

CONTENIDO

RESUMEN	V
RESUM.....	VI
ABSTRACT.....	VII
CONTENIDO	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	5
1.2. PUBLICACIONES.....	5
1.2.1. EVALUACIÓN DE PRONÓSTICOS DE SEQUÍAS BASADOS EN CADENAS MARKOV EN UNA CUENCA ANDINA REGULADA USANDO LOS PUNTAJES DE HABILIDAD RPS Y GMSS..	6
1.2.2. PRONÓSTICO PROBABILÍSTICO DE EVENTOS DE SEQUÍAS USANDO MODELOS BASADOS EN CADENAS DE MARKOV Y REDES BAYESIANAS: UN CASO DE ESTUDIO DE UNA CUENCA ANDINA REGULADA	7
1.2.3. ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE FALLO EN EL SUMINISTRO DE AGUA COMO AYUDA A LA PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS	9
1.2.4. ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RIO TOMBAMBA EN ECUADOR, MEDIANTE MODELOS ESTOCÁSTICOS Y DE GESTIÓN	10
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS	11
2. CASO DE ESTUDIO	12
3. PROPUESTA DE MEJORA DE LA METODOLOGÍA GENERAL DE EVALUACIÓN DEL RIESGO DE FALLO DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS	15
3.1. ÍNDICE DE SEQUÍA	18
3.2. PRONÓSTICO PROBABILÍSTICO DE SEQUÍA	19
3.2.1. CADENAS DE MARKOV	19
3.2.2. REDES BAYESIANAS	21
3.2.2.1 Copulas	22
3.2.2.2. Ajuste de copulas	24
3.2.3. VERIFICACIÓN DEL PRONÓSTICO	25
3.3. MODELO ESTOCÁSTICO PARA LA GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS HIDROLÓGICAS	26
3.4. INTRODUCCIÓN DE LOS PRONÓSTICOS DE SEQUÍA EN LA GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS HIDROLÓGICAS	27
3.5. MODELO DE SIMULACIÓN MÚLTIPLE PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE FALLO	28
4. RESULTADOS	30
4.1. CÁLCULO DEL DI	30
4.2. PRONÓSTICOS PROBABILÍSTICOS DE SEQUÍA	31
4.3. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE FALLO	35
5. CONCLUSIONES	43
5.1. FUTURAS INVESTIGACIONES.....	44
REFERENCIAS.....	45

ANEXO 1: EVALUATION OF MARKOV CHAIN BASED DROUGHT FORECASTS IN AN ANDEAN REGULATED RIVER BASIN USING THE SKILL SCORES RPS AND GMSS.....	55
ANEXO 2: PROBABILISTIC FORECASTING OF DROUGHT EVENTS USING MARKOV CHAIN AND BAYESIAN NETWORK BASED MODELS. CASE STUDY: AN ANDEAN REGULATED RIVER BASIN.....	85
ANEXO 3: ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE FALLO EN EL SUMINISTRO DE AGUA COMO AYUDA A LA PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS	112
ANEXO 4: ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO TOMEBAMBA EN ECUADOR, MEDIANTE MODELOS ESTOCÁSTICOS Y DE GESTIÓN	127

FIGURAS

Figura 1. Localización de la cuenca del río Machángara.....	13
Figura 2. Promedio mensual de las series de tiempo de lluvia y volumen de agua de entrada a los embalses (1971 – 2010) de las microcuencas de los ríos (a) Machángara Alto y (b) Chulco	14
Figura 3. Esquema del sistema de recursos hídricos de la cuenca del río Machángara.....	15
Figura 4. Metodología de evaluación del riesgo de fallo en sistemas de recursos hídricos ..	16
Figura 5. Marco metodológico integral de evaluación del riesgo de fallo en sistemas de recursos hídricos	17
Figura 6. Series de tiempo del DI (1971 – 2010) de las microcuencas de los ríos (a) Machángara Alto y (b) Chulco	31
Figura 7. Probabilidad de fallo de las demandas de agua para: (a) ciudad de Cuenca, (b) canal de riego Machángara y (c) canal de riego La Dolorosa.....	39
Figura 8. DSI_G del sistema de recursos hídricos de la cuenca del río Machángara para un escenario	40
Figura 9. DSI_G del sistema de recursos hídricos de la cuenca del río Machángara para un escenario con diferentes volúmenes iniciales de almacenamiento de los embalses de Chanlud y El Labrado aplicando el marco metodológico integral de la Figura 5	41
Figura 10. $DSIG$ del sistema de recursos hídricos de la cuenca del río Machángara para un escenario con diferentes volúmenes iniciales de almacenamiento de los embalses de Chanlud y El Labrado aplicando la metodología de la Figura 4	42

TABLAS

Tabla 1. Autovalores y varianza explicada del PC1 de las microcuencas de los ríos (a) Machángara Alto y (b) Chulco	30
Tabla 2. Valores del RPSS de la verificación mensual de los pronósticos de sequía.....	32
Tabla 3. Pronósticos probabilísticos de sequía de la microcuenca del río Machángara Alto .	34
Tabla 4. Pronósticos probabilísticos de sequía de la microcuenca del río Chulco	34
Tabla 5. Matrices de parámetros ϕ y matrices de varianza-covarianza G del modelo MPAR1 de las dos series de aportaciones de agua normalizadas y estandarizadas de los dos embalses Chanlud y El Labrado	36
Tabla 6. Umbrales de las dos series históricas de aportaciones de agua normalizadas y estandarizadas de los dos embalses Chanlud y El Labrado	36

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas proveen múltiples servicios ambientales y si son manejados propiamente pueden contribuir significativamente al desarrollo socioeconómico de una región. Uno de los servicios ambientales más estratégicos en cuencas de montaña son los servicios hidrológicos, los mismos que proveen grandes beneficios a la población. Condiciones hidroclimáticas de escasez de agua tal como las épocas de sequía pueden afectar o incluso interrumpir completamente estos servicios causando severos impactos sociales, económicos y ecológicos en una cuenca, dependiendo de la vulnerabilidad de los habitantes de la zona y su capacidad para predecir, adaptarse o responder ante estas condiciones de déficit del recurso hídrico (Brown et al. 2010). Por lo tanto estas épocas se han convertido en un verdadero desafío para los gestores en una cuenca (Li et al. 2009), con respecto a la asignación del agua para los diferentes usuarios y el respeto por los caudales ecológicos, esto sumado al incontrolable crecimiento poblacional, aumento del consumo de agua y la disminución de la oferta del agua por efectos del cambio climático y cambio del uso del suelo, están direccionando a complejas situaciones donde no son fáciles las decisiones (Huang et al. 2010). Asimismo todavía existe una brecha entre la ciencia y los gestores de agua (Steinemann 2006), estos últimos se muestran renuentes a aceptar innovaciones científicas que no se convierten en medidas aplicables en la toma de decisiones (Liu et al. 2008a; Viviroli et al. 2011). Una razón para que suceda esta situación es que las personas encargadas de tomar decisiones son escépticos acerca del reemplazo de su juicio por estrategias prescritas de solución (Labadie and Asce 2004), más aún en cuencas de montaña donde se tiene experiencia de gestión de recursos hídricos en condiciones normales, pero poca experiencia en escenarios de escasez de agua. No obstante, algunos autores sostienen que los efectos del cambio climático pueden traer largos periodos de sequía en el futuro especialmente en cuencas de montaña (Buytaert et al. 2006b), afectando a los residentes de las tierras bajas que se benefician de los bienes y servicios de estos ecosistemas (Beniston 2003) y elevaría la conciencia y preocupación sobre la vulnerabilidad de los sistemas hídricos por la potencial disminución de la disponibilidad de agua (Celleri et al. 2007). El desarrollo de metodologías y herramientas que ayuden para una gestión de sistemas de recursos hídricos en épocas de sequía ofrecen un buen soporte para tomar decisiones con respecto a la asignación de agua que satisfaga las demandas consuntivas, no consuntivas y ambientales. Para este fin la caracterización y el pronóstico de eventos de sequía podrían ayudar

considerablemente para que los gestores de agua tomen las decisiones más apropiadas para un suministro de agua confiable y adverso al riesgo de fallo (Avilés et al. 2016).

Actualmente la comunidad de gestores utilizan ampliamente información en forma de índices (Shukla and Wood 2008) para mejorar la capacidad de analizar, evaluar y predecir eventos de sequía (Svoboda et al. 2004). Para este último aspecto existen varios índices, tales como: el índice estandarizado de precipitación (SPI) (McKee et al. 1993; Mishra and Desai 2005; Mishra et al. 2007; Paulo and Pereira 2007; Cancelliere et al. 2007; Moreira et al. 2008; Nalbantis and Tsakiris 2009; Khalili et al. 2011), el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI) (Vicente-Serrano et al. 2010; Banimahd and Khalili 2013; Vicente-Serrano et al. 2015; Vicente-Serrano et al. 2016), el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) (Palmer 1965; Lohani and Loganathan 1997), el índice de caudales de sequía (SDI) (Nalbantis and Tsakiris 2009), el índice de reconocimiento de sequía (RDI) (Tsakiris and Vangelis 2005; Khalili et al. 2011; Banimahd and Khalili 2013), el índice agregado de sequía (ADI) (Keyantash and Dracup 2004; Barua et al. 2011; Barua et al. 2012), entre otros. Diferentes situaciones hidroclimáticas en una cuenca condicionan la utilización de algunos índices, esto debido a la información requerida y la especificidad del cálculo para desarrollar estos indicadores (Mishra and Singh 2010; Barua et al. 2012). De hecho, la caracterización de sequías requiere indicadores que sean generalmente aplicables, pero también específicos en una región para capturar el tipo de sequías con la información disponible (Staudinger et al. 2014), y captando el resultado de la sucesión de varios eventos de escasez de agua en diferentes periodos de tiempo (Kao and Govindaraju 2010). Por lo tanto, existe la necesidad de evaluar los estados de sequía mediante la información disponible de variables relacionadas con el agua en diferentes ventanas de tiempo (Avilés et al. 2016). Es por esto que la presente tesis utiliza el índice de sequía (DI) desarrollado por Avilés et al. (2015), el cual tiene la ventaja de agrupar información hidrometeorológica con diferentes intervalos de tiempo en un solo índice que identifique la frecuencia y severidad de los diferentes eventos de sequía.

Por otro lado, pronósticos confiables y oportunos de eventos de sequías juegan un rol importante en la toma de decisiones para disminuir los impactos de este fenómeno en sistemas de recursos hídricos (Madadgar and Moradkhani 2013; Madadgar and Moradkhani 2014). Varias metodologías de pronósticos de sequías se han desarrollado en los últimos años, análisis de regresión (Kumar and Panu 1997; Liu and Juárez 2001; Leilah and Al-Khateeb 2005a), modelos de series de tiempo (Mishra and Desai 2005; Modarres 2007; Fernández et al. 2009; Durdu 2010; Han et al. 2010) y redes neuronales (Mishra and Desai

2006; Mishra et al. 2007; Morid et al. 2007) son algunos de estos enfoques. Estos modelos proveen una predicción de los estados de sequía sin considerar la incertidumbre asociada con el pronóstico (Hwang and Carbone 2009). Este aspecto puede ser manejado con pronósticos probabilísticos, los cuales ofrecen un pronóstico asociado con su incertidumbre en una forma cuantitativa (Murphy 1977). Existen varios autores que han desarrollado modelos de pronóstico probabilístico de sequías (Lohani and Loganathan 1997; Chung and Salas 2000; Anderson et al. 2000; Paulo and Pereira 2007; Cancelliere et al. 2007; Hwang and Carbone 2009; Nalbantis and Tsakiris 2009; Araghinejad 2010; Madadgar and Moradkhani 2013; Yuan et al. 2013; Madadgar and Moradkhani 2014; AghaKouchak 2014; Avilés et al. 2015; Avilés et al. 2016), pero pocos pronostican probabilísticamente los estados futuros de sequía dada la información de los eventos previos, es decir mediante una probabilidad condicional, tal como los modelos más comunes basados en cadenas de Markov (MC) (Lohani and Loganathan 1997; Paulo and Pereira 2007; Cancelliere et al. 2007; Nalbantis and Tsakiris 2009; Avilés et al. 2015; Avilés et al. 2016) y los modelos más sofisticados basados en redes bayesianas (BN) (Madadgar and Moradkhani 2013; Madadgar and Moradkhani 2014; Avilés et al. 2016). Estos dos enfoques han sido comparados en un estudio reciente de Avilés et al. (2016), en donde se concluye que los modelos basados en MC demostraron ser igualmente eficientes para pronosticar probabilísticamente eventos de sequías que los modelos basados en BN, además estos autores resaltan el mejor desempeño del modelo MC de primer orden (MCFO) para pronosticar periodos húmedos y secos con respecto al resto de modelos que fueron evaluados. Por esta razón esta tesis utiliza el modelo MCFO para pronosticar probabilísticamente eventos de sequía, los cuales tienen la ventaja de ser los más utilizados en procesos estocásticos de series de tiempo discretas, además su método de cálculo es simple y requiere menos costo computacional.

La caracterización y el pronóstico de eventos de sequía podrían mejorar la gestión y operación de sistemas hídricos, sin embargo una evaluación del riesgo de fallo en el suministro de agua para las diferentes demandas podría complementar la información de soporte para la toma de decisiones orientadas a minimizar o mitigar los efectos de la sequía en sistemas de recursos hídricos en cuencas reguladas (Haro et al. 2014). El riesgo de fallo de un sistema depende de los caudales en los ríos, las reservas disponibles y los valores de consumo de las demandas en una cuenca, los cuales pueden ser variables en el tiempo por fluctuaciones de las demandas y el cambio climático (Rossi et al. 2012). Indicadores que cuantifiquen el riesgo de fallo y la satisfacción de un conjunto de demandas podrían ser una

buena opción para una gestión de sistemas de recursos hídricos a corto y mediano plazo con escenarios de escasez de agua. Para este fin los modelos de simulación son quizás los métodos más ampliamente utilizados para analizar y evaluar alternativas de gestión del agua con diferentes escenarios, dada su simplicidad matemática y su fácil comprensión por parte de los gestores del agua (Cancelliere et al. 2009). Estos modelos generalmente se basan en el principio de conservación de la masa del sistema, siguen un enfoque nodo-arco para describir la red del sistema, donde los nodos pueden representar las demandas (usos consuntivos y no consuntivos), los embalses, etc., y los arcos pueden representar ríos, canales, etc. Existen varias herramientas de este tipo, sin embargo pocos modelos evalúan el riesgo de fallo de un sistema y producen índices de una manera comprensible para identificar políticas de operación y gestión, tal como SIMGES (Andreu et al. 2007) y SIMRISK (Sánchez et al. 2001) del sistema de soporte de decisiones AQUATOOL (Andreu et al. 1996). El proceso de simulación en SIMGES consiste en redes de flujo conservativas que se optimizan mensualmente mediante programación lineal con el algoritmo Out-of-Kilter (Cattrysse 1991; Andreu 1993), para cumplir una función objetivo (satisfacción de las demandas, operación de embalses, etc.) sujeta a las restricciones de conservación de masa (principio de continuidad) y los límites físicos de transporte de flujo en conducciones (ríos, canales, etc.) y capacidades de embalses (reservas) y otros elementos si los hubiere. Este proceso se lo puede realizar múltiples veces utilizando SIMRISK, el cual está basado en la simulación Montecarlo y evalúa el riesgo de insatisfacción de las demandas en diferentes niveles mediante información probabilística que permite analizar el número de fallos en el suministro a las demandas y su severidad, y mediante esta información los tomadores de decisiones podrían formular medidas de prevención y/o mitigación para hacer frente al riesgo y maximizar el rendimiento del sistema (Cancelliere et al. 2009). La simulación Montecarlo consiste en la generación de múltiples escenarios probables mediante modelos de generación sintética dada la naturaleza estocástica de las entradas hidrológicas a un sistema de recursos hídricos, y de acuerdo a objetivos y criterios decididos con anticipación realizar la gestión del sistema a corto o mediano plazo mediante reglas, medidas y procedimientos que minimicen el riesgo de desabastecimiento de agua (Cancelliere et al. 2009; Haro et al. 2014).

La introducción de los pronósticos probabilísticos de sequía ayuda a limitar y direccionar las series de los posibles escenarios estocásticos mediante la generación sintética según la información de los diferentes estados de sequías predichos. Este aspecto podría mejorar la evaluación del riesgo de fallo en los sistemas hídricos y por lo tanto constituye una

herramienta integral importante para los gestores del agua con el fin de disminuir la incertidumbre en la toma de decisiones y perfeccionar las medidas orientadas a prevenir o mitigar las consecuencias cuando existe escasez de agua.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo de esta tesis es desarrollar un marco metodológico integral de evaluación del riesgo de fallo en el suministro de agua que incorpore pronósticos probabilísticos de eventos de sequía y pueda proporcionar un soporte en la toma de decisiones con respecto a la gestión de sistemas de recursos hídricos en tiempos de escasez.

Esta tesis puede dividirse en tres objetivos parciales de la siguiente manera.

- i. Construir un DI priorizando información disponible de variables hidrometeorológicas a diferentes escalas de tiempo.
- ii. Pronosticar probabilísticamente eventos de sequías usando el DI mediante modelos basados en MC y modelos basados en BN, comparando su desempeño y eligiendo el modelo de pronóstico que presente el mejor rendimiento.
- iii. Adaptar los pronósticos probabilísticos de sequías en un marco metodológico general de evaluación del riesgo de fallo en sistema de recursos hídricos, mediante la generación sintética hidrológica que admita las probabilidades de ocurrencia de los estados de sequía y la utilización de modelos de simulación de múltiples escenarios.

1.2. PUBLICACIONES

Esta tesis plantea un marco metodológico integral de evaluación del riesgo de fallo en el suministro de agua en sistemas de recursos hídricos en épocas de sequía acogiendo los aportes de cuatro publicaciones desarrolladas en el transcurso del periodo de investigación del programa de Doctorado en Ingeniería del Agua y Medioambiental de la Universidad Politécnica de Valencia. Las cuales se detallan a continuación:

1.2.1. EVALUACIÓN DE PRONÓSTICOS DE SEQUÍAS BASADOS EN CADENAS MARKOV EN UNA CUENCA ANDINA REGULADA USANDO LOS PUNTAJES DE HABILIDAD RPS Y GMSS

Avilés A, Célleri R, Paredes J, Solera A (2015) Evaluation of Markov Chain Based Drought Forecasts in an Andean Regulated River Basin Using the Skill Scores RPS and GMSS. *Water Resources Management* 29:1949–1963. doi: 10.1007/s11269-015-0921-2

El objetivo de la primera publicación que se presenta en el Anexo 1 fue desarrollar un DI para caracterizar y categorizar la frecuencia y el nivel de severidad de eventos de sequías. Además este artículo tuvo también el propósito de evaluar el rendimiento de dos modelos de pronóstico de sequía mensual y estacional basados en MC usando la serie de tiempo categorizada del DI. Se comparó el desempeño de los modelos cadena de Markov de primer orden (MCFO) y cadena de Markov de segundo orden (MCSO) usando dos puntajes de habilidad del pronóstico de variables discretas, tal como el puntaje jerarquizado de probabilidad (RPS) y el puntaje de habilidad Gandin-Murphy (GMSS). Los resultados de estudio mostraron la importancia de verificar la calidad de los pronósticos mediante uno o varios puntajes de habilidad previo a la utilización de esta información en la toma de decisiones con respecto a reglas y medidas preventivas de gestión del agua en periodos de escasez.

La metodología utilizada para el desarrollo del DI fue un enfoque flexible que engloba y prioriza información de variables relacionadas con el agua a diferentes escalas temporales brindando la posibilidad de caracterizar las sequías de una manera integral y facilitando la obtención de indicadores de déficit de agua con los datos disponible en una cuenca. Una serie de tiempo categórica del DI transformado se utilizó para pronosticar cuatro estados de sequía, extrema (categoría 3), severa (categoría 2), moderada (categoría 1) y no sequía (categoría 0).

Para tomar en cuenta la estacionalidad del ciclo anual se eligieron los modelos no-homogéneos MC con la finalidad de obtener un modelo de pronóstico para cada mes del año. El modelo MCFO utilizó la información del mes actual para pronosticar los estados de sequías del mes siguiente, mientras que el modelo MCSO utilizó la información de los meses actual y anterior para pronosticar los estados de sequía un mes adelante. Además se realizó

predicciones tres meses adelante utilizando los modelos MCFO y MCSO mediante árboles de decisiones construidos por un encadenamiento de pronósticos en cada mes mediante la información de matrices de probabilidad de transición y el conocimiento de las predicciones en los meses previos. Los resultados de este proceso demostraron ser cómodamente manejables y de fácil entendimiento por la ventaja de mostrar la incertidumbre asociada con el pronóstico en una forma cuantitativa.

Los aportes de esta publicación para el contexto de esta tesis fueron:

- El desarrollo del DI a partir de la disponibilidad de información hidrológica y meteorológica a diferentes escalas temporales en una cuenca.
- La utilización del enfoque basado en MC para obtener pronósticos de sequías en un marco probabilístico, brindando información de la incertidumbre asociada con el pronóstico en una forma cuantitativa.
- La importancia de verificar la calidad de los pronósticos y el desempeño de los modelos mediante uno o varios puntajes de habilidad de la predicción antes de aceptar los resultados para la toma de decisiones en la gestión del agua.

1.2.2. PRONÓSTICO PROBABILÍSTICO DE EVENTOS DE SEQUÍAS USANDO MODELOS BASADOS EN CADENAS DE MARKOV Y REDES BAYESIANAS: UN CASO DE ESTUDIO DE UNA CUENCA ANDINA REGULADA

Avilés A, Céleri R, Solera A, Paredes J (2016) Probabilística Forecasting of Drought Events Using Markov Chain-and Bayesian Network-Based Models: A Case Study of an Andean Regulated River Basin. *Water* 8:1–16. doi:10.3390/w8020037

El propósito de la segunda publicación que se presenta en el Anexo 2 fue comparar modelos de pronósticos de sequías basados en la probabilidad condicional (pronóstico de eventos futuros dada la información de los eventos previos), mediante un enfoque clásico usado frecuentemente basado en MC y otro enfoque novedoso usado con menos frecuencia basado en BN. Ambos enfoques usaron el DI desarrollado en la primera publicación y verificaron la calidad de los pronósticos mediante el puntaje de habilidad ponderado de probabilidad (RPSS), derivado del puntaje ponderado de probabilidad (RPS) y los pronósticos de

referencia. Las funciones copulas fueron usadas para resolver la compleja tarea de resolver los modelos basados en BN.

Mediante la agregación de información disponible hidrológica y meteorológica en diferentes escalas se construyó un DI utilizando el método expuesto en la primera publicación. La serie de tiempo resultante del DI fue categorizada en tres estados (no sequía, leve sequía y sequía), formando una nueva serie de datos categóricos que fueron la entrada de los modelos basados en MC, mientras que los valores de la serie de tiempo de la función de distribución normal acumulada del DI fueron las entradas para los modelos basados en BN, dado que la serie de tiempo del DI cumple la hipótesis de normalidad.

La calibración y validación de los modelos se realizó mediante validación cruzada dejando fuera uno. Se construyeron cuatro modelos basados en la probabilidad condicional para realizar los pronósticos de sequías, los modelos MC de primer orden (MCFO) y segundo orden (MCSO) y los modelos BN de primer orden (BNFO) y segundo orden (BNSO). Las funciones copulas fueron utilizadas para ayudar a resolver los cálculos de probabilidad conjunta en la formulación de los modelos basados en BN. Dos funciones copulas elípticas (normal y t) y dos funciones copulas arquimedianas (Clayton y Frank) se analizaron para definir la función más apropiada para las distribuciones conjuntas. El método máxima verosimilitud canónica (CML) fue utilizado para la estimación de parámetros y para seleccionar las mejores funciones ajustadas se utilizó el test de bondad de ajuste paramétrico basado en bootstrap, mediante la comparación del valor de p con el nivel de significancia y escogiendo las copulas con el menor valor del estadístico Cramér-von-Mises (S).

Los resultados de una evaluación global de los pronósticos mostraron que los modelos basados en MC tienen mejor desempeño que los modelos basados en BN para pronosticar los eventos húmedos y secos, mientras que para los eventos de sequía los modelos basados en BN tienen un leve mejor rendimiento que los modelos basados en MC. Sin embargo, realizando una evaluación mensual se detectó que ambos enfoques tuvieron mejor rendimiento en pronosticar las sequías dependiendo del mes de análisis. Además en la mayoría de los análisis de verificación de la calidad de los pronósticos el modelo MCFO fue el que presentó mejor desempeño.

Los aportes de esta publicación para el contexto de esta tesis fueron:

- El análisis de la comparación del desempeño de modelos comúnmente utilizados (MC) y modelos complejos utilizados con menor frecuencia (BN) para el pronóstico probabilístico de sequías.
- La elección del mejor modelo con criterios probabilísticos y pronósticos de referencia.
- El mejor rendimiento del modelo MCFO según la evaluación de los pronósticos.
- La utilidad de comparar varios enfoques de pronóstico de sequía con la finalidad de elegir un modelo confiable que podría ser útil para asegurar una toma de decisiones oportuna de los gestores del agua para enfrentar los periodos de sequías

1.2.3. ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE FALLO EN EL SUMINISTRO DE AGUA COMO AYUDA A LA PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Avilés A, Solera A (2012) Estimación del riesgo de fallo en el suministro de agua como ayuda a la planificación y gestión de recursos hídricos. *Maskana* 3:77–86.

Este artículo se presenta en el Anexo 3 tiene el propósito de estimar el riesgo de fallo en el suministro de agua para explorar alternativas de gestión de la demanda en condiciones futuras mediante un análisis de modelos de series de tiempo y herramientas de simulación múltiple de escenarios estocásticos.

Se analizaron varios modelos de series de tiempo de caudales, tal como los autoregresivos de media móvil (ARMA) y modelos autoregresivos de media móvil periódicos (PARMA) con la finalidad de obtener un conjunto de modelos que sean capaces de reproducir las propiedades estadísticas de los datos históricos y cumplir los supuestos de normalidad e independencia de los residuos. Además se escogieron los mejores modelos mediante criterios de penalización por mayor número de parámetros. Estos modelos sirvieron para generar múltiples series sintéticas de caudales, las cuales fueron la base para la construcción de escenarios estocásticos futuros que ingresaron en las herramientas de simulación (SIMGES y SIMRISK). El proceso de simulación en SIMRISK se realizó mediante la introducción de los múltiples escenarios estocásticos y de acuerdo a criterios decididos con anticipación se valoró de una forma probabilística el riesgo de fallo del suministro de agua en diferentes niveles de déficit (diferencia entre el valor de la demanda y el valor del suministro).

Este banco de información probabilística sirvió para explorar alternativas de gestión de la demanda para la disminución del riesgo de fallo en la asignación de agua principalmente a las demandas prioritarias.

Los aportes de esta publicación para el contexto de esta tesis fueron:

- El análisis de la comparación entre los modelos ARMA y PARMA, en donde se muestra la ventaja de los modelos PARMA para captar la estacionalidad de los caudales y reproducir de mejor forma los estadísticos mensuales de la serie histórica. Y el mejor rendimiento de los modelos PAR1 con respecto a otros modelos PARMA con mayor número de parámetros.
- La necesidad de realizar una gestión a corto o mediano plazo y con actualizaciones constantes de la información de entrada a los modelos dada la incertidumbre de los cambios futuros en la oferta y demanda de agua cuando se realiza una simulación a largo plazo. Este aspecto podría realizarse mediante con una predicción en periodos muy cortos de la distribución de todos los posibles valores de caudales y la introducción de información actualizada de las demandas.

1.2.4. ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RIO TOMBAMBA EN ECUADOR, MEDIANTE MODELOS ESTOCÁSTICOS Y DE GESTIÓN

Avilés A, Solera A (2013) Análisis de sistemas de recursos hídricos de la cuenca del río Tomebamba en Ecuador, mediante modelos estocásticos y de gestión. En: Solera A, Paredes J, Andreu J (editores) Aplicaciones de sistemas soporte a la decisión en planificación y gestión integradas de cuencas hidrográficas. Marcombo, Barcelona, España, pp 51–61

La segunda publicación que presenta en el Anexo 4 es una aplicación de los métodos de la tercera publicación en la cuenca del río Tomebamba ubicada en el sur de los Andes ecuatorianos. El propósito de este estudio fue mostrar las bondades de trabajar con una metodología que incorpore un marco probabilístico en la toma de decisiones y que facilite la búsqueda de alternativas de gestión para disminuir el riesgo de desabastecimiento de agua a las demandas prioritarias.