



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

ESTIMACIÓN DE PRONOSTICOS DE CAUDALES DEL RÍO MAGDALENA A LA ALTURA DEL MUNICIPIO DE EL BANCO, DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA

TITULO EN INGLÉS

YEISON GUTIERREZ ROJAS¹,
WILSON SANDOVAL RODRIGUEZ²

¹ Magister en manejo integrado de cuencas hidrográficas, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Grupo de Investigación en Biodiversidad del Caribe Colombia (RIWISAKA), Santa Marta, Magdalena.

² Fundación Universitaria los Libertadores.

E-mail: yeisongu@gmail.com ; wsandovalr@libertadores.edu.co

RESUMEN

El río Magdalena es el más importante de Colombia, con una extensión de 1540 Km, de los cuales 886 km son navegables, su cuenca representa el 24% de la superficie del país, con un caudal promedio de 7100 m³/s. Este río bordea el límite occidental del departamento del Magdalena y alimenta 185 cuerpos de agua tales como ciénagas o lagunas, que dependen del flujo de agua del río. Estos cuerpos de agua son la fuente natural impulsadora del desarrollo económico, productivo, ambiental y cultural de 17 municipios del departamento del Magdalena. El objetivo de este trabajo fue estimar el pronóstico del caudal del río Magdalena para el año 2021 a la altura del municipio del Banco, mediante la aplicación de un modelo SARIMA tomando los datos de caudal medio de la estación Limnigráfica 25027020 del



IDEAM desde enero de 1990 hasta diciembre del 2019, validados con datos observados del año 2020. Los resultados muestran un comportamiento estacional o periodicidad con media de $3888 \text{ m}^3/\text{s}$, la descomposición de la serie fue marcada por una tendencia polinómica. Los test de Dicky-Fluller y Phillips-Ferron (0.01 y 0.01) indicaron estacionalidad sobre la serie diferencia con un periodo regular y uno estacional. A partir de las autocorrelaciones simple y parcial se obtuvieron 18 posibles modelos, los BIC arrojados identificó al modelo (0, 1, 2, y 0, 1, 1) como el óptimo con 5418,7. El p-value de la prueba de Lung-Box fue de 0.1534, lo cual indicó No correlación serial en los residuos, la prueba de Jarque-Bera con un p-value de 0.6146 se toman como un ruido blanco no Gaussiano. La validación del modelo destacó que la totalidad del modelo se encuentra en las bandas del 80 y 95% de confianza, y se ajusta conforme a los datos reportados para el año 2020.

Palabras clave: Pronósticos, Caudales, río Magdalena, SARIMA, BIC.

ABSTRACT

Magdalena River is the most important in Colombia, with an extension of 1540 Km, of which 886 Km are navigable, its bases represents 24% of the country's surface, with an average flow of $7100 \text{ m}^3/\text{s}$. This river borders the western limit of Magdalena department and feed 185 water body such us swamps, lagoons of Magdalena department that depends on flow of river water. These water bodies are natural sources that drives the economic, productive, environmental and cultural development of 17 municipalities of department. The aim of this work was to estimate the forecast of the Magdalena river flow for the year 2021 at the height



LOS LIBERTADORES
FUNDACION UNIVERSITARIA

of the municipality of the Banco, through the application of a SARIMA model taking the average flow data of the Limnigraphic station 25027020 of the IDEAM since January 1990 until December 2019, validated with data observed from the year 2020. The results showed a seasonal behavior or periodicity with an average of 3888 m³ / s. The series decomposition was marked by a polynomial trend. The Dicky-Fluller and Phillips-Ferron tests (0.01 and 0.01) indicated seasonality on the difference series with a regular and a seasonal period. From the simple and partial autocorrelations, 18 possible models were obtained. The originated BIC identified the model (0, 1, 2, and 0, 1, 1) as the optimum with 5418.7. The p-value of the Lung-Box test was 0.1534, which indicated no serial correlation in the residuals. The Jarque-Bera test with a p-value of 0.6146 is taken as a non-Gaussian white noise. The validation of the model highlighted that the entire model is in the 80 and 95% confidence bands, and is adjusted according to the data reported for the year 2020

Keywords: Forecast, Flows, Magdalena river, SARIMA, BIC.



INTRODUCCIÓN

El río Magdalena, es el más importante de Colombia, atravesando la región Andina, que es el centro del desarrollo de Colombia. Fluye de sur a norte con una longitud de alrededor de 1528 kilómetros y un caudal medio de 7100 m³/s. la cuenca representa el 24% de la superficie total de Colombia y alberga el 77% de la población Colombiana (Cormagdalena, 2007). Para Colombia, el río asume relevancia en diferentes aspectos (Velasco Rivera & Díaz Granados Ortiz, 2006), una de las principales es la navegabilidad del río con 886 Km navegables, de igual manera es la fuente de agua potable de ciudades y municipios ribereños, actúa como vertedero de aguas residuales y contaminantes, generación de hidroenergía, agricultura y ganadería, y no menos importante la pesca, (Puentes, y otros, 2015) describe que en década anteriores se reportaron volúmenes de capturas significativas similares a la pesca industrial marina.

El modelamiento hidrológico y el transporte de sedimentos del río es un aspecto relevante para el manejo del mismo, con base en (Restrepo A., 2015) este río incremento sus aportes de caudal entre 1940-2011, y en el periodo entre 2000-2011, el incremento fue considerable respecto al periodo anterior al 2000, es decir el caudal promedio de 7.156 m³ s⁻¹ para el periodo 1940-1999, se incrementó a 8.833 m³ s⁻¹ entre los años 2005 y 2011, un aumento de 1.677 m³ s⁻¹ o del 24 % con respecto al promedio interanual de la serie completa del periodo 1940-2011.

El comportamiento del régimen hidrológico del río Magdalena, tiene implicaciones directas sobre las comunidades, entre esas las inundaciones y sequias, durante los años 2010 y 2011,



Colombia experimentó una de las mayores temporadas invernales gracias al desarrollo de un fenómeno de La Niña, lo cual generó graves condiciones de inundación en todo el territorio nacional muy especialmente en la región Andina y Caribe. Esta situación representó una catástrofe para el país dejando miles de personas damnificadas y pérdidas millonarias para la nación. Sin embargo, paradójicamente el evento se constituyó como una generosa oportunidad para tomar acciones orientadas a atender la situación de calamidad de miles de familias colombianas y a planificar de una mejor manera la gestión del riesgo minimizando los impactos que puedan causar emergencias de este tipo (IDEAM, IAvH, Invemar, SINCHI e IIAP, 2013). Por otro lado, (Hoyos, Escobar, Arango, & Ortiz, 2013) consideró, que las inundaciones fueron la amenaza predominante y de mayor impacto, durante el ENSO 2010-2011, y concluyen que se debe enfatizar en la reducción de la vulnerabilidad fortaleciendo la resiliencia en las comunidades, ya que las inundaciones no pueden ser controladas solamente por infraestructuras civiles.

Al analizar el recurso hídrico y con base en la cartografía 1:25000 de Colombia (Datos abiertos IGAC), se tiene que esta cuenca alberga el 95.9% del total de Ciénagas del país, el 69.4% de Lagunas y el 60% del total de Pantanos que registra Colombia, lo que en términos de recursos hídricos el río Magdalena no solo es el cauce principal, sino el complejo de cuerpos de agua que dependen de él, en este sentido, el departamento del Magdalena, cuenta con los principales cuerpos de aguas dulces y estuarinos de mayor relevancia para el país, y que son la fuente natural impulsadora del desarrollo económico, productivo, ambiental y cultural de 17 de 29 municipios del departamento, que dependen directamente de los flujos de caudal del río Magdalena.



El presente trabajo tiene por objeto estimar el pronóstico de caudales del río Magdalena a la altura del municipio del Banco, mediante la aplicación de un modelo SARIMA confiable para los próximos 12 meses del año 2021, y sus posibles afectaciones a la zona deltaica del río.

REFERENTES TEORICOS

Pronósticos de Caudales

El pronóstico hidrológico es la estimación previa de los estados futuros de los fenómenos hidrológicos en tiempo real, que no debe confundirse con el cálculo de datos de diseño hidrológico (predicción). Son esenciales para la operación eficiente de la infraestructura hídrica y la mitigación de los desastres naturales tales como inundaciones y sequías. Además, se están convirtiendo cada vez más importante en el apoyo a la gestión integrada de los recursos hídricos y la reducción de pérdidas por inundación inducida (Nemec, 1986), (WHO, World Meteorological Organization, 2009) en (Vergara Saturno, 2020) .

De acuerdo al trabajo realizado por (Barrios Garcias & Barrios Garcia, 2014), para la modelación de pronósticos hidrológicos con fines de gestión de riesgo en el municipio de Ayapel en el departamento de Cordoba, los pronósticos hidrológicos son uno de los principales elementos dentro de la prevención del riesgo, ya que permite una preparación adecuada ante una amenaza; precisamente porque entrega información referente a la probabilidad (cuantitativa o cualitativa) de un estado de las características de las aguas



superficiales, y estos pronósticos se convierten en instrumentos de apoyo a los sistemas de alerta temprana, que preparan a la comunidad ante diferentes eventos que pueden generar desastres y tomar acciones de evacuación y protección de la vida de las mismas, y en términos generales son varios los autores que describen esta situación, tal es el caso de (Vergara Saturno, 2020), (Colorado Mejía, 2019).

Para el río Magdalena existen varios trabajos que intentan modelar mediante pronósticos los caudales o niveles del río, con diferentes metodologías, como son; (Amaris, Ávila, & Guerrero, 2017) que estima un modelo ARIMA para el análisis de series de tiempo de volúmenes anuales (millones de m³/año) en el río Magdalena usando registros de la estación Calamar. De igual manera el trabajo realizado por (Suescun Díaz, 2019) que mediante un modelo SARIMA estiman los pronósticos semanales de la altura del río Magdalena a la altura del municipio de Barrancabermeja. De igual manera (Moreno, Sánchez, & Espitia, 2020) que utiliza inteligencia artificial para predecir a partir de los niveles diarios del río, inundaciones en zonas adyacentes al río Magdalena, desde el Magdalena medio hasta el municipio del Banco, en 5 puntos de estudio como son; Aguadas (Caldas), Barbosa (Santander), El Banco (Magdalena), Palenquito (Bolívar) Y puerto Berrio (Antioquia).

Gestión del Riesgo a Inundaciones

En las últimas décadas se ha reconocido que existe una crisis climática global que como consecuencia ha generado alteraciones en la variabilidad climática, y para Colombia se encuentra influenciada por dos eventos como son el Niño Oscilacion Sur y la Niña asociada



a una mayor entrada de corrientes húmedas del Chocó (Poveda, 2004) (Werner, y otros, 2016). (UNISDR (a), 2015) (Hoyos, Escobar, Arango, & Ortiz, 2013).

Un aspecto principal en la evaluación de los riesgos, es caracterizar las zonas o áreas de estudio que presenten amenazas para las poblaciones que permitan identificar o definir indicadores de vulnerabilidad, entiendo esto es importante describir las relaciones que pueden existir entre los factores ambientales, climáticos, sociales, económicos, urbanos y antropogénicos (Villegas-González, Ramon-Canon, González-Méndez, González-Salazar, & De Plaza-Solórzano, 2017).

Según (UNISDR (a), 2015) Colombia se ubica a nivel latinoamericano en tercer puesto por desastres ocurridos entre el periodo de 1990-2013, con base en las pérdidas y daños acumulados por los desastres, además se ubica a nivel mundial entre los 20 países más propensos a sufrir inundaciones (UNISDR (b), 2015) (IDEAM, IAvH, Invemar, SINCHI e IIAP, 2013). Las inundaciones afectan más personas en todo el mundo que cualquier otra amenaza, y en términos de Pérdidas Anuales Estimadas (PAE), suma 104.000 millones de dólares americanos a las PAE globales. Para poner esta cifra en contexto, equivale a dos veces el gasto en salud pública realizado en el Medio Oriente y Norte de África o al 30% del gasto anual en educación pública de América Latina y el Caribe (UNISDR (b), 2015).

Importancia del río Magdalena para los Ecosistemas Ribereños

Con base en la información de (IGAC datos abiertos) el río Magdalena, bordea el límite occidental del departamento del Magdalena, a su vez esta zona es denominada como la zona del Delta del río Magdalena o planicie de inundación, el cual alberga 185 cuerpos de agua



lenticos como ciénagas o lagunas de importancia para la región, con aproximadamente 140.000 hectáreas. Esta zona limítrofe está conformada por 17 municipios, donde se encuentran 154 centros poblados, donde habitan 395.369 personas (DANE, Censo 2018) (193.179 rural y 202.190 cabecera) que representa el 44.5% de la población del departamento (sin incluir Santa Marta), esto refleja que toda esta población depende exclusivamente de la fuente natural del agua.

Con base en lo anterior, tener un modelo pronóstico para esta región, permite generar estrategias de manejo, no solo desde el punto de vista de la navegabilidad del río por la importancia que este tiene en el sector de hidrocarburos para Colombia, que tradicionalmente ha sido el principal manejo que se le ha dado al río, sino que posterior a los eventos de la Niña 2010-2011, el río Magdalena ha presentado incrementos de caudales (Restrepo A., 2015), que a su vez genera otros efectos como altas tasas de sedimentación, erosión fluvial, inundaciones con mayor intensidad y sequías de los cuerpos de agua adyacentes al delta, estos efectos en la actualidad preocupan a las autoridades ambientales, mortandad de peces por efectos de sequía-inundación, y desabastecimiento de algunos servicios ecosistémicos o disminución del recurso pesquero, que es la principal actividad económica de estas poblaciones.

En la actualidad, el aumento de caudales y sedimentos son las dos características que generan preocupación para todos los actores que confluyen sobre el río, sobre todo el tema de sedimentación explicado por las altas tasas de deforestación (45%) en toda la cuenca (Restrepo A., 2015), concluye que el Magdalena es el sistema fluvial del continente americano con las tasas de erosión más altas por kilómetro cuadrado de área hidrográfica. Como consecuencia, este indicador sugiere conocer los efectos de estos caudales y



sedimentos sobre los cuerpos de agua lagunares y cenagosos que dependen del río en el departamento del Magdalena, ya que podría suponer la sedimentación de estos y posible extinción a corto plazo de muchas especies y servicios ecosistémicos que de ellos se derivan.

METODOLOGÍA

El trabajo descrito, busca generar un modelo de pronóstico de los caudales del río Magdalena a la altura del municipio del Banco, departamento del Magdalena, la literatura consultada relaciona el documento de (Suescun Díaz, 2019), con la diferencia que la serie de tiempo trabajada es niveles del río (altura de la columna del agua), y este autor trabajó con la serie de tiempo de caudales.



AREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la distancia que recorre el río Magdalena, desde el municipio del Banco al sur del departamento del Magdalena, hasta su desembocadura, con 390 kilómetros aproximadamente desde el punto de la estación Limnigráfica catalogada como el Banco, en las coordenadas $-73^{\circ}57'46,672''\text{W}$ y $8^{\circ}59'33,093''\text{N}$; hasta la desembocadura en Bocas de cenizas, en el Mar Caribe, esta distancia es el 25% de la longitud total del río (Figura 1). Este tramo del río recorre 17 (60%) municipios del departamento del Magdalena, y alimenta alrededor de 150 cuerpos de agua entre Ciénagas y Lagunas y un alto número de pequeños complejos cenagosos llamado Delta del río Magdalena.

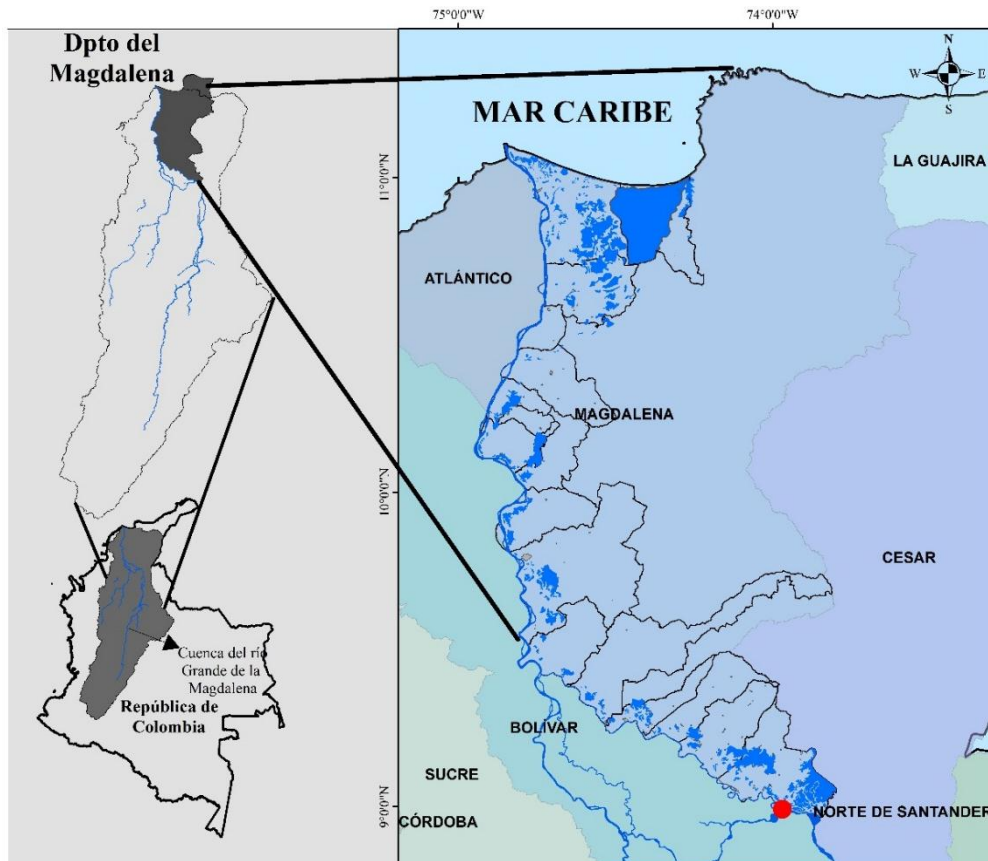


Figura 1. Ubicación del tramo para la modelación del pronóstico de caudales del río Magdalena



FUENTE DE DATOS

Los datos consultados, pertenecen a los datos de la serie de tiempo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, de la estación Limnigráfica 25027020 o llamada El Banco, donde se utilizó la serie de datos del periodo comprendido entre enero de 1990 hasta diciembre de 2020, esta base de datos cuenta con información geográfica de la estación Limnigráfica, la fecha del dato, y el dato de la variable caudal, con 372 datos para el periodo a analizar, es de aclarar que la serie se encuentra completa, estos datos fueron consultados y descargados en febrero del 2021 del portal de datos abiertos del IDEAM¹.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Con base en (Suescun Díaz, 2019), Utilizando la metodología Box-Jenkins explicada en la Especialización en los módulos de aprendizaje: Series de Tiempo I y II, se determinó ajustar un modelo SARIMA (Auto Regresivo Integrado de Medias Móviles Estacional), debido al alcance planteado de pronóstico a corto plazo y la simplicidad que ofrece un modelo univariado.

RESULTADOS

Los datos obtenidos de la serie de tiempo de caudales de la estación Limnigráfica El Banco, son el promedio de datos mensuales desde el periodo comprendido entre enero de 1990 hasta

¹ <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>



diciembre del 2020, se realizó el análisis con los datos hasta diciembre del 2019, y los datos del 2020 se utilizaron para validar el modelo, conforme a esto la totalidad de los datos son 360 datos, en la (Tabla 1) se muestra el resumen descriptivo de los datos, para observar posibles comportamientos.

Tabla 1. Resumen descriptivo de la serie de tiempo de los datos de caudal.

Variable	Min	1 st Qu	Median	Mean	3rd Qu	Max
Dato	1246	2970	3888	3955	4847	7371

Posterior a esto se realiza el ploteo para explorar el comportamiento de los datos (Figura 2), y muestra un comportamiento estacional o periodicidad de los datos, con posible media constante de 3888 m³/S, con picos altos de caudal para el periodo de diciembre del 2010, que coincide para la época donde se presentó el evento Niña (ENSO Oscilación Sur), y posterior descenso de caudales para el 2014 que también coincide con la presencia del evento Niño (ENSO Oscilación Norte), similar información se presenta para el periodo del 98-99 y aumento considerable de caudales para el año 2000.

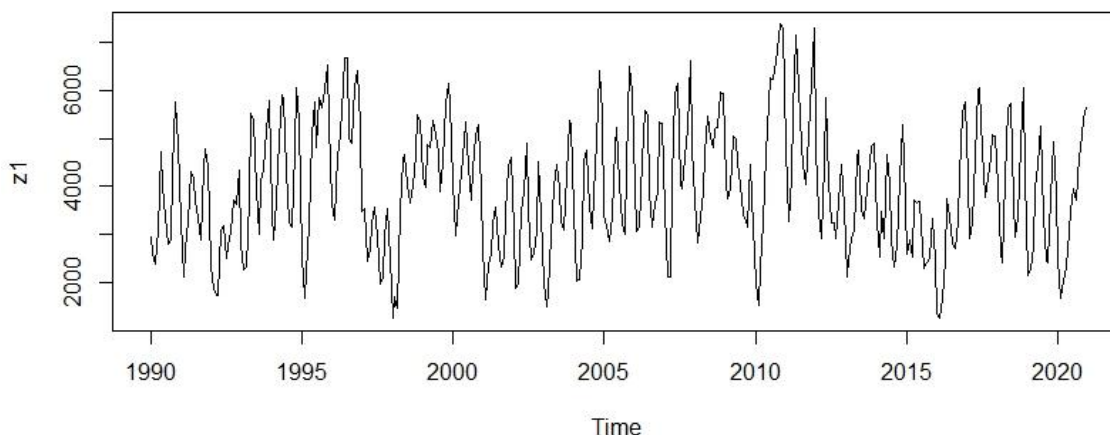


Figura 2. descripción inicial de los datos de caudal del río estación Limnigráfica de El Banco.



Al realizar la descomposición de la serie (Figura 3) para analizar lo observado, la tendencia, la estacionalidad y aleatoriedad, y es marcada una posible tendencia polinómica y estacionalidad de los datos.

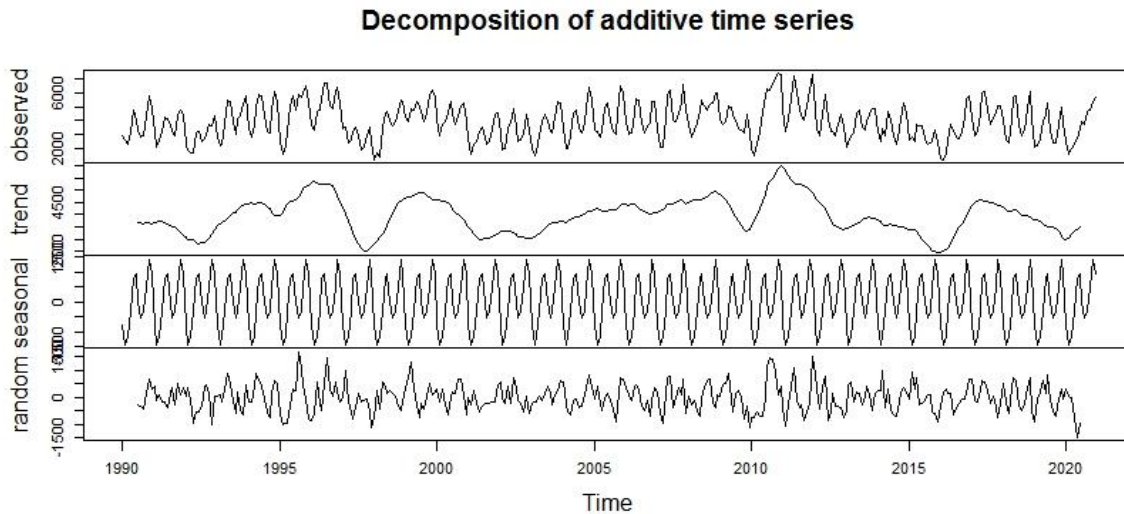


Figura 3. descomposición de la serie de tiempo de los datos de caudal de la estación Limnigráfica de El Banco.

A continuación, en la (Figura 4) permite ver las autocorrelaciones simples y parciales (ACF) y (PACF) de los datos observados; con una diferencia regular; con una diferencia estacional; y la última serie presenta una diferencia regular y una diferencia estacional, donde las tres primeras (Observados, diferencial regular y diferencia estacional) muestran ciclos, lo cual indica que la serie a trabajar es la compuesta por una diferencia regular y una estacional.



LOS LIBERTADORES
FUNDACION UNIVERSITARIA

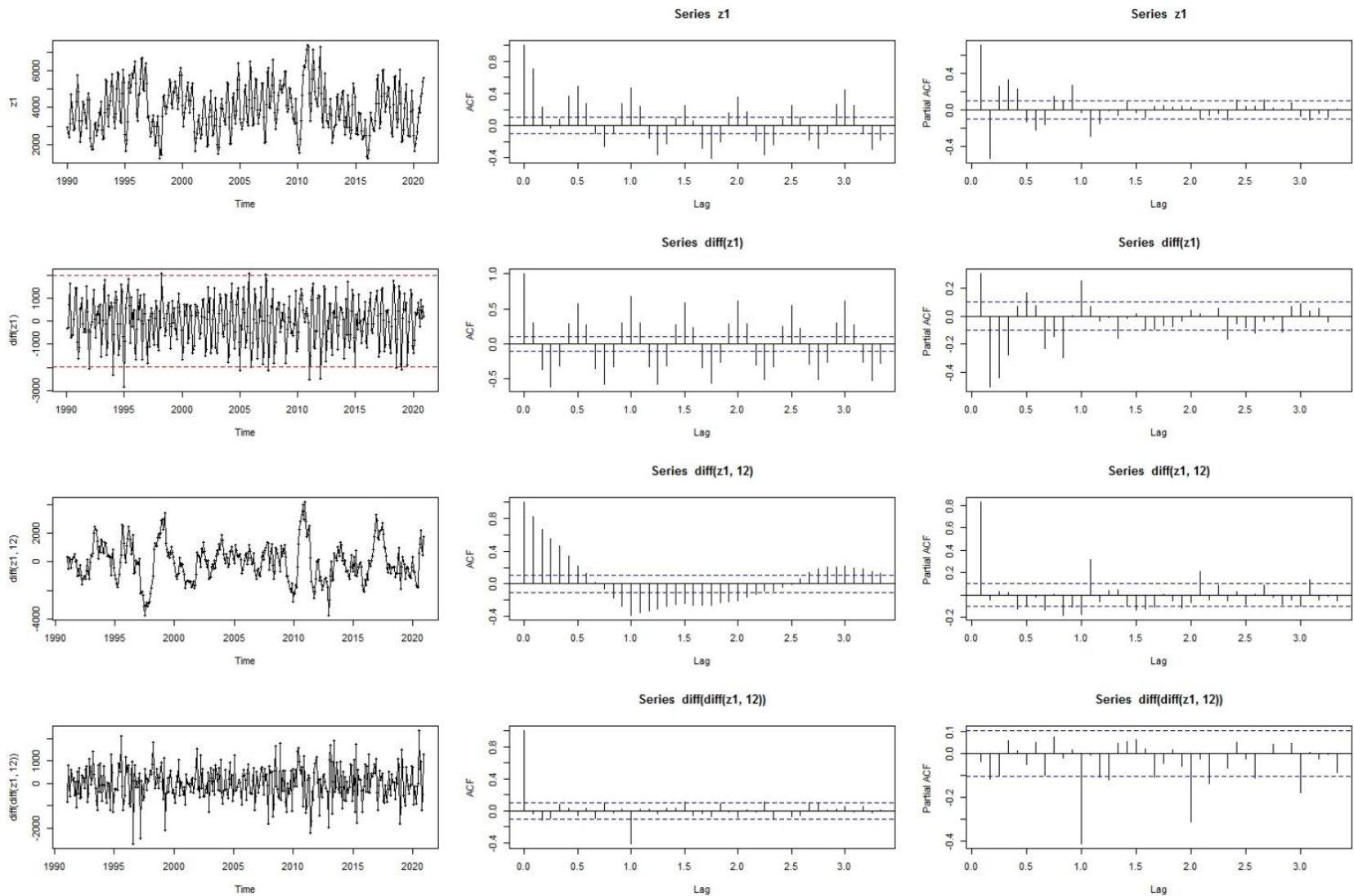


Figura 4. descomposición y diferenciación de la serie de tiempo.



IDENTIFICACIÓN DEL MODELO

Con base en la grafica de diferenciación de un periodo regular y un periodo estacionario (Figura 5), se procede a la definición del modelo.

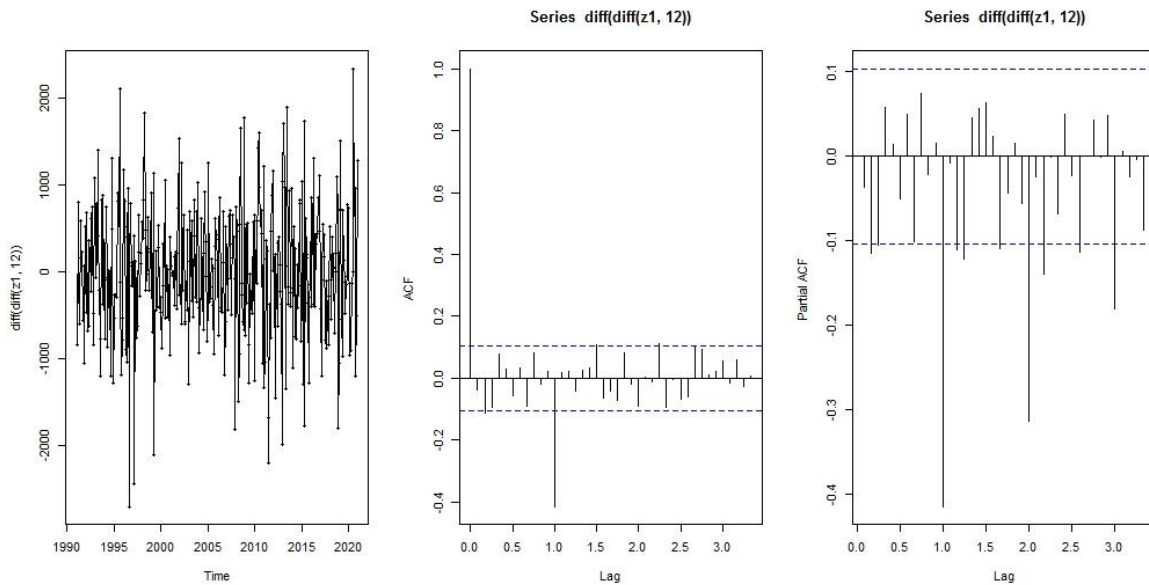


Figura 5. Autocorrelaciones simples y parciales en la diferenciación de la serie de tiempo con un periodo regular y uno estacional de la serie de tiempo.

Al realizar el test aumentado de Dikey Fuller, y de Phillips-Ferron (Tabla 1), sobre la serie que contiene una diferencia regular y una estacional se obtiene que:

La prueba de hipótesis es;

H_0 = No es estacionario

H_a = es estacionario

Tabla 2. resultados de los test para estimar la estacionalidad de la serie de tiempo.

Test	p-value	Resultado
Dickey-Fuller	0.01	Serie Estacionaria
Phillips-Perron	0.01	Serie Estacionaria



Con base en los test. estos resultados identifican que la serie es estacionaria. Posteriormente, se procede a la identificación del modelo con base en los ACF y PACF de la serie diferenciada regular y estacional.

Para encontrar el posible modelo. Se procede a identificar las posibles combinaciones de los parámetros estacionarios (p, d, y q) y estacionales (P, D, Y Q) con base en (Figura 5) de las autocorrelaciones simples y parciales se identificaron los siguientes posibles modelos (Tabla 3), a los cuales se procedieron a validar su ajuste.

Tabla 3. Posibles combinaciones de modelos SARIMA .

p	d	q	P	D	Q
0	1	2	0	1	1
0	1	3	3	1	0
2	1	0	3	1	1
2	1	2			
15	1	0			
20	1	0			

Estos modelos fueron probados para analizar su ajuste (Tabla 4), y a partir del BIC se elaboró el resultado de las 18 posibles combinaciones, obteniendo que el modelo (0, 1, 2, 0, 1, 1) presento el menos valor del BIC, y sus respectivos parámetros (Tabla 5).

Tabla 4. Valores del BIC de los posibles modelos SARIMA.

Modelo	p	d	q	P	D	Q	BIC
1	0	1	2	0	1	1	5418,7
2	0	1	2	3	1	0	5481,57
3	0	1	2	3	1	1	5434,72
4	0	1	3	0	1	1	5422,75
5	0	1	3	3	1	0	5485,95
6	0	1	3	3	1	1	5438,71
7	2	1	0	0	1	1	5421,06
8	2	1	0	3	1	0	5483,67



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

9	2	1	0	3	1	1	5437,12
10	2	1	2	0	1	1	5427,18
11	2	1	2	3	1	0	5490,22
12	2	1	2	3	1	1	5443,49
13	15	1	0	0	1	1	5472,89
14	15	1	0	3	1	0	5536,99
15	15	1	0	3	1	1	5536,99
16	20	1	0	0	1	1	5498,23
17	20	1	0	3	1	0	5559,54
18	20	1	0	3	1	1	5513,15

Los parámetros del modelo (0, 1, 2, 0, 1, 1) son:

Tabla 5. Parámetros del modelo (0, 1, 2, 0, 1, 1).

Parámetros	Ma1	Ma2	Sma1
Estimación	0.0131	0.0001	0.0000
Error Estandar	0.05	0.05	0.04

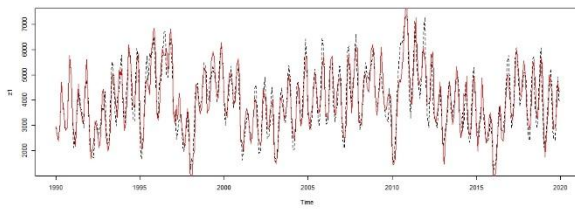
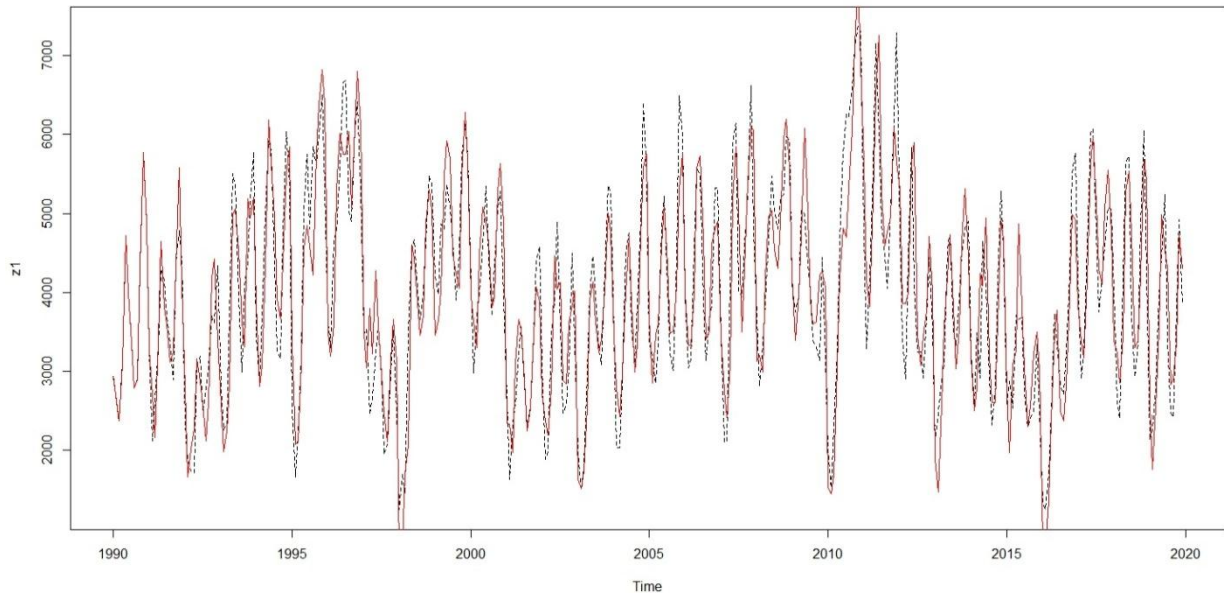
Posteriormente se grafican los residuales del modelo, y con base en el ACF y el PACF de los residuales no se destaca algún problema de autocorrelación serial para el alcance del pronóstico planteado. Los residuales (

Tabla 6), se comportan como un ruido blanco, y el de normalidad muestra que los datos se ajustan, y se indica heterocedasticidad. El p-value de la prueba de Lung-Box es de 0.1534, lo cual nos indica que con una significancia de 5%, no existe evidencia para rechazar la hipótesis de No Correlación Serial en los residuos. Por otro lado, la normalidad de los residuales con base en la prueba de Jarque-Bera nos confirma con un p-value de 0.6146 que los residuales se configuran como un ruido blanco no Gaussiano, con evidencia estadísticamente significativa. Finalmente de acuerdo al test de Aleatoriedad (p-value = 0.2738) los residuales no exhiben estructura o tendencia o cualquier otro comportamiento predecible), (Figura 6).

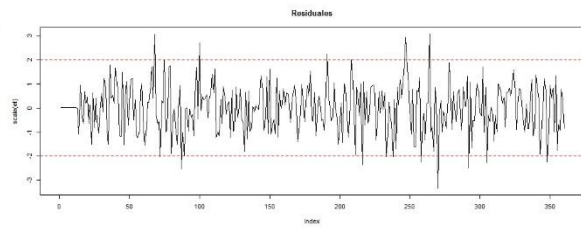


Tabla 6. valores de los test para las pruebas de residuales.

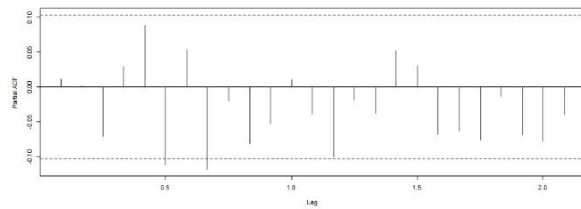
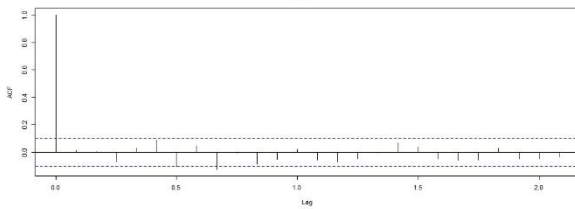
Test	p-value
Ljung-Box	0.1534
Jarque-Bera	0.6146
Aleatoriedad	0.2738



Series et



Series et



Series ab(e)

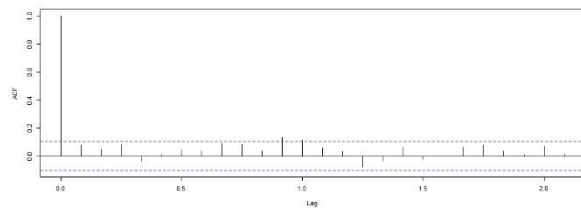
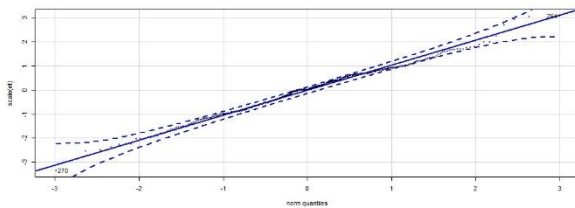




Figura 6. Análisis de residuales del modelo (0, 1, 2, 0, 1, 1) de la serie diferenciada con un periodo regular y uno estacional.

VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo consistió en el pronóstico de los caudales del río del siguiente año entre enero y diciembre del 2020, la (Figura 7) nos muestra el comportamiento del modelo, destacando que la totalidad del modelo se encuentra en las bandas del 80 y 95% de confianza, y que el modelo se ajusta claramente conforme a los datos reportados para el año 2020 para la estación Limnigráfica en estudio. La validación del modelo incluyó los errores del pronóstico que se describen a continuación;

RMSE	MAPE	MASE	MAE
714.40	0.1676	0.7685	608.91



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Forecasts from ARIMA(0,1,2)(0,1,1)[12]

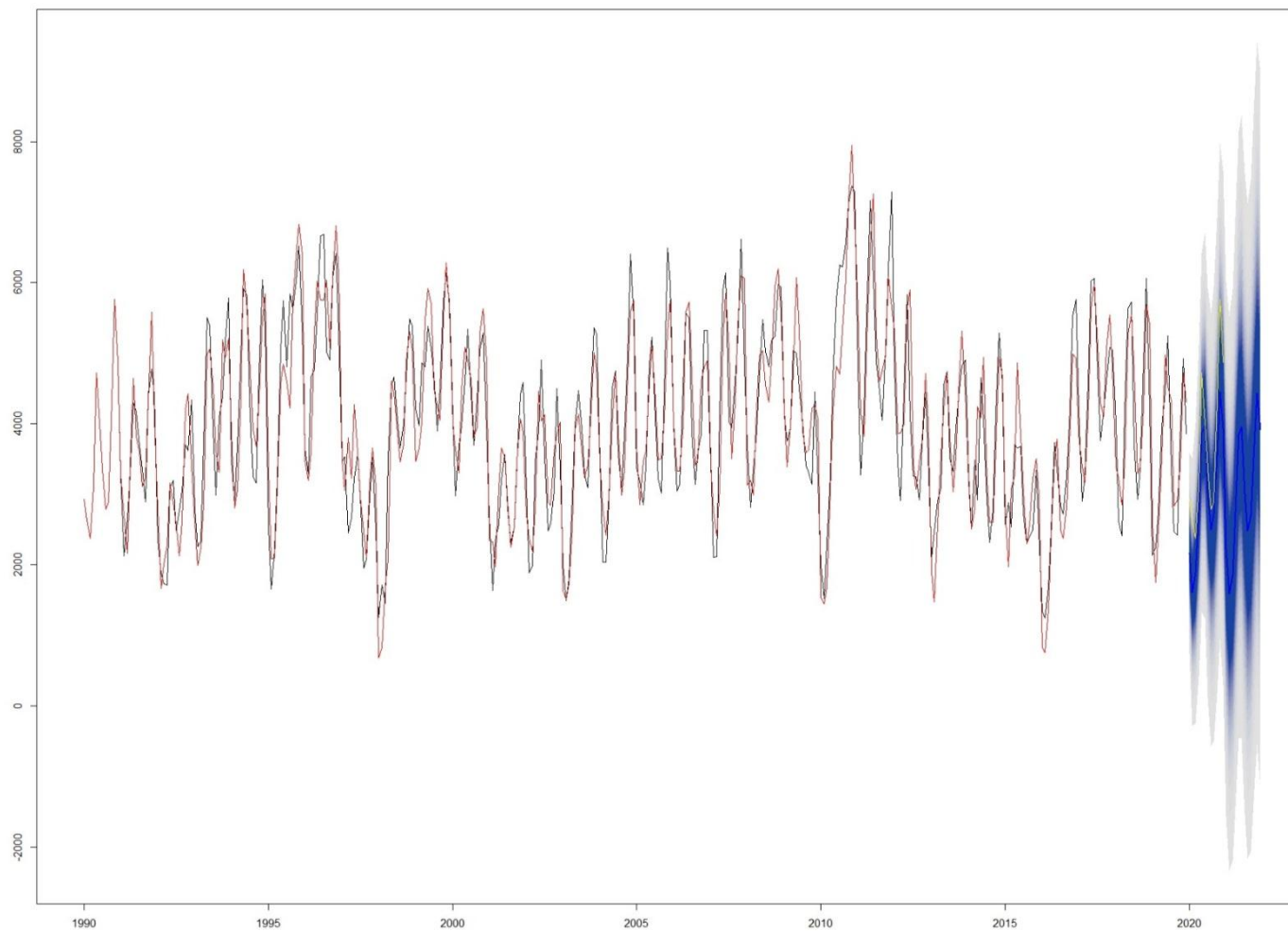


Figura 7. Pronóstico del modelo (0, 1, 2, 0, 1, 1) para 24 periodos, junto con la validación para el año 2020 con bandas de confianza del 80 y 95% de confianza.



CONCLUSIONES

El modelo SARIMA (0, 1, 2, 0, 1, 1) de pronóstico de los caudales del río Magdalena a la altura del municipio de El Banco, se comportó de manera ajustada conforme a la validación de caudales del año 2020 ya que la totalidad del modelo se ajusta entre las bandas del 80 y 95%, y puede ser utilizado como un modelo de pronóstico simplificado para esa parte del río Magdalena.

Con base en el pronóstico del modelo SARIMA de los caudales del río Magdalena, los datos muestran un patrón de caudales donde no evidencia presencia de eventos Niña o Niño, lo cual induce a un comportamiento normal de descarga de aguas desde el río hacia los cuerpos de agua adyacentes (Lagunas y/o Ciénagas), que supone para el 2021 no existan posibles afectaciones desde el punto de vista de flujos hidrológicos de excedentes o sequías.

El modelo SARIMA (0, 1, 2, 0, 1, 1) de pronóstico de los caudales del río Magdalena a la altura del municipio de El Banco, y el análisis de la serie de tiempo de los caudales no presenta información de altos picos de caudales o tendencia a generar inundaciones a las comunidades ribereñas de los 17 municipios que bordean al río, lo cual puede ser utilizado como herramienta en los sistemas de alerta temprana de modelos de inundación, para prevenir y reducir las pérdidas humanas o pérdidas económicas.

Se recomienda para próximos estudios involucrar otras variables climáticas, y datos de otras estaciones de monitoreo del río, para aumentar la robustez del modelo y mejorar la calidad



del pronóstico planteado, y así mismo integrar variables macroclimáticos con el Niño y la Niña.

Es necesario que estos modelos sean comparados con otros instrumentos de modelamiento de datos no lineales, ya que las metodologías Lineales se basan en que las relaciones de dependencia estacionales interanuales son las mismas para todos los períodos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaris, G., Ávila, H., & Guerrero, T. (2017). Aplicación de modelo ARIMA para el análisis de series de volúmenes anuales en el río Magdalena. *Revista Tecnura*, 21(52), 88-101. doi:<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a07>
- Barrios Garcias, T. Y., & Barrios Garcia, Y. (2014). *Modelación de pronósticos hidrológicos para niveles de agua en tiempo real para el río San Jorge, con fines de destiñ del riesgo por inundaciones en el municipio de Ayapel, Cordoba*. Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Bogotá.
- Colorado Mejía, J. (2019). *Fomulación de un modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la genereación de energía hidráulica*. Tesis de Maestría, Universidad EAN, Maestría en Gerencia de la Cadena de Abastecimiento, Facultad de Estudios Ambientales Virtuales, Pereira. Recuperado el 18 de Febrero de 2020
- Cormagalena. (2007). *Plan de manejo de la cuenca del río Magdalena-Cauca*. Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena.
- Hoyos, N., Escobar, J., Arango, A. M., & Ortiz, J. C. (2013). Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, 39, 16-25. doi:10.1016/j.apgeog.2012.11.018



- IDEAM, IAvH, Invemar, SINCHI e IIAP. (2013). *Impacto del clima en Colombia y Cambio climático Global. Informe del estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables 2011*. Tomo 1, Bogotá, D.C.
- Moreno, J. M., Sánchez, J. M., & Espitia, H. E. (2020). Use of computational intelligence techniques to predict flooding in places adjacent to the Magdalena River. *Heliyon*, 6, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04872>
- Nemec, J. (1986). *Hydrological Forecasting: Design and operation of hydrological forecasting systems, Water science and technology library* (Vol. 5). D. Reidel Publishing Company.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia, Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, XXVIII(107), 201-222.
- Puentes, V., Escobar, F. D., Polo, C. J., Gutierrez, J., Castaño, F., Amado, C., . . . Ramirez, J. G. (2015). *Evaluación Integral y perspectivas del sector acuícola y pesquero de Colombia 2015-2040*. Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca.
- Restrepo A., J. D. (2015). El impacto de la deforestación en la erosión de la cuenca del río Magdalena (1980-2010). *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat*, 39((151)), 250-267. doi:doi: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.141>
- Suescun Díaz, A. F. (2019). *Modelo SARIMA para el pronóstico del nivel del río Magdalena a la altura del municipio de Barrancabermeja*. Trabajo de Grado presentado al programa de Especialización en Estadística Aplicada, Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá.
- UNISDR (a). (2015). *Impacto de los desastres en America Latina y el Caribe 1990-2013 "Tendencias y estadísticas para 22 países"*. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, Ginebra, Suiza. Recuperado el 10 de Noviembre de 2018, de Disponible en: <http://eird.org/americas/docs/impacto-de-los-desastres-en-america-latina-y-el-caribe-1990-2013.pdf>
- UNISDR (b). (2015). *Hacia el desarrollo sostenible: El futuro de la gestión del riesgo de desastres*. Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres,



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, Ginebra, Suiza. Obtenido de Disponible en:
http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/gar-pdf/GAR2015_EN.pdf

Velasco Rivera, A., & Díaz Granados Ortiz, M. (2006). Tendencias e incidencia de los fenómenos macroclimáticos en la hidrología del alto y medio Magdalena. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 16(2), 29-44. doi:<https://doi.org/10.18359/rcin.1231>

Vergara Saturno, L. E. (2020). *Simulación y pronósticos de caudales diarios del río Amazonas usando un enfoque híbrido Wavelet y Redes Neuronales*. Tesis para optar al grado de Magister en Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina, Escuela de Posgrado, Lima-Perú. Recuperado el 16 de Febrero de 2020

Villegas-González, P. A., Ramon-Canon, A. M., González-Méndez, M., González-Salazar, R. E., & De Plaza-Solórzano, J. S. (2017). Territorial vulnerability assessment frame in Colombia: Disaster risk management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*(21), 384-395. doi:[doi:10.1016/j.ijdr.2017.01.003](https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.01.003)

Werner, M., Loaiza, J. C., Rosero MEza, M. C., Faneca Sánchez, M., de Keizer, O., & Sandoval, M. C. (2016). Chapter 12 - Developing Flood Forecasting Capabilities in Colombia (South America). *Flood Forecasting*, 349-368. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801884-2.00012-8>

WHO, World Meteorological Organization. (2009). *Guide to hydrological practices: Volume II, management of water resources and application of hydrological practices* (Vol. Sixth Edition).