodológica.

Estructura de la Tesis

Introducción

Capítulo 1. Marco teórico-referencial de la investigación. Sequía, modelo hidrológico y Software.

Capítulo 2 Descripción de la metodología según la teoría de Box-Jenkins y el software SPSS.

Capítulo 3. Estudio de la cuenca hidrológica del río Zaza.

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía



Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

"La degradación de las tierras secas (áridas, semiáridas y subhúmedas) amenazan la subsistencia de más de 1000 millones de personas en unos 100 países. El proceso afecta a un 25 % de la superficie terrestre del planeta y ocurre en todo el mundo a ritmo acelerado. Entre las causas del fenómeno figuran el cultivo y el pastoreo excesivo, las prácticas de riego deficientes y la deforestación, combinadas con las variaciones climáticas" (Serie Información Ambiental 1).

Sí comparamos a otros desastres naturales como terremotos, huracanes, inundaciones, erupciones volcánicas con la sequía, la mayoría de estos son imprevistos, ocurriendo rápidamente, con casi o sin ningún aviso. Las sequías son las excepciones y difieren de otros peligros naturales en varias razones (Wilhite, 1997):

- 1.- Es un "fenómeno progresivo", su comienzo y final, es muy difícil de determinar. Y sus efectos se acumulan lentamente a través de un considerable período de tiempo;
- 2.- La ausencia de una definición precisa y universalmente aceptada de sequía, se adicionara a la confusión sí existe o no la misma, y de ocurrir pronosticar su severidad;
- 3.- Los impactos de la sequía se expanden sobre una extensa área geográfica, y es muy difícil su predicción. La sequía raramente resulta en daños estructurales, por esta y demás razones, la cuantificación de sus impactos y buscar alivio para este tipo de desastre es una tarea muy difícil.

La sequía afecta a muchos sectores económicos y sociales pero al no existir una definición precisa y objetiva de la misma para situaciones específicas, ha sido un obstáculo, lo cual ha dejado paso a la indecisión o inacción por parte de los administradores y hacedores de política (Jacobs, 1991; Wilhite, 1997) Entonces, tiene que ser aceptado que la importancia de la lucha contra la sequía yace en conocer sus impactos para poder mitigarlos.

El presente estudio propone un procedimiento que puede ser empleado en la modelación hidrológica para eventos de este tipo, tanto de lluvia como de escurrimiento. El caso de estudio es la cuenca del río Zaza, donde se encuentra el mayor embalse de Cuba y una de las cuencas más grandes.

1.1. Tipos de sequías.

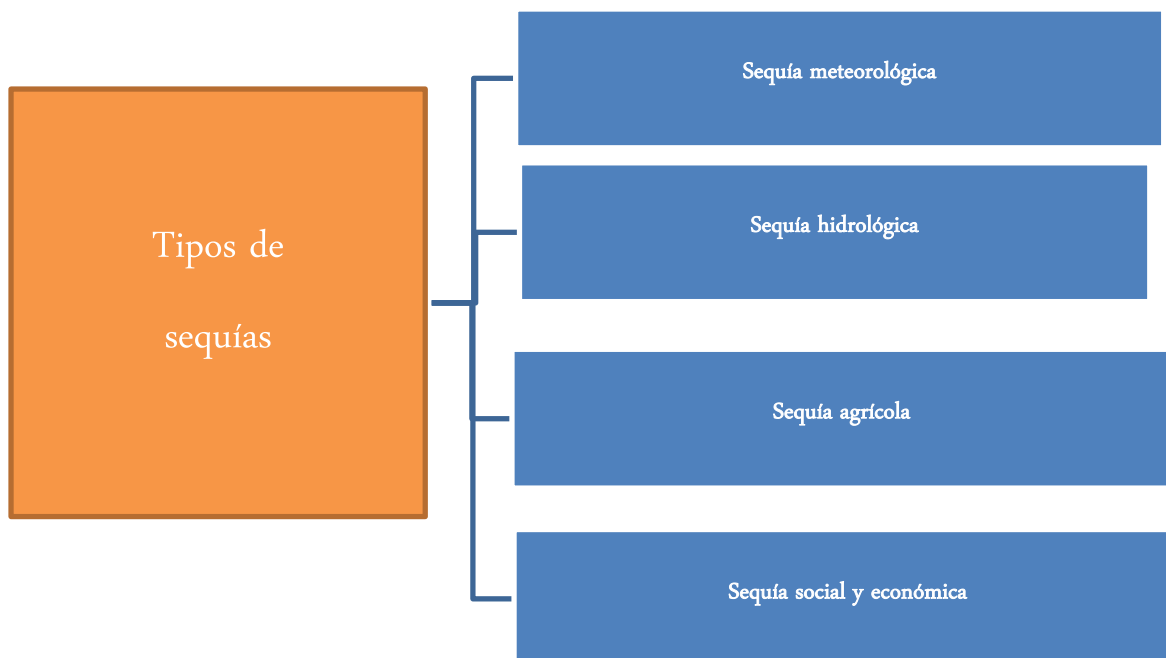


Figura 2: Tipos de sequías.

La sequía, es considerada un evento climático incierto. A menudo sus efectos en la economía y el medio ambiente, no son inicialmente percibidos, pero al finalizar el período seco estos pueden ser increíblemente costosos y devastadores. Este fenómeno constituye uno de los eventos más nocivos conocidos en el planeta, y es una afectación que la sociedad ha enfrentado en los últimos decenios; considerado como uno de los mayores desastres naturales del mundo, el más frecuente y persistente, de mayores efectos negativos para la producción agrícola, de impactos adversos reales y potenciales sobre el medio ambiente. Es “Un período de condiciones meteorológicas anormalmente secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitaciones cause un grave desequilibrio hidrológico”.

En Lapinel et al. (1998), Wilhite y Glantz (1987), tratando de armonizar todo el amplio espectro de enfoques, establecen cuatro tipos principales de sequías, a saber: meteorológica, agrícola, hidrológica y social o económica.

-Se entiende por sequía **meteorológica** cuando la precipitación es muy inferior a lo esperado en una amplia zona y para un largo período.

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

-La **sequía hidrológica** ocurre cuando hay un déficit continuo en la escorrentía en superficie y alcanza ésta un nivel inferior a las condiciones normales o cuando disminuye el nivel de las aguas subterráneas.

-Hay **sequía agrícola** cuando la cantidad de precipitación y su distribución, las reservas en agua del suelo y las pérdidas debidas a la evaporación se combinan para causar disminuciones considerables del rendimiento de los cultivos y del ganado.

-La **sequía social o económica** se define cuando la misma repercute sobre la estructura social, el balance alimentario, de mercado o financiero de una región determinada.

En (INRH-CENHICA, Guía para la acción frente a la sequía) se define como **sequía hidrológica** un período de tiempo anormalmente seco, lo bastante prolongado para dar lugar a una escasez de agua, que se refleja en los niveles de escurrimientos y los lagos, inferiores a lo normal y/o en la disminución de la humedad del suelo y el descenso de los niveles del agua subterránea (OMM-N° 49, 1992); también se define la **sequía hidráulica** cuando la disponibilidad de agua almacenada no permite garantizar el ritmo de entregas considerado en el balance hidrológico anualmente planteado a las fuentes superficiales y subterráneas de todo un territorio y/o sistema hidráulico.

Entre las muchísimas definiciones de sequía según (Jacobs, 1991; Lapinel Pedroso, 1998) es necesario hacer referencia también, a las útiles definiciones de Hurtado (1986), que aclaran y precisan algunos aspectos complementarios relacionados con el concepto de sequía, entre ellos:

-**Sequía permanente**: se encuentra en zonas áridas, donde no existe una época de lluvias marcada en que se satisfagan las necesidades de ciertos cultivos.

-**Sequía estacional**: es la representada generalmente en las regiones tropicales y ocurre en áreas con una temporada seca bien definida que sigue a períodos de lluvia. Cada año se espera esta sequía debido al comportamiento climático de los patrones de circulación atmosférica.

Según (Jacobs, 1991; Lapinel Pedroso, 1998), en la práctica y en la literatura, suelen emplearse comúnmente otros términos tales como:

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

-**Sequía intraestival**, también llamada sequía de medio verano, que tiene lugar cuando se produce una disminución relativa de las lluvias durante el período lluvioso, originada por procesos atmosféricos propios o característicos del área.

-**Sequía atmosférica**, caracterizada por fuertes vientos, escasas precipitaciones, altas temperaturas y usualmente baja humedad del aire.

(Palmer, 1965), reconoció que era importante considerar no solo la oferta de agua sino también las necesidades, para lo cual desarrollo un procedimiento basado en un índice que representa las diferencias entre las disponibilidades de agua en un lugar y las necesidades agrícolas, tomando en cuenta las condiciones climáticas, los cultivos y los suelos. Desde entonces se han propuesto numerosos índices o indicadores, con el fin de representar con un único valor una gran cantidad de información y poder efectuar comparaciones entre sequías ocurridas en diferentes épocas o regiones (Fernández, 2003).

1.2. Sequía meteorológica.

Para poder estimar la posibilidad y la severidad de los fenómenos de sequías meteorológicas debemos conocer, con toda precisión, las condiciones climáticas actuales del territorio. Entre los datos meteorológicos registrados los más importantes para una determinación aceptada son los que expresan y caracterizan la lluvia, la temperatura y la humedad del aire (Valiente, 2001).

Este evento meteorológico provoca una inestabilidad en las condiciones normales del clima, favoreciendo la aparición de largos períodos secos, donde el déficit pluviométrico se hace evidente, esto trae consigo una reducción de la humedad en el territorio afectado, lo cual condiciona el buen desarrollo de las plantaciones forestales, al incrementarse la evapotranspiración (que no es más que la transferencia de agua desde la tierra a la atmósfera por evaporación desde la superficie y el suelo, y por transpiración de la vegetación) y reducirse las posibilidades de extraer del medio donde se desarrolla (subsuelo) los nutrientes y minerales necesarios para su crecimiento, como se evidencia en la figura 3:

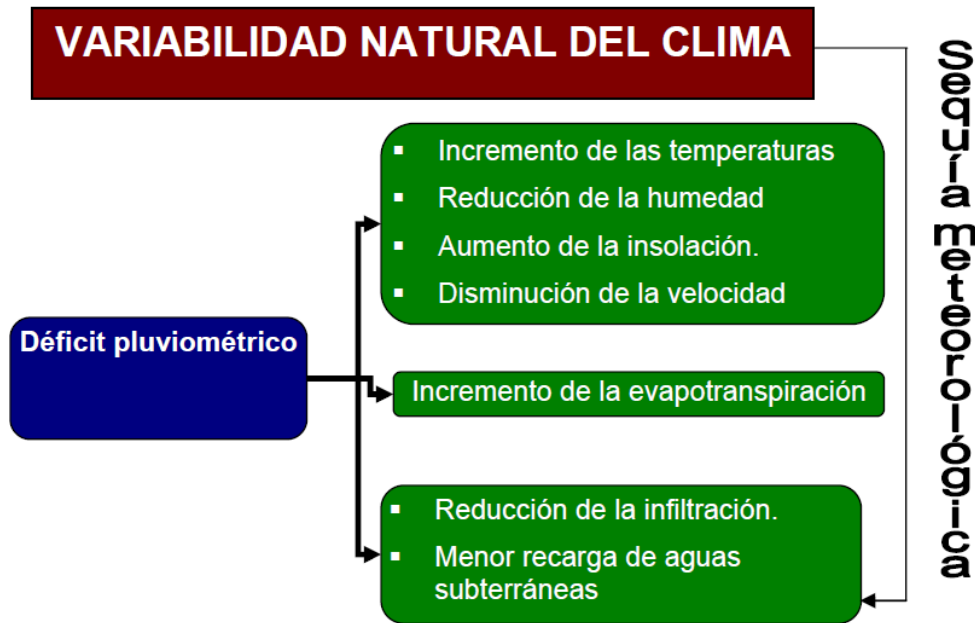


Figura 3: Variabilidad climática de las sequías meteorológicas.

Al hacer referencia a la sequía meteorológica, que es esencialmente un fenómeno de "no lluvia", es de interés precisar que con relativa frecuencia en intervalos de tiempo muy reducidos (horas o pocos días), en determinadas localidades e incluso regiones, pueden producirse acumulados de lluvias capaces de superar los umbrales mínimos para considerar una condición de sequía (referidas a los acumulados mensuales) pudiendo así, interrumpir aparentemente un evento de sequía en curso. La inmediata manifestación de largas secuencias de días secos, o meses secos, propias de la condición de fondo prevaleciente, bien pueden restablecer o dar continuidad al evento en cuestión, siendo este proceso consistente con la propia definición de sequía meteorológica (Valiente, 2001).

1.3. Sequía hidrológica

La sequía es un fenómeno hidrológico extremo que constituye una anomalía transitoria, más o menos prolongada, caracterizada por un período de tiempo con valores de precipitaciones inferiores a las normales en el área.

Se distingue, por tanto, de otros conceptos que reflejan situaciones permanentes, como aridez – condición climática permanente caracterizada por muy baja precipitación – y escasez – situación permanente de insuficiencia de agua para atender las demandas -. A los efectos de los planes de sequía cabe distinguir que estamos en presencia de sequía hidrológica.

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

Ahora bien, la sequía hidrológica se puede considerar como la persistencia de sequía meteorológica que como mayor consecuencia llegue a superar la capacidad de un sistema propuesto para la prevención o contrarresto del fenómeno natural. Figura3.

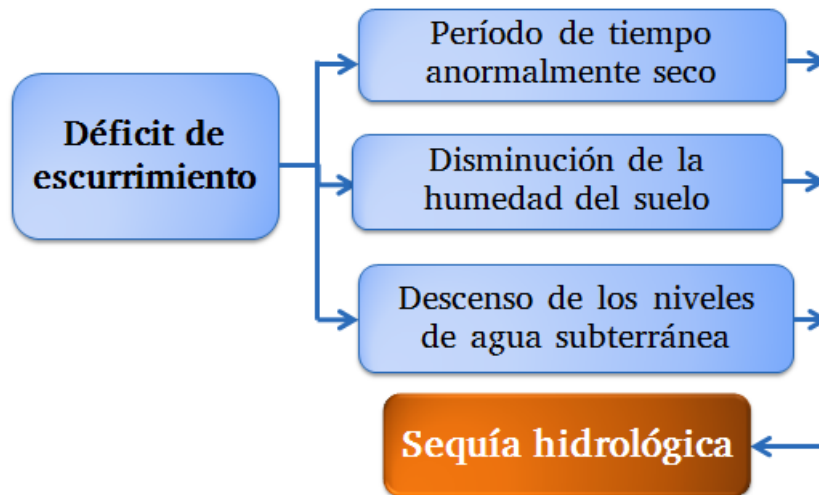


Figura 4: Componentes climáticos de las sequías hidrológicas.

Es, por tanto, necesario definir medidas básicamente de gestión complementarias a las utilizadas en situación normal que, cuando se presente la sequía hidrológica, minimicen los efectos negativos derivados de esta insuficiencia coyuntural del sistema. (Fernández, Andrés, 2012).

1.4. Métodos para determinar las sequías en diferentes épocas.

Palmer (1965), reconoció que era importante considerar no solo la oferta de agua sino también las necesidades, para lo cual desarrollo un procedimiento basado en un índice que representa las diferencias entre las disponibilidades de agua en un lugar y las necesidades agrícolas, tomando en cuenta las condiciones climáticas, los cultivos y los suelos. Desde entonces se han propuesto numerosos índices o indicadores, con el fin de representar con un único valor una gran cantidad de información y poder efectuar comparaciones entre sequías ocurridas en diferentes épocas o regiones (Fernández, 2003).

Entre los índices comúnmente utilizados se destacan, a) Porcentaje de lo normal (Hayes, 1999), ampliamente utilizado debido a su fácil comprensión, b) Índice de severidad de sequías de Palmer (1965), cuya compleja determinación requiere información de variables no siempre disponibles, c) Deciles (Gibbs et al., 1967), cuya sencilla evaluación se basa en el análisis de frecuencia de

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

registros de precipitaciones, d) Índice de precipitación estandarizada (IPE), desarrollada por Mckee et al. (1993), se basa en la probabilidad de precipitación para distintas escalas de tiempo, lo cual permite interpretar el impacto de las precipitaciones por ejemplo, en el contenido de humedad del suelo (escala de tiempo pequeña), hasta el impacto en cuencas de agua subterránea (escala de tiempo grande), además su determinación es menos compleja que la del índice de Palmer ya que se basa solamente en registros de precipitaciones (Fernández, 2003).

Otros índices como los climáticos han sido utilizados extensamente en el mundo desde Thornwaite (1948) a la fecha. Entre ellos, los de Selianinov, Budyko, Ivanov y otros genéricamente llamados “coeficientes hidrotérmicos”, se han basado en estimaciones de la evaporación y la evapotranspiración potencial por métodos indirectos que expresan estas magnitudes como funciones empíricas de las temperaturas activas. De estos índices “remédiales”, es posible prescindir cuando se dispone de parámetros explícitamente calculados al resolver las ecuaciones del balance de radiación, hídrico y energético, tal y como lo plantean Rivero (1992) en (Lapinel et al., 1998).

Bajo el auspicio de agencias de Naciones Unidas, como la UNESCO y el PNUMA (UNCOD, 1977), se elaboraron los primeros mapas mundiales de zonas áridas. Posteriormente, para la Conferencia Cumbre de Naciones Unidas para Medio Ambiente y Desarrollo (UNCED, 1992), el PNUMA y la UNEP presentaron un mapa para los climas secos del mundo. En ambos casos las medidas de aridez utilizadas fueron la “relación de sequedad” de Budyko-Lettau (Hare, 1985) y la “razón precipitación/evapotranspiración potencial” (Hare, 1992), respectivamente. La “relación de sequedad” de Budyko-Lettau es la relación entre el balance de energía neta en la superficie de la tierra y el calor requerido para evaporar la precipitación de un año, referida en todos los casos a valores anuales medios y excluido el valor aportado por los vientos. El sentido físico de este índice radica en que el factor R_o/L es un estimado de la evapotranspiración potencial suponiendo que toda la energía disponible pueda emplearse para evaporar agua, y por tanto el índice K es una estimación del índice E_o/P , o índice de Stenz (Riábchikov, 1976) en Lapinel et al. (1998).

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

El término de “zona árida” es utilizado por Hare (1985), en Lapinel et al. (1998), como expresión colectiva aplicable a las zonas más secas del mundo, incluidos los desiertos, las sabanas, los bosques secos y las zonas de matorral semidesértico y la “aridez” es usualmente definida en términos de un bajo acumulado de las lluvias o la disponibilidad de agua, siendo un patrón climático permanente de una región. Este fenómeno es inducido por un número de factores relativamente estables, tales como el clima, la distribución de las tierras y el mar, y la topografía, en una región geográfica dada y que de hecho involucran una limitada productividad biológica.

Las características más generales de las tierras áridas son: bajas precipitaciones, escasez de agua en el suelo, gran variabilidad interanual de la lluvia, sequía, alta rapidez del viento, erosión eólica y tormentas de polvo. El estudio de las zonas áridas exige la utilización de procedimientos que permitan efectuar medidas del grado de aridez en una u otra región dada. Por lo general, los distintos índices de aridez que han sido desarrollados para estos fines también se formulan, de acuerdo a los intereses específicos de aplicación y los mismos revelan gran adaptabilidad respecto a la información primaria disponible (Lapinel et al., 1998).

Las zonas áridas definidas por este índice no tienen límites exactos, aunque el índice de sequedad de 2 se sitúa cerca del borde húmedo en la mayoría de las zonas Según Lapinel et al. (1998), su clasificación general es la siguiente:

La “razón precipitación/evapotranspiración potencial” llamada también “índice de aridez” (inverso al índice de Stenz), fue la utilizada por el PNUMA en su evaluación de la desertificación en el mundo a principios de la década de los años 90 (UNEP, 1992) y este mismo índice es el que se emplea para definir las “tierras secas” (áridas, semiáridas y subhúmedas secas) en la Convención de Lucha contra la Desertificación, ya mencionada (Lapinel et al., 1998).

En Lapinel et al. (1998), Hare (1983), relaciona la aridez con un conjunto de factores básicos interdependientes, tales como: persistente subsidencia atmosférica, vinculada a la circulación general de la atmósfera; subsidencia local inducida por barreras montañosas u otras configuraciones físico-geográficas específicas; la ausencia de disturbios generadores de lluvia,

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

causando tiempo seco, aún en áreas con suficiente contenido de humedad en el aire y la ausencia de flujos de aire húmedo.

1.5. Medidas para mitigar las sequías.

El objetivo de los Planes especiales de sequía es anticiparse a las sequías, previendo soluciones para satisfacer las demandas y cumplir con los requerimientos medioambientales. Los planes especiales de sequía se basan en:

- a. Conocimiento del sistema de recursos y la capacidad de sus elementos para ser forzados en situación de escasez.
- b. Conocimiento del sistema de demandas y de su vulnerabilidad frente a la sequía.
- c. Sistema de indicadores que pongan de manifiesto la situación de sequía con anticipación suficiente para actuar según las previsiones del Plan.
- d. Aplicación de medidas para reducir el impacto de la sequía en función del estado de los indicadores.
- e. Adecuación de la estructura administrativa para su seguimiento y coordinación entre las distintas administraciones implicadas.
- f. Plan de información pública y a los responsables de los sistemas de abastecimiento.

Los planes especiales de sequía contemplan tres tipos de Medidas: estratégicas, tácticas y de emergencia. Las medidas estratégicas proporcionan respuesta a largo y medio plazo. Suelen estar apoyadas en textos normativos (leyes, decretos...) y suelen requerir inversiones considerables. Algunos ejemplos son la construcción de nuevos embalses, desaladoras, esquemas de reutilización, etc.

Las medidas tácticas dan respuesta a corto plazo. Los planes especiales recogen las medidas a adoptar durante las sequías, los parámetros para imponerlas, los procesos de decisión, las formas de involucrar e informar al público, etc.

Es conocido que las pérdidas por fallos en los suministros de agua no son lineales con el déficit. Es preferible anticiparse mediante el establecimiento de ahorros en los suministros (pequeños déficits repartidos son mejores que un

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

gran déficit de igual magnitud concentrado). Los modelos matemáticos de simulación y optimización se utilizan para estudiar las reglas de explotación y los suministros de las demandas de agua para alcanzar una gestión óptima de la sequía.

Las medidas de emergencia dan respuesta a circunstancias inesperadas, cuando se producen sequías más severas o más largas de lo previsto, por ejemplo mediante la construcción de pozos de emergencia, el establecimiento de restricciones al suministro, la prohibición de usos, la modificación temporal de los derechos etc.

El uso de las aguas subterráneas permite incrementar los recursos necesarios para atender las demandas. Tiene la ventaja de no necesitar grandes infraestructuras para su explotación. Algunos acuíferos pueden ser temporalmente explotados por encima de sus recursos renovables aunque se deberá ser muy cuidadoso al hacerlo, estableciendo procedimientos de control sistemático, para evitar que se produzcan afecciones medioambientales a ecosistemas de ellos dependientes. Durante situaciones de crisis se puede por tanto construir o poner en operación pozos de emergencia de aguas subterráneas. (Este artículo fue publicado en el 2012 por el Proyecto Energía y Clima de la Fundación Friedrich Ebert) (Herrán Claudia, 2012).

1.6. Modelos aplicados a la hidrología.

La hidrología, tanto la hidrología superficial (ciencia encargada del estudio de las aguas continentales superficiales) como la hidrogeología (ocupada del estudio de las aguas subterráneas), necesita modelos para poder representar el funcionamiento de sistemas hidrológicos complejos. En estos sistemas las respuestas producidas por una serie de condiciones externas impuestas al sistema son difícilmente previsibles a causa, precisamente, del gran número de factores que entran en juego. La realización de modelos matemáticos de estos sistemas, combinada con la capacidad de cálculo de los ordenadores, permite obtener herramientas para definir y simular distintas situaciones de utilización de los recursos hídricos.

Como hemos dicho un modelo es una representación simplificada de la realidad manipulable para mejorar la visión que de esta se tiene. En lo sucesivo

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

nos vamos a centrar en un tipo determinado de modelos, que representan el sistema real por medio de un conjunto de expresiones matemáticas, puesto que son los más utilizados en la actualidad (y de forma casi exclusiva en hidrología).

La mayoría de los modelos matemáticos, y de ahí su gran desarrollo reciente, usan como soporte el ordenador. Las ventajas de este son de sobra conocidas, sin embargo, a veces se descuidan o minusvaloran los inconvenientes. Los modelos matemáticos desarrollados sobre ordenadores tienden a crear credibilidad por sí mismos, por ello el modelador debe conocer las limitaciones del modelo y estudiar la veracidad de los datos que le suministra. La clave del buen funcionamiento de cualquier modelo es tener la cantidad y calidad de datos necesarios para alcanzar el fin requerido.

Cada microcuenca presenta características únicas que la identifican y diferencian de su entorno. Sin embargo, los procesos hidrológicos que en ellas se desarrollan son similares: precipitación, infiltración, evapotranspiración, escurrimiento. En este contexto, la predicción y el modelado digital representan una alternativa interesante para la generación de información hidrológica de variables dinámicas como las precipitaciones, los caudales y la pérdida de suelos.

La modelación hidrológica de una cuenca extensa requiere la representación precisa del balance hídrico. Actualmente es posible encarar el problema con modelos esencialmente mecánicos, capaces de calcular ese balance en forma dinámica, integrando al mismo tiempo la modelación del escurrimiento superficial y el subterráneo.

Existen numerosos métodos teóricos científicamente reconocidos que permiten estimar las variables a nivel de cuencas hidrográficas. Por ejemplo, para la estimación de precipitaciones medias se utilizan interpolaciones, triángulos de Thiessen, entre otros. Para la predicción de caudales máximos, suelen emplearse los métodos de: Soil Conservations Service USA, García Nájera, Método Racional con adaptaciones de diversos autores (Temer, Ramser, Frevert, Charnier, Cook), etc. Para la estimación de pérdida de suelos comúnmente son utilizados: USLE, RUSLE, modelo de Fournier, fórmula de Fleming, Modelo de Gravilovic y Djorovic, entre otros.

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

Como hemos mencionado anteriormente los modelos matemáticos serán una herramienta de gran utilidad para representar el comportamiento de las variables que componen el ciclo hidrológico. Estos modelos se pueden dividir en: modelos estocásticos y modelos determinísticos. Dentro de los modelos estocásticos se encuentra el modelo ARIMA (explicados posteriormente), los cuales emplearemos en el desarrollo de la investigación. Los modelos determinísticos son aquellos que de antemano se pueden determinar sus valores, dentro de este se encuentran los modelos de tanque que describen el ciclo hidrológico en función de las ecuaciones de balance hídrico para cada fenómeno en particular (infiltraciones, evapotranspiración, percolación, etc.), ejemplo de ellos son los modelo TETIS y HBV.

Los modelos de Tanque han sido desarrollados para realizar la simulación hidrológica en cuencas naturales, aunque dispone de submódulos para la simulación del efecto de embalses y del riego agrícola. El objetivo es obtener de la mejor forma posible la respuesta hidrológica ocasionada por la precipitación de lluvia o de nieve, teniendo en cuenta los diferentes procesos físicos involucrados y empleando la modelación distribuida de tipo conceptual. Estos modelos también realizan una descripción de la producción de la escorrentía, fusión de nieve, laminación de embalses y traslación a lo largo de los cauces. Todo con el objeto final de justificar el uso de la modelación distribuida conceptual para la simulación hidrológica.

La hipótesis fundamental es: "En cada punto de la cuenca existe una relación funcional entre la tasa de escorrentía superficial y aquellos parámetros hidrológicos que influyen en el escurrimiento." Para aplicar este enfoque, el concepto de punto es relajado al de *elemento*, definido como aquella área dentro de la cual todos los parámetros hidrológicamente significativos son uniformes. El mismo debe ser lo suficientemente pequeño de modo que los cambios arbitrarios de los parámetros de un solo elemento tengan una influencia insignificante sobre la respuesta de toda la cuenca. La cuenca se asume compuesta de elementos cuadrados.

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

TETIS es un modelo distribuido conceptual adaptado a la escala espacio temporal adecuada en que los procesos hidrológicos son determinantes durante un evento de crecida, puede llegar a ser tan preciso como un modelo distribuido físicamente basado, siendo más económico y fácil de utilizar según lo expuesto por Beven (1989). Aunque se disponga de los elementos matemáticos necesarios para el desarrollo de un modelo matemático físicamente basado, este tipo de modelos requieren de muchísima información, la mayor parte de ella no se encuentra disponible o es muy costosa, adicionalmente exigen rutinas complejas con gran cantidad de parámetros, ya que la realidad es heterogénea y las ecuaciones matemáticas no siempre incluyen estas heterogeneidades, finalmente este tipo de modelos son costosos en cuanto a tiempo, almacenamiento y manejo de la información dentro del ordenador.

Grayson et al. (1992) exponen que existen dos razones para el desarrollo de un modelo. La primera es entender el sistema físico que provee un marco de datos, es la prueba de una hipótesis. La segunda es proporcionar una herramienta de predicción. Éstas no deben confundirse, pues la primera de ellas se puede satisfacer con un ajuste empírico, pero el segundo propósito requiere un modelo que tenga experimentación extensiva y conocimiento para producir adecuadamente una salida particular bajo ciertas condiciones bien definidas, lo cual hace que sea factible producir salidas para otras condiciones con alguna confianza. El uso real de estos modelos es asistir en el análisis de datos, probar hipótesis en conjunto con estudios de campo, mejorar nuestro entendimiento de los procesos y su interacción e identificar áreas de pobre entendimiento en nuestro proceso de descripción.

Grayson et al. (1992) indican que los principios aplicados a la guía de los modelos físicamente basados en Hidrología son cuatro:

- Parsimonia. El número de parámetros debe ser minimizado.
- Modestia. El objetivo y la aplicabilidad del modelo no debe ser sobre valorado.
- Precisión. La precisión de la simulación o predicción no puede ser mayor que la precisión de las medidas.
- Que se pueda probar. Un modelo se debe poder probar así sus límites y su validez pueden ser definidos.

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

Otro problema de los modelos físicamente basados es que su desarrollo no es dinámico, son a menudo desarrollados aisladamente o probados sólo para garantizar su precisión y en ocasiones se pierde el objetivo inicial siendo utilizado en situaciones diferentes para las cuales fueron creados. La necesidad de la calibración y la validación en los modelos es la prueba de lo insuficientes que son para su aplicación universal. Beven (1989) resalta que los modelos desarrollan la física de los procesos a pequeña escala sobre sistemas homogéneos y este desarrollo es aplicado al modelo que trabaja a una escala superior, la cual es representada por la celda, realizando un agrupamiento de las variables sin tener en cuenta la física del proceso en la nueva escala. Se puede decir que los modelos distribuidos físicamente basados son modelos conceptuales agrupados. Así mismo, Grayson et al. (1992) mencionan que los procesos que son modelados pueden ser agrupados en unidades homogéneas a alguna escala, de tal forma que los algoritmos y parámetros usados para definir los subprocesos son apropiados a la escala de la unidad homogénea. Aún el más riguroso de los procesos matemáticos que describe la respuesta de la cuenca es una cruda representación de la realidad, lo cual incide en el grado de precisión esperable: no hay una base física para estimar las características del flujo superficial sobre superficies naturales, las características del flujo pueden ser simples artefactos de la estructura del modelo y muchas hipótesis y simplificaciones se deben realizar, surgiendo un gran número de parámetros en especial cuando se trata de modelos de predicción. En general, según Grayson et al. (1992) existe arrogancia al referirse a modelos físicamente basados.

Adicionalmente, los parámetros son estimados con base a la experiencia del investigador y con la información hidrológica disponible. En el caso de existir eventos registrados de lluvia - escorrentía, con posterioridad se procede a un refinamiento de la estimación o calibración, normalmente mediante un proceso iterativo de ensayo y error por comparación entre el hidrograma observado y el simulado. El número de parámetros es a menudo tal que la mayoría se hacen constantes y pocos son variables porque algunos de ellos no son obtenidos.

Beven (1989) menciona que los modelos distribuidos físicamente basados sufren los mismos problemas de los modelos agregados conceptuales, pero en diferente grado. La observación de datos y la sobre-parametrización cuando se

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

efectúa simulación, hace difícil el proceso de la optimización. El investigador es quien decide cuales parámetros son más sensibles y cuales se determinan “a priori”. La valoración de la relación existente entre los parámetros, los cuales varían en función del tipo de suelo, del tipo de vegetación, etc., hace que se reduzca el número de parámetros. Así mismo, las condiciones iniciales que son introducidas al modelo sufren de estos mismos males.

En TETIS, la producción de la escorrentía se basa en la realización de un balance hídrico en cada celda, asumiendo que el agua se distribuye en seis niveles o tanques de almacenamiento conceptuales y conectados entre sí (más un séptimo de cauces cuando lo haya en la celda), como puede observarse en la Figura 4.

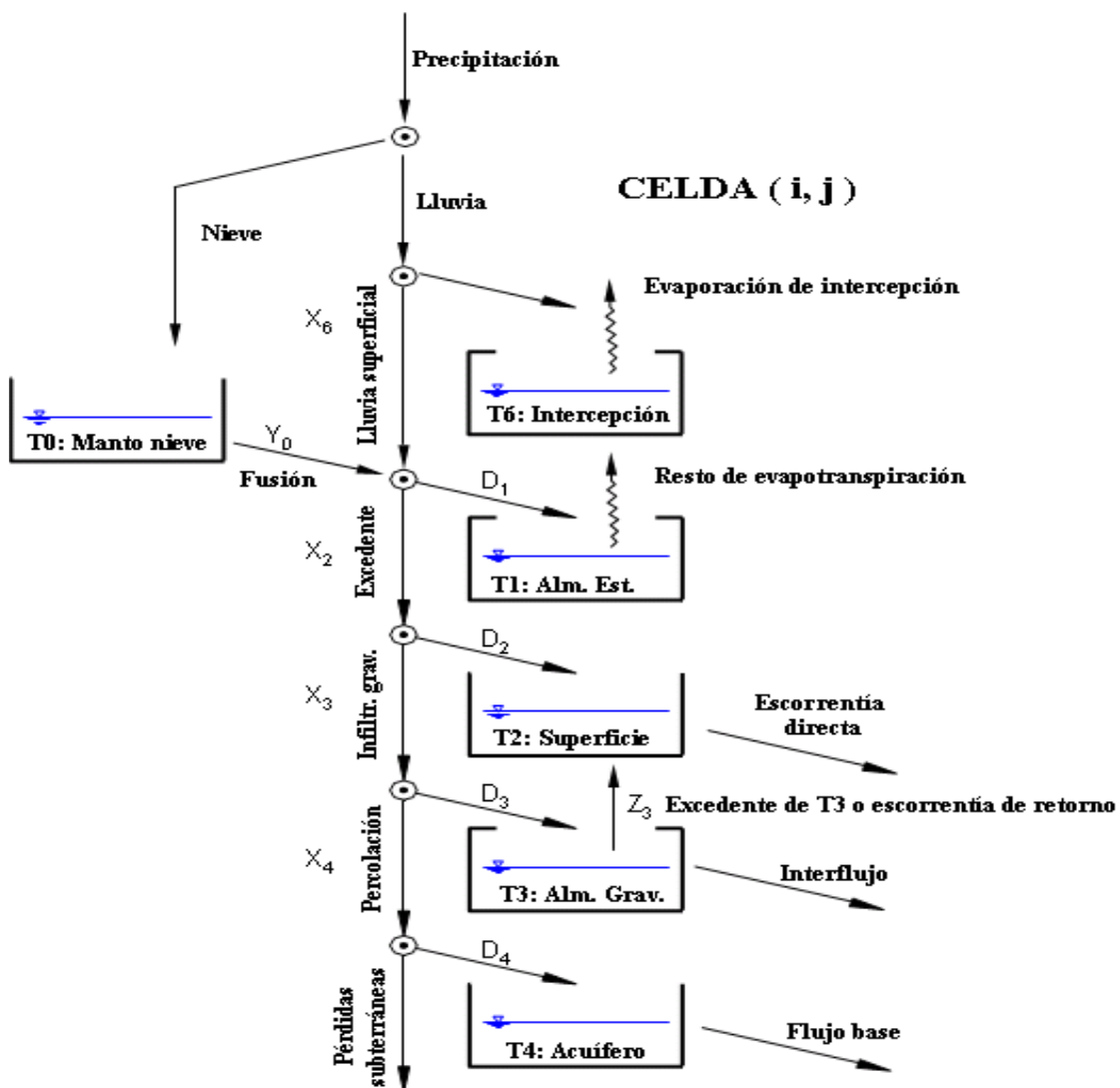


Figura 4. Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS.

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

El flujo entre los tanques es función del agua almacenada en ellos, por lo que las variables de estado son los volúmenes almacenados en cada uno de los tanques. La función que relaciona el flujo con estas variables de estado es función del esquema conceptual adoptado, del tipo de tanque y de las características morfológicas de la celda e hidrológicas del suelo en la misma.

En realidad, la conceptualización del modelo TETIS es una malla interconectada en tres dimensiones. Los tres tanques inferiores drenan hacia el correspondiente tanque aguas abajo, siguiendo las direcciones del flujo propuestas por el MED, hasta alcanzar la red de drenaje constituida por cárcavas y cauces. La longitud de interconexión máxima para cada tanque es definida por el usuario, teniendo en cuenta que para la escorrentía y el flujo subsuperficial esta longitud está asociada al tamaño de las laderas. Para el flujo base esta longitud se estima teniendo en cuenta el punto inicial del flujo permanente en el cauce.

Como conclusión se puede decir que no es necesario desarrollar modelos físicamente basados, los modelos conceptuales son mejores puesto que son más simples, involucran un número de parámetros menor, requieren menos información y son más económicos, todo esto siempre y cuando se empleen a la escala adecuada.

Dentro de los modelos estocásticos, los modelos auto regresivos integrados de medias móviles (**ARIMA**) han ganado enorme popularidad en muchas áreas y la investigación práctica nos confirma su poder y flexibilidad(Stanley Jere, 2016).

ARIMA es una técnica compleja, no es fácil de usar, requiere un alto nivel de experiencia y aunque frecuentemente produce resultados satisfactorios, estos dependen de las habilidades y experiencia del investigador (Peppers, 1982) puede ser formulada con bastante independencia de los argumentos matemáticos que lo fundamentan; pero evidentemente, algunos conceptos son importantes y el desarrollo teórico de algunos resultados no solo permite comprender mejor el fundamento, sino que dan más claridad para la aplicación práctica.

Por las características y exigencias que presenta el trabajo consideramos este modelo capaz de determinar o pronosticar de forma confiable un resultado

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

satisfactorio que cumpla el fin de nuestra investigación, lo cual se mostrará en páginas posteriores.

1.7. Aplicación de softwares en la modelación Hidráulica.

El software **HEC-RAS**. Se trata de un programa de ordenador que los modelos de los hidráulicos de flujo de agua a través de los ríos naturales y otros canales desarrollados por el Departamento de Defensa de EE.UU., concretamente por el Hydraulic Engineering Corps. (HEC). El programa es unidimensional, lo que significa que no hay modelado directo del efecto hidráulico de cambios en la forma de sección transversal, curvas, y otros aspectos de dos y tres dimensiones de flujo. El modelo dimensional de energía le permite:

- Simular vastas extensiones de ríos con un solo modelo.
- Velocidad de cálculo elevada, con lo que puedes repetir un cálculo con facilidad. La simplificación de flujo turbulento tridimensional para un flujo unidimensional es relativamente aceptable para grandes escalas (ríos y quebradas).
- La libertad geométrica es muy grande, es una gran ventaja sobre otros programas mucho más estrictos en este aspecto.
- Características geométricas: la creación, modificación y edición de geometría entorno visual, rápido y muy cómodo.
- Gran capacidad de importar y exportar datos. Entorno Windows para el procesamiento posterior de los resultados y la presentación.
- Ampliamente utilizado: gran número de usuarios experimentados de todo el mundo, siendo hasta la fecha, un software sin coste de licencia de uso.
- HEC-RAS no es un modelo de turbulencia, y en este sentido, la ecuación de la energía y siempre distribuciones de presión hidrostática.
- HEC-RAS tiene limitaciones en las grandes inundaciones en las llanuras de inundación, debido a su falta de 2D o 3D.
- Modelado único de ríos y quebradas con pendientes de menos de 10°, donde la componente vertical del peso de la columna de agua no se utiliza.
- Saltos y obstáculos no se reproducen correctamente, así que en HEC-RAS no funciona el equilibrio de fuerzas.

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

El modelo **HEC-HMS** (“Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System”) fue diseñado para simular procesos de lluvia-escorrentía en sistemas dendríticos de cuencas.

Se usa en estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronósticos de flujo, futuras urbanizaciones, reducción del daño por inundaciones, etc.

Es un programa gratuito, de dominio público y fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. Surge como evolución del programa HEC-1 pero incluye muchas mejoras, como una interface gráfica que facilita al usuario las labores de pre y post-proceso y la posibilidad de conectarse a un sistema de información geográfica (ArcGIS).

El HEC-HMS se usa para simular la respuesta hidrológica de una cuenca. Incluye los modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. El programa crea una corrida de simulación, combinando los modelos y las especificaciones. Puede hacer corridas de precipitación o de la proporción de flujo, tiene la capacidad de salvar toda la información de estado de la cuenca en un punto de tiempo, y la habilidad de comenzar una nueva corrida de simulación, basada en la información de estado previamente guardada.

El modelo contiene:

- a) Descripción física de la cuenca
- b) Descripción meteorológica
- c) Simulación hidrológica
- d) Estimación de parámetros
- e) Análisis de simulaciones
- f) Conexión con SIG

El HEC-HMS permite establecer varias subcuencas, en las cuales realiza los cálculos de las 3 primeras fases mencionadas. Luego, suma todos los caudales generados y transitados a lo largo del recorrido, y proporciona el hidrograma de salida de la cuenca.

EL **SPSS** es un programa estadístico informático muy usado en las ciencias sociales y las empresas de investigación de mercado. Originalmente SPSS fue creado como el acrónimo de *Statistical Package for the Social Sciences* aunque

Capítulo 1: Marco teórico-referencial de la investigación.

también se ha referido como "Statistical Product and Service Solutions" (Pardo, A., & Ruiz, M.A., 2002, p. 3). Sin embargo, en la actualidad la parte SPSS del nombre completo del software (IBM SPSS) no es acrónimo de nada.

Es uno de los programas estadísticos más conocidos teniendo en cuenta su capacidad para trabajar con grandes bases de datos y un sencillo interface para la mayoría de los análisis. El programa consiste en un módulo base y módulos anexos que se han ido actualizando constantemente con nuevos procedimientos estadísticos. Cada uno de estos módulos se compra por separado. En el capítulo 2 se hace una descripción más detallada de este software dado a que las características del mismo satisfacen la exigencia propuesta en nuestra investigación y por ello lo empleamos para resolver lo propuesto en la investigación.



Capítulo 2: Descripción de la metodología. Teoría de Box-Jenkins.

Capítulo 2: Descripción de la metodología. Teoría de Box-Jenkins.

Esta metodología de Box-Jenkins puede ser formulada con bastante independencia de los argumentos matemáticos que lo fundamentan; pero evidentemente, algunos conceptos son importantes y el desarrollo teórico de algunos resultados no solo permite comprender mejor el fundamento, sino que dan más claridad en su aplicación práctica.

2.1 Teoría de Box-Jenkins

La metodología de Box-Jenkins es realmente un proceso multipaso e iterativo de análisis de series de tiempo y pronósticos, y consiste esencialmente de cuatro fases(Box, 1976):

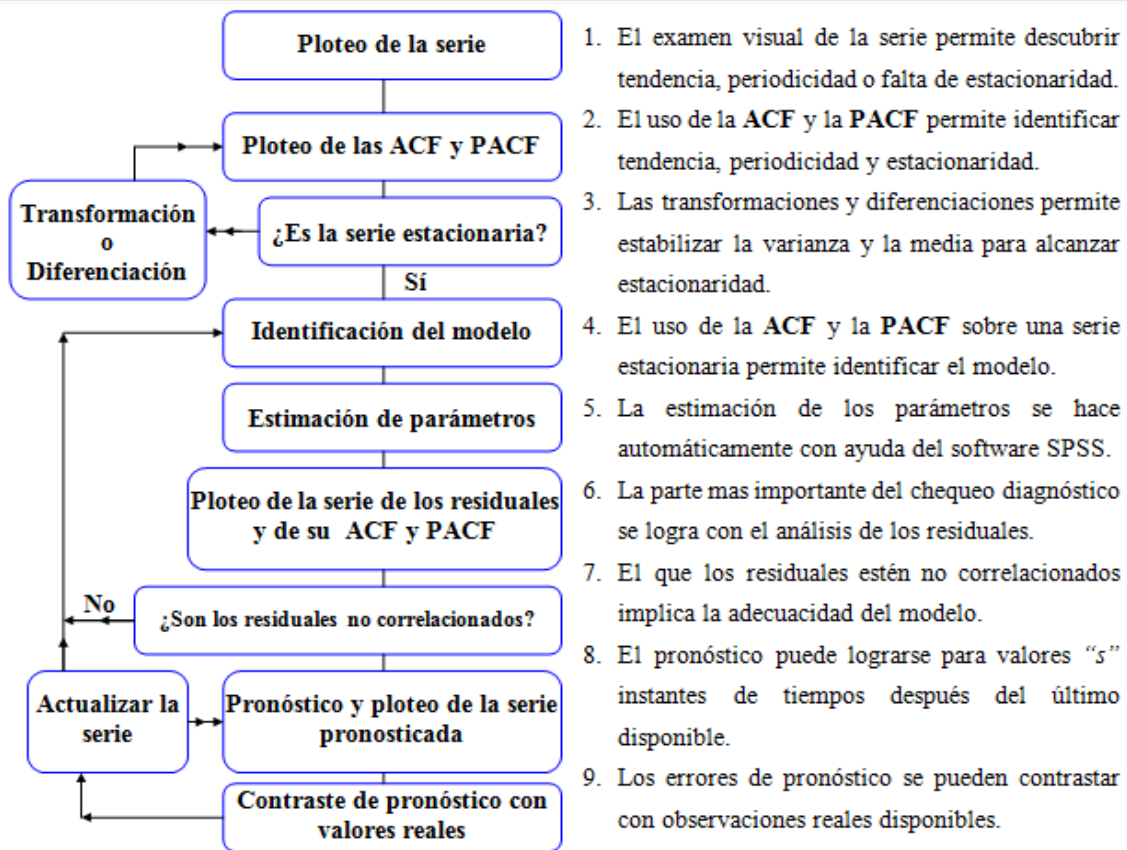
- Identificación del modelo
- Estimación de parámetros
- Chequeo diagnóstico
- Pronóstico

La metodología ayuda no sólo a identificar un modelo sino a perfeccionarlo en varias de sus fases. Es importante comprender que para un juego de datos específico puede existir más de un modelo ARIMA que ajuste bien los datos. Por ello, el modelo puede perfeccionarse como consecuencia de cada fase. El chequeo diagnóstico incluye no sólo el estudio de la validez de un modelo, sino también la comparación de varios posibles. El propio rastreo del pronóstico con nuevos valores disponibles, hace que también una serie pueda mejorarse sucesivamente.

En la fase de identificación del modelo, el ploteo de la serie y los residuales permiten descubrir e identificar tendencias a la periodicidad, además de tendencias lineales, polinómicas, o violaciones del carácter estacionario de la serie por falta de homogeneidad de varianza. Las transformaciones y/o diferenciaciones, permiten muchas veces lograr carácter estacionario y este explica el primer lazo. Los pasos sucesivos de la metodología de Box-Jenkins parten de que se han alcanzado estacionaridad de la serie.

Un “diagrama de flujo” que muestra las fases y el carácter iterativo puede ser el siguiente:

Capítulo 2: Descripción de la metodología. Teoría de Box-Jenkins.



Nota: ACF Función de Autocorrelación
PACF Función de Autocorrelación Parcial

Una vez que la serie es estacionaria, los correlogramas trazados permiten la identificación inicial del modelo. El proceso de identificación puede ser concebido como un proceso cíclico de aproximaciones sucesivas en el que intervienen en el primer nivel, las fases de identificación, estimación, y análisis de la autocorrelación de los residuales (ver "lazo" correspondiente en el diagrama de la metodología de Box-Jenkins). En el segundo nivel, el ciclo abarca además el pronóstico y su contraste con valores reales.

La estimación de parámetros es la fase de construcción del modelo donde calculamos los valores específicos para cada uno de los parámetros $AR(i)$, $MA(j)$ y el μ (o δ , según el paquete); ya que la serie de tiempo que estamos modelando es solamente una muestra o realización del proceso que ella representa, realmente nosotros calculamos estimaciones muestrales de los verdaderos parámetros.

Capítulo 2: Descripción de la metodología. Teoría de Box-Jenkins.

El diagnóstico comienza prácticamente con las estadísticas que surgen en la fase de estimación, tiene su centro en el estudio de la correlación de los residuales y se extiende hasta la etapa de pronóstico en el sentido siguiente.

Una práctica general y bastante usual, al comenzar el estudio de modelos de series de tiempo, es reservar desde el principio una parte de los datos (digamos el último 10 por ciento) para validar el modelo y emprender todo el análisis, identificación, estimación y diagnóstico con la primera parte de los datos. El pronóstico sobre el período de validación y su cooperación con los valores reservados reales proporciona un criterio efectivo de cuán válidos son los pronósticos a partir del modelo estimado.

En el período de validación pueden comprobarse tanto los pronósticos a corto plazo como los pronósticos a largo plazo. En el primer instante del pronóstico, el valor predicho se estima a partir de cierto número de valores anteriores a él. A partir del segundo instante, tenemos dos alternativas: utilizar el valor real (que está disponible) en el instante anterior, o utilizar el valor recién pronosticado para este punto. En general, si pronosticamos utilizando valores reales de la serie, anteriores al instante actual, aunque estén dentro del período de validación, los pronósticos serán más exactos y validamos con ello el pronóstico a corto plazo. Si para predecir el valor en un instante dado utilizamos sólo los valores reales que sirvieran de base en la estimación de la serie y los valores pronosticados de instantes anteriores al actual, validamos el pronóstico a largo plazo. En este último caso obtendremos un pronóstico mucho más grosero porque la información real se acabará al cabo de ciertas fases.

En el pronóstico real, esto es, sobre un período para el cual no tengamos valores reservados, es imprescindible utilizar después del primer paso, la información previamente pronosticada.

El “agotamiento” de la información real disponible para el pronóstico a largo plazo es particularmente notable en los procesos autorregresivos en los cuales el valor actual depende apenas de p valores anteriores. En el caso de series de medias móviles y de modelos mixtos (equivalentes, si son invisibles a modelos autorregresivos de muy alto orden), la información real disponible terminará más en agotarse, pero en cualquier caso el pronóstico será mucho más ingenioso. Después veremos que los mejores pronósticos se pueden

Capítulo 2: Descripción de la metodología. Teoría de Box-Jenkins.

obtener en el caso de las series estacionales o periódicas, porque hay dependencia de información anterior mucho más ligera.

Es justo decir también que la metodología de Box-Jenkins no es un “algoritmo” pues no garantiza siempre convergencia a una solución. De hecho, si la serie no es ARIMA o transformable a una, tal serie no puede ser modelada según estos criterios.

Es importante recordar de la teoría que para obtener buenos pronósticos, es deseable que:

- Si hay componentes de media móvil, esta sea inversible y se tengan bastantes datos de base para hacer el pronóstico.
- En cualquier caso se tengan residuales independientes y de ser posible, distribuidos normalmente.

La metodología de Box-Jenkins así formulada es válida también para el estudio de series estacionales o periódicas, lo cual se hará referencia a ello a continuación.

El carácter periódico de una serie puede ser una propiedad muy buena a los fines de pronóstico; pero para el análisis de Box-Jenkins, es imprescindible trabajar con series estacionarias. La periodicidad en una serie es otro tipo de violación del carácter estacionario y debe ser “eliminado” en la fase de identificación del modelo.

El análisis de una serie de tipo estacional ARIMA es una extensión del principio de identificación sucesiva. Salvo un detalle, que inmediatamente aclararemos, se trata primero de identificar y ajustar los parámetros como si fuera una serie estacional pura (P, D, Q)_S y luego, estudiando los residuales, identificamos y estimamos los parámetros de la posible componente regular (p,d,q).

El modelo definitivo será (p,d,q)(P,D,Q)_S.

Así, el orden de identificación usual es realmente:

d - diferenciación regular

S - estacionalidad de la serie

D - diferenciación estacional

Todo precedido posiblemente de transformaciones para alcanzar homocedasticidad y con el objetivo final de alcanzar estacionaridad (en este momento se podría estimar ya la constante μ). Una vez alcanzada la estacionaridad, se identifican sucesivamente.

Capítulo 2: Descripción de la metodología. Teoría de Box-Jenkins.

(P,Q) - Ordenes autorregresivos y de medias móviles estacional a partir de la serie transformada y diferenciadas. La identificación de P y Q permite estimar los parámetros ϕ_i , $i = 1, 2, \dots, P$; θ_j , $j = 1, 2, \dots, Q$ y calcular los residuales E_t de un modelo estacional supuestamente puro.

(p,q) - Ordenes autorregresivos y de medias móviles regulares a partir de los residuales del preprocesamiento anterior. La identificación de p y q puede considerarse un afinamiento del modelo y permite estimar los parámetros ϕ_i , $i = 1, 2, \dots, p$; θ_j , $j = 1, 2, \dots, q$ y calcular e_t que esperamos que sean un ruido blanco.

De esta manera se mantiene válido el orden del flujo en el diagrama o metodología de Box-Jenkins.

Hasta aquí, hemos tratado de una forma muy general algunos aspectos teóricos de interés de la modelación de Box-Jenkins, sin embargo, el comportamiento histórico de un proceso hidrológico se ve afectado frecuentemente por la influencia de un factor externo en un instante de tiempo dado o en el intervalo comprendido entre dos ciertos instantes de tiempo.

En una primera aproximación puede suponerse una relación lineal entre la excitación a que se ve sometida una cuenca, representada por las precipitaciones, y su respuesta apreciable en la serie de caudales, o mejor aún la precipitación efectiva. Designando a $P_{v,\tau}$ y $Q_{v,\tau}$ la precipitación total y la efectiva del año v en el mes τ sobre la cuenca de interés, ellas corresponden a las series temporales que representan los recursos meteorológicos e hidrológicos respectivamente. Con el objetivo de remover la periodicidad, ambas series pueden ser estandarizadas periódicamente mediante las expresiones:

$$X_{12(v-1)+\tau} = \frac{P_{v,\tau} - m_{P\tau}}{S_{P\tau}}$$

$$Y_{12(v-1)+\tau} = \frac{Q_{v,\tau} - m_{Q\tau}}{S_{Q\tau}}$$

donde: $v = 1, 2, \dots, N$; $\tau = 1, 2, \dots, 12$, siendo N el número de años de interés, τ un índice del mes, $m_{P\tau}$ el promedio y $S_{P\tau}$ la varianza de las

1

Capítulo 2: Descripción de la metodología. Teoría de Box-Jenkins.

precipitaciones totales del mes τ y mQ_τ $S2Q_\tau$ el promedio y la varianza de las precipitaciones efectivas de cada mes.

Como primera aproximación, la dependencia lineal entre las variables estandarizadas puede representarse mediante un modelo de función de transferencia (Bekkali, 2014), (FT) de orden (r, S, b) donde r es el número de términos autorregresivos, S el de términos de excitación y b el desfase entre excitación y respuesta. De manera explícita este modelo corresponde a:

$$Y_t = \sum_{i=1}^r \delta_i \cdot Y_{t-i} + \sum_{j=0}^S W_j \cdot X_{t-b-j} + \varepsilon_t \quad 2$$

donde ε_t es el ruido del sistema. Estos modelos pueden escribirse en la forma de Box-Jenkins (1976) como:

$$\delta_r(B) \cdot Y_t = W_s(B) \cdot B^b \cdot X_t + \varepsilon_t \quad 3$$

Donde $\delta_r(B)$ es un polinomio de grado r en B , $W_s(B)$ otro polinomio en B de grado S y B es el operador de retroceso, definido como $B^n \cdot Z_t = Z_{t-n}$.

Con el objetivo de visualizar los efectos de las sequías meteorológicas, observables en la serie $P_{v,\tau}$, sobre las hidrológicas, representadas por $Q_{v,\tau}$ es conveniente utilizar la representación explícita del modelo (3) para la variable Y_t :

$$Y_t = \delta_r^{-1}(B) \cdot W_s(B) \cdot B^b \cdot X_t + \delta_r^{-1}(B) \cdot \varepsilon_t \quad 4$$

la que se puede colocar como:

$$Y_t = V(B) \cdot X_t + N_t \quad 5$$

Siendo $V(B)$ un polinomio en B de orden infinito cuyos elementos corresponden a la respuesta del sistema o una excitación de tipo impulso. Los valores de los coeficientes V_j están relacionados con los polinomios, δ y W mediante un sistema de ecuaciones lineales.

Disponiendo del modelo de función de transferencia y conocidos los valores de la función respuesta impulso, (V_0, V_1, V_2, \dots) es posible estimar cuantitativamente algunos efectos de interés de las sequías meteorológicas sobre las hidrológicas, como las que se analizan a continuación.

Capítulo 2: Descripción de la metodología. Teoría de Box-Jenkins.

a) Es de interés estimar el impacto de un tipo de sequía sobre la otra a través de una medida del déficit de recursos de agua superficial provocado por un déficit en la precipitación. Para ello, se puede centrar el interés sobre el efecto en la precipitación efectiva de un déficit en las precipitaciones totales ocurridas a partir del mes τ durante n periodos seguidos. Así la sequía meteorológica corresponde a un escalón de tamaño a y longitud n en la serie de precipitaciones totales en relación con los valores medios. La respuesta puede observarse k meses después, también con relación al valor medio de las correspondientes precipitaciones efectivas.

Las principales variables involucradas se muestran a continuación:

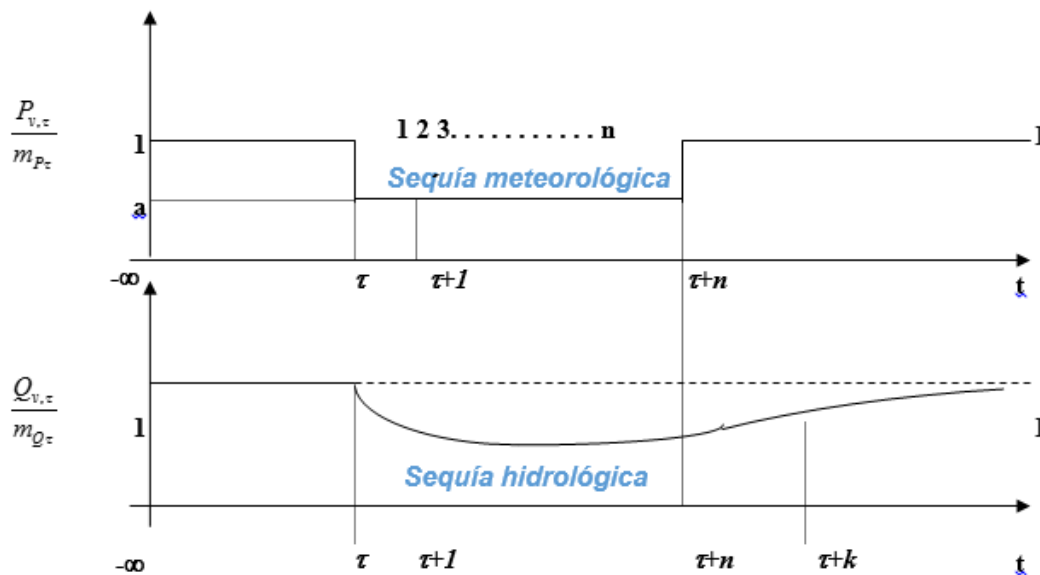


Figura 6: Grafico de las variables escurrimiento y precipitación.

Los valores de respuesta y excitación están ligados directamente a través de la expresión (5) la cual puede expresarse explícitamente, aceptando que el valor esperado del ruido es nulo, como la tradicional función de convolución:

$$Y_t = \sum_{j=0}^{\infty} V_j \cdot X_{t-j}$$

6

Esta relación puede transformarse en términos de las precipitaciones efectivas y totales utilizando la ecuación (1):

Capítulo 2: Descripción de la metodología. Teoría de Box-Jenkins.

$$\frac{Q_{v,\tau} - m_{Q\tau}}{S_{Q\tau}} = \sum_{j=0}^{\infty} V_j \cdot \left(\frac{P_{v,\tau-j} - m_{P,\tau-j}}{S_{P,\tau-j}} \right) \quad 7$$

que por comodidad puede ponerse como:

$$\left(\frac{Q_{v,\tau}}{m_{Q\tau}} - 1 \right) \cdot \frac{m_{Q\tau}}{S_{Q\tau}} = \sum_{j=0}^{\infty} V_j \cdot \frac{m_{P,\tau-j}}{S_{P,\tau-j}} \cdot \left(\frac{P_{v,\tau-j}}{m_{P,\tau-j}} - 1 \right) \quad 8$$

donde se aprecia que es conveniente utilizar las precipitaciones totales y efectivas en términos reducidos, usando para ello los valores medios mensuales:

$$q_{v,\tau} = \frac{Q_{v,\tau}}{m_{Q\tau}} ; \quad p_{v,\tau-j} = \frac{P_{v,\tau-j}}{m_{P,\tau-j}} \quad 9$$

Combinando estas relaciones en (8) se puede despejar $q_{v,\tau}$ como:

$$q_{v,\tau} = 1 - \frac{S_{Q\tau}}{m_{Q\tau}} \cdot \sum_{j=0}^{\infty} V_j \cdot \frac{m_{P,\tau-j}}{S_{P,\tau-j}} \cdot (1 - p_{v,\tau-j}) \quad 10$$

En la relación (10) las series q y p son de promedio 1 y varianza periódica. Una sequía meteorológica puede quedar representada por uno o más valores de p menos de 1. En particular supóngase que p adopta los siguientes valores:

$$P_{\tau} = \begin{cases} 1 & \text{si } t \leq \tau \\ a & \text{si } \tau \leq t \leq \tau + n - 1 \\ 1 & \text{si } t \geq \tau + n \end{cases} \quad \text{con } a \leq 1 \quad 11$$

Esto indica entonces una sequía de tamaño a y duración n que ocurre a partir del mes τ . Interesa conocer el efecto de ella sobre el caudal k meses después, con $k = 0, 1, 2, \dots$. Reemplazando τ por $\tau+k$ en la expresión (10) se tiene:

$$q_{v,\tau+k} = 1 - \frac{S_{Q,\tau+k}}{m_{Q,\tau+k}} \cdot \sum_{j=0}^{\infty} V_j \cdot \frac{m_{p,\tau+k-j}}{S_{p,\tau+k-j}} \cdot (1 - P_{v,\tau+k-j}) \quad 12$$

Considerando que p es igual a 1 para $t < \tau$ y $t \geq \tau + n$ en el término de la suma es distinto a cero solo para algunos valores, por lo tanto combinando (11) y (12) y eliminando el índice v por comodidad se tiene:

$$q_{\tau,k}^{a,n} = 1 - \frac{S_{Q,\tau+k}}{m_{Q,\tau+k}} \cdot \sum_{j=k-n+1}^k V_j \cdot \frac{m_{p,\tau+k-j}}{S_{p,\tau+k-j}} \cdot (1 - a) \quad 13$$

Capítulo 2: Descripción de la metodología. Teoría de Box-Jenkins.

donde $q_{\tau,k}^{a,n}$ representa la respuesta k meses después a una sequía de tamaño a y duración n que comenzó en el mes τ . En particular, si $n = 1$ se tiene:

$$q_{\tau,k}^{a,1} = 1 - \frac{S_{Q,\tau+k}}{m_{Q,\tau+k}} \cdot V_k \cdot \frac{m_{p,\tau}}{S_{p,\tau}} \cdot (1-a) \quad 14$$

Esta expresión puede entenderse de la siguiente manera. Si en un mes cualquiera τ se tiene una reducción de precipitaciones tal que solo se dispone de una proporción a del valor medio de ese mes, ello tendrá efecto sobre las precipitaciones efectivas de manera que k meses después solo se contará con una proporción $q_{\tau,k}^{a,n}$ del valor medio de ella.

Tanto en (13) como en (14) queda claro que si $a = 1$ entonces $q = 1$. Es decir que si se mantienen los valores medios de precipitaciones entonces se tendrán valores medios de caudales.

b) Retardo medio

También es de interés conocer el tiempo que tardarán en promedio notarse los efectos de sequías en las precipitaciones sobre el comportamiento de los caudales. Esto queda reflejado en el retardo medio del sistema, que se obtiene ponderando los retardos por los efectos que se transmiten:

$$T = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{j \cdot V_j}{G} \quad 15$$

donde G es la ganancia del sistema, es decir la respuesta a una función escalón de la excitación, calculable como (Box y Jenkins 1976):

$$G = \frac{W(1)}{\delta(1)} = \frac{W_0 - W_1 - \dots - W_s}{1 - \delta_1 - \dots - \delta_r} \quad 16$$

Como el polinomio de respuesta a la función impulso, $V(B)$ cumple con:

$$\frac{dV(B)}{dB} = V_1 + 2 \cdot V_2 \cdot B + 3 \cdot V_3 \cdot B^2 + \dots \quad \frac{dV(1)}{dB} = \sum_{j=1}^{\infty} j \cdot V_j = V(1) \quad 17$$

Entonces

$$T = \frac{\delta(1)}{W(1)} \cdot V'(1)$$

Capítulo 2: Descripción de la metodología. Teoría de Box-Jenkins.

Expresando $V(B)$ en función de los polinomios $\delta(B)$ y $W(B)$ según la ecuación (4), derivando y evaluando para $B = 1$ se obtiene:

$$T = b + \frac{W'(1)}{W(1)} - \frac{\delta'(1)}{\delta(1)} \quad 18$$

donde el apóstrofe indica la derivada del polinomio respecto al factor de retroceso B .



Capítulo 3: Estudio de la cuenca hidrográfica del río Zaza.

Capítulo 3: Análisis de los resultados de la investigación.

Para la realización de este trabajo fue posible contar con datos de escurrimiento mensual de la estación Sopimpa ubicada en el río Agabama, provincia de Sancti Spíritus y las series mensuales de lluvia del pluviómetro 752 que fue escogido como representativo de la cuenca, según trabajos desarrollados en la EIPH Villa Clara. Estos datos fueron suministrados por el Departamento de Estudios Hidrológicos de la EIPH de Villa Clara y Sancti Spíritus.

3.1. Aplicación del software SPSS.

Las variables que vamos a tratar representan el caudal medio mensual medido en la Estación Hidrométrica Paso Ventura y los valores mensuales de precipitaciones del Pluviómetro 752, para ello utilizaremos el software SPSS versión 8.0 debido a la facilidad y fiabilidad en la obtención de los resultados.

A continuación se explicarán por pasos el análisis realizado.

1. Los datos de caudales fueron llevados de m^3/s a mm para trabajar con las mismas unidades por razones de comodidad.
2. Se fijan las variables de datación en años y meses.
3. Las series fueron centradas y estandarizadas según la ecuación (1) con el objetivo de eliminar la estacionalidad y atendiendo a la comodidad que esto representa para la aplicación de la metodología expuesta en el capítulo 3.
4. Se plotean ambas series y sus correspondientes funciones de autocorrelación (FAC) y de autocorrelación parcial (FAP) (anexos 1, 2, 3, 6 y 7). El gráfico de la serie evidencia la homogeneidad de varianzas. De aquí se demuestra también que la componente estacional ha sido separada y además se evidencia la necesidad de una componente autorregresiva. Observe en particular el hecho de contar con un “lags” o retardo de 16 con el objetivo de tener un mejor criterio de la estacionalidad.
5. La parte autorregresiva, por lo tanto, es tratada por un modelo ARIMA (1, 0,0) y comenzamos el análisis, (anexo 2). Se puede observar que la componente autorregresiva es significativa.
6. Se comprueban ahora que los residuales no están autocorrelacionados por medio de ACF y PACF (anexos 4 y 5). Como se puede apreciar los

Capítulo 3: Análisis de los resultados de la investigación.

errores no están correlacionados que es lo que queríamos obtener, además de considerar los resultados estadísticos de los modelos analizados; también se analizaron otros modelos autorregresivos de mayor orden pero el resultado no fue satisfactorio, se concluye por lo tanto, que la serie de lluvia bajo las condiciones impuestas, puede ser modelada ARIMA (1,0,0).

7. Para la serie de caudales se repiten los pasos anteriores y los resultados son similares. (Anexos 6, 7,8 y 9)
8. A la serie ARIMA (1,0,0) obtenida en el paso anterior se le incluye como “regresor” el modelo ajustado obtenido de la lluvia y los resultados son obtenidos en el (Anexo10). Se puede apreciar que el regresor es significativo.
9. Se plotean los ACF y PACF los cuales demuestran que los residuales no están autocorrelacionados.(Anexos 11 y 12)
- 10.El ploteo conjunto de la serie original de caudales, el modelo ARIMA(1,0,0) de caudales y el modelo ARIMA(1,0,0) de caudales considerando como regresor la serie modelada ARIMA(1,0,0) de lluvia (Anexo 13), muestran que esta última se ajusta sensiblemente mejor, sin embargo de estos resultados podemos inferir que el modelo presenta algunas dificultades con los puntos o valores extremos por lo que podemos pasar a partir de este, hacer el análisis de intervención, lo cual es explicado porque en la serie analizada se encuentran valores producidos por eventos extremos y los cuales suponemos que fueron observados con fiabilidad, y para ello se puede utilizar la función “delta” o “pulso unitario” ya definido en el epígrafe 3.2, pero como en nuestro caso el interés es trabajar con valores medios consideramos obviar este análisis.
11. Se pasa ahora a la fase de validación aplicando el modelo obtenido a los valores reservados, lo cual al ser comparado con el ajuste de la serie original se demuestra que el modelo propuesto pronostica aceptablemente los valores reservados hasta el último dato de la serie. Es de destacar que la diferencia aparente con el análisis de los residuales de la regresión es que no necesitamos probar que los mismos se distribuyen normalmente ni sean independientes, ni siquiera que

Capítulo 3: Análisis de los resultados de la investigación.

tengan la misma distribución para cada instante de tiempo. Sin embargo, la efectividad de los pronósticos depende teóricamente en muchos casos que los residuales sean independientes y la elaboración de los intervalos de confianza, es más fácil si los residuales se distribuyen normalmente (en este caso la condición de ser independientes y no correlacionados es equivalente)

12. A partir del modelo final obtenido, que puede ser planteado de esta forma:

$(1 - 0,249 \cdot B) \cdot Y_t = (1,246 - 0,189 \cdot B) \cdot X_t + N_t$ Donde N_t es el ruido del sistema, y aplicando las ecuaciones 16 y 18 se llega a la conclusión que los efectos de las sequías en las precipitaciones tardarán como promedio 8 días en notarse en los valores promedios de los caudales.

13. Por último buscamos los estadísticos finales de los errores.

Error Variable		ERR_7
Observed Variable		ZCAUDAL
N of Cases	Use	324
Deg Freedom	Use	322
Mean Error	Use	0,0004
Mean Abs Error	Use	0,6156
Mean Pct Error	Use	247,9947
Mean Abs Pct Err	Use	277,0237
SSE	Use	272,0253
MSE	Use	0,8448
RMS	Use	0,9191
Durbin-Watson	Use	1,9972

Para una mayor comprensión de estos resultados se explicarán a continuación que representan estos estadísticos.

La interpretación de los primeros parámetros es obvia. Observe que el error medio es bastante cercano a cero. El error medio absoluto es el valor medio del error en valor absoluto. Los errores en por ciento se calculan utilizando como denominador los valores observados de la serie y luego se promedian incluyendo signos (**Mean Pct Error**) y en valor absoluto (**Mean Abs Pct Error**) Para que estos dos parámetros que se calculan es imprescindible especificar

Capítulo 3: Análisis de los resultados de la investigación.

una serie “denominador” en el subcomando OBS. (En este ejemplo utilizamos la propia serie de escurrimiento)

SSE denota la suma de cuadrados de los errores de las diferencias entre los valores observados de las series y los valores predichos por el modelo.

MSE (Mean Square Error) es la media de la serie **SSE**, esto es, la **SSE** dividida por los grados de libertad del error.

RMS (Root Mean Square Error) es la raíz cuadrada de **MSE**.

El test de **Durbin-Watson**, verifica la hipótesis nula de que los residuales de la regresión son independientes contra la hipótesis alternativa de que estos residuales siguen un proceso autorregresivo de primer orden.

3.2. Resultados obtenidos a partir de los datos propuestos.

A continuación en las tabla 1 y 2 se muestran dichos datos.

Tabla 1: Escurrimiento mensual Estación Sopimpa (m³/s).

M e s e s												
Año	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1970	2,81	5,14	2,84	1,01	0,65	7,38	5,20	13,30	26,40	12,20	5,17	2,24
1971	1,24	0,92	0,53	0,66	4,69	8,37	11,10	15,90	13,30	28,10	27,10	7,60
1972	2,78	2,25	3,66	1,44	7,11	43,60	17,10	9,98	11,50	24,00	7,64	13,70
1973	4,91	2,33	1,84	0,68	2,89	4,66	12,90	24,10	26,00	15,70	4,24	2,73
1974	1,45	1,00	0,70	1,42	3,19	6,37	4,21	2,86	3,76	31,80	4,75	2,10
1975	1,34	0,95	0,60	0,16	1,19	6,52	6,77	7,36	17,90	6,24	2,82	1,34
1976	1,14	0,73	0,73	1,13	7,87	31,60	8,89	7,28	17,00	19,70	5,60	2,58
1977	1,54	0,95	0,28	3,68	41,10	36,50	9,49	10,90	13,90	10,00	6,50	3,41
1978	1,68	3,33	4,09	1,74	15,70	31,10	17,80	12,40	11,50	93,70	12,80	3,86
1979	2,28	2,54	1,37	4,05	5,66	6,58	6,84	9,27	37,60	17,60	6,71	2,65

Capítulo 3: Análisis de los resultados de la investigación.

Tabla 1 (Conclusión)

1980	1,47	1,23	0,81	0,92	5,08	18,30	14,70	17,30	24,50	20,70	18,60	4,64
1981	1,92	1,96	0,96	0,34	0,56	8,69	8,41	47,40	29,20	15,90	7,37	2,65
1982	1,71	1,20	1,02	0,56	1,23	13,10	11,20	7,58	14,50	24,30	6,55	2,14
1983	9,13	21,90	14,50	7,26	3,08	6,69	4,53	8,35	19,60	15,20	12,50	4,73
1984	2,83	2,12	4,85	1,47	9,81	14,40	22,40	8,26	22,80	7,60	5,42	1,73
1985	1,07	1,09	0,88	1,66	8,46	8,11	8,40	12,59	13,71	18,29	27,30	7,25
1986	3,11	1,75	1,24	0,91	1,56	30,18	8,70	9,98	6,34	4,86	2,50	1,72
1987	1,11	0,75	8,30	1,26	1,93	5,89	5,35	4,54	15,40	50,40	12,20	3,15
1988	1,41	0,79	0,59	0,44	22,70	15,10	25,70	9,54	15,90	17,00	4,08	1,93
1989	1,38	1,22	0,89	10,90	5,39	2,19	7,17	11,60	10,60	15,20	2,66	5,45
1990	1,51	0,94	1,35	1,36	32,60	9,19	13,10	13,50	12,20	11,30	8,90	2,96
1991	2,26	1,07	0,87	1,45	17,70	23,00	12,00	10,40	10,30	25,00	7,85	3,65
1992	2,84	1,86	1,24	1,82	2,31	21,60	9,92	13,70	16,10	9,68	11,90	3,31
1993	2,30	1,48	2,08	2,46	12,00	18,60	8,16	4,98	10,40	33,50	8,01	4,98
1994	2,51	1,27	1,12	4,54	9,52	5,86	3,38	12,00	16,30	12,40	16,10	3,63
1995	1,98	1,38	1,70	1,21	4,34	29,40	9,24	27,20	9,82	43,00	6,41	3,76
1996	1,96	1,13	2,43	1,06	30,40	38,40	6,97	11,60	7,98	60,50	19,10	5,99

Capítulo 3: Análisis de los resultados de la investigación.

Tabla 2: Lluvia mensual Pluviómetro 752 (mm).

M e s e s												
Año	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1970	86,3	110,4	108,7	0,0	252,2	311,0	92,6	318,5	320,2	62,8	86,9	39,0
1971	0,0	0,0	8,4	0,0	286,2	162,8	220,7	216,1	187,3	314,3	148,9	38,9
1972	25,4	73,6	97,9	101,2	196,8	233,0	386,6	80,5	169,3	158,8	134,1	94,7
1973	66,2	23,4	15,4	17,9	59,4	250,5	202,7	412,4	246,1	229,8	48,0	91,7
1974	0,0	0,0	4,8	107,8	128,1	187,7	70,4	122,2	151,0	146,1	48,7	58,6
1975	6,0	20,4	36,2	15,1	102,7	259,4	118,7	227,4	273,1	155,9	26,2	19,0
1976	10,3	37,9	2,8	130,5	278,5	319,3	100,2	166,1	169,1	258,3	44,4	48,0
1977	17,5	7,2	28,5	226,8	439,5	121,1	289,0	243,8	266,9	201,3	18,1	59,3
1978	59,1	115,5	105,3	128,2	140,2	335,5	243,9	197,4	102,2	464,4	52,7	28,0
1979	98,5	41,5	152,5	484,0	172,9	196,8	132,0	229,0	321,4	165,4	103,0	39,9
1980	33,1	59,1	0,0	98,7	188,9	228,7	272,2	258,4	251,0	208,3	260,5	27,0
1981	13,7	92,8	94,4	38,5	138,0	261,5	259,7	455,3	356,6	128,2	9,2	28,6
1982	68,6	89,6	38,5	31,6	122,6	377,8	243,2	79,6	184,8	217,5	72,4	12,7
1983	285,1	269,3	75,3	85,8	52,7	250,0	110,8	228,4	259,0	79,9	139,5	123,8
1984	76,9	96,6	131,5	55,6	209,3	280,3	198,9	144,2	325,9	80,0	68,0	17,9
1985	41,3	29,9	49,1	81,9	366,6	122,7	264,2	395,4	273,2	210,6	243,7	61,3
1986	12,2	12,0	17,9	10,7	172,6	719,8	265,8	307,5	140,3	133,3	47,9	65,1
1987	70,0	27,9	84,4	34,3	146,6	232,9	187,6	82,2	152,4	359,7	93,1	67,3
1988	7,4	19,3	43,8	38,2	371,3	1257,2	281,4	240,7	345,4	71,3	192,0	42,6

Capítulo 3: Análisis de los resultados de la investigación.

Tabla 2 (Conclusión)

1989	25,9	118,6	42,7	39,7	104,6	235,4	125,6	170,1	238,4	172,2	27,1	124,1
1990	45,4	55,4	116,7	202,9	877,4	175,4	148,6	228,2	116,4	171,4	95,4	29,0

Conclusiones

1. La experiencia internacional y los resultados de la investigación desarrollada en el marco de este trabajo, confirman que la metodología de Box-Jenkins aplicadas a series hidrológicas tienen un gran interés científico, tecnológico y práctico para su aplicación en los trabajos de pronósticos y generación de series.
2. Se desarrolla y aplica la metodología usando el paquete estadístico SPSS.
3. Se obtuvo un modelo de función de transferencia que describe la relación entre la lluvia y el escurrimiento y puede ser planteado de la siguiente forma:
$$(1 - 0,249 \cdot B) \cdot Y_t = (1,246 - 0,189 \cdot B) \cdot X_t + N_t$$
4. La cuenca en el río Agabama, enmarcada a partir del cierre en la estación hidrométrica Sopimpa, presenta un retardo promedio de 8 días para notarse la influencia de una sequía meteorológica en una hidrológica. Esto nos indica la gran vulnerabilidad y rápida respuesta que presenta la cuenca cuando existen variaciones en el régimen de precipitaciones.
5. La serie de escurrimientos mensuales de la estación Sopimpa se ajusta perfectamente a un modelo ARIMA (1,0, 0) con la influencia del regresor de la serie ajustada por la función de transferencia (1, 0,0) de lluvias.
6. El modelo, como se puede observar en el Anexo 13 , pronostica bien los datos reservados.
7. Los estadísticos del error se comportan estables en la fase de cálculo y pronóstico.

Recomendaciones

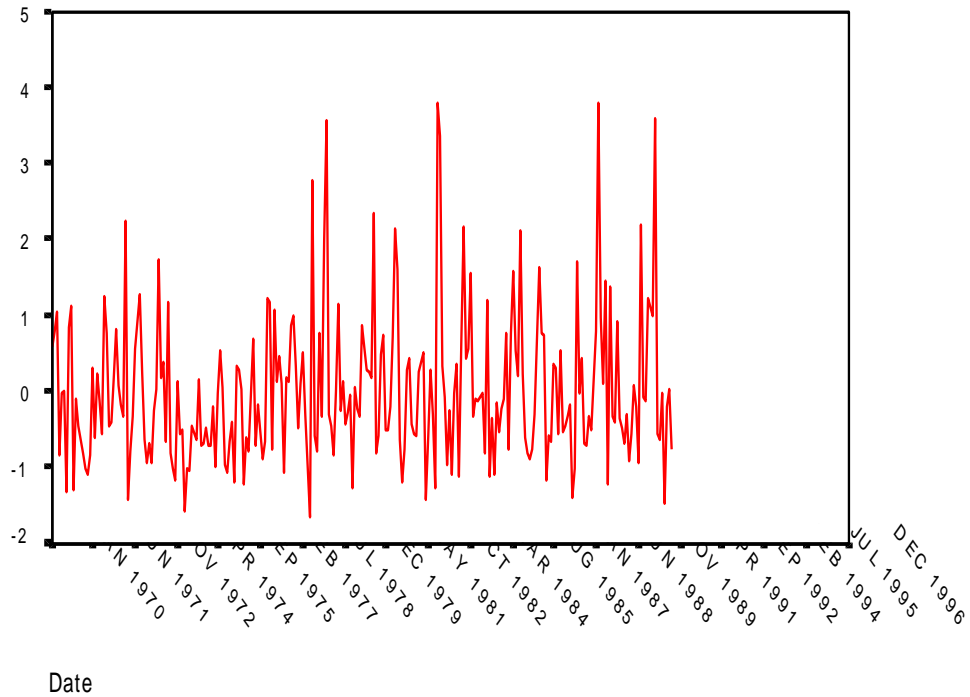
1. La aplicación de esta metodología puede emplearse en los trabajos de pronósticos y generación de series.
2. Se recomienda hacer extensivo el uso de la metodología de Box-Jenkins para aplicarla a series hidrológicas con dependencia seriales.
3. El software SPSS se puede usar para hacer cualquier cálculo estadístico y en particular la modelación ARIMA.
4. Lograr la regionalización de estos modelos, a partir de criterios estrictamente estadísticos, con el fin de poder hacer análisis a toda una región o provincia.
5. Deberá confirmarse las causas que hacen que los valores de los caudales, en el cierre en estudio, tengan un retardo de 8 días como promedio en notarse una sequía en el régimen de lluvias.

Bibliografía

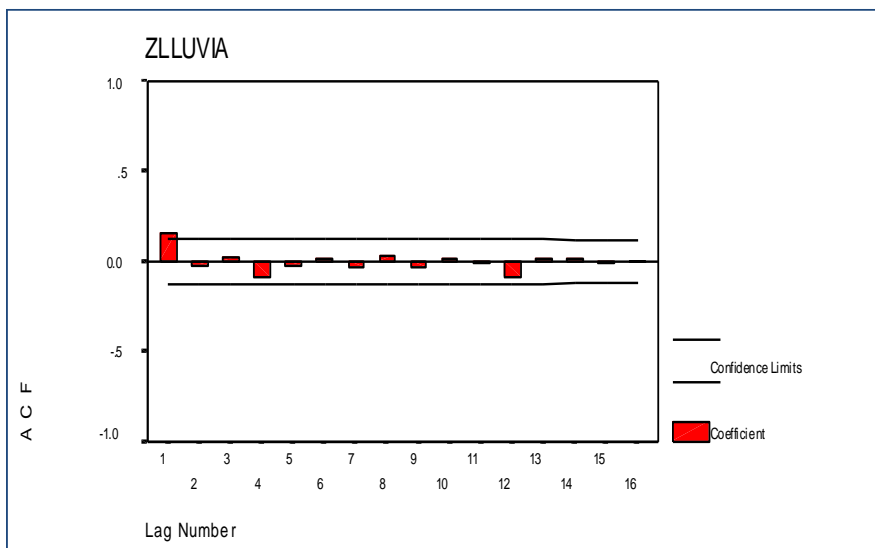
1. Arellano Acosta, D. M. (2002). El Enfoque Ecosistémico para el Desarrollo Sostenible Mediante la Promoción de Sinergias en la Escala Nacional.
2. Bekkali, N. (2014). Modelos ARIMA y Función de Transferencia para Previsiones Temporales.
3. Box, G. E. P. a. J., G. M. (1976). Time Series Analysis Forecasting and Control.
4. Fernández, H. W. (2003). Sequías Meteorológicas en el Cono Sur de América. Asociaciones con El Niño Oscilación del Sur; Tesis Doctoral 2001.
5. INSMET. (2000). Informe Cambio Climático.
6. Jacobs, J. (1991). The cost-effectiveness of misoprostol. *JAMA*, 265(5), 594-594. doi: 10.1001/jama.1991.03460050047012
7. Lapinel Pedroso, B. e. a. (1998). Sequía, Aridez y Desertificación,.
8. Palmer, W. C. (1965). Meteorological Drought.
9. Peppers, B. a. (1982).
10. Provincial, C. d. C. (2002). Informe Cuenca Zaza (2002)
11. Stanley Jere, E. M. (2016). Modelling Epidemiological Data Using Box-Jenkins Procedure. *Open Journal of Statistics*, 6, 295-302
12. Wilhite, D. A. (1997). Improving Drought Management in the West: The Role of Mitigation and Preparedness.

Anexos.

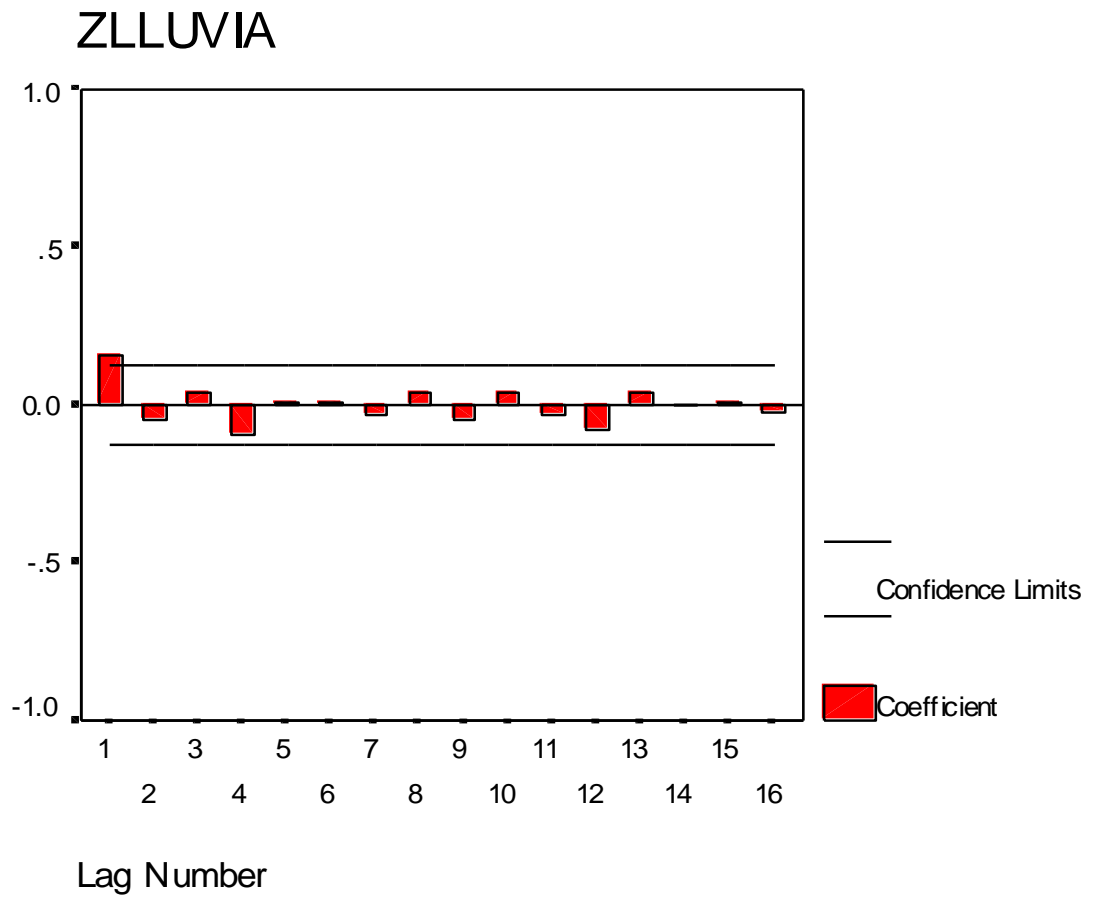
Anexo 1. Gráfico de Ploteo de los valores de las precipitaciones.



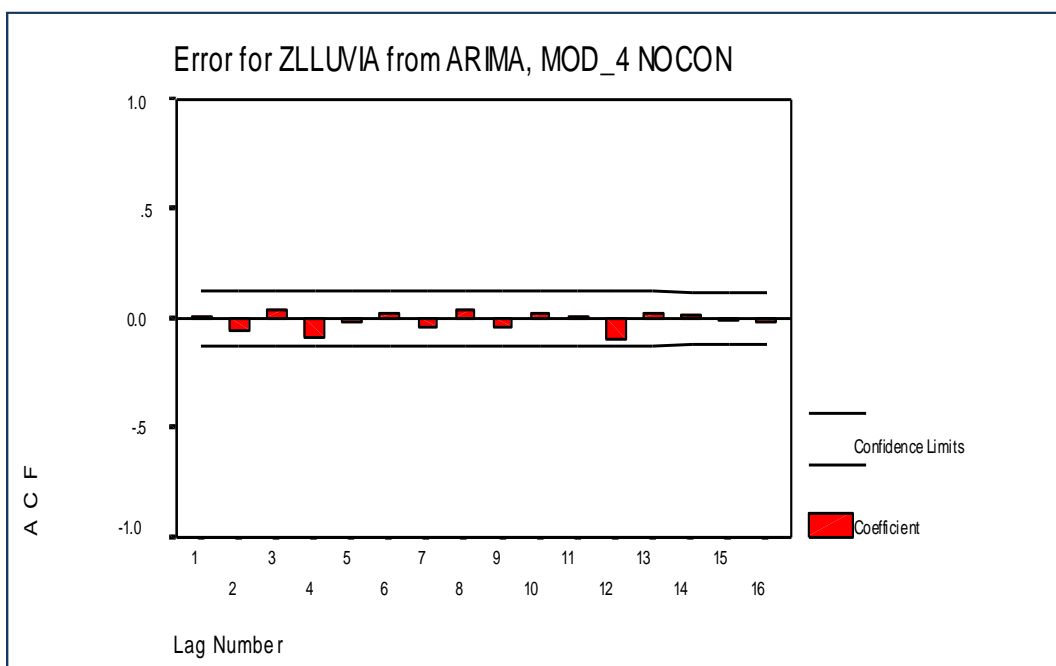
Anexo 2. Función de autocorrelación (fac) de la lluvia.



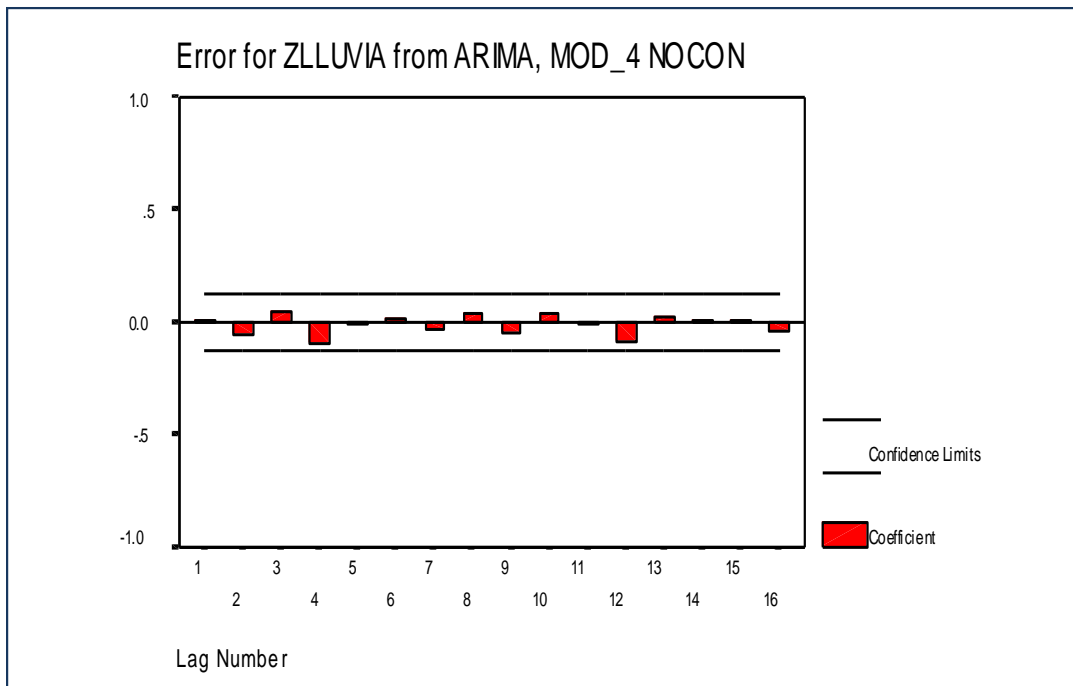
Anexo 3. Función de autocorrelación parcial (fap) de la lluvia.



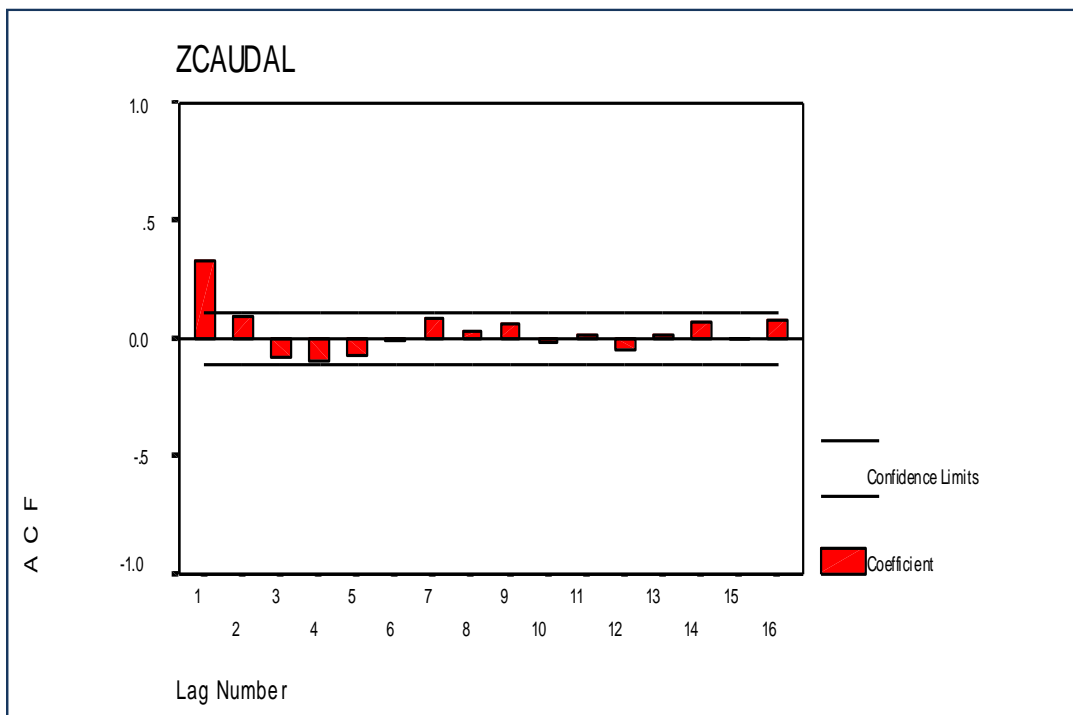
Anexo 4. Función de autocorrelación (fac) de los errores (lluvia).



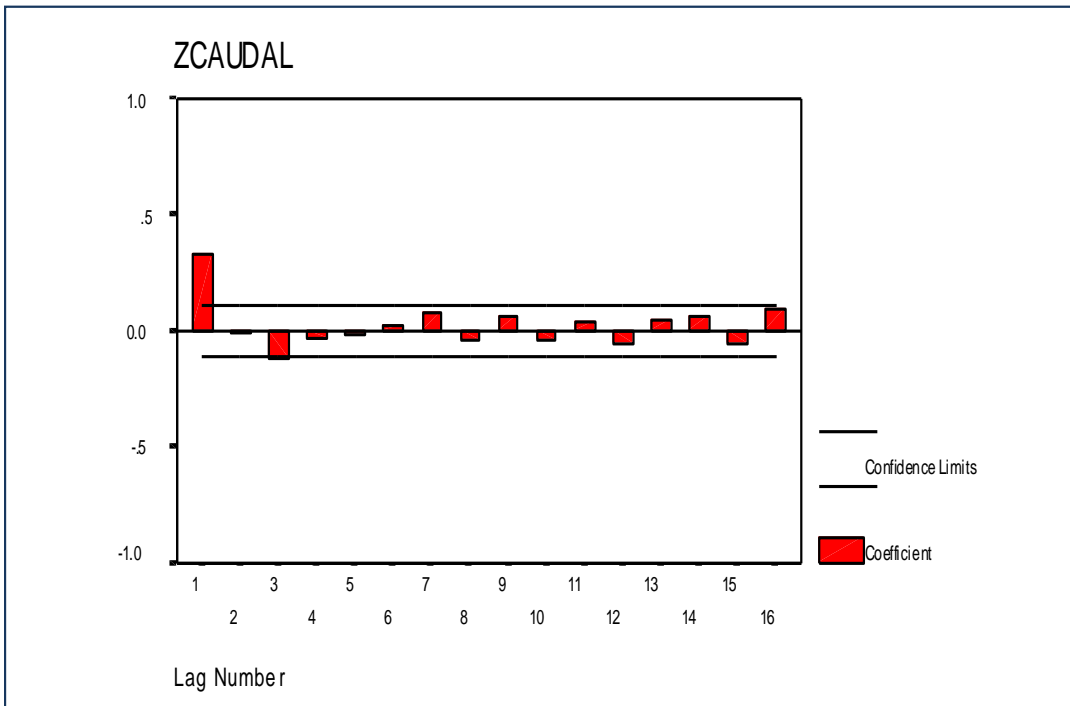
Anexo 5. Función de autocorrelación parcial (fap) de los errores (lluvia).



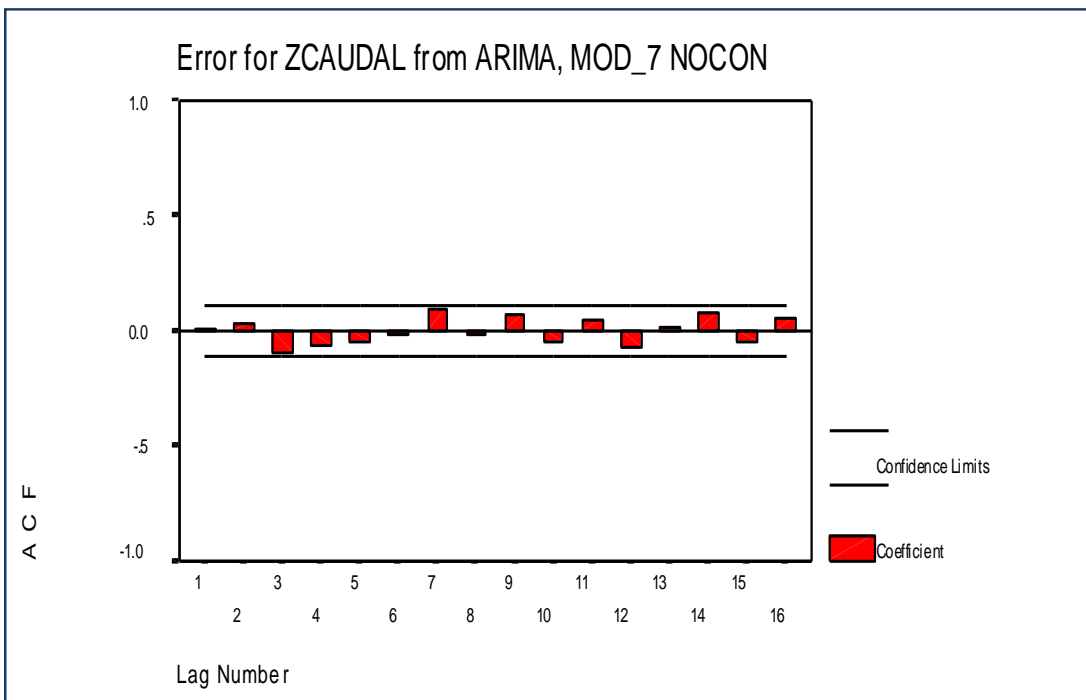
Anexo 6. Función de autocorrelación (fac) del escurrimiento.



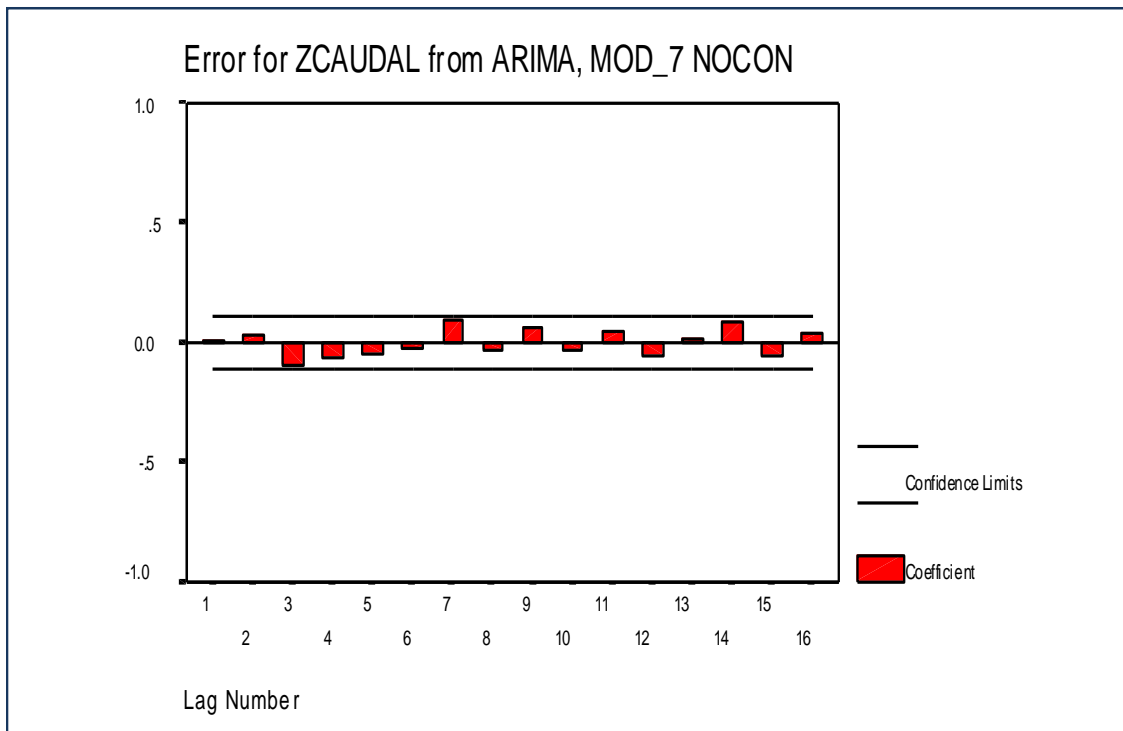
Anexo 7. Función de autocorrelación parcial (fap) del escurrimiento.



Anexo 8. Función de autocorrelación (fac) de los errores (escurrimiento).



Anexo 9. Función de autocorrelación parcial (fap) de los errores (escurrimiento).

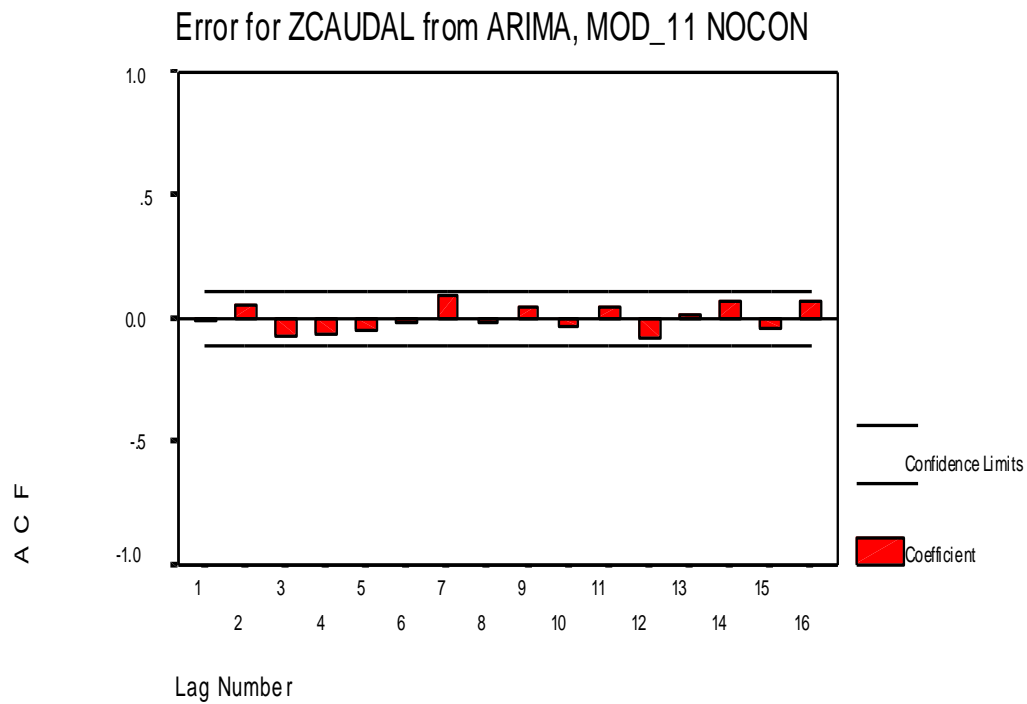


Anexo 10. Resultados del modelo del escurrimiento incluyendo al modelo arima de la lluvia como regresor.

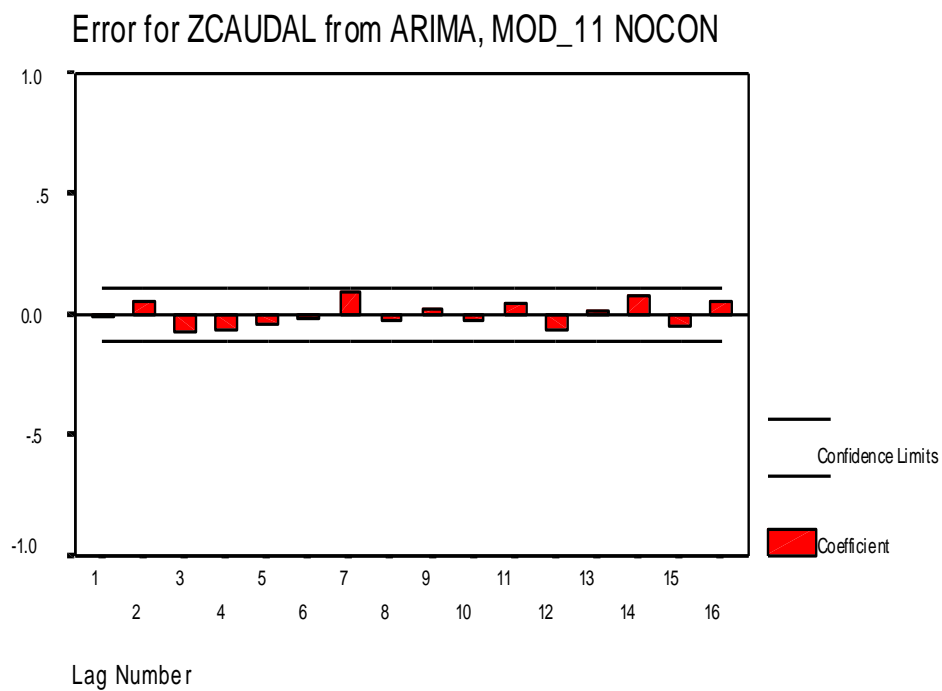
```

◆          Variables in the Model:
◆          B          SEB          T-RATIO  APPROX.
◆  PROB.
◆  AR1      .2442218    .06319726    3.8644362
◆          .00013466
◆  FIT#1    1.1455485    .38468391    2.9778956
◆          .00312261
◆  Covariance Matrix:
◆          AR1
◆  AR1      .00399389
◆  Correlation Matrix:
◆          AR1
◆  AR1      1.0000000
◆  Regressor Covariance Matrix:          Regressor
◆  Correlation Matrix:
◆          FIT#1
◆  FIT#1
◆  FIT#1    .14798171          FIT#1
◆          1.0000000
    
```

Anexo 11. Función de autocorrelación (fac) de los errores (escurrimiento teniendo en cuenta la lluvia como regresor).



Anexo 12. Función de autocorrelación parcial (fap) de los errores (escurrimiento teniendo en cuenta la lluvia como regresor).



Anexo 13. Gráfico del ploteo conjunto de la serie original y el modelo encontrado para el escurrimiento.

