

MODELACIÓN DE PRONÓSTICOS HIDROLÓGICOS PARA NIVELES DE  
AGUA EN TIEMPO REAL PARA EL RÍO SAN JORGE, CON FINES DE  
GESTIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIONES EN EL MUNICIPIO DE  
AYAPEL CÓRDOBA

TABATA YAJAIRA BARRIOS GARCIA  
YARUTHZA BARRIOS GARCIA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
BOGOTÁ  
2014

MODELACIÓN DE PRONÓSTICOS HIDROLÓGICOS PARA NIVELES DE  
AGUA EN TIEMPO REAL PARA EL RÍO SAN JORGE, CON FINES DE  
GESTIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIONES EN EL MUNICIPIO DE  
AYAPEL CÓRDOBA

Presentado por:  
TABATA YAJAIRA BARRIOS GARCIA  
YARUTHZA BARRIOS GARCIA

Proyecto - Pregrado  
Modalidad: Trabajo de grado

Dirigido por:  
DARWIN MENA RENTERIA  
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
BOGOTÁ  
2014

## **DEDICATORIA**

A Dios por derramar sus bendiciones sobre nosotras, darnos fuerza para vencer los obstáculos desde siempre.

A nuestra madre por todo el esfuerzo y sacrificio, por brindarnos todo el amor, la comprensión, el apoyo incondicional, la confianza en cada momento y sobre todo en nuestros estudios universitarios.

A nuestro padre por la entrega, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ellos hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos. Ha sido un privilegio ser sus hijas, son los mejores padres.  
Les dedicamos todos nuestros esfuerzos y reconocimientos por todo sacrificio puesto para que pudiésemos estudiar, se merecen esto y mucho más.

A nuestra hermana Sandra y por ti Simón los amamos, fueron un pilar fundamental para alcanzar este logro.

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradecemos a Dios por habernos acompañado a lo largo de este camino, por ser nuestra fortaleza en los momentos difíciles y por brindarnos una vida llena de aprendizaje, experiencia y sobre todo felicidad para culminar este camino que hoy llega a su fin.

Gracias a nuestros padres Fany y Rafael por el apoyo incondicional por los valores que nos han inculcado y por habernos dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de nuestra vida.

A nuestra hermana Sandra y nuestro sobrino Simón por ser parte importante en nuestras vidas, representar la unidad familiar y llenar nuestras vidas de alegría y amor cuando más lo hemos necesitado.

A ti Fabio porque llegar a la cima significa mucho para la familia y para ti  
Al ingeniero Darwin Mena por creer en nosotras y brindarnos la oportunidad de desarrollar nuestra tesis profesional, por su tiempo, dedicación y apoyo mil gracias.

Gracias por la confianza, apoyo y dedicación de tiempo a nuestros profesores que formaron parte de este sueño.

## RESUMEN

El municipio de Ayapel Córdoba presenta una amenaza alta por inundaciones gracias al desbordamiento del río San Jorge y río Cauca y a su ubicación geográfica dentro de la Mojana, el cual para el periodo 2010-2011 en la pasada ola invernal el área inundada fue de 96.668 Ha casi el 50% de su territorio y en donde hubo 26.000 damnificados, 40.000 viviendas y 10.000 hectáreas de cultivos de arroz afectados [1]. Debido a lo anterior es importante una adecuada gestión del riesgo que permita aminorar estos desastres; en efecto a esa gestión se le puede sumar herramientas técnico-científicas como es el caso de modelos de predicción de inundaciones que posibiliten la toma de decisiones de prevención al respecto.

De esta manera, a partir de los valores medios diarios de niveles del río San Jorge, registrados por la estación limnimétrica Marralu, sector Ayapel Córdoba del IDEAM en el periodo correspondiente a 1997-2012 fue posible llevar a cabo la modelación de la ecuación diferencial determinista, siguiendo una serie de etapas que van desde la recolección de la información, desarrollo del modelo conceptual y matemático, parametrización del modelo, validación y simulación del modelo y la evaluación del pronóstico. Adicionalmente, se realizó otra prueba de modelación, donde se ensayó con cantidades limitadas de datos de niveles y se concluye que no es necesario grandes volúmenes de datos para llevar a cabo la modelación de la Ecuación Diferencial Determinista, debido a la adecuada bondad de ajuste que mostró al momento de evaluar su desempeño. Lo que representaría una ventaja al momento de emplear este modelo en zonas donde la información hidrometeorológica es escasa.

El modelo de la ecuación diferencial determinista mostró un buen ajuste cuando se emplearon en la modelación los parámetros -0,1 y 0,1, e incluso cuando se probó con pocos datos en la parametrización y validación de este, donde los pronósticos superaron el 90% de los aciertos. Por el contrario las modelaciones con parámetros 0,3, -0,3; 0,5, -0,5 y 0,7, -0,7 mostraron un ajuste inaceptable debido a que aproximadamente el 95% de los casos superaron la margen de error del 15%.

Por último, los pronósticos hidrológicos son de gran importancia dentro de la prevención del riesgo debido a que es una herramienta 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 o subterráneas (en este caso los niveles de agua iguales o por encima de la cota normal del río). Estos pronósticos se convierten en instrumentos de apoyo a los sistemas de alerta temprana, ya que por medio de boletines, avisos y alertas (amarilla, naranja y roja) comunican y preparan a la comunidad ante diferentes eventos que pueden generar desastres y tomar acciones de evacuación y protección de la vida de las mismas.

## LISTA DE TABLAS

|               |    |
|---------------|----|
| TABLA 1.....  | 26 |
| TABLA 2.....  | 57 |
| TABLA 3.....  | 58 |
| TABLA 4.....  | 62 |
| TABLA 5.....  | 67 |
| TABLA 6.....  | 69 |
| TABLA 7.....  | 71 |
| TABLA 8.....  | 72 |
| TABLA 9.....  | 75 |
| TABLA 10..... | 76 |
| TABLA 11..... | 78 |
| TABLA 12..... | 78 |
| TABLA 13..... | 82 |
| TABLA 14..... | 82 |
| TABLA 15..... | 84 |
| TABLA 16..... | 85 |
| TABLA 17..... | 87 |
| TABLA 18..... | 87 |
| TABLA 19..... | 88 |
| TABLA 20..... | 89 |
| TABLA 21..... | 90 |
| TABLA 22..... | 91 |
| TABLA 23..... | 93 |
| TABLA 24..... | 93 |

## LISTA DE FIGURAS

|                 |    |
|-----------------|----|
| FIGURA 1 .....  | 23 |
| FIGURA 2 .....  | 24 |
| FIGURA 3 .....  | 25 |
| FIGURA 4 .....  | 32 |
| FIGURA 5 .....  | 32 |
| FIGURA 6 .....  | 33 |
| FIGURA 7 .....  | 38 |
| FIGURA 8 .....  | 39 |
| FIGURA 9 .....  | 39 |
| FIGURA 10 ..... | 40 |
| FIGURA 11 ..... | 59 |
| FIGURA 12 ..... | 60 |
| FIGURA 13 ..... | 61 |
| FIGURA 14 ..... | 61 |
| FIGURA 15 ..... | 63 |
| FIGURA 16 ..... | 64 |
| FIGURA 17 ..... | 65 |
| FIGURA 18 ..... | 65 |
| FIGURA 19 ..... | 66 |
| FIGURA 20 ..... | 68 |
| FIGURA 21 ..... | 70 |
| FIGURA 22 ..... | 70 |
| FIGURA 23 ..... | 72 |
| FIGURA 24 ..... | 73 |
| FIGURA 25 ..... | 74 |
| FIGURA 26 ..... | 77 |
| FIGURA 27 ..... | 78 |
| FIGURA 28 ..... | 79 |
| FIGURA 29 ..... | 80 |
| FIGURA 30 ..... | 81 |
| FIGURA 31 ..... | 81 |
| FIGURA 32 ..... | 83 |
| FIGURA 33 ..... | 83 |
| FIGURA 34 ..... | 86 |
| FIGURA 35 ..... | 87 |
| FIGURA 36 ..... | 89 |
| FIGURA 37 ..... | 91 |

FIGURA 38.....92

## LISTA DE ECUACIONES

|                  |    |
|------------------|----|
| ECUACIÓN 1.....  | 29 |
| ECUACIÓN 2.....  | 30 |
| ECUACIÓN 3.....  | 35 |
| ECUACIÓN 4.....  | 35 |
| ECUACIÓN 5.....  | 35 |
| ECUACIÓN 6.....  | 36 |
| ECUACIÓN 7.....  | 36 |
| ECUACIÓN 8.....  | 36 |
| ECUACIÓN 9.....  | 37 |
| ECUACIÓN 10..... | 51 |
| ECUACIÓN 11..... | 51 |
| ECUACIÓN 12..... | 51 |
| ECUACIÓN 13..... | 52 |
| ECUACIÓN 14..... | 52 |
| ECUACIÓN 15..... | 53 |
| ECUACIÓN 16..... | 53 |
| ECUACIÓN 17..... | 54 |
| ECUACIÓN 18..... | 54 |
| ECUACIÓN 19..... | 55 |
| ECUACIÓN 20..... | 55 |
| ECUACIÓN 21..... | 55 |
| ECUACIÓN 22..... | 55 |

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUCCIÓN .....                                                            | 13 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                                             | 13 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN.....                                                          | 14 |
| 1.3. OBJETIVOS.....                                                              | 16 |
| 1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....                                                     | 16 |
| 1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....                                               | 16 |
| 1.4. ALCANCE .....                                                               | 16 |
| 2. ANTECEDENTES .....                                                            | 18 |
| 3. MARCO CONCEPTUAL .....                                                        | 20 |
| 3.1. ZONA DE ESTUDIO .....                                                       | 21 |
| 3.1.1. ASPECTOS FÍSICOS E HIDROMETEOROLÓGICOS DEL RÍO SAN JORGE 21               |    |
| 3.1.2. INUNDACIONES .....                                                        | 23 |
| 3.1.3. RIESGO Y VULNERABILIDAD .....                                             | 26 |
| 3.2. MODELACION DE PRONOSTICOS HIDROLOGICOS.....                                 | 28 |
| 3.2.1. MODELACION MATEMATICA DETERMINISTA .....                                  | 28 |
| 3.2.2. MODELACION ESTOCASTICA .....                                              | 29 |
| 3.2.3. METODOLOGIA DESARROLLADA POR EXPERTOS DE HOLANDA 29                       |    |
| 3.2.4. METODOLOGIA DESARROLLADA POR EL IDEAM .....                               | 31 |
| 3.3. MODELO DE WIENER PARA LA TOMA DE DECISIONES EN RIESGO DE INUNDACIONES ..... | 38 |
| 3.4. OBJETO DEL PRONOSTICO .....                                                 | 41 |
| 3.5. HORIZONTE Y AREA DEL PRONÓSTICO.....                                        | 41 |
| 3.6. SENCILLEZ Y COMPLEJIDAD DEL MODELO .....                                    | 42 |
| 3.7. RESULTADO DEL PRONÓSTICO.....                                               | 42 |
| 3.8. EVALUACION PORCENTUAL DEL ACIERTO DE LOS PRONOSTICOS 43                     |    |
| 3.9. SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA (SAT) .....                                      | 44 |

|         |                                            |     |
|---------|--------------------------------------------|-----|
| 3.9.1.  | MONITOREO Y PRONOSTICO .....               | 44  |
| 3.9.2.  | SISTEMA DE EMISION DE ALERTAS .....        | 45  |
| 3.9.3.  | RESPUESTA.....                             | 45  |
| 3.10.   | MEDICION DE NIVELES.....                   | 46  |
| 3.10.1. | LECTURA DIRECTA.....                       | 47  |
| 3.10.2. | LIMNIGRAFOS.....                           | 47  |
| 3.10.3. | TOMA DE LOS DATOS DE NIEVEL .....          | 48  |
| 3.11.   | TIPOS DE ESTACIONES.....                   | 48  |
| 4.      | METODOLOGIA .....                          | 50  |
| 4.1.    | RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....         | 50  |
| 4.2.    | DESARROLLO DEL MODELO.....                 | 50  |
| 4.3.    | PARAMETRIZACION DEL MODELO .....           | 52  |
| 4.4.    | VALIDACION DEL MODELO.....                 | 53  |
| 4.5.    | EVALUACION DEL DESEMPEÑO DEL MODELO .....  | 53  |
| 4.6.    | OTRAS MODELACIONES.....                    | 55  |
| 5.      | RESULTADOS.....                            | 57  |
| 5.1.    | PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO .....           | 57  |
| 5.2.    | VALIDACION Y PREDICCION .....              | 62  |
| 5.3.    | EVALUACION DE ACIERTO DEL PRONÓSTICO ..... | 67  |
| 5.4.    | MODELADO EMPLEANDO GAMMA 0.1 .....         | 69  |
| 5.5.    | MODELADO EMPLEANDO GAMMA -0.3 Y 0.3.....   | 73  |
| 5.6.    | MODELADO EMPLEANDO GAMMA -0.5 Y 0.5.....   | 79  |
| 5.7.    | MODELADO EMPLEANDO GAMMA -0.7 Y 0.7 .....  | 82  |
| 5.8.    | MODELACION CON DATOS LIMITADOS .....       | 87  |
| 5.9.    | ANALISIS DEL MODELO .....                  | 93  |
| 6.      | CONCLUSIONES .....                         | 95  |
| 7.      | RECOMENDACIONES .....                      | 99  |
| 8.      | REFERENCIAS.....                           | 100 |

## **1. INTRODUCCIÓN**

Colombia es un país altamente propenso a los desastres, donde las inundaciones son el evento más frecuentemente observado y afectan seriamente a la sociedad y a su dinámica de desarrollo. La predicción hidrológica es un instrumento que puede aportar beneficios sustanciales en el control y gestión de los daños producidos por estos fenómenos extremos [2].

La viabilidad de realizar pronósticos hidrológicos en tiempo real es una característica de los tiempos modernos. Nuestro país, aún se encuentra en la etapa inicial de desarrollo de modelación hidrológica cuantitativa con fines de alertas por crecidas, inundaciones y sequías [3]. Sin embargo, no ha sido ajeno a la corriente internacional que dictó las pautas para establecer no sólo redes de monitoreo sobre el recurso hídrico, sino también sistemas de alerta temprana que ayudan a tomar ventaja de la información hidrológica en tiempo real y de su conjunción con los avances en ordenadores y medios de comunicación [3].

Por tal motivo en este trabajo se desarrolla una modelación hidrológica mediante la aplicación de la Ecuación Diferencial Determinista, para la predicción cuantitativa de los niveles del agua en tiempo real del río San Jorge, que sirva como instrumento de gestión del riesgo por parte de las autoridades competentes y al sistema de alertas tempranas; es decir, se analiza la posibilidad de emitir pronósticos hidrológicos basados en una técnica que contempla ecuaciones matemáticas.

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El municipio de Ayapel en el departamento de Córdoba, está situado en el noroccidente Colombiano y es bañado por las aguas del río San Jorge y la Ciénaga de Ayapel, este municipio hace parte de la ecorregión la Mojana que pertenece a la Depresión Momposina, conocida por su riqueza ambiental ecosistémica y función reguladora hídrica. La Mojana permanece inundada buena parte del año debido a que es gran parte una llanura aluvial por lo que el terreno es plano y la mayoría de la población se encuentra en zonas poco emergidas [4]; es por esto que en esta zona debe haber un mayor control, especialmente cuando las actividades económicas de los municipios del bajo San Jorge dependen en una

gran medida de los niveles pluviales, como la pesca; además la mayor parte de la población de la zona se encuentra asentada a orillas de este río [4].

De esta manera el municipio de Ayapel es considerado como área inundable debido a su ubicación geográfica dentro de la ecorregión La Mojana. Para el periodo 2010-2011 en la pasada ola invernal el área inundada en Ayapel fue de 96.668 Ha sabiendo que el área total del municipio es de 193.441 Ha y en donde hubo 26.000 damnificados, 40.000 viviendas y 10.000 hectáreas de cultivos de arroz afectados [1], es por esto que Ayapel es uno de los principales municipios de Córdoba más vulnerables a las amenazas por inundaciones.

Aunque Ayapel y la Mojana cuentan con un plan de intervención integral para la reducción del riesgo de inundación en la Mojana, además de las labores en gestión del riesgo realizadas por la CVS (Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge) en la cuenca del Río San Jorge y el Plan Departamental de Gestión del Riesgo en Córdoba, estas no se apoyan en modelos de pronósticos hidrológicos que permitan alertar a las poblaciones ribereñas sobre la posibilidad de inundaciones [5] [1]. Por esta razón es imprescindible, contar con pronósticos en tiempo real de la dinámica de los niveles de agua en el río San Jorge, para soportar decisiones en la gestión del riesgo en el municipio de Ayapel por parte de las entidades competentes.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

El territorio de Ayapel por estar ubicado en una zona estratégica en La Mojana la cual es una de las zonas más inundables del país, además de estar rodeada por el Río San Jorge y la Ciénaga de Ayapel [4], es más propenso a sufrir inundaciones como se evidenció la pasada ola invernal, en donde los niveles del agua de la cuenca del río San Jorge y el río Cauca estuvieron por encima del valor de referencia, los cuales provocaron crecidas, desbordamiento de las aguas, inundaciones, y por ende afectó gravemente a la población y su dinámica de desarrollo, pérdidas materiales y humanas, pérdidas masivas de cultivo y ganado, daño a infraestructuras y efectos ambientales [1].

Y aunque es imposible controlar y evitar en un 100% que aparezcan las crecidas puesto que es un evento natural, por medio de la predicción hidrológica se podría aminorar la vulnerabilidad y riesgo por inundación, ya que se sabrá con anterioridad la magnitud en tiempo y espacio de la aparición de la inundación y por lo tanto tomar decisiones de prevención al respecto.

La gestión del riesgo es de gran importancia porque permite reducir y/o prevenir los desastres, mediante medidas y estrategias que brinden protección permanente contra los efectos de los desastres y los medios de vida más vulnerables. También es importante porque permite una preparación adecuada ante una amenaza mediante, el establecimiento de sistemas de alertas tempranas que prevengan y minimicen el riesgo.

Los científicos advierten, a nivel internacional y nacional, que los pronósticos se están utilizando cada vez con mayor frecuencia con el objeto de orientar las decisiones en una diversidad de campos ambientales. La razón de ser de un pronóstico hidrológico es entregar la información suficiente a la autoridad competente referente a la probabilidad (cuantitativa o cualitativa) de un estado de las características de las aguas superficiales o subterráneas (ya sean niveles del agua, caudal, volumen u otra característica como cantidad de sedimentos, calidad, etc.), que represente adversidad para el desarrollo económico, bienestar social y equilibrio ambiental; permitiendo de esta manera la toma de decisiones en la prevención y gestión del riesgo de las inundaciones y así obtener el beneficio máximo o las pérdidas mínimas en la ocurrencia de estos desastres [3].

En este intento aparecen modelos de pronósticos hidrológicos, unos basados en principios matemáticos que definen la dinámica de los procesos hidrológicos, como las ecuaciones diferenciales deterministas, que permiten hacer predicciones hidrológicas, sin tener en cuenta todos los parámetros y variables que identifican a los modelos basados en leyes físicas; por el contrario, cuando el conocimiento del modelador con relación al sistema es muy pequeño o incluso nulo, se establecen relaciones matemáticas que a unos determinados valores de las variables de entrada hacen corresponder a otros para las variables de salida. Las relaciones matemáticas se establecen por calibración sin que se conozca de qué forma pueden ser relacionadas las variables [6]. Por otro lado, se considera que en la modelación hidrológica rige el principio de la parsimonia; en igualdad de condiciones, los modelos sencillos son preferibles a los más complicados [7] [3].

Es por esto que en este proyecto se desarrolló una modelación hidrológica mediante el uso de la Ecuación Diferencial Determinista, para la predicción cuantitativa de los niveles del agua en tiempo real del río San Jorge, que apoye y complemente la gestión del riesgo por parte de las autoridades competentes y al sistema de alertas tempranas.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Aplicar un modelo de Ecuación Diferencial Determinista, con el fin de pronosticar los niveles diarios de agua en el río San Jorge para soportar decisiones en la gestión del riesgo en el municipio de Ayapel.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Parametrizar la Ecuación Diferencial Determinista, en función de los niveles medios diarios del río San Jorge.
- Validar el modelo matemático, mediante el uso de la Ecuación Diferencial Determinista, para los niveles medios diarios registrados en la estación limnimétrica de la estación Marralu, sector Ayapel Córdoba.
- Evaluar el grado de acierto de los pronósticos dados por el modelo.

### **1.4. ALCANCE**

Este proyecto se limita al desarrollo y aplicación de la Ecuación Diferencial Determinista, cuya finalidad será la predicción de los niveles del río San Jorge.

Por otro lado, además de encontrar el valor del parámetro óptimo que arroje el menor error en la parametrización, con el cual se realiza la validación del modelo; se efectúa también un ensayo, de manera que se pruebe los diferentes valores de parámetros de la Ecuación Diferencial Determinista para determinar con que otros se podría obtener un mejor pronóstico.

En este proyecto no se tendrá en cuenta otras técnicas de predicción como lo son los modelos basados en la probabilidad entre ellos los ARMA y ARIMA y tampoco el desarrollo de modelos de inteligencia artificial como lógica difusa, ni redes neuronales. Tampoco tendrá en cuenta leyes físicas de modelos hidrológicos e hidráulicos en la que variables y parámetros son completamente conocidos. Puesto que perfectamente por ser las EDD, modelos de caja negra, en los cuales el conocimiento de las leyes físicas que rigen un sistema es casi nulo, se establecen relaciones matemáticas en los que determinados valores de variables de entrada hacen corresponder a otros para las variables de salida. Por otro lado

este trabajo se limita a la aplicación de la modelación determinística con fines predictivos, sin llegar a elaborar un mapa de riesgos identificando zonas con mayores amenazas por inundaciones en el municipio de Ayapel.

## 2. ANTECEDENTES

Colombia aún se encuentra en la etapa inicial de desarrollo de modelación hidrológica cuantitativa o matemática con fines de alertas por crecidas, inundaciones y sequías. Por ejemplo no existe ningún municipio o comité local de emergencia que cuente con un sistema de prevención, en tiempo real, de las inundaciones locales [3].

Sin embargo, nuestro país no ha sido ajeno a la corriente internacional que dictó las pautas para establecer no sólo redes de monitoreo sobre el recurso hídrico, sino también sistemas de alerta temprana que ayudan a tomar ventaja de la información hidrológica en tiempo real y de su conjunción con los avances en ordenadores y medios de comunicación. En el año 1976 Colombia, con el Servicio Colombiano de Hidrología y Meteorología (SCMH), incursionó en predicción hidrológica con el modelo Sacramento, que se operaba con tarjetas perforadas y asimilaba información transmitida por radio y teléfonos convencionales [8].

Al inicio de los 90, se creó el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) a partir de la reestructuración del Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT), tomando auge nuevamente la necesidad de implementar un mejor sistema de alertas y pronósticos de los eventos hidrológicos extremos (inundaciones y estiaje); además creó el “Protocolo para la emisión de pronósticos hidrológicos” el cual determina unos lineamientos y aproximaciones matemáticas de modelación para predecir especialmente niveles y caudales de un río; además incentiva la necesidad de intensificar la investigación en la modelación hidrológica, en tiempo real, con el fin de prever la dinámica de las variables de nivel del agua, caudal líquido y sólido y variables de calidad del agua, puesto que muchas de las tragedias en gran cantidad de municipios, embalses y represas, cultivos y otros sectores, se pueden evitar si se logra desarrollar una cultura del prever hidrológico en tiempo real. Por lo que este ámbito requiere ser reforzado en los programas de pregrado y posgrado de las universidades [3].

De esta manera un primer acercamiento en la predicción hidrológica, fue el desarrollo de un modelo hidrológico determinista que funciona en tiempo real para el sistema de abastecimiento de agua del acueducto de la ciudad de Cúcuta (Norte de Santander), el cual contempla una metodología de pronóstico de los niveles pentadales (periodos de 5 días) del río Pamplonita en la estación hidrológica La DonJuana. Estos resultados permitieron confirmar la posibilidad de

pronosticar en forma científica los niveles del agua en el río Pamplonita, Norte de Santander [9].

También se destaca otro estudio en materia de pronósticos, en el que se aplicó la teoría de los procesos estocásticos para la prevención en tiempo real (en términos de días o semanas) del riesgo por desabastecimiento de agua en los sistemas de riego para la agricultura, en la cual se tienen en cuenta aspectos teóricos y metodología a emplear [10].

Otro aporte llevado a cabo en nuestro país, es la viabilidad de pronósticos hidrológicos de niveles diarios, semanales y decadales en Colombia para 20 estaciones hidrológicas que soporta el servicio de alertas del IDEAM, en la que se aplica un modelo matemático de Combinaciones lineales adaptativamente óptima (CLAO) y se muestra que los pronósticos de niveles diarios, semanales y decadales tienen una viabilidad de pronóstico satisfactoria para el 70% de los casos estudiados [8].

Por otro lado la Universidad Nacional ha implementado una metodología de pronósticos por medio de Lógica Difusa y conjuntos difusos, en la cual se aplicó para el pronóstico de los niveles medios diarios del río Magdalena en la estación limnigráfica de Puerto Salgar, Colombia. El pronóstico de niveles diarios de ríos en Colombia se reporta oficialmente en términos lingüísticos, este hecho inspiró un modelo basado en la teoría de conjuntos difusos, concepto proveniente de la inteligencia artificial [9].

En otro estudio realizado de la cuenca media del río Bogotá, se aplicó el modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundación en tiempo real. El modelo se basa en ecuaciones diferenciales determinísticas, que al ser solucionadas en la estructura del modelo de simulación hidráulica Hec-Ras permiten pronosticar la dinámica de los niveles del agua en los eventos hidrometeorológicos extremos de inundación [11].

Estos esfuerzos en materia de modelación hidrológica en tiempo real, permiten asegurar que en la actualidad es posible aplicar una metodología de pronóstico de amenaza por inundaciones en tiempo real basado en la dinámica de los niveles del agua en los ríos de Colombia.

### 3. MARCO CONCEPTUAL

La hidrología puede ser entendida como la ciencia que trata con las aguas, su ocurrencia, circulación, distribución, sus propiedades química y física y su interacción con el medio ambiente. Su premisa básica es que el agua dulce es un recurso limitado y vulnerable, esencial para la vida, el desarrollo y medio ambiente.

En un enfoque adecuado, la hidrología hace uso de la hidrometría, para el registro de diferentes tipos de datos como niveles, velocidades caudales, entre otros. Estos datos son la base para la producción de información hidrológica, que a través de su tratamiento, modelación y simulación, producen el conocimiento de base para abordar la toma de decisiones sobre una base científica sólida.

En el campo de la hidrología, al igual que en otras ramas de la ciencia y de la técnica, el auge experimentado por los modelos matemáticos en los últimos años ha sido muy importante. Con la modelación de los sistemas hidrológicos se persigue una identificación de estos, con un cierto grado de aproximación con un modelo matemático, con objeto de analizar el funcionamiento de los sistemas y mejorar la visión de los mismos, al poder simular distintas situaciones hipotéticas [12].

Tradicionalmente en Hidrología se clasifican los modelos en deterministas y estocásticos, soportando esta división en los principios matemáticos y físicos que definen la dinámica de los procesos hidrológicos. Además de clasificar los modelos en deterministas y estocásticos se agregan otras características como las lineales, no lineales, sencillos o complejos, con parámetros agregados (concentrados) o distribuidos, entre otras. En Hidrología se suelen desarrollar modelos de pronósticos que expresan los siguientes resultados [9]:

1. Cuando el estado futuro del proceso hidrológico en estudio se describe mediante cualidades: aumentará, disminuirá, sufrirá alteraciones, etc; esta clase de predicciones les denominaremos *predicción cualitativa*;
2. Cuando el estado futuro se describe mediante cualidades y acercamientos cuantitativos: se esperan máximos que superaran el nivel promedio multianual de producción; esta clase de predicciones les denominaremos *predicción cualicuantitativa*;
3. Cuando la dinámica se describe en términos cuantitativos: el aumento

alcanzará un 30% por encima del promedio de producción o el caudal mensual será de 100 metros cúbicos por segundo; esta clase de predicciones les denominaremos *predicción determinista cuantitativa*;

4. Cuando la dinámica se describe en términos probabilísticos de manera gráfica ó tabular. esta clase de predicciones les denominaremos *predicción estocástica cuantitativa*.

A continuación se presenta una descripción de las características de la zona en estudio, se explica los modelos matemáticos más empleados en pronósticos hidrológicos, las metodología de pronósticos realizados en Colombia y el mundo, y por último, las etapas de desarrollo de un pronóstico hidrológico para la toma de decisiones, los principales elementos que lo componen y como funciona un Sistema de Alerta Tempranas como mecanismo de prevención del riesgo.

### **3.1. ZONA DE ESTUDIO**

#### **3.1.1. ASPECTOS FÍSICOS E HIDROMETEOROLÓGICOS DEL RÍO SAN JORGE**

La Mojana, pertenece a la región fisiográfica del Caribe colombiano y a la región geográfica de la Depresión Momposina, conformada por el río Magdalena, el río Cauca desde Colorado (Antioquia) hasta su desembocadura en el Brazo de Loba y el río San Jorge desde la ciénaga de Ayapel hasta su desembocadura en el Brazo de Loba [4].

La ecorregión comprende a su interior dos zonas diferenciadas: *los municipios del núcleo central*, localizados en los ecosistemas geoestratégicos, principalmente en las áreas inundables y zonas de humedales. La otra zona corresponde *al área inmediata de los ecosistemas estratégicos regionales*, donde se ubican la mayoría de los asentamientos poblacionales y que están en zonas emergidas, sujetas en menor medida al riesgo de inundaciones [4].

Por tal motivo, es preciso decir que el municipio de Ayapel pertenece a la zona del núcleo central o áreas inundables, de manera que, en los últimos años ha venido presentado fuertes inundaciones a causa de las crecidas del río San Jorge.

El río San Jorge nace en límites entre los departamentos de Antioquia y Córdoba, específicamente en el nudo de Paramillo, en la cordillera occidental. Su recorrido

se da en dirección sur-norte, con una extensión de 368 kilómetros, un caudal promedio mensual de 204 metros cúbicos por segundo y una cuenca que alcanza las 965.000 hectáreas. Transita entre las serranías de San Jerónimo y Ayapel para luego atravesar las ciénagas de Ayapel, de San Marcos Y Machado, en la Depresión Momposina. Después de recorrer las llanuras del Caribe Colombiano desemboca en Boca de San Antonio, convirtiéndose en afluente del río Cauca, para finalmente verter sus aguas en el Brazo de Loba, una vía alterna del río Magdalena [13].

De acuerdo con la corporación para el desarrollo sostenible de La Mojana y el San Jorge (Corpomojana), el clima predominante en la zona es de bosque húmedo tropical, lo que indica que solo hay temporadas secas y húmedas. La precipitación promedio anual es de 2,179mm <sup>1</sup>. La humedad relativa alcanza su máximo nivel en marzo y noviembre, con un 90%; el mínimo entre julio y agosto, con un 70%. El brillo solar promedio anual es de 5,39 horas/día, alcanzando su máximo nivel en enero, con 7,63 horas/ día y el mínimo en abril, con 3,85 horas/día [13].

En la figura 1 se observa la ubicación de la cuenca del Rio San Jorge la cual está representada por el circulo color verde<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> QUINTERO LOPEZ, Luis Fernando. Estudio hidrológico e hidráulico del Rio San Jorge, Estación Marralu, Municipio de Ayapel. Medellín. 2010. <https://es.scribd.com/doc/61653016/Estudio-Hidro-San-Jorge-Final>

<sup>2</sup> GOBERNACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA. Plan Departamental de la gestión del riesgo de Córdoba. Montería. 2012



**Figura 1** Cuencas hidrográficas del Departamento de Córdoba  
*Fuente:* Gobernación Departamental de Córdoba

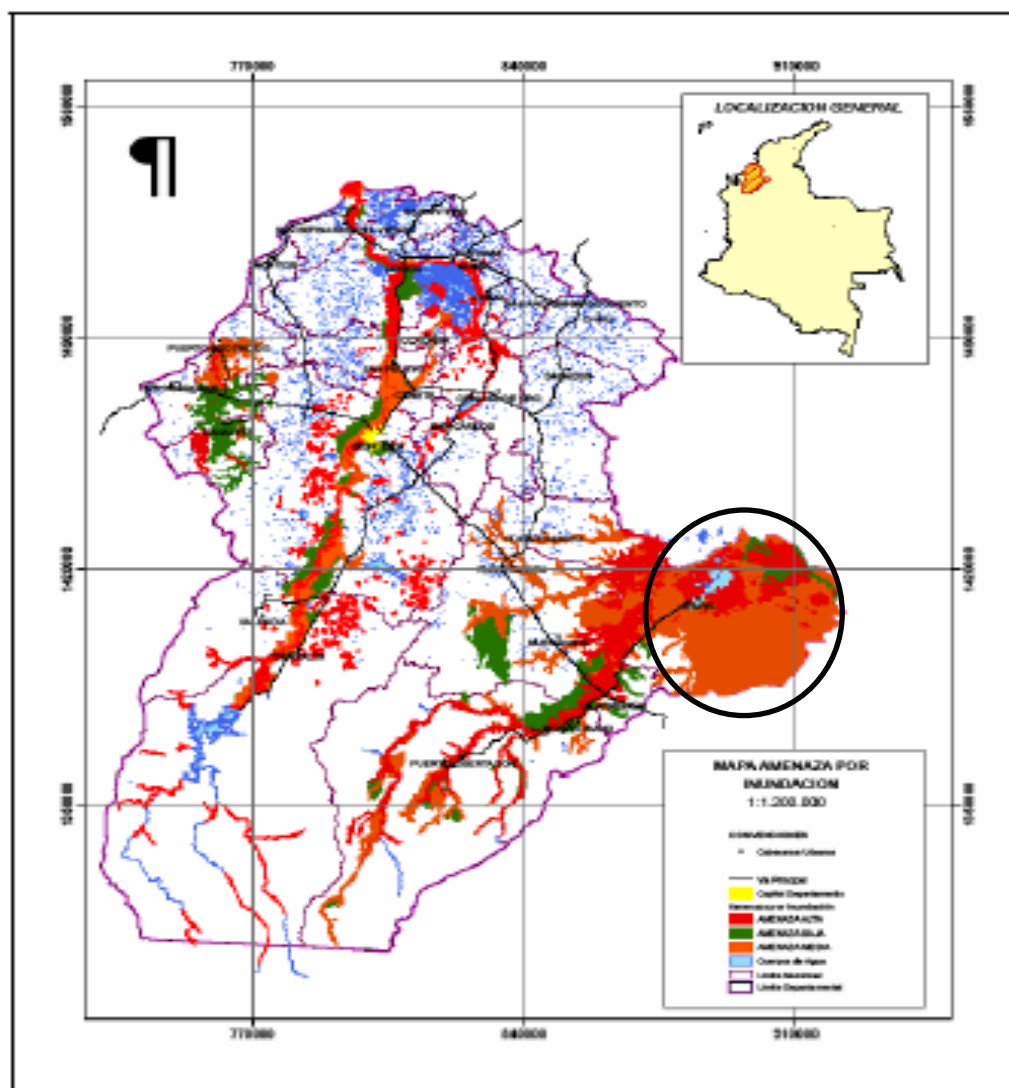
### 3.1.2. INUNDACIONES

Las inundaciones en la subregión San Jorge tienen una frecuencia alta con una intensidad alta y territorio afectado alto lo que le da una clasificación de amenaza alta como se aprecia en la figura 2, esto se presenta principalmente por el desbordamiento del río San Jorge y su mayor intensidad se da en los municipios de Ayapel y Buenavista [1].

| Subregiones | Tipo de Amenaza  | Frecuencia |              | Intensidad |              | Territorio Afectado |              | Calificación de la Amenaza |              |
|-------------|------------------|------------|--------------|------------|--------------|---------------------|--------------|----------------------------|--------------|
|             |                  | Valor      | calificación | Valor      | calificación | Valor               | calificación | Valor                      | calificación |
| San Jorge   | Vendavales       | 1          | BAJA         | 2          | MEDIA        | 1                   | BAJA         | 4                          | MEDIA        |
|             | Inundaciones     | 3          | ALTA         | 3          | ALTA         | 3                   | ALTA         | 9                          | ALTA         |
|             | Contaminación    | 3          | ALTA         | 3          | ALTA         | 3                   | ALTA         | 9                          | ALTA         |
|             | Remoción en masa | 3          | ALTA         | 2          | MEDIA        | 1                   | BAJA         | 6                          | MEDIA        |

**Figura 2** Calificación de amenazas en la subregión San Jorge  
*Fuente:* Gobernación Departamental de Córdoba

La subregión del San Jorge presenta un riesgo alto ante las amenazas de inundaciones, la mayor evidencia del riesgo que padecen las poblaciones de esta subregión es Ayapel que ha permanecido inundado por largo tiempo por el desbordamiento del río Cauca y San Jorge [1] como se puede observar en la figura 3.



**Figura 3** Mapa Amenaza por inundación en el departamento de Córdoba  
*Fuente: Gobernación Departamental de Córdoba*

Las fuertes precipitaciones asociadas al fenómeno de La Niña que desde el mes de junio del 2010, con un pequeño receso de aproximadamente 60 días en los meses de enero y febrero del 2011, se presentaron en territorio cordobés o en departamentos cercanos cuyas fuentes hídricas alimentan el flujo hidráulica del departamento de Córdoba, han traído como consecuencias considerables afectaciones tanto físicas como socioeconómicas y ambientales principalmente en los municipios ubicados en las cuencas del río San Jorge y Sinú sin olvidar las

afectaciones presentadas en los municipios localizados en proximidades a las ciénagas y espejos de agua que ocupan este departamento [1].

Las afectaciones territoriales por inundaciones para el periodo 2010-2011, que el municipio de Ayapel presentó fueron: 96.668 hectáreas inundadas lo que representa el 50% de su territorio, 32.702 productos afectados que resultan de su desarrollo económico y agroindustrial, 15.140 personas afectadas y 3500 familias afectadas [1].

### 3.1.3. RIESGO Y VULNERABILIDAD

Después de ocurrida la inundación el riesgo está representado en el valor de todo lo que puede ser afectado y dañado lo cual incluye la vida de las personas y su salud, los bienes e infraestructura y el ambiente.

El riesgo, o daños, que pueden sufrir las comunidades de la cuenca por su inundación, dependen de la existencia al mismo tiempo de la amenaza de las crecientes del río y la vulnerabilidad de la comunidad. A continuación se presenta el análisis de riesgo de nuestra área de estudio, donde se evidencia que el riesgo por inundaciones en el San Jorge es uno de los más altos, junto con el riesgo por contaminación y remoción.

**Tabla 1** Análisis del riesgo en el San Jorge<sup>3</sup>

|           | FENÓMENO         | AMENAZA | VULNERABILIDAD | RIESGO |
|-----------|------------------|---------|----------------|--------|
| San Jorge | Vendavales       | MEDIA   | MEDIA          | MEDIO  |
|           | Inundación       | ALTA    | MEDIA          | ALTO   |
|           | Contaminación    | ALTA    | ALTA           | ALTO   |
|           | Remoción en masa | MEDIA   | ALTA           | ALTO   |

*Fuente:* Gobernación Departamental de Córdoba

<sup>3</sup> CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DE LOS VALLES DEL RIO SINU Y SAN JORGE (CVS). Plan de Gestión Regional. Montería. 2008

Ahora bien, la Gestión del Riesgo es la manera en que se controla o transforma las condiciones ambientales peligrosas de la amenaza, en este caso de las crecientes que causan inundaciones y la forma en que se incrementa la capacidad de la comunidad para reducir su vulnerabilidad, antes de que ocurra una inundación y cualquier evento peligroso [14]. Se sabe que eliminar las crecientes no es posible, pero reducir su peligro si, por medio de medidas estructurales y no estructurales.

En el san Jorge se están llevando acciones de reducción de los factores de riesgo, algunas de ella son de intervención correctiva como la recuperación de cuerpos de agua y adecuación hidráulica de cauces, obras de reducción de la amenaza por avenidas torrenciales e inundación, incorporación de la zonificación de amenaza por inundación [1], recuperación de cobertura vegetal en la cuenca del río, devolviendo la capacidad amortiguadora de las ciénagas, removiendo los obstáculos en las interconexiones, a lo largo del río, también recuperando espacio entre las orillas y los muros de “protección” para que el agua tenga más espacio y pueda explayarse, en vez de elevarse su altura. Por la magnitud de estas soluciones corresponde al Gobierno ejecutarlas, a través de las entidades competentes, que por costo y trámites son a mediano y largo plazo [14].

De acuerdo con el Programa de las NACIONES UNIDAS para el medio ambiente (PNUMA), una de las respuestas más efectivas para reducir la vulnerabilidad humana a los cambios ambientales es reforzar mecanismos de alerta temprana, para tomar acciones para proteger la vida y la propiedad recibiendo alertas a tiempo. Las capacidades de alerta temprana se mejoran, con medios tecnológicos para la observación del ambiente, su evaluación y comunicaciones [14].

Para Colombia Humanitaria un Sistema de Alerta Temprana (SAT) es el conjunto de instrumentos, comportamientos y herramientas que implementa la comunidad, los organismos de socorro y las autoridades para definir los niveles de riesgo ante diferentes eventos que pueden generar desastre y tomar acciones de evacuación y protección de la vida de las comunidades [14].

## 3.2. MODELACION DE PRONOSTICOS HIDROLOGICOS

### 3.2.1. MODELACION MATEMATICA DETERMINISTA

Describen el comportamiento del ciclo hidrológico (o parte de este) en forma de expresiones analíticas que relacionan las interacciones físicas entre sus componentes [6].

Los tipos de modelos deterministas se definen según el grado de conocimiento que el modelador tenga de las leyes físicas que rigen el sistema estudiado [6] [7]. Cuando este conocimiento es muy pequeño o incluso nulo se establecen relaciones matemáticas que a unos determinados valores de las variables de entrada hacen corresponder a otros para las variables de salida. Las relaciones matemáticas se establecen por calibración sin que se conozca de qué forma pueden ser relacionadas las variables. Estos modelos reciben el nombre de modelos empíricos o de **caja negra**. La ventaja de este tipo de modelos es la facilidad de su uso, mientras que como inconvenientes principales tiene la imposibilidad de extrapolar un modelo empírico a zonas o condiciones distintas y el poco conocimiento que aporta el sistema [6].

El otro extremo del espectro es aquel en el que las leyes que rigen el comportamiento del sistema son perfectamente conocidas. Un ejemplo de esto son los modelos basados en leyes conocidas son los utilizados en hidráulica (ecuaciones de Saint Venant) a estos se les denomina modelos deterministas puros o de **caja blanca** o conceptuales. Sin embargo, en muchas ocasiones en hidrología no se puede conocer con exactitud todas las componentes del sistema y sus interacciones, aunque si una buena parte de ellas. Un ejemplo de estos modelos son los de lluvia-escurrimiento. En ellos la variable de entrada es la lluvia, la variable de salida es el caudal y ambas están relacionadas por una serie de ecuaciones que representan con mayor o menor fidelidad, con los procesos que actúan en la cuenca como la evapotranspiración. Pero aunque estos fenómenos se conocen bien, no así las relaciones funcionales entre ellos [7].

Además los modelos determinísticos poseen un segundo criterio de clasificación según se atiende a la variabilidad espacial de los parámetros y/o variables. En los modelos aglutinados, no se considera variabilidad espacial y se representan con ecuaciones diferenciales y por el contrario los modelos distribuidos, se considera la variabilidad espacial de variables y parámetros y están representados por ecuaciones en derivadas parciales [7].

### 3.2.2. MODELACION ESTOCASTICA

Carecen de base físicas, y expresan en términos de probabilidad el resultado de procesos altamente aleatorios. Los modelos estocásticos de simulación más conocidos son: Modelos de Regresión Lineal, Modelos Autorregresivos, Modelos de ruido Fraccionado y Modelos ARIMA. Un modelo matemático que representa un proceso estocástico se le denomina también modelos de series de tiempo. Este modelo tiene una estructura matemática y un conjunto de parámetros. Una expresión general sería la siguiente [12]:

$$Y = f(Y_{t-1}, Y_{t-2} \dots Y_{t-n}, X_t, X_{t-1}, \dots, X_{t-m}, \theta) + \varepsilon_t \quad \text{Ecuación 1}$$

dónde:

$Y_{t-i}$  : Vector de salida

$X_{t-1}$  : Vector de entrada

$\theta$  : Vetor de parametros del modelo

$\varepsilon_t$  : Vector de residuos o errores en el instante t

### 3.2.3. METODOLOGIA DESARROLLADA POR EXPERTOS DE HOLANDA

En Colombia, en los años 70, mediante el Acuerdo administrativo entre el Gobierno de Colombia y el de los Países Bajos firmado el 5 de octubre de 1970, el Ministerio de Obras Públicas se propuso tener un mejor conocimiento y comprensión del régimen hidrológico y morfológico de los ríos para hallar las soluciones satisfactorias de los problemas de congestión del tráfico relacionado con la navegación fluvial [3].

En ese entonces, una recomendación importante resultó ser la predicción de los niveles del agua, dado que durante la temporada de estiaje los operadores de río requerían conocer con ciertos días de anterioridad el nivel del agua que se presentaría para poder cargar las embarcaciones con el máximo calado permisible. Así por ejemplo, en ese entonces se razonaba de la siguiente manera “cuando hay que transportar cargamentos desde Barrancabermeja a Puerto Salgar y se conoce la profundidad mínima disponible en este trayecto del río Magdalena, la posibilidad de predecir de antemano los niveles del agua en Puerto

Berrío (un día) y en Puerto Salgar (tres días) le permitirá al operador cargar sus planchones con un calado tal que ya no deberá considerar demora innecesaria alguna en los cruces para esperar niveles de aguas altas. Sin embargo, en el párrafo 2.5 se ha descrito la imposibilidad de establecer las curvas de relación para el río Magdalena con cierto grado de exactitud. Por esta razón debe resultar claro que también es imposible predecir los niveles del agua. Una vez establecida una red más densa de fluviómetros a lo largo del río Magdalena para cierto número de años y tomando asimismo en cuenta las lecturas de los fluviómetros en la zona alta del río Magdalena, deberá estudiarse con mayor detalle la posibilidad de predecir los niveles de agua. Con la información actualmente disponible (1973) hay que considerar como imposible predecir los niveles de agua” (Ministerio de Obras Públicas, 1974) [3].

A pesar de las restricciones señaladas, los expertos recomendaron un modelo como primera tentativa, estudiando el descenso del nivel del agua en Calamar (dado en el hidrograma) y teniendo en cuenta los caudales y la cantidad de precipitación efectiva en algunos sitios. El modelo propuesto tiene la siguiente expresión [3]:

$$R_{C_t} = R_{C_{t_0}} e^{(-\alpha t) + R_{LV} (t - \Delta t_1) + R_G (t - \Delta t_2)} \quad \text{Ecuación 2}$$

en donde,

- $R_{C_t}$  - descarga del río Magdalena en Calamar, tiempo futuro,
- $R_{C_{t_0}}$  - descarga del río Magdalena en Calamar, tiempo inicial,
- $R_{LV}^*$  - descarga relativa del río Cauca en Las Varas,
- $R_G^*$  - descarga relativa del río Magdalena en Gamarra,
- $\alpha, \gamma, \beta$  - coeficientes a determinar a partir de las curvas de

depleción respectivas,

$t$  - tiempo,

$\Delta t_1, \Delta t_2$  - Períodos de retraso debidos a la translación.

Por medio de la ecuación 2 se proponía calcular la descarga en Calamar y transformarla en nivel del agua en Calamar a partir de la curva de calibración de caudales. Una vez finalizada la comisión de expertos extranjeros, y a pesar del interés estatal en sus recomendaciones y conclusiones para mejorar la navegación sobre el río Magdalena, en las entidades responsables no se logró ni aplicar el modelo propuesto ni desarrollar otro cualquiera [3].

#### **3.2.4. METODOLOGIA DESARROLLADA POR EL IDEAM**

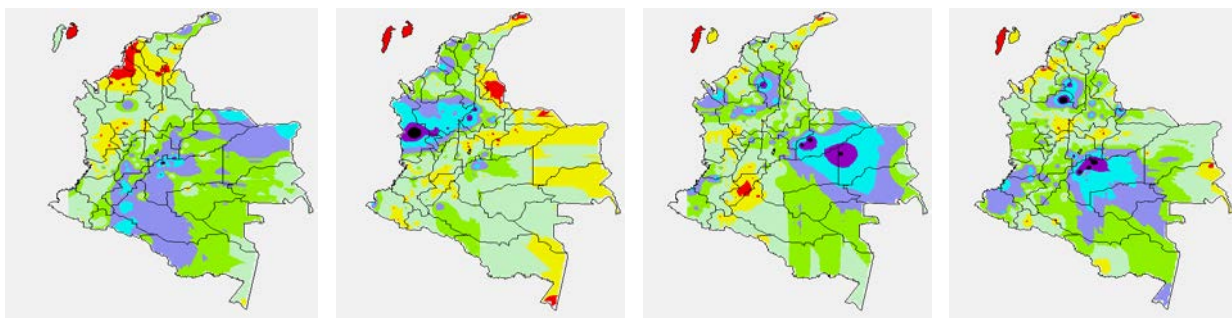
Al inicio de los 90, se creó el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) [9] a partir de la reestructuración del Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT), tomando auge nuevamente la necesidad de implementar un mejor sistema de alertas de los eventos hidrológicos extremos (inundaciones y estiaje) [3].

En el 2000, el IDEAM ya contaba con transmisión en tiempo real de información de niveles del agua para los sitios de Calamar, El Banco, Puerto Berrio y Puerto Salgar. Igualmente se había fortalecido el sistema cualitativo de alertas hidrológicas en el Servicio de Información Ambiental, el cual consistía en lo siguiente. En la mañana de cada día, se daban a conocer la dinámica de las lluvias de los últimos días y también los pronósticos meteorológicos de variables como la precipitación, nubosidad, temperatura del aire a partir de la interpretación de los resultados de modelos foráneos; igualmente se entregaban los resultados del seguimiento de la dinámica de la humedad en el territorio nacional. A continuación se muestra un ejemplo para el día 4 de junio de 2002 [3].

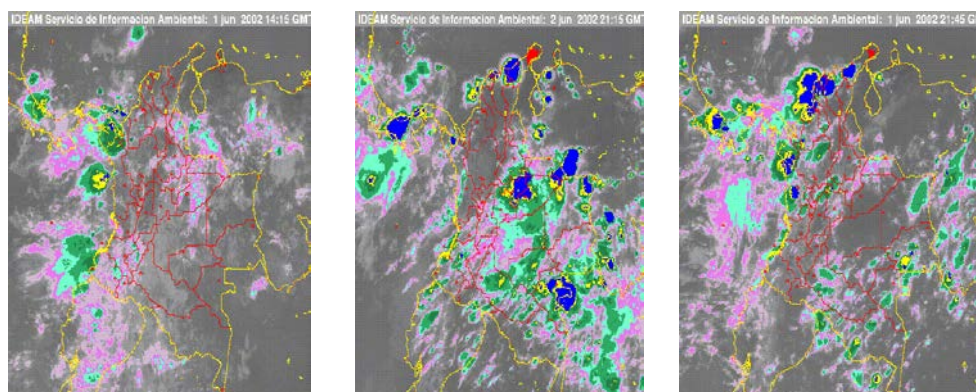
Los pronósticos cualitativos fueron posibles gracias al seguimiento de la dinámica de la nubosidad, de las lluvias sobre el territorio nacional (figura 4 y 5) y de niveles presentados en días anteriores (figura 6), así como también a la experiencia de los expertos en la interpretación de los resultados de los modelos aplicados<sup>4</sup>.

---

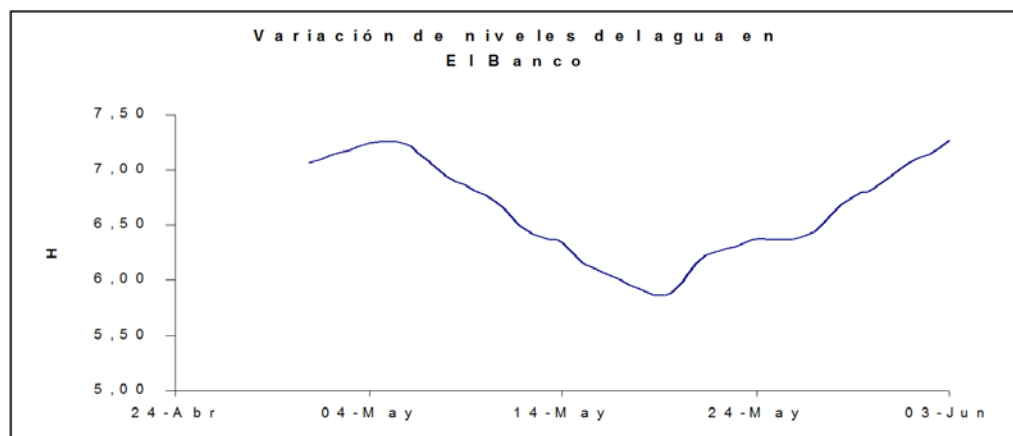
<sup>4</sup> IDEAM. Protocolo para la emisión de pronósticos hidrológicos. Bogotá. 2008

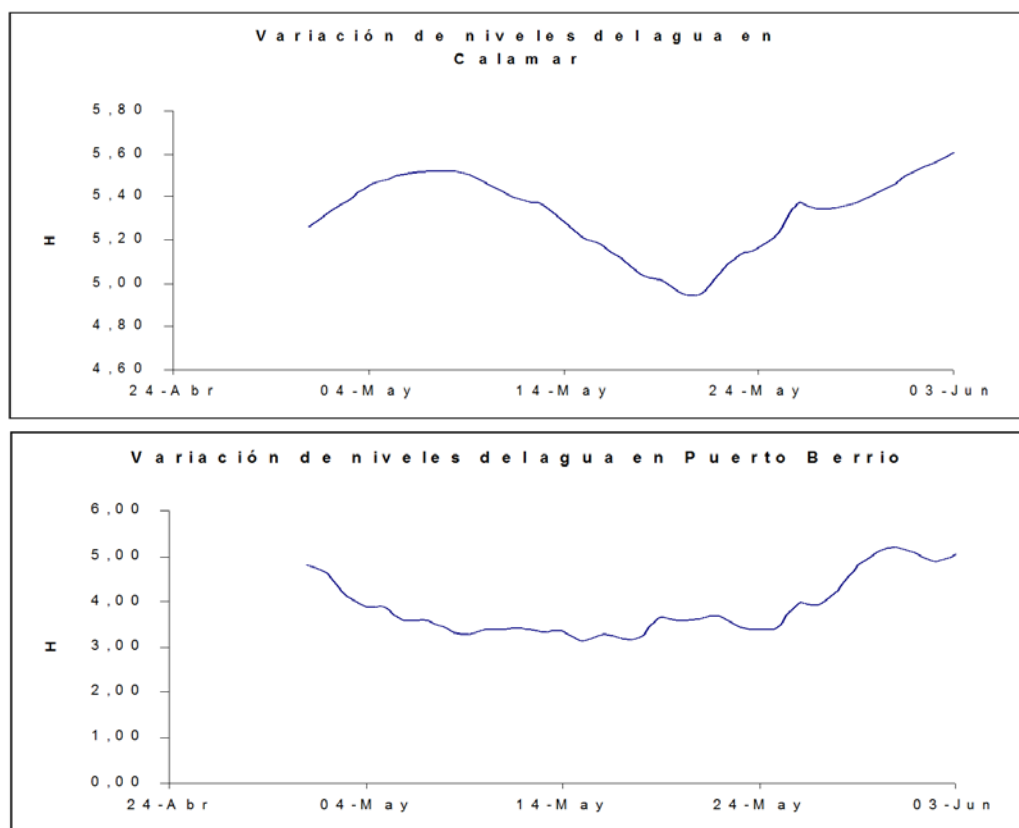


**Figura 4** Variación espacio-temporal de las lluvias diarias antecesoras al pronóstico para el 4 de junio de 2002  
Fuente: IDEAM 2008



**Figura 5** Seguimiento dinámica de la nubosidad en Colombia; imágenes de satélite del 1 al 3 de junio de 2002.  
Fuente: IDEAM 2008





**Figura 6** Ilustración de la variación de los niveles del agua del río Magdalena en los sitios de Puerto Berrio, Calamar y El Banco en mayo y junio de 2002.

*Fuente:* IDEAM 2008

Esta información junto con la obtenida sobre la dinámica de los niveles del agua en la madrugada del 4 de junio de 2002 y en los días anteriores, permitía elaborar ciertas proyecciones cualitativas sobre la tendencia de los niveles para los próximos días.

Para finales del 2002, toma auge el proyecto del gobierno nacional “YUMA”, que pretendía reactivar la navegación sobre el río Magdalena. Dado el renacimiento del interés en mejorar las condiciones de navegabilidad sobre el río, entidades diversas emprendieron una campaña fuerte para invertir recursos económicos en la iniciativa presidencial. CORMAGDALENA y el IDEAM firman el Convenio Interadministrativo No. 202 (numeración IDEAM) 00043 (numeración CORMAGDALENA) cuyo objetivo plantea “Desarrollar herramientas que permitan tomar decisiones concernientes a las actividades de navegación sobre el río Magdalena, con énfasis en el desarrollo, aplicación y calibración de un modelo de

predicción diaria de los niveles del agua del río Magdalena para fines de navegación” [3].

El Convenio 202 de 2002 contempló el montaje, mantenimiento y operación de estaciones hidrológicas, así como también el desarrollo y aplicación de un modelo para pronosticar los niveles diarios del agua en el período de estiaje desde Puerto Salgar hasta Calamar. Para lograr el objetivo planteado las estaciones hidrológicas en Puerto Salgar, Puerto Berrio, El Banco y Calamar fueron mejoradas en su funcionamiento y se adaptó el sistema experto del IDEAM de alertas para los pronósticos de niveles en período de estiaje [3].

La definición del modelo que simula la dinámica de los niveles promedios diarios durante el período de estiaje para los sitios de Calamar, El Banco y Puerto Berrio tuvo en cuenta las siguientes circunstancias: a) el modelo debe pronosticar cuantitativamente el nivel del agua; b) el margen de error del nivel del agua pronosticado diariamente no debe superar el 10%; c) el modelo debe ser aplicable con la información climática e hidrológica existente en tiempo real; d) ) la captura de información por parte del modelo debe ser en tiempo real; e) el modelo debe funcionar automáticamente y en forma manual; f) aunque el modelo funcione en tiempo real debe contar con medidas de validación; g) el pronóstico a emitir debe ser difundido en menos de 1 hora a los navieros para la toma de decisiones respectivas [3].

En este sentido, se descartó el uso del modelo propuesto por la Comisión de Expertos de los Países Bajos por los siguientes motivos: a) los aforos en los sitios requeridos del río Magdalena no cuentan con la instrumentación ni la frecuencia requerida para establecer una relación nivel-caudal que permita pronosticar los niveles con márgenes de error menores al 10%; y b) en la actualidad se cuenta con información climática e hidrológica en tiempo real con mayor cobertura espacial. Aunque una transformación del modelo propuesto es posible, su restricción mayor radica en que pronostica los caudales y exige la relación nivel-caudal para obtener los niveles requeridos. [3]

El análisis del modelo cualitativo aplicado tanto por el IDEAM hasta el 2002 como el aplicado por el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad del Norte permitió establecer las siguientes restricciones en ambos casos: a) para el operario de la navegación es de mejor soporte en sus decisiones conocer el nivel del agua en forma cuantitativa que cualitativa; b) los pronósticos cualitativos que se emiten no permiten establecer márgenes de error medibles cuantitativamente.

En este sentido se adaptó y validó un sistema experto de pronósticos de los niveles del agua para cada día del período de estiaje en los sitios requeridos que retomara las ventajas de los anteriores y eliminara las restricciones de éstos. A continuación se describe el modelo que soporta el sistema experto desarrollado.

Como primera aproximación, la dinámica de los niveles diarios promedios del agua para Calamar, El Banco y Puerto Berrio durante el período de estiaje se planteó el modelo dinámico [3]:

$$\frac{dH}{dt} = f(\tau, \kappa, \xi, H) \quad \text{Ecuación 3}$$

en donde,

- $\tau$  - parámetro que representa a la propiedad de inercia de cualquier sistema ante la influencia de algún factor externo,
- $\kappa$  - parámetro que representa a las propiedades del sistema,
- $\xi$  - parámetros que representa a los factores externos que ejercen influencia sobre el sistema,

se propuso expresar la función (del lado derecho del modelo) de la siguiente manera:

$$f(\tau, \kappa, \xi, H) = \gamma h, \quad \gamma = f(\kappa, \tau) \quad \text{Ecuación 4}$$

en donde, los parámetros  $\gamma$  ,  $h$  representarán a las propiedades internas del sistema y a la propiedad de inercia del sistema ante los factores externos. En este caso, una de estas propiedades se reflejan mediante un valor constante igual a la unidad ( $\gamma = 1$ ), valor que se obtuvo luego del proceso de calibración.

El modelo que simula la dinámica de los niveles del agua toma entonces la siguiente expresión:

$$\frac{dH}{dt} = \gamma h \quad \text{Ecuación 5}$$

Para aplicar este modelo a los sitios seleccionados, se procedió a solucionar la Ecuación Diferencial Determinista (EDD) que le representó. La solución de la EDD se dio mediante aproximación numérica:

$$H_{i+1} = \Delta t \gamma h + H_i \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\gamma = 1, \quad \Delta t = 1 \quad \text{Ecuación 7}$$

$$h = \pm \left| \frac{H_{i-1} + H_i}{\phi} \right| \quad \text{Ecuación 8}$$

en donde,

- $H_i$  - nivel del agua en el sitio de interés, en unidades de metros; el índice “i” indica que se toma el nivel del agua del día en que se realiza el pronóstico;
- $H_{i-1}$  - nivel del agua en el sitio de interés, en unidades de metros; el índice “i-1” indica que se toma el nivel del agua del día anterior al día en que se realiza el pronóstico;
- $H_{i+1}$  - nivel del agua en el sitio de interés, en unidades de metros; el índice “i+1” indica que es nivel del agua que se pronostica para el día siguiente;
- $\phi$  - parámetro, que refleja la relación de los niveles del agua;

Este sistema experto tiene en cuenta la experiencia de los funcionarios de turno, la dinámica de los factores externos (clima, aspectos meteorológicos y sinópticos), expresada por los expertos de las áreas de meteorología y climatología que asisten al Comité de Alertas Ambientales.

El sentido positivo o negativo de  $h$  depende de: a) la cantidad de aguas lluvias precipitadas sobre la cuenca del río Magdalena, b) la tendencia de las lluvias sobre la cuenca, que se obtiene de los pronósticos meteorológicos, c) la tendencia

de la humedad sobre la cuenca, d) el relieve aguas arriba del sitio para el cual se pronostica el nivel del agua.

Este sistema experto permite predecir el nivel del agua en términos de promedios diarios durante el período de estiaje, así como también el nivel promedio mínimo y máximo que se presentará durante el día. Los valores del nivel promedio diario se estiman por la expresión:

$$H = \frac{\sum_{j=1}^n H_j}{n} \quad \text{Ecuación 9}$$

en donde,

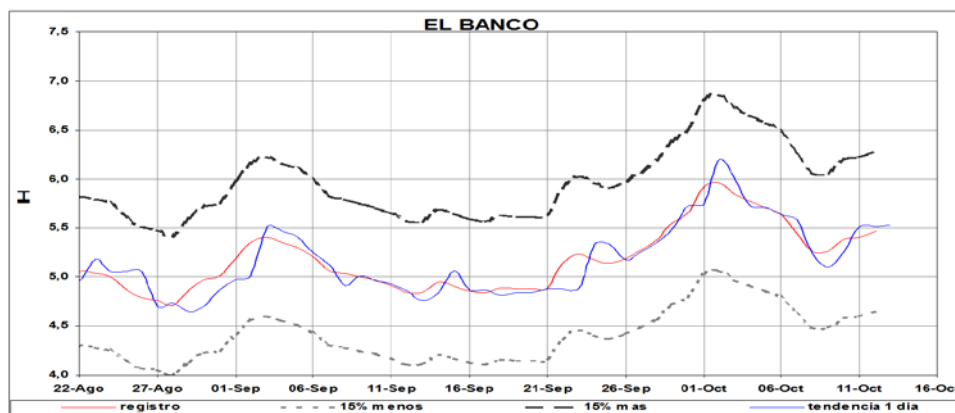
$n$  - cantidad total de valores del nivel del agua,

$H_j$  - nivel del agua diario,

$H$  - nivel del agua promedio, hallado mediante el promedio aritmético.

El modelo desarrollado y validado para los tres sitios, a fecha de 2004 es aplicado diariamente en CORMAGDALENA en Barrancabermeja y se adelantan los primeros ensayos de soporte al sector naviero. Se espera que la plataforma informática generada se mejore, al igual que los márgenes de error de los pronósticos. Sólo en el 2004 se ha iniciado la fase de pronosticar la amenaza del nivel crítico para la navegación en Calamar, El Banco y Puerto Berrio a partir de la Ecuación Prospectiva de Kolmogorov [3].

Resultados de los pronósticos de los niveles diarios que emite el sistema experto se pueden observar en la figura 7, la cual muestra el comportamiento de los niveles medidos registrados, el comportamiento de los niveles pronosticados con el soporte en el modelo, el limite por encima del 15% y por debajo del 15% de los niveles registrados, nos muestra además de esta manera que efectivamente los pronósticos de los niveles se encuentran entre el margen más el 15% y menos el 15% identificadas por la línea azul [3].



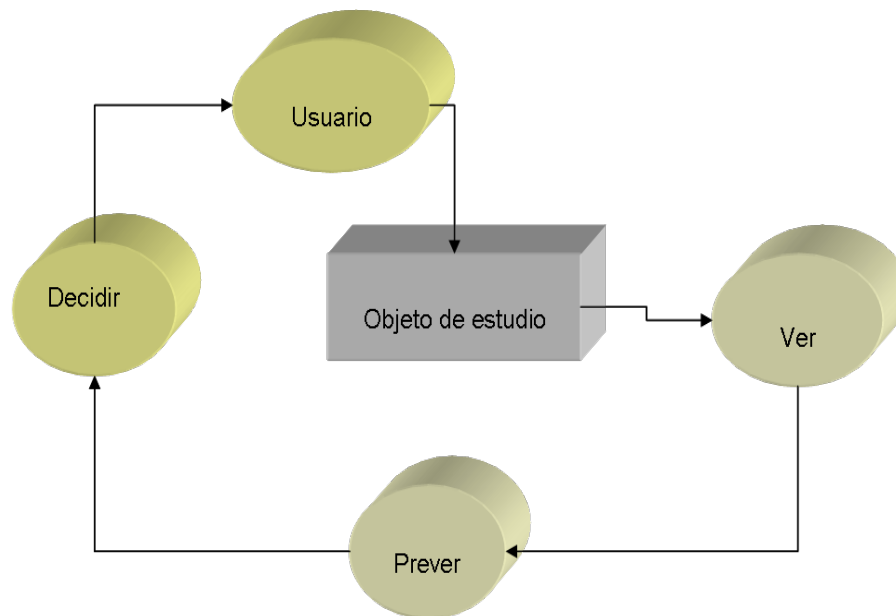
**Figura 7** Comportamiento de los niveles de acuerdo al modelo en la estación el Banco.

*Fuente: IDEAM 2008*

### 3.3. MODELO DE WIENER PARA LA TOMA DE DECISIONES EN RIESGO DE INUNDACIONES

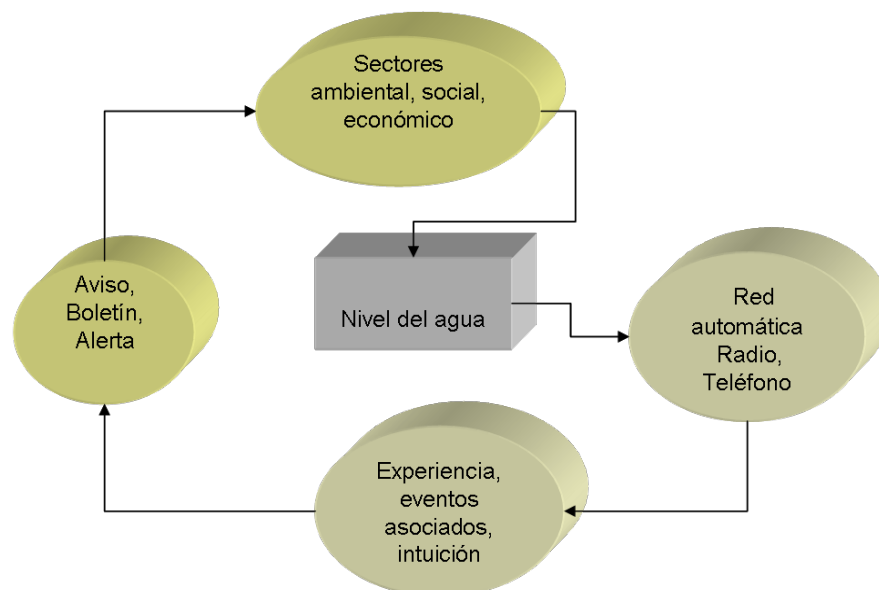
De manera general se puede interpretar la toma de decisiones con riesgo con soporte en el modelo conceptual de Norbert Wiener. En general, el principio cibernético de Wiener (Figura 8), considera tres fases fundamentales, las cuales dan garantía de obtener, a partir de la toma de una decisión, el beneficio máximo ó las pérdidas mínimas. Estas tres etapas como son: el *ver*, *prever* y *decidir*. Se interpreta de la siguiente manera. Inicialmente, se observan y miden las características relevantes del proceso en estudio (el *ver*), posteriormente, con base en fundamentos teóricos y prácticos, mediante un modelo se simula la dinámica del proceso hacia el futuro (el *prever*) y, finalmente, con base en el conocimiento previo de la dinámica futura del proceso en estudio se toma una decisión respectiva [3].

Como se aprecia en la (figura 9), el funcionamiento operacional de la emisión de un aviso, boletín o propuesta de alerta consiste en lo siguiente: generalmente el *objeto de estudio o característica hidrológica* es el nivel del agua en determinado sitio, cuya dinámica es *observada y medida* en tiempo real mediante la red automática de estaciones hidrométricas [3].



**Figura 8** Estructura sistémica general del funcionamiento de una decisión con soporte en pronósticos hidrológicos.

*Fuente: IDEAM 2008*



**Figura 9** Estructura sistémica del funcionamiento operacional de la emisión de un pronóstico hidrológico en el IDEAM.

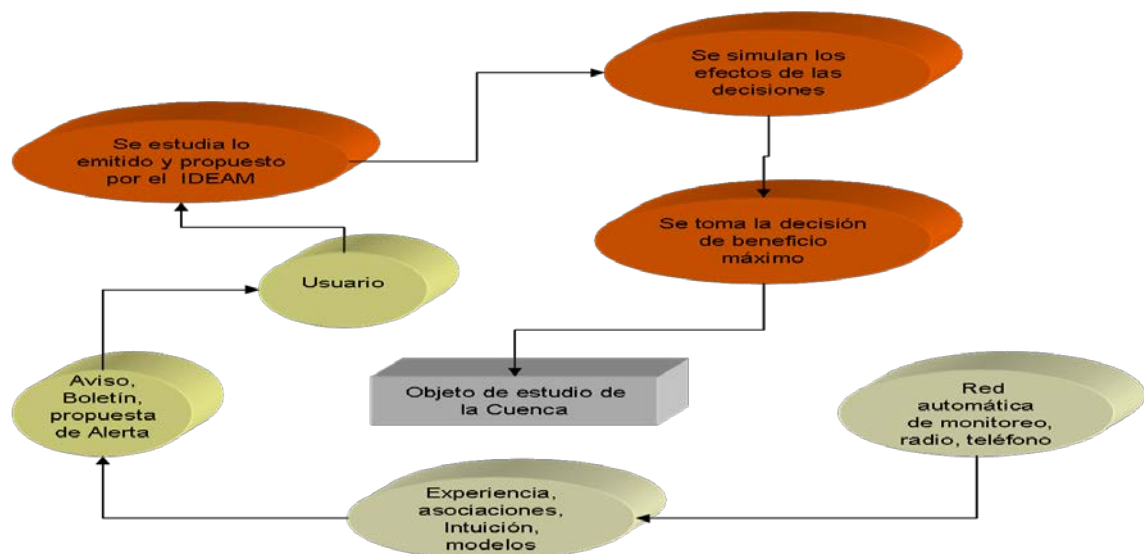
*Fuente: IDEAM 2008*

Valiéndose de medios estratégicos como la radio y el teléfono también se logran transmitir los datos de niveles del agua en tiempo real. Posteriormente, contando

con la información obtenida en tiempo real, teniendo en cuenta la dinámica histórica de la variable de interés y, contando con la dinámica actual e histórica de eventos asociados (naturales como los climáticos, meteorológicos, etc. y, antropogénicos como la regulación de volúmenes de agua en los casos pertinentes, etc.) y su propia intuición profesional, el experto de turno *pronostica* la dinámica futura de la característica en estudio (en nuestro caso el nivel del agua) [3].

Una vez emitido el aviso, boletín o propuesta la alerta, corresponde al usuario tomar las decisiones respectivas (figura 10).

Como se aprecia en este esquema, el funcionamiento operacional de la toma de decisiones por parte del usuario (ya sea del sector económico, social ó ambiental) consiste en lo siguiente: generalmente el usuario obtiene del IDEAM un aviso, un boletín, un comunicado o una propuesta de alerta, luego valiéndose de la dinámica actual e histórica de las medidas a tomar, asociadas al evento probable de suceder y, aplicando su propia intuición y saber profesional, el funcionario responsable en la entidad denominada “usuario” *pronostica* las consecuencias de la medidas que se tomarían y, posteriormente, de acuerdo a criterios de efectividad u optimización, se toma la decisión para atender la situación de tal manera que se garantice el mejor resultado [3].



**Figura 10** Estructura sistémica del funcionamiento operacional de la toma de decisiones por parte del usuario.

*Fuente: IDEAM 2008*

### **3.4. OBJETO DEL PRONOSTICO**

Se debe ser claro en la identificación del objeto, definiendo de antemano si la importancia de la decisión es prever una crecida que se desarrolle en inundación o un período de estiaje que evolucione en el desabastecimiento de agua de una población. Para los diversos sectores de la producción, de prevención y atención de desastres y para el sector ambiental, es claro que algunas crecidas y sequías hidrológicas representan el mayor reto a la hora de tomar decisiones. Por ello, es importante identificar el objeto que se pronosticará.

Cabe señalar que la cantidad y calidad de los datos para desarrollar y aplicar el modelo hidrológico con fines de pronóstico en tiempo real, restringe o favorece el éxito del pronóstico. En Hidrología se sabe que los niveles del agua se miden con márgenes de error que no suelen superar el 1%, mientras que los caudales líquidos, obtenidos mediante el uso de molinetes, presentan errores que pueden superar incluso el 10%, siendo mayor el error de medición para los caudales sólidos y la calidad del agua (cuando su valoración depende del caudal obtenido con molinete). Un modelo hidrológico de pronóstico no puede mejorar la calidad del dato básico que utiliza como fuente y su resultado está intrínsecamente relacionado con esta [3].

### **3.5. HORIZONTE Y AREA DEL PRONÓSTICO**

Es claro que la modelación hidrológica se vuelve una tarea más compleja a medida que el horizonte de previsión se amplía a días, semanas o meses; en igual medida, se torna difícil esta actividad cuando de un sitio pasamos a requerir pronósticos hidrológicos en forma longitudinal a lo largo y ancho de un tramo.

Especificaremos el hecho de que el pronóstico cambia cuando cambia el horizonte de pronóstico. Los pronósticos diarios ofrecen resultados que compilan información diariamente, mientras que los semanales expresan información semanal, etc. Igual sucede con el área de pronóstico, los resultados a escalas locales difieren cuando se amplía la escala. Además, la complejidad física y matemática del modelo hidrológico suele ser mayor en la medida en que se amplía la exigencia espacial [3].

### **3.6. SENCILLEZ Y COMPLEJIDAD DEL MODELO**

La experiencia científica en modelación física demuestra que el uso de modelos matemáticos sencillos suelen ofrecer los resultados requeridos por el sector ambiental; por ello, antes de iniciar el desarrollo de modelos complejos debe comprobarse que las formulaciones sencillas no satisfacen las expectativas planteadas. Se considera que en la modelación hidrológica rige el principio de la parsimonia; en igualdad de condiciones, los modelos sencillos son preferibles a los más complicados, es decir, reina el pragmatismo.

Además de estos aspectos relacionados con la modelación hidrológica en tiempo real, un pronóstico debe reunir las siguientes características: a) indicar el origen e intensidad de la sequía o crecida y el área geográfica o sitio más afectado; b) la información del pronóstico, que se proporcione a los responsables gubernamentales de la toma de decisiones, debe ser, en lo posible, clara, inteligible e inequívoca con respecto al fenómeno previsto; c) su difusión debe ser masiva e inmediata a toda la comunidad; d) debe existir el espíritu de colaboración entre quienes elaboran el pronóstico y los que hacen uso de él.

### **3.7. RESULTADO DEL PRONÓSTICO**

La forma en que se desea recibir el resultado del pronóstico incide rotundamente en el soporte físico y matemático del modelo por desarrollar y aplicar; cuando se exige un valor concreto del nivel del agua se hace énfasis determinístico, mientras que cuando se requiere un conjunto de posibles valores con su respectiva probabilidad de ocurrencia (intervalo de confianza) se recurre a la interpretación estocástica de los procesos.

El tipo de pronóstico está relacionado con la estructura de la decisión que se toma; puede limitarse a exigir un valor concreto o requerir la probabilidad de dicho valor de la variable hidrológica. Un valor concreto (pronóstico puntual) futuro de la variable hidrológica, puede expresarse en forma cualitativa o cuantitativa. Por ejemplo: el nivel del río para mañana se mantendrá en aumento, o el nivel del río será de 3 metros. Un buen pronóstico puntual entrega una orientación fácil de comprender.

De igual forma, el pronóstico se puede expresar como un conjunto de posibles valores con su respectiva probabilidad. Por ejemplo: la probabilidad del aumento del nivel del río es alta para mañana, o con una probabilidad de 0.8 el nivel del río puede alcanzar los 3 metros. Otro ejemplo del pronóstico se relaciona con la densidad de probabilidad. Por ejemplo: con la distribución log normal de probabilidad se espera que el nivel del río se encuentre entre los 2.5 y 3.7 metros.

En la práctica resulta más fácil y rápido desarrollar y aplicar modelos hidrológicos que emiten pronósticos de valor concreto, mientras que prever la densidad de probabilidad, en forma cuantitativa de una variable hidrológica exige un manejo minucioso de la Teoría de Procesos Estocásticos, la cual, en el nivel de formación del ingeniero, no es muy profunda [3].

### **3.8. EVALUACION PORCENTUAL DEL ACIERTO DE LOS PRONOSTICOS**

Generalmente cuando el aplicador obtiene mediante su tecnología valores predictivos de la oferta hídrica para determinado sitio y sector económico, social o ambiental, surge el interrogante sobre la validez de sus esfuerzos científicos y entonces se ve obligado a generar ciertos criterios que le permitan estimar la calidad de su desempeño ingenieril y de su tecnología [9].

Un modelo es una herramienta que sin validar, no permite hacer conclusiones fiables para apoyar los procesos de toma de decisiones. La validación consiste en la comparación de los resultados obtenidos en la simulación con el modelo matemático y los observados en la realidad [15]. Para ello, existen gran cantidad de criterios que de una u otra forma permiten estimar la bondad de ajuste de las tecnologías de predicción; por ejemplo Bathurst J. (1986) aplica el RMS (Root Mean Square) y el EQ (Percent Error) en el análisis de sensibilidad del SHE (System Hydrologique Europeen) en una cuenca determinada [9]

Un criterio que ampliamente se utiliza, consiste en establecer de manera preliminar algunos “intervalos de aceptabilidad de aciertos” que debe cumplir la metodología de pronósticos por ejemplo:

1. los pronósticos que se den con un margen de error menor al 5% con respecto al valor del nivel registrado se consideran muy buenos;
2. los pronósticos que se den con un margen de error entre el 5% y el 10% con respecto al valor del nivel registrado se consideran buenos;

3. los pronósticos que se den con un margen de error entre el 10% y el 15% con respecto al valor del nivel registrado se consideran satisfactorios;
4. los pronósticos que se den con un margen de error superior al 15% con respecto al valor del nivel registrado se consideran no satisfactorios.

Se considera que un pronóstico es acertado si se ubica en la categoría de muy buenos y buenos; es decir, es acertado el pronóstico siempre y cuando el margen de error no supere el 10% [3].

### **3.9. SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA (SAT)**

El Sistema de Alerta Temprana está conformado por un equipo humano técnico científico altamente calificado, soportado en una infraestructura informática (computadores, software, redes de comunicación, estaciones hidrometeorológicas), modelos de pronóstico, y en información (mapas temáticos, datos hidrometeorológicos) que es procesada y analizada, para establecer el posible comportamiento de eventos de menor escala (inundaciones, deslizamientos e incendios) en un periodo determinado (tiempo real) y que pueden ocurrir bajo las condiciones propias de una región [16].

#### **3.9.1. MONITOREO Y PRONOSTICO**

Acciones realizadas por personal voluntario que habita en las comunidades de la parte media o alta de la cuenca y cuya responsabilidad es recolectar información sobre el nivel de los ríos por medio de escalas o sensores y de las condiciones de lluvia.

Esta vigilancia debe de ser más intensa cuando se tiene información oficial y segura sobre la inminente ocurrencia de eventos de lluvia extremos (tormentas, huracanes, temporales, etc.).

Esta información se transmite por radio a las bases de la parte baja de la cuenca y a las autoridades correspondientes para la toma de decisiones.

A este componente del SAT se suman también el pronóstico que consiste en el uso de herramientas creadas para este fin (tablas, fórmulas, mapas, etc.), las cuales deben contener al menos tres informaciones de importancia:

- Niveles del río, el cual corresponde a una cantidad de agua que tiene posibilidades de generar inundaciones en la parte baja de la cuenca y afectar comunidades vecinas.
- Tiempo de arribo, que corresponde al tiempo que tarda la crecida registrada, en llegar a una comunidad o área específica.
- Nombre de comunidades, las cuáles son aquellas que tienen posibilidad de ser afectadas por la crecida del río.

Con esta información, será posible determinar los niveles de alerta que se podrían generar para cada comunidad, dependiendo de los niveles alcanzados por el río y la misma deberá de ser transmitida a las comunidades involucradas e instituciones de coordinación, por medio del sistema de radiocomunicación [2].

### **3.9.2. SISTEMA DE EMISION DE ALERTAS**

Al determinarse la posibilidad de superación de las condiciones limites en el modelo de pronóstico, se debe emitir una alerta hacia líderes de las comunidades que se determinen un riesgo inminente y hacia las entidades locales encargadas de brindar el soporte de la evacuación. Por medio de los sistemas de informacion que se cuenten [2].

### **3.9.3. RESPUESTA**

#### **Boletines**

Se considera Boletín al mensaje oficial, por medio del cual se difunde información. Por lo regular se refiere a eventos observados, reportados o registrados, estos pueden contener algunos elementos de pronósticos a manera de orientación. Por sus características pretéritas y futuras, difiere del aviso y de la alerta, por lo general no está encaminado a alertar sino a informar sobre las situaciones presentadas.

#### **Avisos**

Es un mecanismo de comunicación empleado con el fin de manifestar la presencia de un fenómeno o evento. No implica amenaza inmediata y es catalogado, por lo tanto como un mensaje para informar a las autoridades competentes y al público en general. La emisión de un Aviso implica la vigilancia continua del desarrollo del evento, cuando las condiciones lo ameriten, sin que necesariamente se deba declarar en Alerta.

### **Alertas**

Dentro del Sistema de Prevención y Atención de Desastres es un mensaje empleado para advertir sobre la amenaza que pueda ocasionar un fenómeno con efectos adversos sobre la población y el cual requiere atención inmediata de los cuerpos de atención y socorro y la colaboración de los medios de comunicación y la población en general. Las alertas están relacionadas directamente con la información previa que existe sobre el fenómeno. Se cuenta con tres grados de alertas identificadas por colores, para los eventos hidrometeorológicos específicamente:

- Alerta Amarilla. Se declara cuando la persistencia e intensidad de las lluvias pueden llegar a ocasionar el desbordamiento de los ríos en un tiempo prudencial corto (días).
- Alerta Naranja. Se declara cuando la tendencia ascendente de los niveles en los ríos y la persistencia de las lluvias indiquen una buena posibilidad de que se presenten desbordamientos.
- Alerta Roja. Se declara cuando el nivel de los ríos alcanza alturas críticas que hacen inminente el desbordamiento [3].

### **3.10. MEDICION DE NIVELES**

Se denomina nivel del agua en una corriente (río, quebrada, arroyo, caño) o en un cuerpo de agua (ciénaga, lago, laguna, embalse), a la elevación o altura de la superficie del agua en un punto determinado, el cual está ligado topográficamente a un origen de referencia identificado con una cota arbitraria o al nivel medio del mar [17].

### **3.10.1. LECTURA DIRECTA**

Según el IDEAM las mediciones de los niveles de agua, se pueden dividir en tres clases:

- **Mira hidrométrica o limnómetro:** La mira o limnómetro es una regla graduada de un (1) metro, que se utiliza para medir las fluctuaciones de los niveles del agua en un punto determinado de una corriente o de un cuerpo de agua.
- **De contacto o Limnicontacto:** El limnicontacto o sonda indicadora de profundidad (nivel) es un dispositivo simple y elemental constituido esencialmente por una polea, un contrapeso y un flotador unidos por un cordel o cable abcisado, para facilitar la medición; su operación es sencilla, según el nivel de agua el cable se desplaza con relación a un punto de referencia, permitiendo así obtener la lectura de nivel.
- **Maximétero:** Se puede llamar maximétero a cualquier ingenio asociado a una mira limnimétrica que permita con posterioridad determinar el nivel máximo alcanzado por las aguas. También se denominan instrumentos medidores de crecientes en los ríos, según el tipo de maximétero, el agua se deposita en una serie de recipientes que se encuentran colocados dentro de un tubo con perforaciones laterales que permiten la entrada del agua, o borra una señal previamente pintada o dejan una huella (corcho) adherida a las paredes interiores de un tubo [17].

### **3.10.2. LIMNIGRAFOS**

En circunstancias especiales, cuando se necesita información continua e inmediata sobre los niveles de una corriente, por requerimientos de operación de obras hidráulicas o por alarma ante crecidas, se acopla a los instrumentos registradores un sistema automático que consta de un decodificador, un panel de sensores y una antena con alimentación de una batería, que es recargada a través de un panel solar. El dato colectado es transmitido a intervalos de tiempo (cada 4 horas) al satélite y este lo envía a una plataforma central de recepción instalada convenientemente en oficinas. Los datos recibidos se pueden manipular (consultar, graficar, hacer tratamiento estadístico) instantáneamente para su aplicación en diferentes tareas [17].

### 3.10.3. TOMA DE LOS DATOS DE NIEVEL

La información de niveles se puede obtener por observaciones directas en forma sistemática de una manera relativamente fácil en corrientes (ríos, quebradas, arroyos) y cuerpos de agua (embalses, lagunas). En Colombia y por recomendación y estandarización mundial de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en las estaciones hidrométricas se toma información diaria, realizando dos lecturas, a las 6 a.m. y 6 p.m., (06 y 18 horas) y lecturas extras si ocurren crecientes [17].

### 3.11. TIPOS DE ESTACIONES

- **ESTACIONES:** Se denomina estación al punto en el cual se observan y miden periódicamente uno o varios parámetros o variables durante un período de tiempo lo suficientemente largo para determinar el comportamiento de la variable. Una estación cuenta con una infraestructura de protección y está dotada con instrumentos de registro continuo o de observación directa.
- **REDES:** Una red es el conjunto de estaciones, distribuidas estratégicamente, en las que se observan, miden y/o registran los diferentes fenómenos y elementos que se necesitan para la determinación del estado y el comportamiento de los recursos ambientales, agua, aire y suelo en una región, para su posterior aplicación a diversos usos y objetivos. Cada red toma su nombre de la actividad que impacta o del elemento que es observado o medido.
- **RED METEROLOGICAS:** Esta red incluye las estaciones en las que se realizan mediciones de parámetros atmosféricos y se compone de varias redes: red pluviométrica, red climatológica, red agrometeorológica, red sinpótica y red aerológica. El propósito principal de esta red es el estudio y seguimiento del clima.
- **RED PLUVIOMETRICA:** Es la red de mayor cubrimiento a nivel nacional en la cual se hace la medición de la precipitación con registros continuos en pluviógrafos o por observaciones directas efectuadas una vez al día en un pluviómetro.
- **RED HIDROLOGICA:** En esta red se observan, miden y/o registran los niveles en forma directa o indirectamente se obtienen los caudales; en

algunas estaciones se hacen muestreos de sedimentos, a partir de los cuales se obtiene la concentración y el transporte de sedimentos en suspensión, información necesaria para la determinación del estado y manejo del recurso hídrico.

- **RED SINOPTICA:** Es la red básica para el seguimiento, diagnóstico y pronóstico del tiempo, las cuales están localizadas principalmente en los aeropuertos del país. En estas estaciones se realizan observaciones y mediciones horarias de la temperatura, humedad, presión atmosférica, vientos, precipitación y fenómenos atmosféricos principalmente [17].

## 4. METODOLOGIA

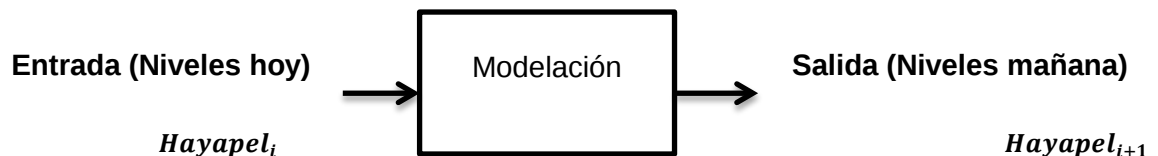
Para el pronóstico de los niveles del río San Jorge se aplicó un modelo basado en una Ecuación Diferencial Determinista EDD siguiendo una serie de etapas que van desde la recolección de la información, desarrollo del modelo conceptual y matemático, parametrización del modelo, validación y simulación del modelo y la evaluación del pronóstico. Cabe resaltar que el programa utilizado para llevar a cabo la modelación fue la herramienta de Excel. Para una mayor comprensión del modelado se explicará las diferentes actividades realizadas en este proyecto.

### 4.1. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Se tomaron los datos medios diarios de los niveles registrados en la estación Limnimétrica Marralu con código No. 25027120 de todos los años disponibles (1997-2012), suministrados por la oficina de archivo técnico del IDEAM, los cuales fueron compilados y organizados en archivos de texto de manera práctica en Excel para lograr las gráficas que nos permitieran un mejor análisis del comportamiento del nivel de agua en el río San Jorge (Ver Anexo 1 y 2).

### 4.2. DESARROLLO DEL MODELO

El modelo matemático determinístico es una clase de modelo matemático cuya función principal es el hacer predicciones de manera correcta, exacta y definida, donde las variables vienen determinadas por leyes físicas (empíricas, conceptuales o teóricas) consideradas como exactas y que explican toda su variabilidad [12]. Es decir que es un modelo donde las mismas variables de entrada generarán las mismas salidas [18] y no contempla ni el azar ni el principio de incertidumbre como muestra la siguiente gráfica:



El modelo matemático a través de una Ecuación Diferencial Determinista (EDD) es de la forma [3]:

$$\frac{dH}{dt} = f(\tau, \kappa, \xi, H)$$

**Ecuación 10**

se tiene que

- $H$  - representa a la variable dependiente en la ecuación diferencia, es decir el nivel del agua en determinado sitio y lugar,
- $t$  - representa a la variable independiente, al tiempo (día),
- $\tau$  - es un parámetro que representa a la propiedad de inercia de cualquier sistema ante la influencia de algún factor externo,
- $\kappa$  - es un parámetro que representa a las propiedades del sistema,
- $\xi$  - representa a la variable externa.

Se expresa la función del lado derecho de la siguiente manera:

$$f(\tau, \kappa, \xi, H) = \gamma h, \quad \gamma = f(\kappa, \tau)$$

**Ecuación 11**

en donde, los parámetros  $\gamma$  ,  $h$  representan a las propiedades internas del sistema y a la propiedad de inercia del sistema ante los factores externos. Por lo que  $\gamma$  es un valor que se obtiene luego del proceso de calibración.

Como propiedades internas del sistema se puede identificar factores tales como la rugosidad de la superficie, pendiente, textura del suelo del fondo del cauce, forma del cauce, entre otros. Y factores externos como el clima y cobertura vegetal.

El modelo determinista que simula la dinámica de los niveles del agua toma entonces la siguiente expresión:

$$\frac{dH}{dt} = \gamma h$$

**Ecuación 12**

Por lo tanto, para la predicción de los niveles medios diarios del agua en la cuenca del río San Jorge, sector Marralu Ayapel se desarrollará, mediante la aplicación de la solución analítica de una ecuación diferencial determinista, como se muestra a continuación<sup>5</sup>:

$$H_{i+1} = H_i e^{\gamma t}$$

**Ecuación 13**

$H_{i+1}$ =nivel estimado (nivel de mañana)

$H_i$  =nivel de hoy (condición inicial)

$\gamma$  =parámetro que se calcula con los datos históricos

$t$ =tiempo (como los pronósticos tiene un horizonte diario)

Esta solución analítica de la EDD permite obtener como resultado el pronóstico, un valor concreto del nivel del agua en el sitio señalado y a nivel diario.

#### 4.3. PARAMETRIZACION DEL MODELO

El objetivo de la parametrización fue estimar el valor del  $\gamma$  de la ecuación diferencial que mejor se ajustara a los valores de la serie, para ello se realizarón 20 iteraciones, valores correspondientes entre -1 a 1, escogiendo el  $\gamma$  que menos errores produjera.

Estos valores -1 a 1, son sugeridos en el protocolo para la emision de pronosticos hidrológicos llevado a cabo por el IDEAM, para la modelación de pronosticos hidrológicos empleando esta formula matematica. [3].

De esta manera, se seleccionó una parte de los datos disponibles los cuales corresponden a los años 1997-2006, seguidamente se procedió a aplicar la Ecuación Diferencial Determinista (Ecuación 13) variando los parámetros y al mismo tiempo se calculaba el porcentaje de error por cada pronóstico realizado. El valor óptimo sería el parámetro con el que se logra el menor porcentaje de error y se obtiene a partir de la siguiente ecuación.

$$P \% = \frac{H_{med} - H_{pron}}{H_{med}} * 100$$

**Ecuación 14**

---

<sup>5</sup> IDEAM. Protocolo para la emision de pronósticos hidrológicos. Bogota. 2008

#### 4.4. VALIDACION DEL MODELO

La validación del modelo se realizó con los datos registrados en la estación limnimétrica Marralu sector Ayapel, de niveles diarios de la serie correspondiente a los años 2007-2012. Para este proceso se aplicó la Ecuación Diferencial Determinista (Ecuación 13), utilizando el valor del parámetro (-0,1) que menos error produjo en el proceso de parametrización.

Por otro lado, se tuvo en cuenta el error del 10% que se tiene al momento al momento de registrar el dato del nivel en la estación. Se establece un limite maximo del 10% por encima del nivel registrado y un minimo del 10% (por debajo) del nivel registrado. Es decir que los pronósticos resultantes de la modelación deben estar dentro del margen para que sean considerados como satisfactorios [3]. Este margen se obtiene mediante la siguiente expresión y se calcula para cada pronóstico.

$$\text{Margen mas 10\%} = h_{med} + (h_{med} * 10\%) \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\text{Margen menos 10\%} = h_{med} - (h_{med} * 10\%) \quad \text{Ecuación 16}$$

#### 4.5. EVALUACION DEL DESEMPEÑO DEL MODELO

El criterio de evaluación de los pronósticos obtenidos, consistió en establecer de manera preliminar algunos “intervalos de aceptabilidad de aciertos” que debe cumplir la metodología de pronósticos por ejemplo:

1. los pronósticos que se den con un margen de error menor al 5% con respecto al valor del nivel registrado se consideran muy buenos;
2. los pronósticos que se den con un margen de error entre el 5% y el 10% con respecto al valor del nivel registrado se consideran buenos;
3. los pronósticos que se den con un margen de error entre el 10% y el 15% con respecto al valor del nivel registrado se consideran satisfactorios;
4. los pronósticos que se den con un margen de error superior al 15% con respecto al valor del nivel registrado se consideran no satisfactorios.

Se considera que un pronóstico es acertado si se ubica en la categoría de muy buenos y buenos; es decir, es acertado el pronóstico siempre y cuando el margen de error no supere el 10% [3]

Este criterio tiene la siguiente aproximación matemática:

$$P \% = \frac{H_{med} - H_{pron}}{H_{med}} * 100 \quad \text{Ecuación 17}$$

en donde se tiene que,

$P_{\%}$  - Porcentaje de aciertos de cada pronostico;

$H_{med}$  - Nivel diario del agua medido

$H_{pron}$  - Nivel diario agua pronosticado,

En este proyecto se consideró llevar a cabo un segundo criterio de evaluación de desempeño del pronóstico para verificar que tan acertados resultaron ser los pronósticos obtenidos, y este consistió en aplicar el criterio de porcentaje de pronósticos acertados, propuesto por el servicio Hidrológico de Pronóstico de Rusia, el cual si es igual o mayor a 80% de todos los pronósticos emitidos, demostraría una bondad de ajuste muy buena, mientras que si el porcentaje de aciertos se encuentra entre 60% y 70% esta se cataloga como satisfactorio y para los casos que es menor a 60% es inaceptable [3] [7].

Para esta etapa se evalúan los 2040 pronósticos realizados, en el periodo comprendido desde el 1 de enero de 2007 hasta el 31 de diciembre de 2012. Y se desarrolla mediante la siguiente metodología.

1. Se estima la media de los valores de niveles registrados, mediante la fórmula del promedio aritmético

$$H = \frac{\sum_1^n H_{regis}}{n} \quad \text{Ecuación 18}$$

2. Se estima la desviación estándar de los valores predictivos de niveles con respecto a la media de los niveles registrados, mediante la siguiente expresión matemática:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (H_{pron} - \bar{H}_{regis})^2}{n - 1}}$$

**Ecuación 19**

donde

S: Desviación estándar  
H regis: Promedio de niveles registrados  
H pron: Nivel pronosticado  
n: cantidad de valores

3. Se evalúa el error máximo  $\Delta_{max}$  permitido para cada pronóstico definido como:

$$\Delta_{max} = 0,674 * S$$

**Ecuación 20**

4. Se define la “condición de pronóstico acertado”; y si se cumple la relación correspondera a los pronosticos permisibles:

$$|H_{regi} - H_{pred}| \leq \Delta_{max}$$

**Ecuación 21**

5. Se estima el porcentaje de pronósticos acertados, mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{P_{Permisibles}}{P_{Total}} * 100$$

**Ecuación 22**

#### 4.6. OTRAS MODELACIONES

Después de conocer el valor del parámetro óptimo en el proceso de parametrización, se consideró relevante realizar otros pronósticos empleando diferentes parámetros (0,1; 0,3; 0,5; 0,7; -0,3; -0,5; y -0,7), al utilizado inicialmente en este proyecto (-0,1) para identificar que tanto varían los pronósticos y determinar con cuál de los parámetros se podría obtener un mejor pronóstico y de esta manera lograr una buena bondad de ajuste del modelo. Se escogieron estos parámetros porque son lo que más tenían cercanía con los niveles registrados.

Adicionalmente se realizó otra prueba de modelación la cual consistió en tomar una menor cantidad de datos para la parametrización aproximadamente unos 480 registros de niveles (del 1 de enero de 1997 hasta 7 de agosto de 1998), y 499 datos para la validación (del 8 de agosto de 1998 hasta el 20 de diciembre de 1999), con el fin de analizar y determinar si es posible tomar cantidades pequeñas de datos sobre todo cuando la información es escasa, lo que sucede mucho en nuestro país, y así obtener un pronóstico satisfactorio.

## 5. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos desde la Parametrización del modelo hasta la evaluación del desempeño del modelo.

### 5.1. PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO

Los resultados de la parametrización se obtuvieron de emplear la Ecuación Diferencial Determinista (Ecuación 13), la cual fue programada en una hoja de Excel; seguidamente se ingresaron los datos de niveles correspondientes a los años 1997-2006 y por último se tiene el pronóstico para el siguiente día. La tabla 2 muestra un fragmento del pronóstico de los niveles de la estación Marralu y su respectivo error como resultado de la parametrización.

**Tabla 2** Parametrización del modelo (Gama -0.1)

| FECHA      | REGISTRADO<br>$Hayapel_i$ | PRONÓSTICADO<br>$Hayapel_{i+1}$ | ERROR |
|------------|---------------------------|---------------------------------|-------|
| 02/01/1997 | 263                       |                                 |       |
| 03/01/1997 | 258                       | 237,9                           | 9,51  |
| 04/01/1997 | 255                       | 237,9                           | 7,76  |
| 05/01/1997 | 251                       | 233,4                           | 8,45  |
| 21/09/2003 | 409                       | 375,5                           | 8,18  |
| 22/09/2003 | 407                       | 370,0                           | 9,07  |
| 23/09/2003 | 413                       | 368,2                           | 10,83 |
| 24/09/2003 | 427                       | 373,6                           | 12,48 |
| 28/08/2006 | 509                       | 464,1                           | 8,80  |
| 29/08/2006 | 484                       | 460,5                           | 4,84  |
| 30/08/2006 | 476                       | 437,9                           | 7,99  |
| 31/08/2006 | 456                       | 430,7                           | 5,54  |
| 25/12/2006 | 189                       | 175,5                           | 7,12  |
| 26/12/2006 | 186                       | 171,0                           | 8,05  |
| 27/12/2006 | 180                       | 168,2                           | 6,50  |
| 28/12/2006 | 176                       | 162,8                           | 7,45  |

|                   |     |       |      |
|-------------------|-----|-------|------|
| <b>29/12/2006</b> | 160 | 159,2 | 0,46 |
| <b>30/12/2006</b> | 160 | 144,7 | 9,51 |
| <b>31/12/2006</b> | 153 | 144,7 | 5,37 |

El parametro  $\gamma$  que obtuvo el menor resultado fue -0.1, con un error promedio para toda la serie de 1997-2006 de 10,3%. Esto quiere decir que al momento de hallar el porcentaje promedio de los errores de todos los pronósticos para cada uno de los diferentes parametros empleados en la Ecuacion Diferencial Determinista que logro un menor porcentaje fue el correspondiente a  $-0,1$ .

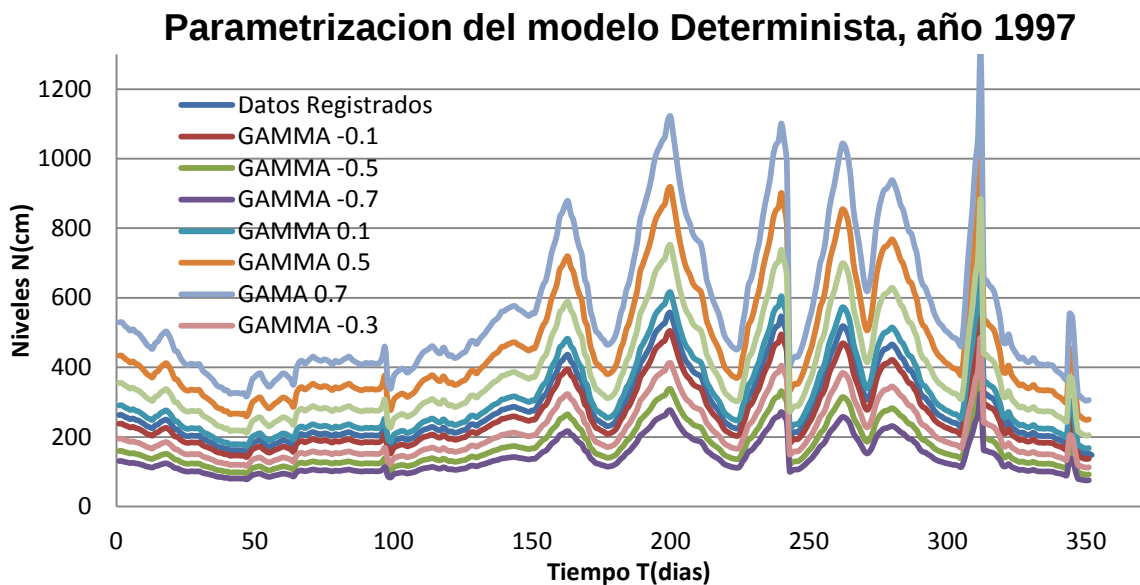
El hecho de encontrar este parametro óptimo de -0,1 para el río San Jorge estacion Marralu, no significa que sea el mismo para todos los ríos de Colombia, por ejemplo para el rio Pamplonita en Cucuta Norte de Santander estacion La Don Juana, el parametro empleado en la validación de la Ecuación Diferencial como producto de la parametrizacion es 1. Esto se debe a que la dinámica de todos los ríos no siempre es la misma, sin embargo en este trabajo se analiza la posibilidad de emitir pronósticos hidrológicos basados en esta técnica y comprobar su bondad de ajuste.

A continuación se muestra cada error promedio correspondiente a cada parametro utilizado en la ecuación diferencial (Ec 13).

**Tabla 3** Resultados de la parametrización

| <b>GAMMA</b> | <b>ERROR PROMEDIO</b> | <b>GAMMA</b> | <b>ERROR PROMEDIO</b> |
|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| <b>-0,1</b>  | <b>10,39</b>          | 1            | 172,66                |
| <b>-0,2</b>  | 18,37                 | 0,9          | 147,15                |
| <b>-0,3</b>  | 25,95                 | 0,8          | 123,64                |
| <b>-0,4</b>  | 32,90                 | 0,7          | 102,38                |
| <b>-0,5</b>  | 39,22                 | 0,6          | 83,16                 |
| <b>-0,6</b>  | 44,96                 | 0,5          | 65,77                 |
| <b>-0,7</b>  | 50,16                 | 0,4          | 50,09                 |
| <b>-0,8</b>  | 54,87                 | 0,3          | 35,96                 |
| <b>-0,9</b>  | 59,16                 | 0,2          | 23,31                 |
| <b>-1</b>    | 146,75                | 0,1          | 12,29                 |

Tras conocer el valor del parámetro óptimo (-0,1), se consideró relevante identificar por medio de una gráfica (Figura 11) el comportamiento no solo del Gamma escogido, sino también del resto de parámetros que no tuvieron errores adecuados y que se encontraran cercanos a los datos registrados, aplicados en la Ecuación Diferencial Determinista; esto con el fin de llevar a cabo otros pronósticos usando diferentes Gamma, sin importar los errores que cada uno mostró, para posteriormente hacer comparaciones e identificar con cuál de los parámetros se podría obtener un mejor pronóstico y de esta manera lograr una buena bondad de ajuste del modelo.



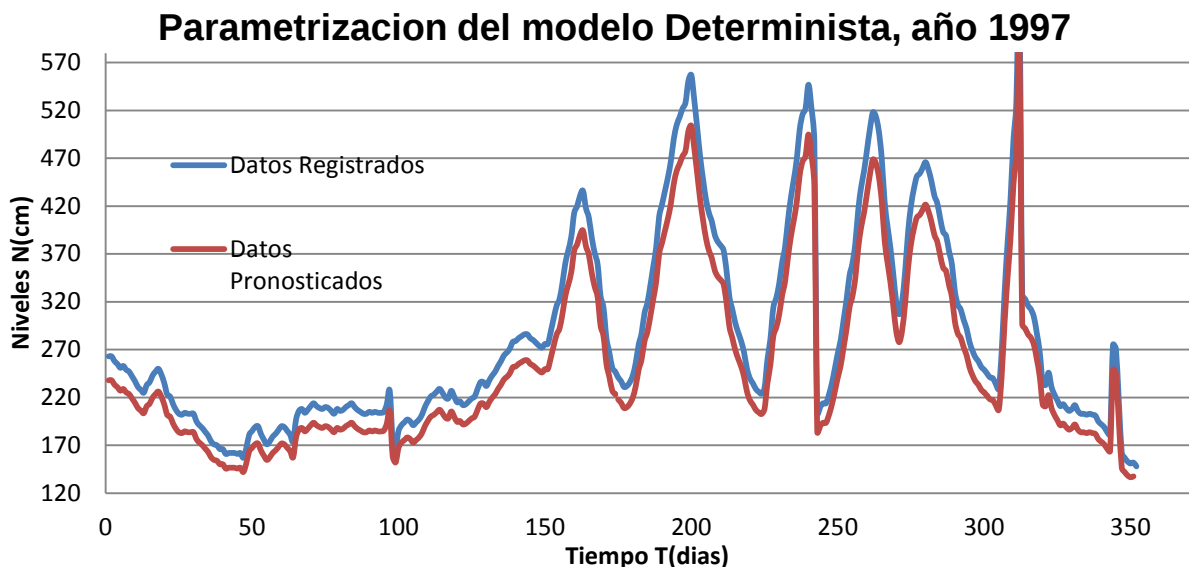
**Figura 11** Comportamiento de los niveles pronosticados empleando los diferentes Gamma.

De la figura 11 se puede decir que, dependiendo de la condición del parámetro empleado en la Ecuación Diferencial los niveles pronosticados van a ser tantas veces menores o mayores que el nivel registrado. Por ejemplo, cuando se emplea el parametro 0,7 el pronóstico va a ser tantas veces mayor que el registrado, y por el contrario con -0,7 es tantas veces menor el pronóstico resultante. Es por esto que al momento de parametrizar la ecuacion e identificar el menor porcentaje de error de los pronósticos, se escogió el -0,1.

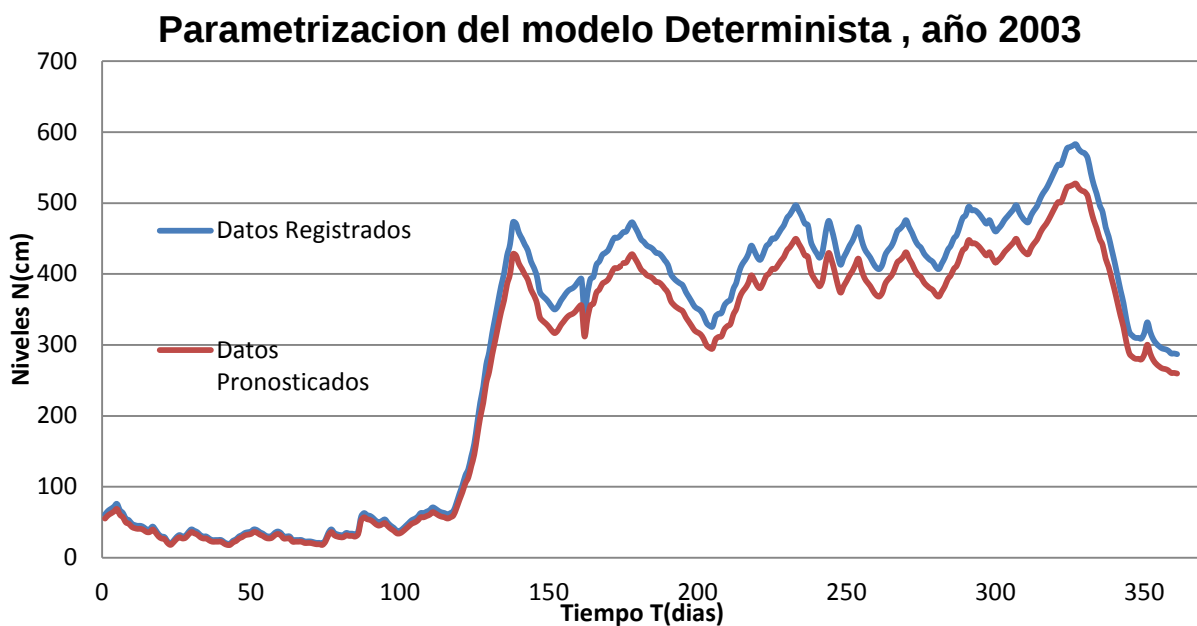
En las figuras 12,13 y 14 se observa los resultados de los pronósticos obtenidos en el proceso de parametrización y los niveles registrados empleados en esta etapa de modelación para los años 1997, 2003 y 2005.

La grafica muestra que los niveles pronosticados siguen un comportamiento similar a los niveles registrados, esto se debe a que los pronósticos son resultado de la misma inercia de los niveles registrados en la estación.

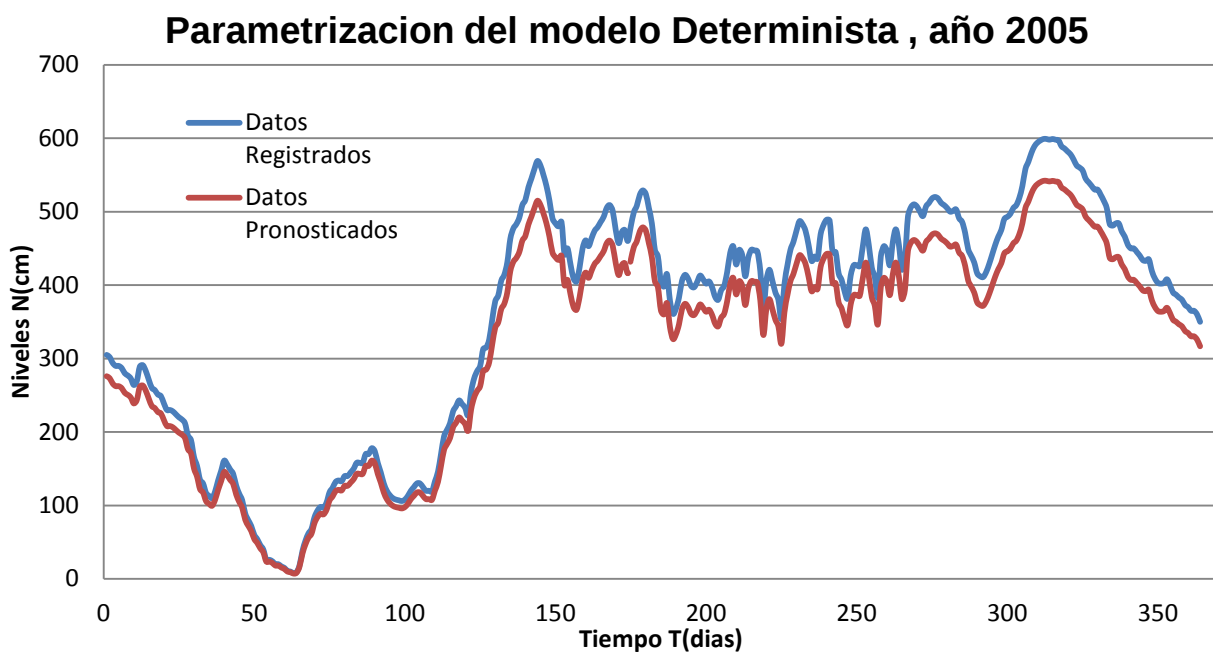
En la figura 12 se observa que para el año 1997 los niveles registrados y pronosticados por encima de 100cm muestran errores altos, sin embargo aproximadamente para el día 300 del mismo año disminuyen. Ahora bien, para los años 2003 y 2005 los niveles menores a 100cm muestran mejores resultados y se corrobora que por encima de 100cm los errores aumentan. Este comportamiento, sistemáticamente no se explica a partir del modelo aplicado, debido a que los pronósticos son producto del azar, no obligatoriamente los valores que están por debajo de cierto nivel van a tener un mejor comportamiento como sucede para el día 300 en el año 1997, donde se obtienen resultados satisfactorios y los niveles superan los 100cm.



**Figura 12** Parametrización del modelo año 1997.



**Figura 13** Parametrización del modelo año 2003.



**Figura 14** Parametrización del modelo año 2005.

## 5.2. VALIDACION Y PREDICCION

La validación del modelo se realizó con los datos registrados en la estación limnimétrica Marralu sector Ayapel, de niveles diarios de la serie correspondiente a los años 2007-2012. Para este proceso se aplicó la Ecuación Diferencial Determinista (Ec. 13) que fue programada en una hoja de Excel, utilizando el valor del parámetro (-0,1) que menos error produjo en el proceso de parametrización.

De esta manera se obtuvieron un total de 2040 pronósticos, en el periodo comprendido desde el 1 de enero de 2007 hasta el 31 de diciembre de 2012. En la tabla 4, se muestra un fragmento de los pronósticos de los niveles en centímetros de la estación Marralu que resultaron de la aplicación de la Ecuación Diferencial Determinista, y los respectivos márgenes por encima y por debajo del 10%.

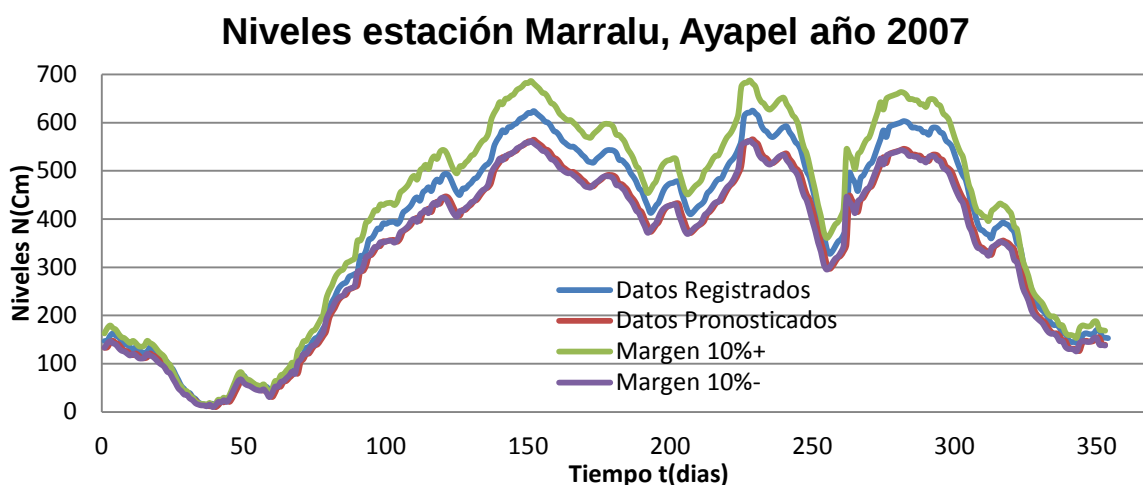
Se establece un limite de confianza maximo del 10% por encima del nivel registrado y un minimo del 10% (por debajo) del nivel registrado, porque estos márgenes de error del 10%, son los que se obtienen al momento de registrar el dato del nivel en la estación Limnimetrica o Limnigráfica. Por lo tanto los pronósticos resultantes de la modelación deben estar dentro del margen para que sean considerados como satisfactorios [3].

**Tabla 4** Resultados del Pronóstico (Gama -0.1).

| DIA        | REGISTRADO | MARGEN 10%+ | MARGEN 10%- | PRONÓSTICO | EVALUACION ACIERTO % |
|------------|------------|-------------|-------------|------------|----------------------|
| 01/01/2007 | 147        |             |             |            |                      |
| 02/01/2007 | 148        | 162,8       | 133,2       | 133,0      | 10,12                |
| 03/01/2007 | 158        | 173,8       | 142,2       | 133,9      | 15,24                |
| 04/01/2007 | 163        | 179,3       | 146,7       | 142,9      | 12,29                |
| 05/01/2007 | 158        | 173,8       | 142,2       | 147,4      | 6,65                 |
| 06/01/2007 | 155        | 170,5       | 139,5       | 142,9      | 7,76                 |
| 07/01/2007 | 147        | 161,7       | 132,3       | 140,2      | 4,59                 |

|            |     |       |       |       |      |
|------------|-----|-------|-------|-------|------|
| 08/01/2007 | 141 | 155,1 | 126,9 | 133,0 | 5,66 |
| 09/01/2007 | 139 | 152,9 | 125,1 | 127,5 | 8,21 |
| 10/01/2007 | 134 | 147,4 | 120,6 | 125,7 | 6,13 |
| 11/01/2007 | 130 | 143   | 117   | 121,2 | 6,73 |

En las figuras de la 15 a la 19 se puede observar la dinámica de los niveles medios registrados del rio San Jorge en la estación Marralu y los niveles pronosticados resultantes de la aplicación del modelo, junto con los márgenes por encima y por debajo del 10%. De manera general en todas las gráficas en los años 2007, 2008, 2009, 2010 y 2011 se observa un comportamiento similar, puesto que los niveles pronosticados se encuentran ubicados dentro de los márgenes estipulados, estando siempre cercano al margen por debajo. Asimismo los pronósticos están siempre por debajo del nivel registrado; esto se debe al parámetro (-0.1) escogido en la parametrización.

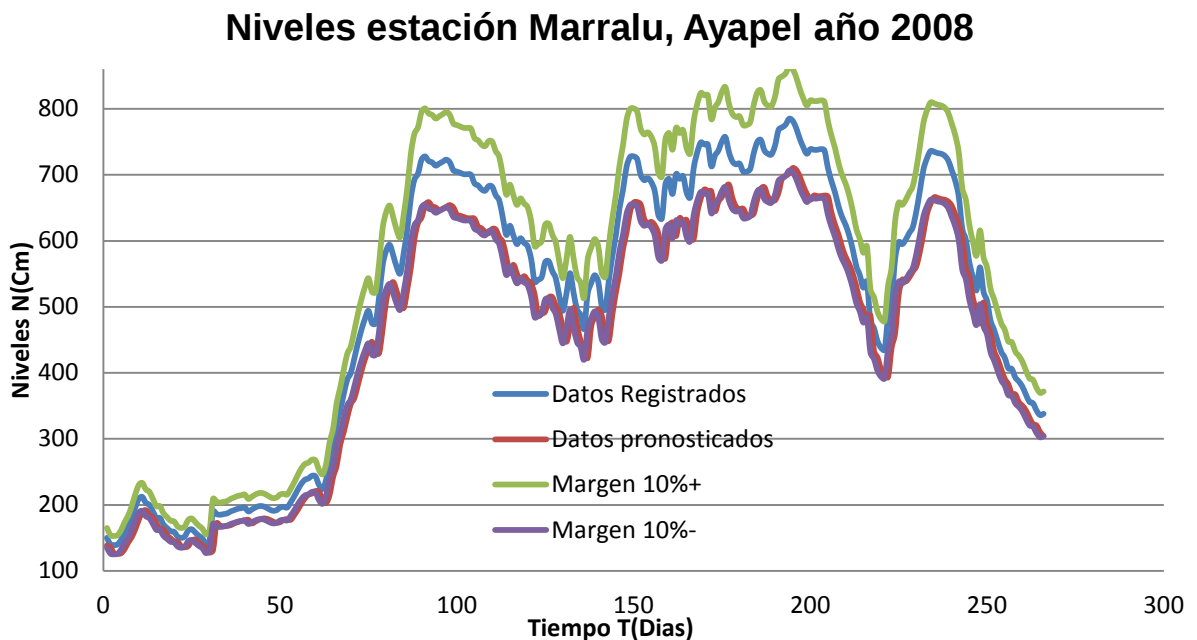


**Figura 15** Niveles estación Marralu, Ayapel año 2007.

Se puede observar en la figura 15 los datos registrados de color azul, el valor pronosticado de color rojo y los márgenes que son los niveles de confianza por encima y por debajo del 10% con color verde y morado. Se analiza que los datos pronosticados están dentro de la banda de confianza y por esa razón el pronóstico es acertado. Según el IDEAM la medición de un nivel de agua tiene un error

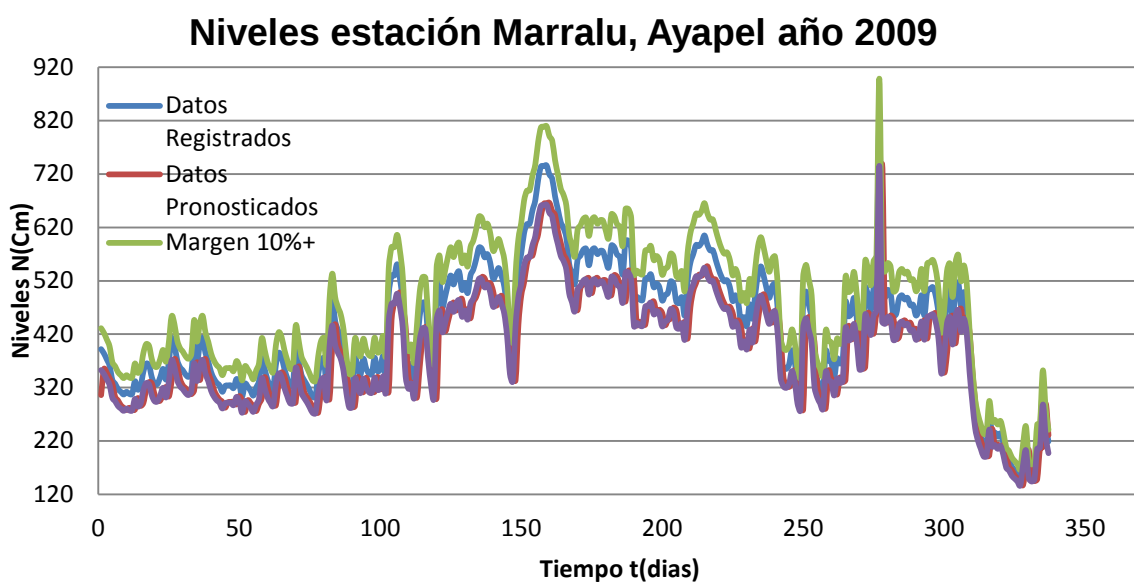
intrínseco, es decir, cuando el lector mide con miras, de entrada sabe que existe un error sistemático del 10% lo cual indica que el valor que se midió puede ser 10% por encima o por debajo.

Los pronósticos no se emiten teniendo en cuenta el nivel medido ni el pronosticado sino también los intervalos de confianza. Esos errores sistemáticos (niveles de confianza) son tomados en la estación limnimetrica o Limnigráfica. Lo mismo sucede con las figuras 16, 17, 18 y 19.

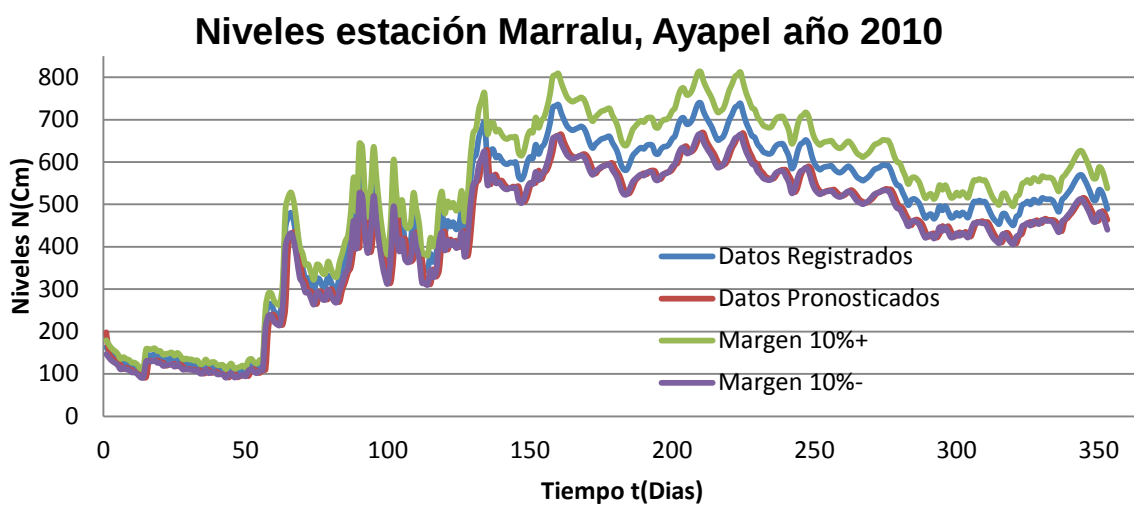


**Figura 16** Niveles estación Marralu, Ayapel año 2008.

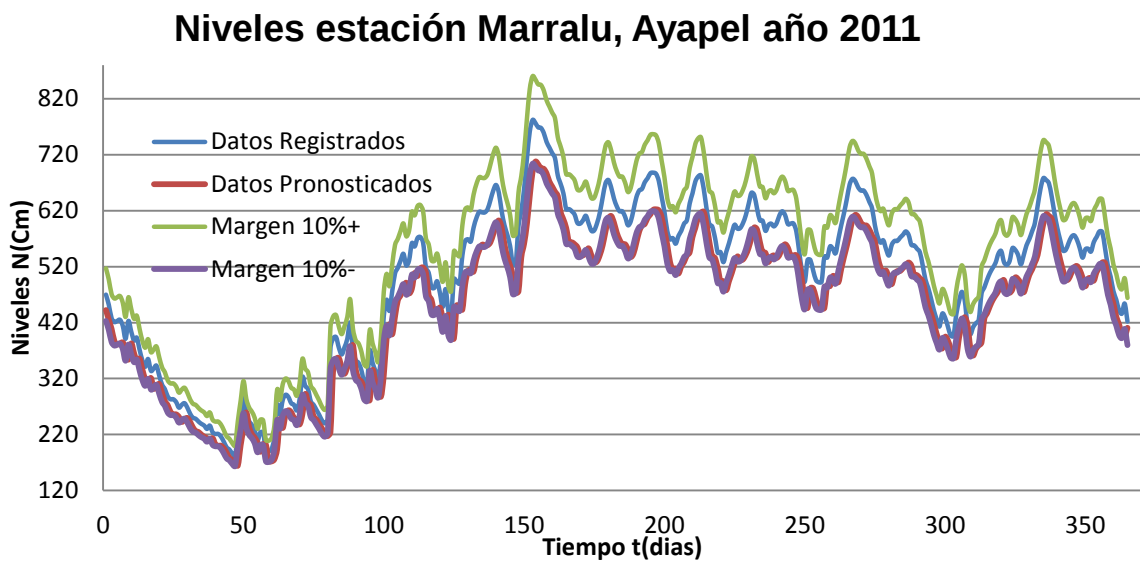
Se observa en la figura 16 que los valores pronosticados están por debajo del registrado, esto quiere decir que se subestimo el valor medido, mas sin embargo los niveles que se pronosticaron son acertados ya que se encuentran dentro de la banda de confianza. Además se observa un comportamiento diferente en los valores registrados y pronosticados en las figuras 15, 16, 17, 18 y 19, puesto que el nivel del agua es una variable aleatoria, es decir, lo que implica una dinámica diferente para los diferentes años.



**Figura 17** Niveles estación Marralu, Ayapel año 2009.



**Figura 18** Niveles estación Marralu, Ayapel año 2010.



**Figura 19** Niveles estación Marralu, Ayapel año 2011.

Por el contrario cuando se emplea más adelante en la validación con parámetros de 0.3, 0.5 y 0.7 los valores pronosticados están muy por encima del nivel registrado esto quiere decir que se sobre estima el valor medido, en efecto, los niveles que se pronosticaron no son acertados ya que se encuentran por fuera de la banda de confianza. Y cuando se emplean los parámetros -0.3, -0.5 y -0.7 los valores pronosticados están muy por debajo del registrado esto quiere decir que se subestimo el valor medido, en efecto, los niveles que se pronosticaron no son acertados ya que se encuentran por fuera de la banda de confianza.

Por lo que es preciso decir que los niveles pronosticados van a ser tantas veces mayores o menores según el parámetro empleado, pero será acertado siempre y cuando los pronósticos se encuentren dentro de la banda de confiabilidad.

### 5.3. EVALUACION DE ACIERTO DEL PRONÓSTICO

En esta etapa, se muestra los resultados de la primera evaluación del desempeño del pronóstico “intervalos de aceptabilidad de aciertos” que se obtuvo con la (Ec. 17), asimismo se identificaron los pronósticos que se categorizaban según los rangos establecidos a continuación:

1. los pronósticos que se den con un margen de error menor al 5% con respecto al valor del nivel registrado se consideran muy buenos;
2. los pronósticos que se den con un margen de error entre el 5% y el 10% con respecto al valor del nivel registrado se consideran buenos;
3. los pronósticos que se den con un margen de error entre el 10% y el 15% con respecto al valor del nivel registrado se consideran satisfactorios;
4. los pronósticos que se den con un margen de error superior al 15% con respecto al valor del nivel registrado se consideran no satisfactorios.

**Tabla 5** Resultados de la evaluación “intervalos de aceptabilidad de aciertos” del modelo

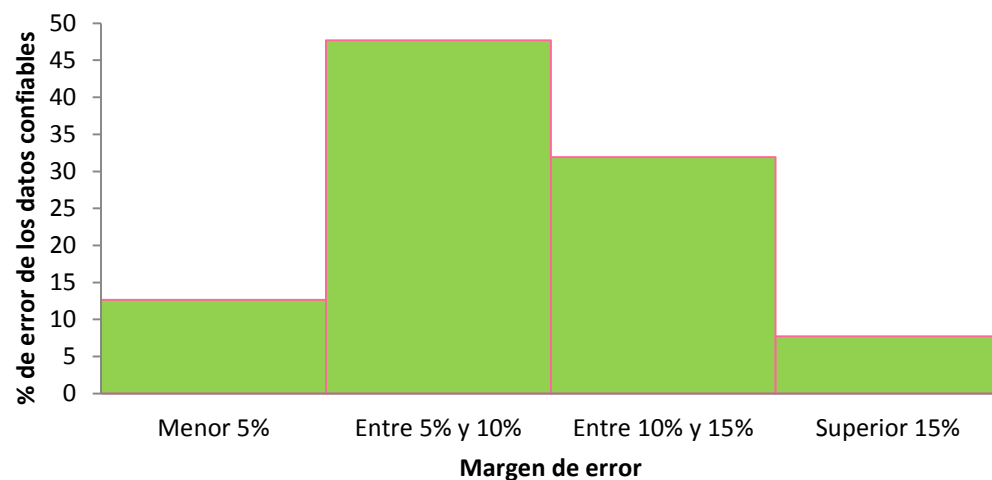
| Margen de error | DATOS | %     |
|-----------------|-------|-------|
| Menor 5%        | 258   | 12,64 |
| Entre 5% y 10%  | 973   | 47,69 |
| Entre 10% y 15% | 651   | 31,91 |
| Superior 15%    | 158   | 7,74  |
| TOTAL           | 2040  | 100   |

De acuerdo a este criterio, los pronósticos obtenidos pertenecen al rango de muy buenos y buenos puesto que el 60% de los 2040 casos para el periodo comprendido desde el 1 de enero de 2007 hasta el 31 de diciembre de 2012, se ubicaron en un margen de error entre el 5% y el 10% con respecto al valor del nivel registrado en la estación Marralu en el río San Jorge. Por el contrario, los pronósticos de los niveles que tuvieron un margen de error superior al 15% se catalogan como no satisfactorios, de manera que se obtuvo un total de 158 casos ubicados en este rango.

En La figura 20 se observa una distribucion normal con curva simetrica de los errores del pronóstico, lo que significa que la mayoría de estos se ubican en el centro puesto que se acercan a la media (9.7) de los errores del pronostico.

Por otro lado, en la figura 20 se puede observar una distribución porcentual de errores de los pronósticos, donde la mayor porción de errores se ubican en el margen del 5% y 10%, el cual considera a los pronósticos como muy buenos y buenos; por el contrario los datos que superan el margen de error del 15% son catalogados como no satisfactorios.

### Histograma Errores del Pronóstico



**Figura 20** Histograma Errores del Pronóstico.

Asimismo se tiene a continuación los resultados del segundo criterio de evaluación de desempeño del pronóstico “porcentaje de pronósticos acertados”.

**Tabla 6** Resultado de la evaluación del criterio “porcentaje de pronósticos acertados”

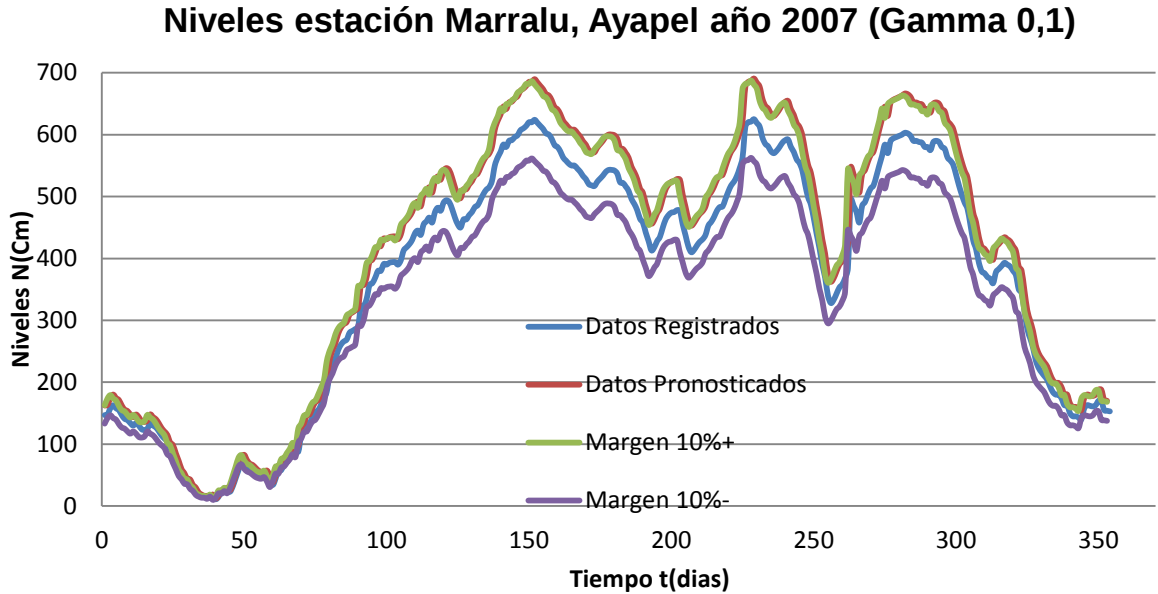
| <b>Estación</b> | $\bar{H}$ | <b>Desviación</b> | $\Delta_{Maximo}$ | <b>Total de Pronósticos</b> | $P_{Acertados}$ | $P_{No\ acertados}$ | $P_{\%}$ |
|-----------------|-----------|-------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|----------|
| <b>Marralu</b>  | 450,76    | 162,51            | 109,53            | 2040                        | 2005            | 35                  | 98,28    |

Mediante este segundo criterio se obtiene que el 98,28% de los pronósticos son acertados demostrando una bondad de ajuste muy buena. Por lo que se puede decir que este criterio es más generoso, por consiguiente verifica que el modelo se ajusta a las condiciones de la zona de estudio.

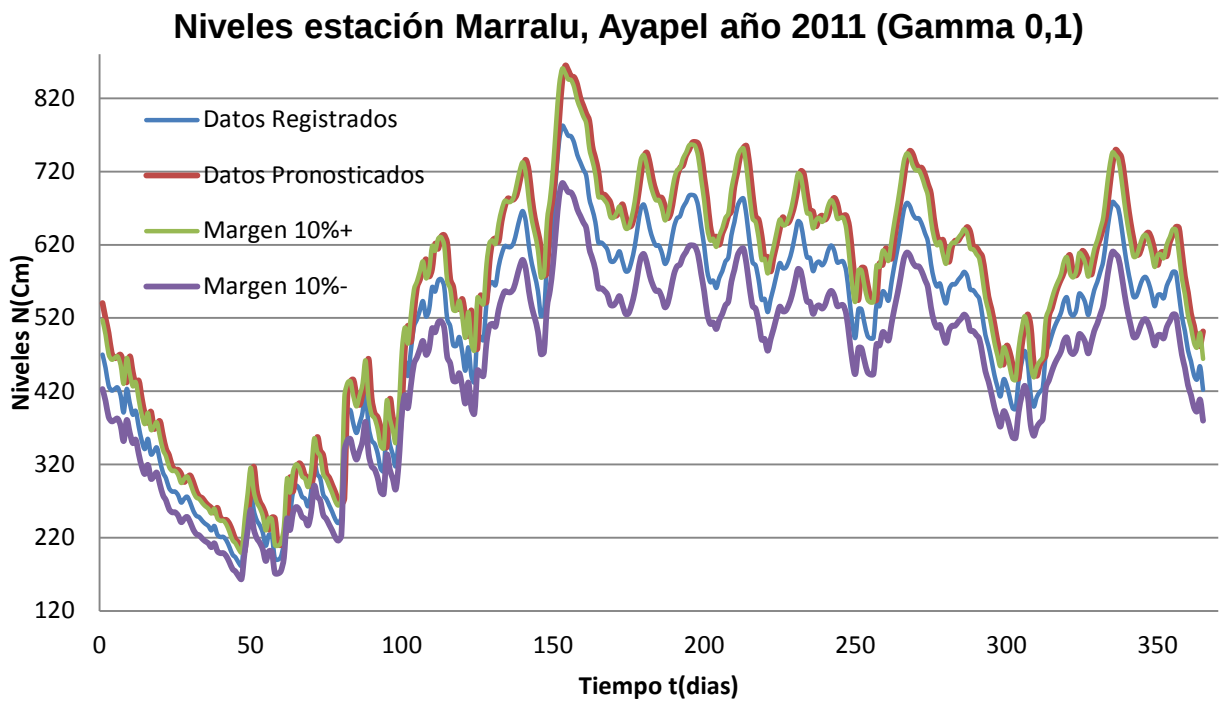
#### **5.4. MODELADO EMPLEANDO GAMMA 0.1**

Como se mencionó anteriormente en la metodología se consideró realizar otros pronósticos empleando diferentes parámetros (0,1; 0,3; 0,5; 0,7; -0,3; -0,5; y -0,7), al utilizado inicialmente en este proyecto para identificar y analizar el comportamiento de los pronósticos y determinar con cuál de los parámetros se podría obtener una mejor predicción y de esta manera lograr una buena bondad de ajuste del modelo.

Las figuras 21 y 22, presentan los niveles de la estación Marralu en el municipio de Ayapel para el año 2007 y 2011 como resultado de la validación del modelo, y se observa que los niveles pronosticados están por encima de los datos registrados y en efecto están relativamente muy cercanos al margen de +10%; de manera que se obtuvo un resultado diferente al que se produjo cuando se empleó el parámetro -0,1 donde los pronósticos mostraron una tendencia siempre por debajo del nivel registrado y cercanía al margen de -10%. Con esto se comprobó que dependiendo del signo que tenga el parámetro el pronóstico va a dar por encima o por debajo del nivel registrado.



**Figura 21** Niveles Ayapel año 2007 (Gamma 0,1).



**Figura 22** Niveles Ayapel año 2011 (Gamma 0,1).

Ahora bien, se evaluaron los pronósticos de este modelo por los dos metodos anteriormente realizados estos son “intervalos de aceptabilidad de aciertos” y “porcentaje de pronósticos acertados”.

A continuación se muestra los resultados obtenidos de la primera evaluación “intervalos de aceptabilidad de aciertos” del modelo aplicado con el parámetro 0,1.

**Tabla 7** Resultados de la evaluación “intervalos de aceptabilidad de aciertos” del modelo

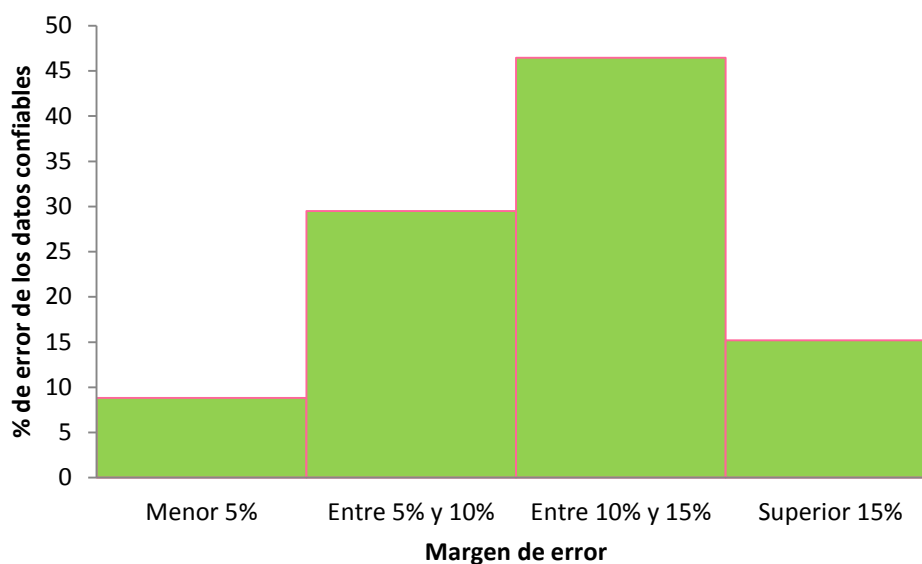
| Margen de error | DATOS       | %          |
|-----------------|-------------|------------|
| Menor 5%        | 180         | 8.82       |
| Entre 5% y 10%  | 602         | 29.50      |
| Entre 10% y 15% | 948         | 46.47      |
| Superior 15%    | 310         | 15.19      |
| <b>TOTAL</b>    | <b>2040</b> | <b>100</b> |

De acuerdo a este criterio, los pronósticos obtenidos pertenecen al rango de satisfactorios puesto que el 46% de los 2040 casos para el periodo comprendido desde el 1 de enero de 2007 hasta el 31 de diciembre de 2012, se ubicaron en un margen de error del 10% y el 15% con respecto al valor del nivel registrado en la estación Marralu en el rio San Jorge; a diferencia de los pronósticos obtenidos del modelo empleando el parámetro -0,1, los cuales se ubicaron en el rango de 5% y 10%, para un 60% de los casos.

Aunque 46% de los pronósticos resultaron ser satisfactorios y 37% fueron buenos y muy buenos, se puede decir que es un pronóstico relativamente aceptable, puesto que para ser considerado totalmente aceptable los pronósticos en su mayoría no deben superar el margen de error de 10%; por lo tanto con este primer criterio de evaluación para este modelo se tiene que los pronósticos son satisfactorios.

En La figura 23 se observa una distribucion normal con curva simetrica de los errores del pronóstico, lo que significa que la mayoría de estos se ubican en el centro puesto que se acercan a la media (11,72) de los errores del pronostico.

## Histograma Errores del pronóstico



**Figura 23** Histograma de Errores del Pronóstico.

En el segundo criterio “porcentaje de pronósticos acertados” se obtiene que el 99.5% de los pronósticos son acertados demostrando una bondad de ajuste muy buena. Por lo que se puede decir que este criterio verifica que este modelo empleando el parámetro 0,1 se ajusta a las condiciones de la zona de estudio, siendo aproximadamente 1% más efectivo que el modelo utilizando el parámetro -0,1, y esto se debe a que la desviación estándar y en efecto el error son más pequeños, es decir, al utilizar parámetros negativos la desviación estándar y el error disminuyen y por lo tanto hace que el porcentaje de aciertos de pronósticos  $P_{\%}$ , sea menor que cuando se emplea parámetros positivos en la ecuación diferencial.

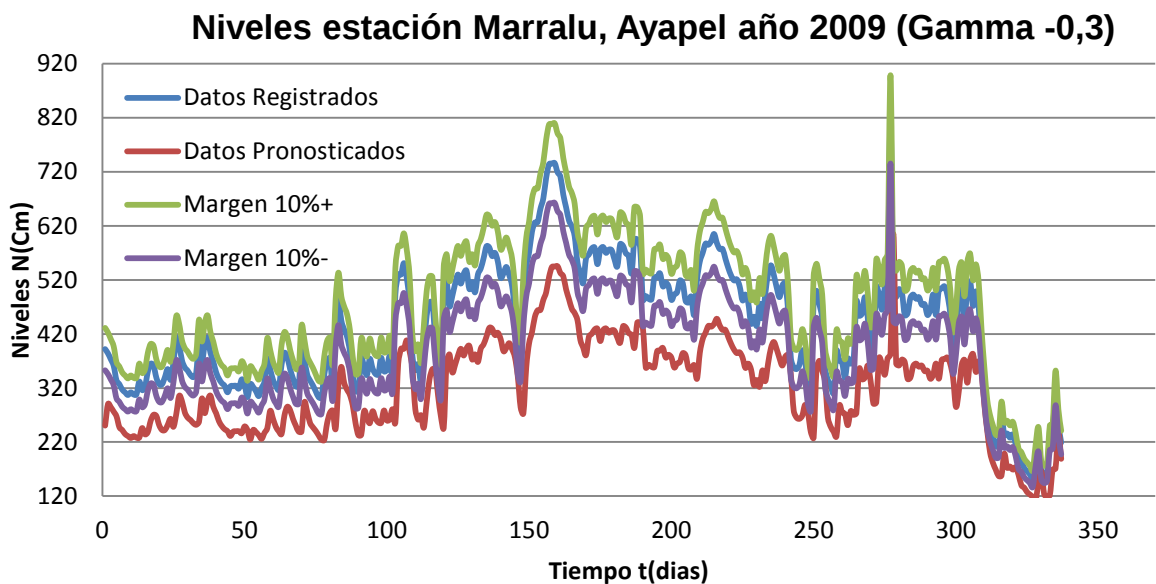
**Tabla 8** Resultado de la evaluación del criterio “porcentaje de pronósticos acertados” Gamma 0.1

| Estación | $\bar{H}$ | $S$    | $\Delta error$ | Total Pronósticos | $P_{acertados}$ | $P_{NO\ acertados}$ | $P_{\%}$ |
|----------|-----------|--------|----------------|-------------------|-----------------|---------------------|----------|
| MARRALU  | 450.54    | 197.15 | 132.88         | 2040              | 2031            | 9                   | 99,5     |

### 5.5. MODELADO EMPLEANDO GAMMA -0.3 Y 0.3

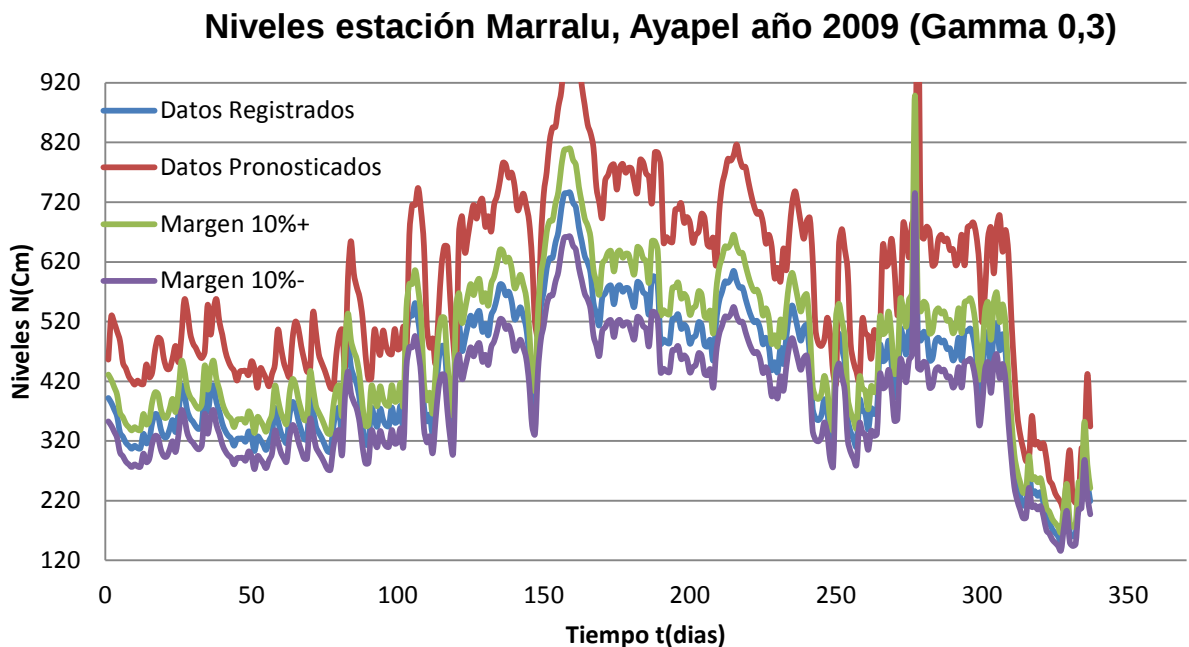
En esta modelación, se variaron los parámetros de la ecuación diferencial determinista, de manera que se obtuvieron dos pronósticos unos con el parámetro -0,3 y otros con 0,3 respectivamente.

En la figura 24, se observa la tendencia de los pronósticos los cuales se ubican por debajo de los niveles registrados y de las márgenes +10% y -10%, por su parte en la figura 25 muestra una situación similar solo que los pronósticos se ubican por encima de los niveles registrados y de las márgenes +10% y -10%.



**Figura 24** Niveles estación Marralu, Ayapel año 2009 (Gamma -0,3).

En las figuras 24, 28 y 32 se observa que el nivel de agua pronosticado esta por fuera de la banda de confianza por lo tanto no refleja el comportamiento real de los valores medidos en campo. Los valores pronosticados están por debajo del registrado esto quiere decir que se subestimo el valor medido, en efecto, los niveles que se pronosticaron no son acertados ya que se encuentran por fuera de la banda de confianza.



**Figura 25** Niveles estación Marralu, Ayapel año 2009 (Gamma -0,3).

En las figuras 25, 29 y 33 se observa que el nivel de agua pronosticado esta por fuera de la banda de confianza por lo tanto no refleja el comportamiento real de los valores medidos en campo. Los valores pronosticados están por encima del nivel registrado esto quiere decir que se sobre estima el valor medido, en efecto, los niveles que se pronosticaron no son acertados ya que se encuentran por fuera de la banda de confianza.

De igual forma como en las anteriores modelaciones, se evaluó el desempeño de este modelo por dos cirterios.

Los resultados del primero “intervalos de aceptabilidad de aciertos” se muestran en las figuras 26 y 27 se observa que los pronósticos obtenidos se consideran como no satisfactorios tanto para la modelación con el parámetro -0,3 y 0,3, debido a que aproximadamente el 97% de los pronósticos superan la margen de error del 15%. Esto se debe a que los pronósticos en la mayoría de los casos para la serie de 2007 a 2012 en la modelación con parámetro 0,3 son aproximadamente 2 veces mayores que los niveles registrados y en efecto los errores obviamente van a ser más grandes superando así la margen del 15% como se aprecia en la tabla 9.

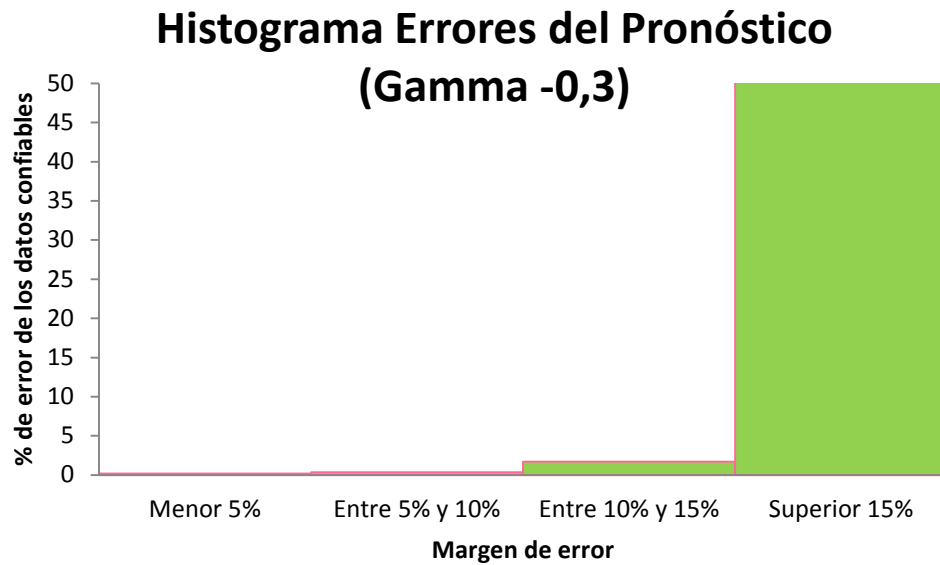
**Tabla 9** Resultados del pronóstico (Gamma 0,3)

| FECHA      | NIVELES<br>REGISTRADOS | MARGEN<br>+10% | MARGEN -<br>10% | NIVELES<br>PRONÓSTICADOS | ERROR |
|------------|------------------------|----------------|-----------------|--------------------------|-------|
| 29/05/2008 | 594                    |                |                 |                          |       |
| 30/05/2008 | 578                    | 635,8          | 520,2           | 1065,9                   | 32,94 |
| 31/05/2008 | 560                    | 616            | 504             | 1082,3                   | 38,72 |
| 25/06/2008 | 551                    | 606,1          | 495,9           | 1053,1                   | 39,32 |
| 26/06/2008 | 583                    | 641,3          | 524,7           | 1020,3                   | 37,19 |
| 27/06/2008 | 619                    | 680,9          | 557,1           | 1003,9                   | 27,57 |
| 28/06/2008 | 666                    | 732,6          | 599,4           | 1062,2                   | 27,13 |
| 29/06/2008 | 693                    | 762,3          | 623,7           | 1127,8                   | 25,45 |
| 30/06/2008 | 702                    | 772,2          | 631,8           | 1213,5                   | 29,72 |
| 01/07/2008 | 723                    | 795,3          | 650,7           | 1262,7                   | 33,25 |
| 02/07/2008 | 728                    | 800,8          | 655,2           | 1279,1                   | 31,06 |
| 03/07/2008 | 721                    | 793,1          | 648,9           | 1317,3                   | 34,05 |
| 04/07/2008 | 719                    | 790,9          | 647,1           | 1326,5                   | 36,29 |
| 05/07/2008 | 714                    | 785,4          | 642,6           | 1313,7                   | 35,36 |
| 06/07/2008 | 717                    | 788,7          | 645,3           | 1310,1                   | 35,93 |
| 07/07/2008 | 720                    | 792            | 648             | 1300,9                   | 34,42 |
| 08/07/2008 | 723                    | 795,3          | 650,7           | 1306,4                   | 34,42 |

Por su parte en la modelación con parámetro -0,3 (tabla 10), los pronósticos son menores que los niveles registrados y en efecto los errores aumentan, sin embargo no son tan elevados como los errores de los pronósticos con el parámetro 0,7, pero de igual modo superan la margen de error del 15% para el 97% de los pronósticos realizados. Demostrando una vez más que dependiendo de la condición del parámetro empleado en la Ecuación Diferencial los niveles pronosticados van a ser tantas veces menores o mayores que el nivel registrado.

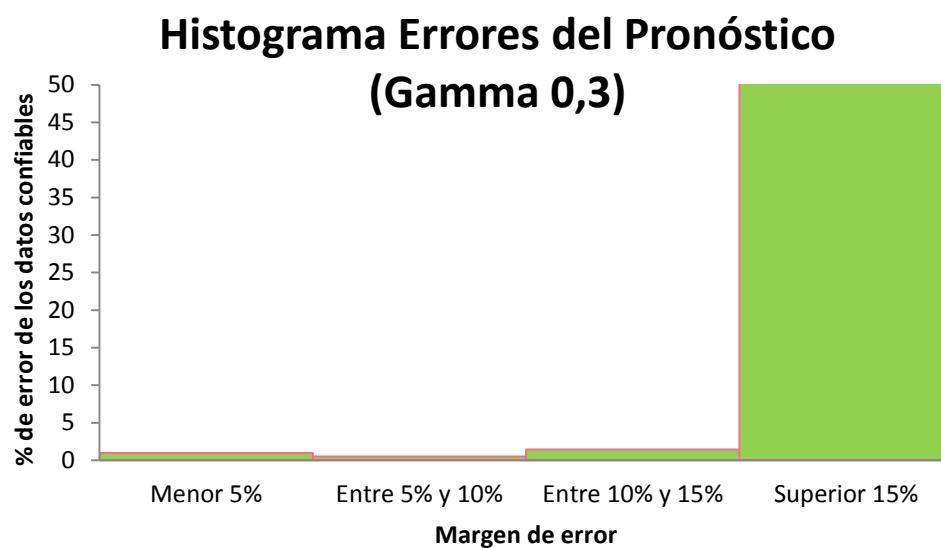
**Tabla 10** Resultados del pronóstico (Gamma 0,3)

| FECHA      | NIVELES<br>REGISTRADOS | MARGEN<br>+10% | MARGEN -<br>10% | NIVELES<br>PRONÓSTICADOOS | ERROR |
|------------|------------------------|----------------|-----------------|---------------------------|-------|
| 29/05/2008 | 594                    |                |                 |                           |       |
| 30/05/2008 | 578                    | 635,8          | 520,2           | 321,0                     | 27,04 |
| 31/05/2008 | 560                    | 616            | 504             | 325,9                     | 23,86 |
| 25/06/2008 | 551                    | 606,1          | 495,9           | 317,2                     | 23,53 |
| 26/06/2008 | 583                    | 641,3          | 524,7           | 307,3                     | 24,70 |
| 27/06/2008 | 619                    | 680,9          | 557,1           | 302,3                     | 29,98 |
| 28/06/2008 | 666                    | 732,6          | 599,4           | 319,9                     | 30,22 |
| 29/06/2008 | 693                    | 762,3          | 623,7           | 339,7                     | 31,14 |
| 30/06/2008 | 702                    | 772,2          | 631,8           | 365,5                     | 28,80 |
| 01/07/2008 | 723                    | 795,3          | 650,7           | 380,3                     | 26,86 |
| 02/07/2008 | 728                    | 800,8          | 655,2           | 385,2                     | 28,06 |
| 03/07/2008 | 721                    | 793,1          | 648,9           | 396,7                     | 26,42 |
| 04/07/2008 | 719                    | 790,9          | 647,1           | 399,5                     | 25,19 |
| 05/07/2008 | 714                    | 785,4          | 642,6           | 395,6                     | 25,71 |
| 06/07/2008 | 717                    | 788,7          | 645,3           | 394,5                     | 25,39 |
| 07/07/2008 | 720                    | 792            | 648             | 391,8                     | 26,22 |
| 08/07/2008 | 723                    | 795,3          | 650,7           | 393,4                     | 26,22 |



**Figura 26** Histograma Errores del Pronóstico.

En las figuras 26, 27, 30, 31, 34 y 35 se muestra la distribución porcentual de errores de los pronósticos, donde la mayor porción de errores se ubican en el margen que superan el 15%, el cual es catalogado como pronósticos no satisfactorios, es decir, no son datos confiables. Al aplicar este modelo se concluye que la mayoría de datos pronosticados no son confiables por lo tanto la modelación no es la acertada.



**Figura 27** Histograma Errores del Pronóstico.

En el segundo criterio “porcentaje de pronósticos acertados” se obtiene que en la modelación con el parámetro -0,3 el 45% de los pronósticos se catalogan como inaceptables, por el contrario en la modelación con el parámetro 0,3 el 65% de los pronósticos se consideran como satisfactorios por lo que es preciso decir que este último se ajustaría parcialmente a las condiciones de la zona en estudio.

Mediante estas dos modelaciones se ratifica, que al utilizar parámetros negativos en el modelo, al momento de ser evaluadas la desviación estándar y el error disminuyen, por lo tanto hace que el porcentaje de aciertos de pronósticos  $P_{\%}$  sea menor que cuando se emplea parámetros positivos en la ecuación diferencial.

**Tabla 11** Resultado de la evaluación del criterio “porcentaje de pronósticos acertados” Gamma -0.3

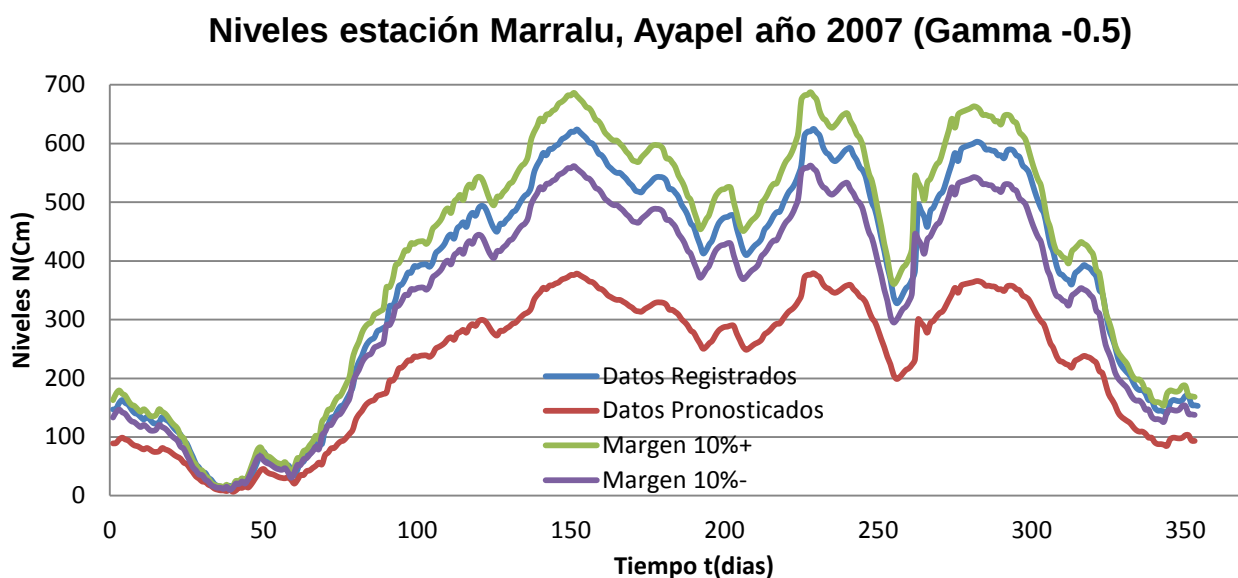
| Estación | $\bar{H}$ | $S$   | $\Delta error$ | Total Pronósticos | $P_{acertados}$ | $P_{NO\ acertados}$ | $P_{\%}$ |
|----------|-----------|-------|----------------|-------------------|-----------------|---------------------|----------|
| MARRALU  | 450.5     | 173.3 | 116.8          | 2040              | 918             | 2958                | 45       |

**Tabla 12** Resultado de la evaluación del criterio “porcentaje de pronósticos acertados” Gamma 0.3

| Estación | $\bar{H}$ | $S$   | $\Delta \text{error}$ | Total Pronósticos | $P_{\text{acertados}}$ | $P_{\text{NO acertados}}$ | $P_{\%}$ |
|----------|-----------|-------|-----------------------|-------------------|------------------------|---------------------------|----------|
| MARRALU  | 450.5     | 281.9 | 190.0                 | 2040              | 1256                   | 784                       | 65       |

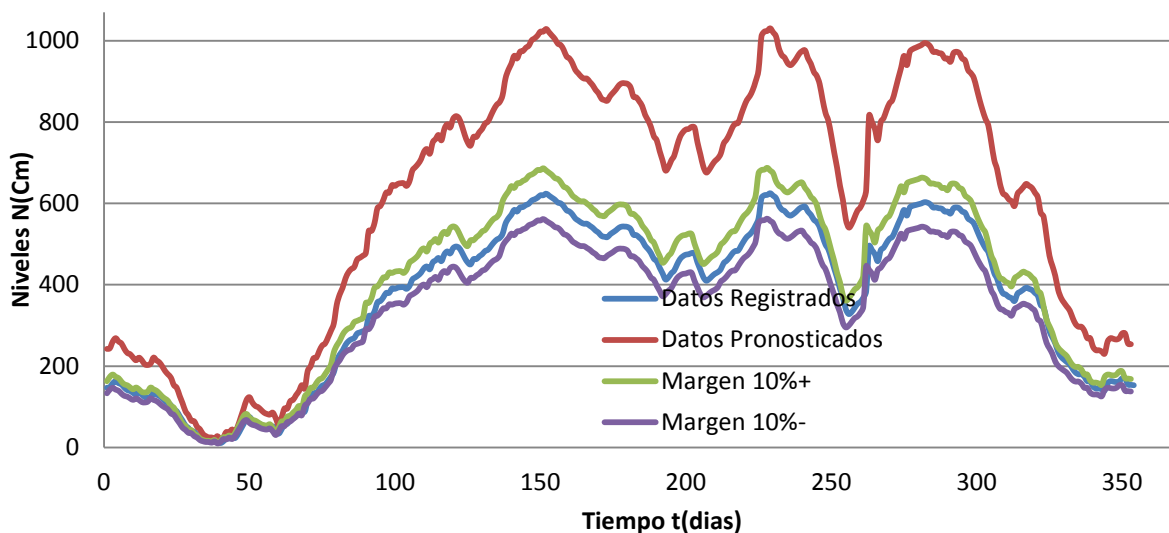
### 5.6. MODELADO EMPLEANDO GAMMA -0.5 Y 0.5

De igual forma se presentan los resultados de la modelación con los parámetros -0,5 y 0,5 que fueron aplicados a la Ecuación Diferencial Determinista. Se observa que en las figuras 28 y 29, los niveles pronosticados con el parámetro -0,5 siguen una tendencia muy por debajo de los niveles registrados y las márgenes y lo mismo sucede con el parámetro 0,5 solo que en este caso los niveles pronosticados están por encima de los demás niveles.



**Figura 28** Niveles estacion Marralu, Ayapel año 2007 (Gamma -0,5)

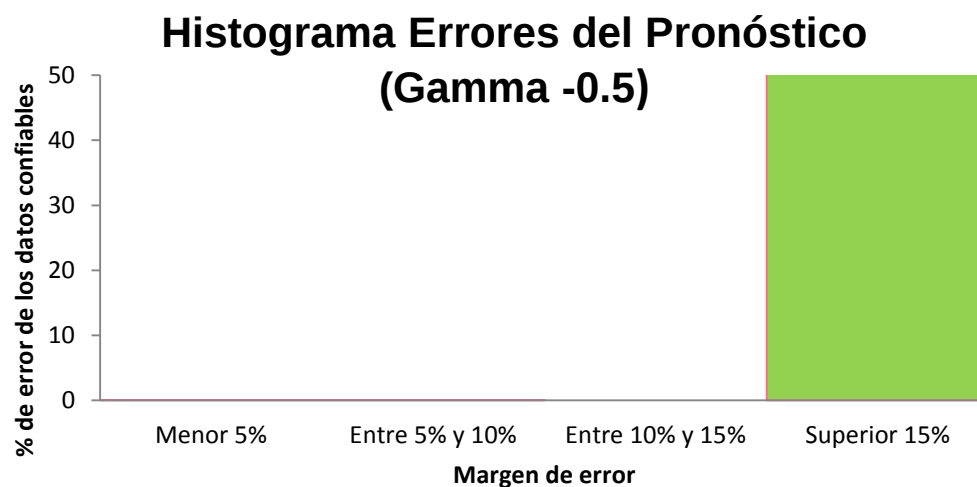
### Niveles estación Marralu, Ayapel año 2007 (Gamma 0.5)



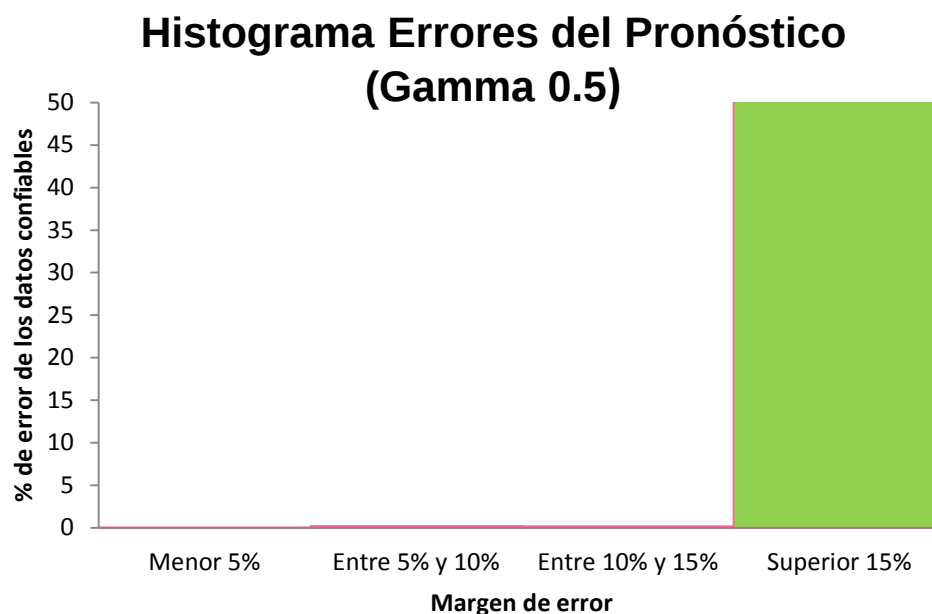
**Figura 29** Niveles estacion Marralu, Ayapel año 2007 (Gamma 0,5).

De igual forma como en las anteriores modelaciones, se evaluó el desempeño de este modelo por dos criterios.

Los resultados del primero “intervalos de aceptabilidad de aciertos” se muestran en las figuras 30 y 31 se observa que los pronósticos obtenidos se consideran como no satisfactorios para la modelación con el parámetro -0,5 y 0,5, debido a que aproximadamente el 99.7% de los pronósticos superan el margen de error del 15%.



**Figura 30** Histograma Errores del Pronóstico.



**Figura 31** Histograma Errores del Pronóstico

En el segundo criterio “porcentaje de pronósticos acertados” se obtiene que en la modelación con el parámetro -0,5 el 29,41% de los pronósticos se catalogan como inaceptables, asimismo en la modelación con el parámetro 0,5 el 39,01% de los pronósticos se consideran como inaceptables por lo que es preciso decir que ninguno de los dos modelos se ajusta a las condiciones de la zona en estudio.

**Tabla 13** Resultado de la evaluación del criterio “porcentaje de pronósticos acertados” Gamma -0.5

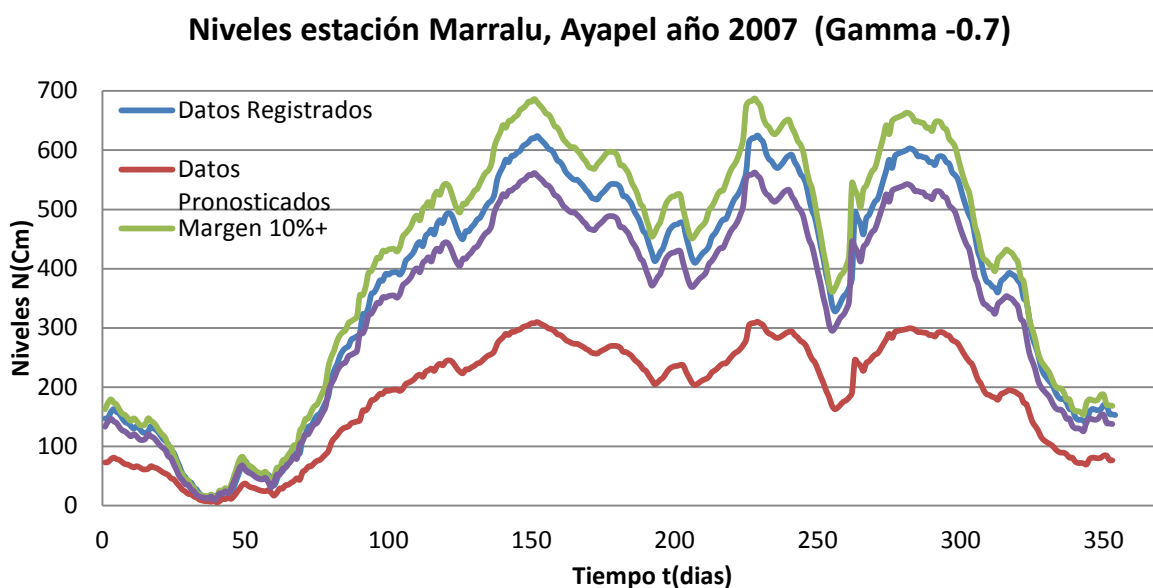
| Estación | $\bar{H}$ | $S$   | $\Delta error$ | Total Pronósticos | $P_{acertados}$ | $P_{NO\ acertados}$ | $P_{\%}$ |
|----------|-----------|-------|----------------|-------------------|-----------------|---------------------|----------|
| MARRALU  | 450.5     | 205.9 | 138.8          | 2040              | 600             | 1439                | 29,41    |

**Tabla 14** Resultado de la evaluación del criterio “porcentaje de pronósticos acertados” Gamma 0.5

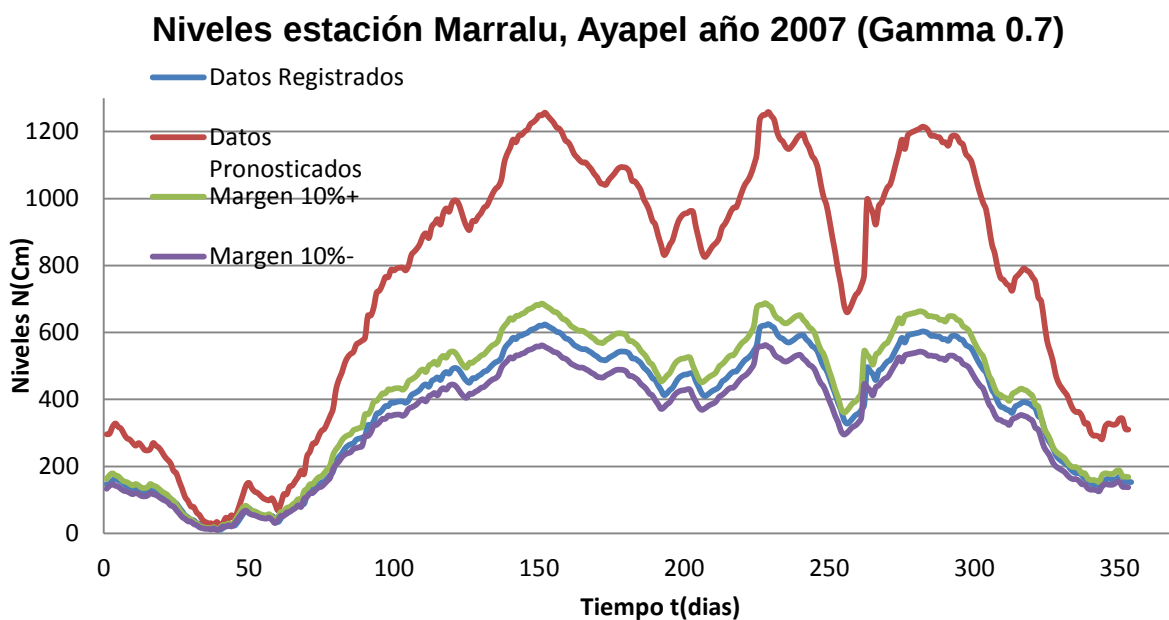
| Estación | $\bar{H}$ | $S$   | $\Delta error$ | Total Pronósticos | $P_{acertados}$ | $P_{NO\ acertados}$ | $P_{\%}$ |
|----------|-----------|-------|----------------|-------------------|-----------------|---------------------|----------|
| MARRALU  | 450.7     | 408.5 | 275.3          | 2040              | 796             | 1244                | 39,01    |

### 5.7. MODELADO EMPLEANDO GAMMA -0.7 Y 0.7

Finalmente se obtiene la modelación con los parámetros -0.7 y 0,7. Las figuras 32 y 33 reflejan el mismo comportamiento que se ha venido presentando en las anteriores modelaciones mediante la aplicación de los diferentes parámetros. Con esto se puede corroborar que dependiendo de la condición del parámetro los niveles pronosticados van a resultar por arriba o por debajo de los demás niveles.



**Figura 32** Niveles estacion Marralu, Ayapel año 2007 (Gamma -0,7).



**Figura 33** Niveles estacion Marralu, Ayapel año 2007 (Gamma 0,7).

De igual forma como en las anteriores modelaciones, se evaluó el desempeño de este modelo por dos cirterios.

Los resultados del primero “intervalos de aceptabilidad de aciertos” se muestran en la figuras 33 y 34, se observa que los pronósticos realizados se consideran como no satisfactorios tanto para la modelación con el parámetro -0,7 como el 0,7, debido a que aproximadamente el 99.9% de los pronósticos superan el margen de error del 15%, mostrando un comportamiento de una curva asimétrica hacia la derecha. Esto sucede porque los pronósticos en la mayoría de los casos para la serie de 2007 a 2012 en la modelación con parámetro 0,7 son aproximadamente 3 veces mayores que los niveles registrados y en efecto los errores obviamente van a ser más grandes superando así la margen del 15% como se aprecia en la tabla 15.

**Tabla 15** Resultados del pronóstico (Gamma 0,7)

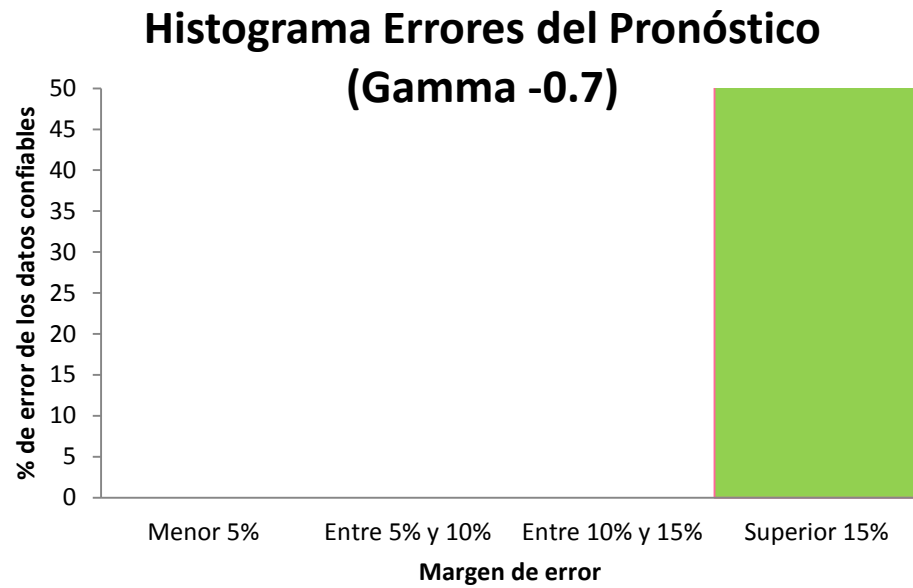
| FECHA      | NIVELES REGISTRADOS | MARGEN +10% | MARGEN - 10% | NIVELES PRONÓSTICADOOS | ERROR  |
|------------|---------------------|-------------|--------------|------------------------|--------|
| 13/09/2012 | 539                 |             |              |                        |        |
| 14/09/2012 | 550                 | 605         | 495          | 2279,0                 | 109,96 |
| 15/09/2012 | 546                 | 600,6       | 491,4        | 2185,7                 | 97,34  |
| 16/09/2012 | 517                 | 568,7       | 465,3        | 2230,3                 | 102,85 |
| 17/09/2012 | 504                 | 554,4       | 453,6        | 2214,1                 | 112,67 |
| 18/09/2012 | 555                 | 610,5       | 499,5        | 2096,5                 | 106,56 |
| 19/09/2012 | 562                 | 618,2       | 505,8        | 2043,8                 | 82,87  |
| 20/09/2012 | 554                 | 609,4       | 498,6        | 2250,6                 | 98,86  |
| 21/09/2012 | 520                 | 572         | 468          | 2279,0                 | 104,28 |
| 22/09/2012 | 485                 | 533,5       | 436,5        | 2246,5                 | 114,54 |
| 23/09/2012 | 465                 | 511,5       | 418,5        | 2108,7                 | 115,90 |
| 24/09/2012 | 450                 | 495         | 405          | 1966,7                 | 110,03 |
| 25/09/2012 | 469                 | 515,9       | 422,1        | 1885,6                 | 108,08 |
| 26/09/2012 | 504                 | 554,4       | 453,6        | 1824,8                 | 93,21  |
| 27/09/2012 | 456                 | 501,6       | 410,4        | 1901,8                 | 87,39  |
| 28/09/2012 | 535                 | 588,5       | 481,5        | 2043,8                 | 122,57 |
| 29/09/2012 | 552                 | 607,2       | 496,8        | 1849,1                 | 71,63  |

Por su parte en la modelación con parámetro -0,7 (tabla 16), los pronósticos son aproximadamente 3 veces menores que los niveles registrados y en efecto los errores aumentan, sin embargo no son tan elevados como los errores de los pronósticos con el parámetro 0,7, pero de igual modo superan la margen de error del 15% para el 99,9% de los pronósticos realizados. Demostrando una vez más que dependiendo de la condición del parámetro empleado en la Ecuación Diferencial los niveles pronosticados van a ser tantas veces menores o mayores que el nivel registrado.

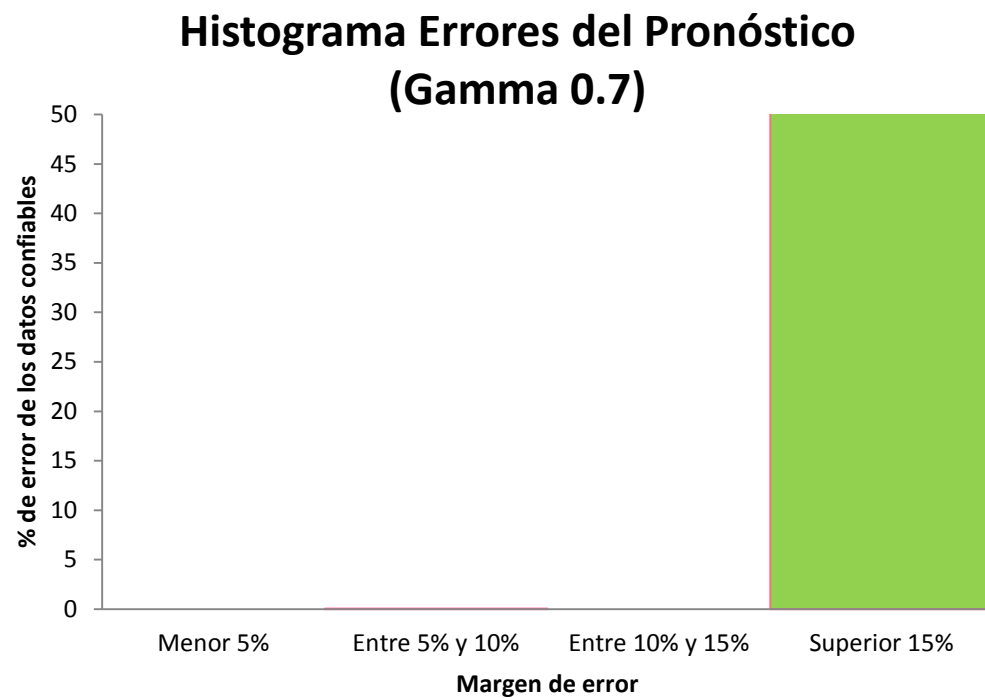
**Tabla 16** Resultados del pronóstico (Gamma -0,7)

| FECHA      | NIVELES<br>REGISTRADOS | MARGEN<br>+10% | MARGEN -<br>10% | NIVELES<br>PRONÓSTICADOS | ERROR |
|------------|------------------------|----------------|-----------------|--------------------------|-------|
| 13/09/2012 | 539                    |                |                 |                          |       |
| 14/09/2012 | 550                    | 605            | 495             | 138,5                    | 48,22 |
| 15/09/2012 | 546                    | 600,6          | 491,4           | 132,9                    | 51,33 |
| 16/09/2012 | 517                    | 568,7          | 465,3           | 135,6                    | 49,97 |
| 17/09/2012 | 504                    | 554,4          | 453,6           | 134,6                    | 47,55 |
| 18/09/2012 | 555                    | 610,5          | 499,5           | 127,4                    | 49,06 |
| 19/09/2012 | 562                    | 618,2          | 505,8           | 124,2                    | 54,90 |
| 20/09/2012 | 554                    | 609,4          | 498,6           | 136,8                    | 50,95 |
| 21/09/2012 | 520                    | 572            | 468             | 138,5                    | 49,62 |
| 22/09/2012 | 485                    | 533,5          | 436,5           | 136,6                    | 47,09 |
| 23/09/2012 | 465                    | 511,5          | 418,5           | 128,2                    | 46,75 |
| 24/09/2012 | 450                    | 495            | 405             | 119,5                    | 48,20 |
| 25/09/2012 | 469                    | 515,9          | 422,1           | 114,6                    | 48,68 |
| 26/09/2012 | 504                    | 554,4          | 453,6           | 110,9                    | 52,35 |
| 27/09/2012 | 456                    | 501,6          | 410,4           | 115,6                    | 53,78 |
| 28/09/2012 | 535                    | 588,5          | 481,5           | 124,2                    | 45,11 |

|            |     |       |       |        |       |
|------------|-----|-------|-------|--------|-------|
| 29/09/2012 | 552 | 607,2 | 496,8 | 112,44 | 57,67 |
|------------|-----|-------|-------|--------|-------|



**Figura 34** Histograma Errores del Pronóstico.



**Figura 35** Histograma Errores del Pronóstico.

En el segundo criterio “porcentaje de pronósticos acertados” se obtiene que en la modelación con el parámetro -0,7 el 25,24% de los pronósticos se catalogan como inaceptables, asimismo en la modelación con el parámetro 0,7 el 32,25% de los pronósticos se consideran como inaceptables, por lo que es preciso decir que ninguno de los dos modelos se ajusta a las condiciones de la zona en estudio.

**Tabla 17** Resultado de la evaluación del criterio “porcentaje de pronósticos acertados” Gamma -0.7

| <b>Estación</b> | <b><math>\bar{H}</math></b> | <b><math>S</math></b> | <b><math>\Delta error</math></b> | <b>Total<br/>Pronósticos</b> | <b><math>P_{acertados}</math></b> | <b><math>P_{NO\ acertados}</math></b> | <b><math>P_{\%}</math></b> |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| MARRALU         | 450.5                       | 242.5                 | 163.4                            | 2040                         | 515                               | 1525                                  | 25,24                      |

**Tabla 18** Resultado de la evaluación del criterio “porcentaje de pronósticos acertados” Gamma 0.7

| <b>Estación</b> | <b><math>\bar{H}</math></b> | <b><math>S</math></b> | <b><math>\Delta error</math></b> | <b>Total<br/>Pronósticos</b> | <b><math>P_{acertados}</math></b> | <b><math>P_{NO\ acertados}</math></b> | <b><math>P_{\%}</math></b> |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| MARRALU         | 450.5                       | 574.7                 | 387.4                            | 2040                         | 658                               | 1382                                  | 32,25                      |

## 5.8. MODELACION CON DATOS LIMITADOS

Esta modelación consistió en tomar una menor cantidad de datos para la parametrización aproximadamente unos 480 registros de niveles (del 1 de enero de 1997 hasta 7 de agosto de 1998), y 499 datos para la validación (del 8 de agosto de 1998 hasta el 20 de diciembre de 1999), con el fin de analizar y determinar si es posible tomar cantidades pequeñas de datos sobre todo cuando

la información es escasa, lo que sucede mucho en nuestro país, y así obtener un pronóstico satisfactorio.

La razón por la cual se tomó como valor de referencia los 480 datos, se debe a que se realizó una prueba con 353 grupo de datos de los niveles de agua del río San Jorge en la parametrización y validación del modelo, por lo tanto el pronóstico que se registró fue satisfactorio, por el contrario, al tomar datos menores a 300 no se obtuvo un pronóstico acertado. Así mismo, se concluye que al tomar grupos de datos mayores a 300 hasta 5000 (datos disponibles de la estación de los niveles de agua del río San Jorge) se obtenían pronósticos favorables.

Para el proceso de parametrización se seleccionaron una parte de los datos disponibles los cuales corresponden a los años 1997-1998. La tabla 19 muestra un fragmento del pronóstico de los niveles de la estación Marralu y su respectivo error como resultado de la parametrización.

**Tabla 19** Resultados de la parametrización del modelo

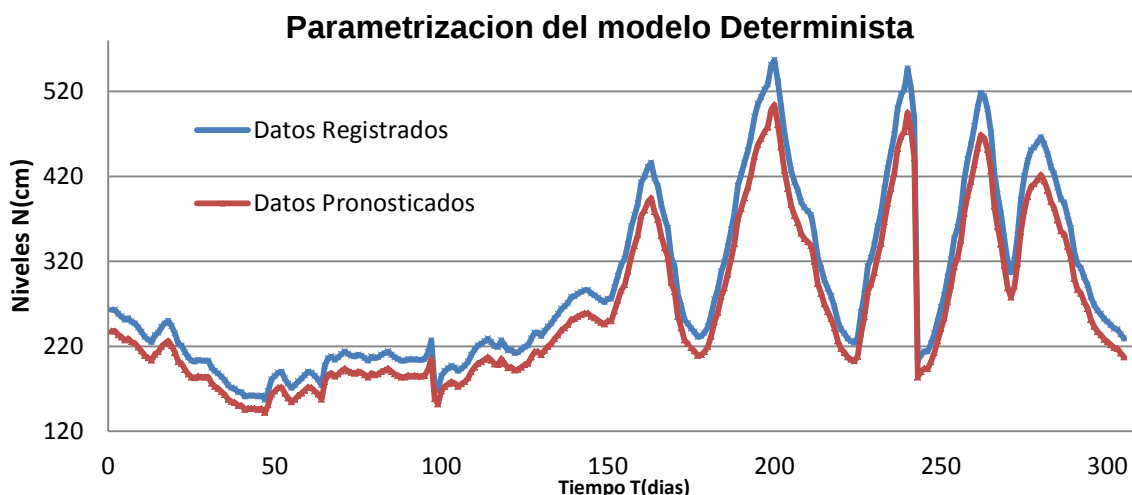
| FECHA      | REGISTRADO<br><i>Hayapel<sub>i</sub></i> | PRONÓSTICADO<br><i>Hayapel<sub>i+1</sub></i> | ERROR |
|------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|
| 01/01/1997 | 263                                      |                                              |       |
| 02/01/1997 | 263                                      | 290,65                                       | 10,51 |
| 03/01/1997 | 258                                      | 290,65                                       | 12,65 |
| 04/01/1997 | 255                                      | 285,13                                       | 11,81 |
| 05/01/1997 | 251                                      | 281,81                                       | 12,27 |
| 06/01/1997 | 253                                      | 277,39                                       | 9,64  |
| 07/01/1997 | 249                                      | 279,60                                       | 12,29 |
| 08/01/1997 | 247                                      | 275,18                                       | 11,41 |
| 01/01/1998 | 149                                      | 163,56                                       | 9,77  |
| 02/01/1998 | 157                                      | 164,67                                       | 4,88  |
| 03/01/1998 | 154                                      | 173,51                                       | 12,67 |
| 04/01/1998 | 199                                      | 170,19                                       | 14,47 |
| 05/01/1998 | 144                                      | 219,92                                       | 52,72 |
| 06/01/1998 | 128                                      | 159,14                                       | 24,33 |
| 07/01/1998 | 119                                      | 141,46                                       | 18,87 |
| 08/01/1998 | 114                                      | 131,51                                       | 15,36 |

El parametro  $\gamma$  que obtuvo un mejor resultado fue -0.1, con un error promedio para toda la serie de 1997-1998 de 10,57359351%. A continuación se muestra cada error promedio correspondiente a cada parametro utilizado en la ecuación diferencial.

**Tabla 20** Resultados de la parametrización del modelo

| GAMMA | ERROR PROMEDIO | GAMMA | ERROR PROMEDIO |
|-------|----------------|-------|----------------|
| -0,1  | 10,57          | 1     | 172,66         |
| -0,2  | 18,71          | 0,9   | 146,75         |
| -0,3  | 26,24          | 0,8   | 123,31         |
| -0,4  | 33,17          | 0,7   | 102,10         |
| -0,5  | 39,45          | 0,6   | 82,91          |
| -0,6  | 45,13          | 0,5   | 65,54          |
| -0,7  | 50,28          | 0,4   | 49,83          |
| -0,8  | 54,97          | 0,3   | 35,67          |
| -0,9  | 59,22          | 0,2   | 22,93          |
| -1    | 146,75         | 0,1   | 11,64          |

La figura 36 muestra que los niveles pronosticados siguen un comportamiento similar a los niveles registrados, esto se debe a que los pronósticos son resultado de la misma inercia de los niveles registrados en la estación.



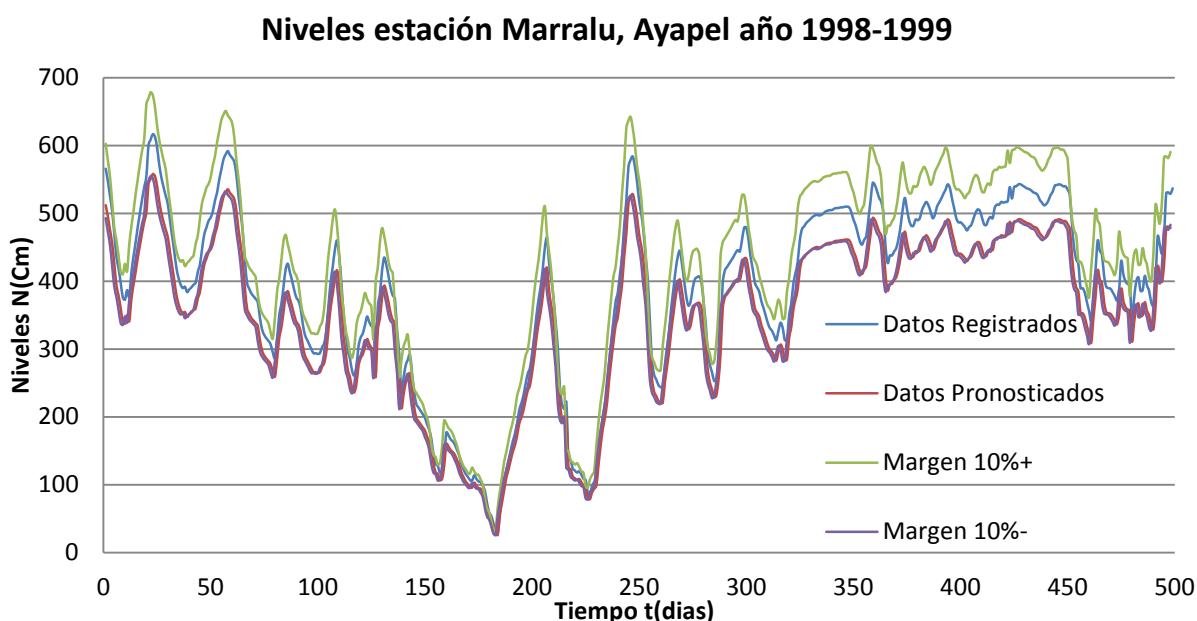
**Figura 36** Parametrización del modelo determinista.

Se obtuvieron un total de 498 pronósticos, en el periodo comprendido desde el 8 de agosto de 1998 hasta el 20 de diciembre de 1999. En la tabla 21, se muestra un fragmento de los pronósticos de los niveles en centímetros de la estación Marralu que resultaron de la aplicación de la Ecuación Diferencial Determinista, y los respectivos márgenes por encima y por debajo del 10%.

**Tabla 21** Resultados del pronóstico (Datos limitados).

| FECHA      | NIVELES<br>REGISTRADOS | MARGEN<br>+10% | MARGEN -<br>10% | NIVELES<br>PRONÓSTICADOOS | ERROR      |
|------------|------------------------|----------------|-----------------|---------------------------|------------|
| 01/01/1999 | 214                    |                |                 |                           |            |
| 02/01/1999 | 209                    | 229,9          | 188,1           | 179,30                    | 7,40215208 |
| 03/01/1999 | 204                    | 224,4          | 183,6           | 175,20                    | 7,35157538 |
| 04/01/1999 | 199                    | 218,9          | 179,1           | 171,11                    | 7,29851943 |
| 05/01/1999 | 189                    | 207,9          | 170,1           | 167,02                    | 7,24279735 |
| 06/01/1999 | 181                    | 199,1          | 162,9           | 162,92                    | 4,72875863 |
| 07/01/1999 | 168                    | 184,8          | 151,2           | 154,74                    | 5,51697679 |
| 08/01/1999 | 145                    | 159,5          | 130,5           | 148,19                    | 2,51454008 |
| 09/01/1999 | 131                    | 144,1          | 117,9           | 137,54                    | 4,83633533 |
| 10/01/1999 | 128                    | 140,8          | 115,2           | 118,71                    | 0,15376001 |
| 11/01/1999 | 118                    | 129,8          | 106,2           | 107,25                    | 7,3955455  |
| 12/01/1999 | 120                    | 132            | 108             | 104,79                    | 1,84814448 |
| 13/01/1999 | 142                    | 156,2          | 127,8           | 96,61                     | 11,0243206 |
| 14/01/1999 | 177                    | 194,7          | 159,3           | 98,24                     | 23,5348661 |
| 15/01/1999 | 173                    | 190,3          | 155,7           | 116,25                    | 27,4085235 |

En la figura 37, se puede observar la dinámica de los niveles medios registrados del río San Jorge en la estación Marralu y los niveles pronosticados resultantes de la aplicación del modelo, junto con los márgenes por encima y por debajo del 10%. Se puede apreciar que los niveles pronosticados se encuentran ubicados por debajo de los niveles registrados y entre las márgenes, estando siempre cercano al margen por debajo. Esto ratifica una vez más que dependiendo del signo que tenga el parámetro el pronóstico va a dar por encima o por debajo del nivel registrado. En este caso como es negativo, va a estar siempre por debajo del registrado.



**Figura 37** Niveles estación Marralu, Ayapel 1998-1999

De igual forma como en las anteriores modelaciones, se evaluó el desempeño de este modelo por dos criterios.

Los resultados del primero “intervalos de aceptabilidad de aciertos” se muestran en la tabla 22 y se observa que los pronósticos obtenidos pertenecen al rango de muy buenos y buenos puesto que el 57% de los 2040 casos para el periodo comprendido desde el 8 de agosto de 1998 hasta el 20 de diciembre de 1999, se ubicaron en un margen de error entre el 5% y el 10% con respecto al valor del nivel registrado en la estación Marralu en el río San Jorge. Por el contrario, los pronósticos de los niveles que tuvieron un margen de error superior al 15% se catalogan como no satisfactorios, de manera que se obtuvo un total de 55 casos ubicados en este rango.

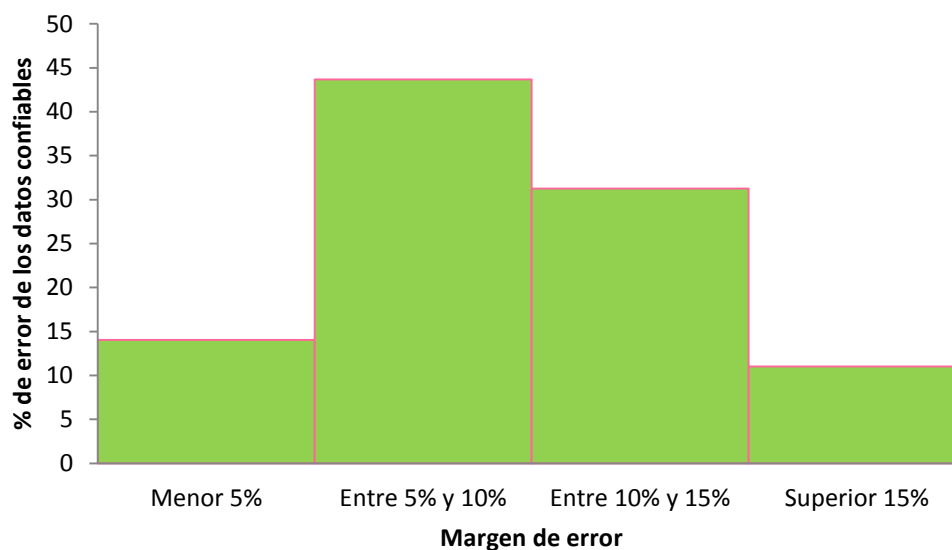
**Tabla 22** Resultados de la evaluación “intervalos de aceptabilidad de aciertos” del modelo

| Margen de error | DATOS | %          |
|-----------------|-------|------------|
| Menor 5%        | 70    | 14,0280561 |
| Entre 5% y 10%  | 218   | 43,6873747 |
| Entre 10% y     | 156   | 31,2625251 |

|                     |     |            |
|---------------------|-----|------------|
| <b>15%</b>          |     |            |
| <b>Superior 15%</b> | 55  | 11,0220441 |
| <b>TOTAL</b>        | 499 | 100        |

En La figura 38 se observa una distribucion normal con curva simetrica de los errores del pronóstico, lo que significa que la mayoría de estos se ubican en el centro puesto que se acercan a la media (9.99) de los errores del pronostico.

### Histograma Errores del Pronóstico



**Figura 38** Histograma Errores del Pronóstico

En el segundo criterio “porcentaje de pronósticos acertados” se obtiene que el 98,59% de los pronósticos se consideren como satisfactorios, por lo que es preciso decir que el modelo se ajusta a las condiciones de la zona en estudio.

**Tabla 23** Resultado de la evaluación del criterio “porcentaje de pronósticos acertados”

| Estación | $\bar{H}$   | $S$         | $\Delta \text{ error}$ | Total Pronósticos | $P_{\text{acertados}}$ | $P_{\text{NO acertados}}$ | $P_{\%}$ |
|----------|-------------|-------------|------------------------|-------------------|------------------------|---------------------------|----------|
| MARRALU  | 387,9038076 | 125,5273006 | 84,60540061            | 499               | 492                    | 7                         | 98,59    |

Por otro lado, mediante este último pronóstico, se concluye que no es necesario grandes volúmenes de datos para llevar a cabo la modelación de la Ecuación Diferencial Determinista, debido a la adecuada bondad de ajuste que mostró al momento de evaluar su desempeño. Lo que representaría una ventaja al momento de emplear este modelo en zonas donde la información hidrometeorológica es escasa.

## 5.9. ANALISIS DEL MODELO

A continuación se muestra la tabla 24 que unifica los resultados de la evaluación de los diferentes modelos empleados en este proyecto.

**Tabla 24** Aglomeración de los resultados de la evaluación del desempeño del modelo

|                        | Intervalos                                   | % de acierto del pronóstico |
|------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>MODELO PAR- 0,1</b> | 5-10% Para el 60% de los casos               | 98,28                       |
| <b>MODELO PAR 0,1</b>  | 10-15% Para el 45% de los casos              | 99,5                        |
| <b>MODELO PAR 0,3</b>  | Superiores a 15% Para el 97% de los casos    | 65                          |
| <b>MODELO PAR -0,3</b> | Superiores a 15% Para el 97% de los casos    | 45                          |
| <b>MODELO PAR 0,5</b>  | Superiores a 15% Para el 99,7 % de los casos | 39                          |
| <b>MODELO PAR -0,5</b> | Superiores a 15%                             | 29                          |

|                               |                                              |       |
|-------------------------------|----------------------------------------------|-------|
|                               | Para el 99,7% de los casos                   |       |
| <b>MODELO PAR 0,7</b>         | Superiores a 15%<br>Para el 99% de los casos | 32    |
| <b>MODELO PAR -0,7</b>        | Superiores a 15%<br>Para el 99% de los casos | 25    |
| <b>MODELO DATOS LIMITADOS</b> | 5-10% Para el 57% de los casos               | 98,59 |

Después de obtener el pronóstico hidrológico, como resultado de la modelación matemática determinista, la cual presentó una bondad de ajuste satisfactoria, se puede decir que este modelo es una herramienta que serviría de apoyo al sistema de alerta temprana porque entrega información concreta de los niveles del río San Jorge a nivel diario, es decir, se entraría a la etapa de decidir según el modelo cibernético de Wiener donde una vez se cuente con el pronóstico del nivel de agua se emite el aviso, boletín o alerta y es aquí donde le corresponde al usuario tomar decisiones al respecto, con el objetivo de alertar y preparar a la comunidad más susceptible, en este caso a los habitantes del municipio de Ayapel y sus veredas; minimizando así los daños como muertes a personas, pérdidas económicas, de infraestructura y de servicios ambientales básicos de igual manera facilitaría la atención oportuna de eventos por parte del Sistema de Prevención y Atención de Desastres y del Comité Regional de Atención y Prevención de Desastres CREPAD.

## 6. CONCLUSIONES

- Después de obtener el pronóstico hidrológico, como resultado de la modelación matemática determinista, la cual presentó una bondad de ajuste satisfactoria, se puede decir que este modelo es una herramienta que serviría de apoyo al sistema de alerta temprana porque entrega información concreta de los niveles del río San Jorge a nivel diario, es decir, se entraría a la etapa de decidir según el modelo cibernético de Wiener donde una vez se cuente con el pronóstico del nivel de agua se emite el aviso, boletín o alerta y es aquí donde le corresponde al usuario tomar decisiones al respecto, con el objetivo de alertar y preparar a la comunidad más susceptible, en este caso a los habitantes del municipio de Ayapel y sus veredas; minimizando así los daños como muertes a personas, pérdidas económicas, de infraestructura y de servicios ambientales básicos de igual manera facilitaría la atención oportuna de eventos por parte del Sistema de Prevención y Atención de Desastres y del Comité Regional de Atención y Prevención de Desastres CREPAD.
- Los resultados obtenidos del modelo determinístico se pueden aplicar de tal manera que conociendo el valor del nivel de agua mañana, se puede comparar ese valor con la cota máxima de desborde o inundación y a partir de esto si el valor del pronóstico está por encima de la cota de desborde se emiten los sistemas de alertas.
- A pesar de que existen modelos más robustos, hay que tener en cuenta que estos requieren una mayor cantidad de información, la cual muchas veces no está disponible o es escasa, por lo tanto es importante utilizar modelos que requieren poca información y que de igual modo son confiables y eficientes, de los cuales se obtienen resultados satisfactorios como el caso del modelo basado en la ecuación diferencial determinista que se aplicó.
- El modelo de la Ecuación Diferencial Determinista es un instrumento de fácil comprensión, debido a su sencillez, lo que representa una ventaja para la aplicación del modelo en las oficinas del sistema de alertas tempranas y corporaciones.
- Los pronósticos hidrológicos son de gran importancia dentro de la prevención del riesgo debido a que es una herramienta 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 o subterráneas (en

este caso los niveles de agua iguales o por encima de la cota normal del río). Estos pronósticos se convierten en instrumentos de apoyo a los sistemas de alerta temprana, ya que por medio de boletines, avisos y alertas (amarilla, naranja y roja) comunican y preparan a la comunidad ante diferentes eventos que pueden generar desastres y tomar acciones de evacuación y protección de la vida de las mismas.

- En la parametrización del modelo de la ecuación diferencial determinista se encontró que el valor óptimo fue  $-0,1$ , puesto que arrojó menor error promedio; posteriormente en la evaluación del desempeño del pronóstico se encontró que por el método “intervalos de aceptabilidad de aciertos”, los pronósticos obtenidos pertenecen al rango de muy buenos y buenos puesto que el 60% de los 2040 casos estudiados, se ubicaron en un margen de error, entre el 5% y el 10%, y mediante el criterio “porcentaje de pronósticos acertados” se obtuvo que el 98,28% de los pronósticos son acertados demostrando una bondad de ajuste muy buena. Por lo que se puede decir que este criterio es más generoso, por consiguiente verifica que el modelo se ajustó a las condiciones de la zona de estudio.
- En el modelado con parámetro  $0,1$ ; se obtuvo que, mediante el método de evaluación de pronósticos “intervalos de aceptabilidad de aciertos” los pronósticos pertenecen al rango de satisfactorios puesto que el 46% de los 2040 casos estudiados, se ubicaron en un margen de error del 10% y el 15% y el 38,82% pertenecen al margen de buenos y muy buenos; por otro lado en el segundo criterio “porcentaje de pronósticos acertados” se obtuvo que el 99,5% de los pronósticos son acertados demostrando una bondad de ajuste muy buena. Por lo que se puede decir que este criterio verifica que este modelo empleando el parámetro  $0,1$  se ajustó a las condiciones de la zona de estudio, siendo aproximadamente 1% más efectivo que el modelo utilizando el parámetro  $-0,1$ .
- En el modelado con los parámetros  $-0,3$  y  $0,3$ , se determinó por medio de la evaluación de desempeño “intervalos de aceptabilidad de aciertos”, que los pronósticos se consideran como no satisfactorios tanto para la modelación con el parámetro  $-0,3$  como  $0,3$ , debido a que aproximadamente el 97% de los pronósticos superan la margen de error del 15%. Esto se debe a que los pronósticos en la mayoría de los casos para la serie de 2007 a 2012 en la modelación con parámetro  $0,3$  son aproximadamente 2 veces mayores que los niveles registrados y con  $-0,3$  los pronósticos son aproximadamente 2 veces menores, en efecto los errores van a ser más grandes superando así la margen del 15%. Ahora bien, por medio del segundo criterio “porcentaje de pronósticos acertados” se obtuvo que en la modelación con el parámetro

-0,3 el 45% de los pronósticos se catalogan como inaceptables, por el contrario en la modelación con el parámetro 0,3 el 65% de los pronósticos se consideran como satisfactorios por lo que es preciso decir que este último se ajustaría parcialmente a las condiciones de la zona de estudio.

- En el modelado con los parámetros -0,5 y 0,5, se determinó por medio de la evaluación de desempeño “intervalos de aceptabilidad de aciertos”, que los pronósticos obtenidos se consideran como no satisfactorios para la modelación con el parámetro -0,5 y 0,5, debido a que aproximadamente el 99.7% de los pronósticos superan el margen de error del 15%. Ahora bien, por medio del segundo criterio “porcentaje de pronósticos acertados” se obtuvo que en la modelación con el parámetro -0,5 el 29,41% de los pronósticos se catalogan como inaceptables, asimismo en la modelación con el parámetro 0,5 el 39,01% de los pronósticos se consideran como inaceptables por lo que es preciso decir que ninguno de los dos modelos se ajustó a las condiciones de la zona en estudio.
- En el modelado con los parámetros -0,7 y 0,7, se determinó por medio de la evaluación de desempeño “intervalos de aceptabilidad de aciertos”, que los pronósticos realizados se consideran como no satisfactorios tanto para la modelación con el parámetro -0,7 como el 0,7, debido a que aproximadamente el 99.9% de los pronósticos superan la margen de error del 15%. Ahora bien, por medio del segundo criterio “porcentaje de pronósticos acertados” se obtuvo que en la modelación con el parámetro -0,7 el 25,24% de los pronósticos se catalogan como inaceptables, asimismo en la modelación con el parámetro 0,7 el 32,25% de los pronósticos se consideran como inaceptables, por lo que es preciso decir que ninguno de los dos modelos se ajustó a las condiciones de la zona en estudio.
- Se puede decir que, dependiendo de la condición del parámetro empleado en la Ecuación Diferencial los niveles pronosticados van a ser tantas veces menores o mayores que el nivel registrado.
- En la modelación con cantidades limitadas de información se determinó por medio de la evaluación de desempeño “intervalos de aceptabilidad de aciertos”, que los pronósticos realizados pertenecen al rango de muy buenos y buenos puesto que el 57% de los 2040 casos estudiados, se ubicaron en un margen de error entre el 5% y el 10%. Ahora bien, por medio del segundo criterio “porcentaje de pronósticos acertados” se obtuvo que el 98,59% de los pronósticos se consideran como satisfactorios, por lo que es preciso decir que el modelo se ajustó a las condiciones de la zona en estudio.

- Se concluye que al tomar grupos de datos mayores de 300 a 5000 (datos disponibles de la estación de los niveles de agua del río San Jorge) se obtenían pronósticos favorables. Y menores a 300 los pronósticos eran inaceptables; por lo tanto no es representativo utilizar una muestra de datos menores a trecientos.
- Por otro lado, mediante este último pronóstico, se concluye también que no es necesario grandes volúmenes de datos para llevar a cabo la modelación de la Ecuación Diferencial Determinista, debido a la adecuada bondad de ajuste que mostró al momento de evaluar su desempeño. Lo que representaría una ventaja al momento de emplear este modelo en zonas donde la información hidrometeorológica es escasa.
- De manera general, el modelo de la ecuación diferencial determinista mostró un buen ajuste cuando se emplearon en la modelización los parámetros -0,1 y 0,1, e incluso cuando se probó con pocos datos en la parametrización y validación de este, donde los pronósticos superaron el 90% de los aciertos.
- Las modelaciones con parámetros 0,3, -0,3; 0,5, -0,5 y 0,7, -0,7 mostraron un ajuste inaceptable debido a que aproximadamente el 95% de los casos superaron la margen de error del 15%.
- Al utilizar parámetros negativos en la ecuación diferencial determinista, la desviación estándar y el error disminuyeron notablemente y por lo tanto hace que el porcentaje de aciertos de pronósticos  $P_{\%}$ , sea menor que cuando se emplea parámetros positivos en la ecuación diferencial.

## 7. RECOMENDACIONES

Se sugiere llevar a cabo otros pronósticos hidrológicos empleando diferentes modelos entre los cuales se encuentran la Inteligencia Artificial como las redes neuronales y lógica difusa; otros basados en ecuaciones estocásticas como los modelos ARMA y ARIMA; otros relacionados con series de tiempo como modelos de suavizamiento, descomposición y regresión; o técnicas de minería de datos como arboles de decisión, redes neuronales, estadísticas (regresión lineal, correlaciones), redes bayesianas mediante el uso de programas como el WEKA que brinda las herramientas necesarias para el desarrollo y constitución del modelo asimismo del reconocimiento de patrones.

Por otro lado se considera necesario para próximos estudios tener en cuenta no solo el nivel de hoy del río, sino también  $t-1$  y  $t-2$ , además de incluir las precipitaciones y caudales no solo de la misma estación empleada sino también la de estaciones circundantes. Además se podría complementar este estudio no solo prediciendo el nivel de mañana, de manera que se obtenga igualmente  $t+2$ ,  $t+3$  y  $t+10$ .

Para monitorear, vigilar y hacer que el sistema de alertas como mecanismo de gestión del riesgo entregue información a tiempo, es necesario fortalecer los pronósticos hidrológicos y con ello la red hidrológica de nuestro país, que le proporcione datos suficientes de niveles de agua del río con los cuales, se pueda predecir adecuadamente y así tomar decisiones al respecto.

## 8. REFERENCIAS

- [1] Gobernación del Departamento de Córdoba, «Plan Departamental de la gestion del riego de Córdoba,» Monteria, 2012.
- [2] L. G. Palacios Vargas y S. X. Parra Dueñas, «Sistema de identificacion y clasificacion de tendencias historicas de cota de nivel en la estacion hidrologica el Banco, ubicada en el rio Magdalena, para pronostico de inundaciones,» Bogota, 2014.
- [3] IDEAM, «Protocolo para la emision de pronosticos hidrologicos,» Bogota, 2008.
- [4] Departamento Nacional de Planeacion, «Plan de Ordenamiento Ambiental y Desarrollo territorial de La Mojana,» Bogota, 2012.
- [5] CVS, «Plan de gestion Ambiental Regional,» Monteria, 2008.
- [6] M. Fernandez Mejuto, A. Vela Mayorga y S. Castaño Fernandez, La utilizacion de modelos en hidrologia, SF.
- [7] E. A. Dominguez Calle, «mathmodelling,» 27 03 2010. [En línea]. Available: <http://www.mathmodelling.org/home/publicaciones>.
- [8] E. A. Dominguez Calle, H. Angarita y H. Rivera, «Viabilidad de pronosticos hidrologicos diarios, semanales y decadales en Colombia,» Bogota, 2010.
- [9] A. Florez Leal, «Desarrollo, aplicación del modelo determinista para pronosticar los niveles pentadales del agua en periodo de estiaje del rio pamplonita en la gestion del riesgo por desabastecimiento del agua de la ciudad de cucuta,» Pamplona, 2003.
- [10] M. E. Rivera y Y. Umanets, «Prevencion en tiempo real del riesgo por desabastecimiento de agua en los sistemas de riego para la agricultura ante la variabilidad hidologica,aplicando la teoria de procesos Estocasticos,» Bogota D.C., 2007.

- [11] E. Torres Quintero y E. Gonzalez Naranjo, «Aplicacion del modelo de simulacion hidraulica HEC-RAS para la emision de pronosticos hidrológicos de inundacion de tiempo real, en la cuenca media del rio Bogota-Sector Alicachin,» Bogota, SF.
- [12] T. Estrela, Modelos matematicos para la evaluacion de recursos hidricos, Madrid: Centro de estudios y experimentacion de obras publicas, 1992.
- [13] A. Sanchez Jabba, «La Economia del bajo San Jorge,» Cartagena, 2013.
- [14] J. E. Rubio Gomez, «Gestion ambiental del riesgo por inundaciones,» Bogota, SF.
- [15] F. M. Caicedo Carrascal, «Asimilacion de la precipitacion estimada por imagenes de satelite de modelos hidrológicos aglutinados y distribuidos, caso de estudio afluencias al embalse de Betania Huila, Colombia,» Bogota, 2008.
- [16] IDEAM, «Alertas Tempranas: una estrategia para reducir impactos de los desastres naturales y prepararnos para el cambio climatico,» Bogota, 2008.
- [17] IDEAM, «Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua,» Bogota, 2007.
- [18] T. Courtney M y F. Tim G., «Deterministic and probabilistic flood modeling for contemporary and future coastal and inland precipitation inundation,» *Applied Geography*, pp. 1-14, 2014.
- [19] L. F. Quintero Lopez , «Scribid,» Junio 2010. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/61653016/Estudio-Hidro-San-Jorge-Final>.
- [20] R. K. Senado Cruz, «Gestion integrada en la gestion del riego de inundaciones en Colombia,» Valencia, 2012.
- [21] L. F. Quintero Lopez, «Estudio hidrológico e hidraulico de la cuenca del rio San Jorge-Municipio de Ayapel,» Medellin, 2010.
- [22] W. O. Jaimes Torres, «Modelado Inteligente para soportar decisiones del sector de navegacion en el rio Magdalena,» Pamplona, Colombia, 2006.
- [23] D. I. Chavasse y R. S. Seoane, «Asociacion Deterministico-Estocastico,» Argentina, 1997.

- [24] G. Perez Luna y H. Rubio Gutierrez, «Estado del arte en pronosticos hidrologicos en Mexico,» Mexico, 2012.
- [25] L. Thorjörn, T. Høgasen y B. J. Cosby, «Impact of time series data on calibration and prediction uncertainty for a deterministic hydrogeochemical model,» *ecological modelling*, pp. 22-33, 2007.
- [26] J. Cabrera, «Calibracion de modelos hidrologicos,» 2011.

# ANEXOS

## ANEXO 1. Registro de los niveles proporcionados por el IDEAM

|                                                                          |         |         |                |              |                          |         |                            |                             |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------------------------------|---------|---------|----------------|--------------|--------------------------|---------|----------------------------|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES |         |         |                |              |                          |         |                            |                             |         |         |         |         |
| SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL                                |         |         |                |              |                          |         |                            |                             |         |         |         |         |
| FECHA DE PROCESO : 2014/08/28                                            |         |         | VALORES MEDIOS |              | DIARIOS DE NIVELES (Cms) |         |                            | ESTACION : 25027120 MARRALU |         |         |         |         |
| LATITUD 0818 N                                                           |         |         | TIPO EST       | LM           | DEPTO CORDOBA            |         | FECHA-INSTALACION 1977-ENE |                             |         |         |         |         |
| LONGITUD 7514 W                                                          |         |         | ENTIDAD        | 01 IDEAM     | MUNICIPIO AYAPEL         |         | FECHA-SUSPENSION           |                             |         |         |         |         |
| ELEVACION 27 m.s.n.m                                                     |         |         | REGIONAL       | 02 ATLANTICO | CORRIENTE SAN JORGE      |         |                            |                             |         |         |         |         |
| *****                                                                    |         |         |                |              |                          |         |                            |                             |         |         |         |         |
| DIA                                                                      | ENERO * | FEBRE * | MARZO *        | ABRIL *      | MAYO *                   | JUNIO * | JULIO *                    | AGOST *                     | SEPTI * | OCTUB * | NOVIE * | DICIE * |
| *****                                                                    |         |         |                |              |                          |         |                            |                             |         |         |         |         |
| 01                                                                       | 149     | 104     | 109            |              |                          |         | 479                        | 607                         | 597     | 565     | 426     | 268     |
| 02                                                                       | 157     | 103     | 107            |              |                          |         | 490                        | 611                         | 572     | 580     | 413     | 261     |
| 03                                                                       | 154     | 105     | 104            |              |                          |         | 504                        | 604                         | 553     | 587     | 401     | 274     |
| 04                                                                       | 199     | 107     | 104            |              |                          |         | 506                        | 594                         | 539     | 592     | 387     | 304     |
| 05                                                                       | 144     | 109     | 105            |              |                          |         | 508                        | 587                         | 526     | 586     | 376     | 317     |
| 06                                                                       | 128     | 108     | 106            |              |                          |         | 512                        | 562                         | 514     | 582     | 371     | 323     |
| 07                                                                       | 119     | 108     | 107            |              |                          |         | 515                        | 574                         | 490     | 576     | 360     | 335     |
| 08                                                                       | 114     | 108     | 103            |              |                          |         | 512                        | 566                         | 467     | 557     | 337     | 348     |
| 09                                                                       | 110     | 107     | 102            |              |                          |         | 510                        | 548                         | 444     | 526     | 321     | 340     |
| 10                                                                       | 107     | 102     | 102            |              |                          |         | 512                        | 526                         | 420     | 501     | 314     | 334     |
| 11                                                                       | 110     | 103     | 133            |              |                          |         | 511                        | 504                         | 405     | 471     | 307     | 330     |
| 12                                                                       | 108     | 105     | 105            |              |                          |         | 511                        | 471                         | 395     | 430     | 300     | 286     |
| 13                                                                       | 104     | 103     | 105            |              |                          |         | 514                        | 436                         | 390     | 397     | 294     | 362     |
| 14                                                                       | 102     | 102     | 103            |              |                          |         | 514                        | 419                         | 392     | 389     | 294     | 382     |
| 15                                                                       | 104     | 104     | 103            |              |                          |         | 517                        | 398                         | 384     | 382     | 293     | 416     |
| 16                                                                       | 102     | 104     | 102            |              |                          |         | 523                        | 376                         | 388     | 378     | 294     | 435     |
| 17                                                                       | 103     | 103     | 102            |              |                          |         | 530                        | 373                         | 391     | 374     | 303     | 424     |
| 18                                                                       | 103     | 102     | 102            |              |                          |         | 545                        | 387                         | 395     | 369     | 309     | 408     |
| 19                                                                       | 105     | 105     | 103            |              |                          |         | 567                        | 377                         | 398     | 346     | 328     | 390     |
| 20                                                                       | 104     | 103     | 103            |              |                          |         | 580                        | 413                         | 414     | 329     | 365     | 379     |
| 21                                                                       | 104     | 102     | 124            |              |                          |         | 590                        | 437                         | 425     | 321     | 399     | 374     |
| 22                                                                       | 105     | 103     | 105            |              |                          |         | 597                        | 458                         | 448     | 316     | 422     | 328     |
| 23                                                                       | 106     | 104     | 104            |              |                          |         | 591                        | 481                         | 469     | 312     | 447     | 294     |
| 24                                                                       | 104     | 104     | 105            |              |                          |         | 585                        | 501                         | 479     | 307     | 460     | 236     |
| 25                                                                       | 103     | 104     | 108            |              |                          |         | 579                        | 521                         | 489     | 295     | 437     | 257     |
| 26                                                                       | 102     | 105     | 111            |              |                          |         | 581                        | 539                         | 494     | 287     | 399     | 276     |
| 27                                                                       | 104     | 107     | 156            |              |                          |         | 584                        | 555                         | 503     | 315     | 352     | 284     |
| 28                                                                       | 102     | 104     | 124            |              |                          |         | 590                        | 601                         | 519     | 350     | 326     | 292     |
| 29                                                                       | 105     |         | 129            |              |                          |         | 595                        | 609                         | 531     | 367     | 298     | 264     |
| 30                                                                       | 104     |         | 134            |              |                          |         | 595                        | 617                         | 550     | 392     | 286     | 237     |
| 31                                                                       | 103     |         | 146            |              |                          |         | 605                        | 613                         |         | 418     |         | 219     |
| MEDIA                                                                    | 115     | 104     | 111            | *            | *                        | *       | 543                        | 512                         | 466     | 425     | 354     | 322     |
| MAXIMA ABSOLUTA                                                          | 248     | 111     | 199            | *            | *                        | *       | 608                        | 620                         | 603     | 592     | 467     | 435     |
| MINIMA MEDIA                                                             | 102     | 102     | 102            | *            | *                        | *       | 479                        | 373                         | 384     | 287     | 286     | 219     |
| ** DATOS PRELIMINARES **                                                 |         |         |                |              |                          |         |                            |                             |         |         |         |         |
| *** VALORES ANUALES ***                                                  |         |         |                |              |                          |         |                            |                             |         |         |         |         |
| MEDIA 328                                                                |         |         |                |              |                          |         |                            |                             |         |         |         |         |
| MAXIMA ABSOLUTA 620                                                      |         |         |                |              |                          |         |                            |                             |         |         |         |         |
| MINIMA MEDIA 102                                                         |         |         |                |              |                          |         |                            |                             |         |         |         |         |

I

## I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

| SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL |                         |          |              |                             |        |                 |         |                 |         |         |         |         |
|-------------------------------------------|-------------------------|----------|--------------|-----------------------------|--------|-----------------|---------|-----------------|---------|---------|---------|---------|
| VALORES MEDIOS DIARIOS DE NIVELES (cms)   |                         |          |              | ESTACION : 25027120 MARRALU |        |                 |         |                 |         |         |         |         |
| ANO 2001                                  |                         |          |              | FECHA-INSTALACION 1977-ENE  |        |                 |         |                 |         |         |         |         |
| FECHA DE PROCESO : 2014/08/28             |                         |          |              | FECHA-SUSPENSION            |        |                 |         |                 |         |         |         |         |
| LATITUD 0818 N                            |                         | TIPO EST | LM           | DEPTO CORDOBA               |        |                 |         |                 |         |         |         |         |
| LONGITUD 7514 W                           |                         | ENTIDAD  | 01 IDEAM     | MUNICIPIO AYAPEL            |        |                 |         |                 |         |         |         |         |
| ELEVACION 27 m.s.n.m                      |                         | REGIONAL | 02 ATLANTICO | CORRIENTE SAN JORGE         |        |                 |         |                 |         |         |         |         |
| *****                                     |                         |          |              |                             |        |                 |         |                 |         |         |         |         |
| DIA                                       | ENERO *                 | FEBRE *  | MARZO *      | ABRIL *                     | MAYO * | JUNIO *         | JULIO * | AGOST *         | SEPTI * | OCTUB * | NOVIE * | DICIE * |
| *****                                     |                         |          |              |                             |        |                 |         |                 |         |         |         |         |
| 01                                        | 296                     | 119      | 18           | 113                         | 115    | 405             | 273     | 231             | 295     | 403     | 498     | 387     |
| 02                                        | 290                     | 114      | 24           | 98                          | 152    | 410             | 263     | 277             | 318     | 417     | 511     | 366     |
| 03                                        | 285                     | 108      | 63           | 83                          | 206    | 415             | 254     | 305             | 365     | 428     | 521     | 353     |
| 04                                        | 279                     | 103      | 95           | 74                          | 283    | 409             | 244     |                 | 353     | 440     | 528     | 337     |
| 05                                        | 271                     | 91       | 119          | 66                          | 323    | 368             | 237     | 366             | 303     | 430     | 536     | 319     |
| 06                                        | 260                     | 84       | 167          | 50                          | 225    | 319             | 230     | 418             | 369     | 441     | 540     | 314     |
| 07                                        | 248                     | 74       | 206          | 49                          | 274    | 291             | 238     | 455             | 423     | 452     | 541     | 309     |
| 08                                        | 243                     | 68       | 266          | 59                          | 301    | 268             | 248     | 438             | 374     | 462     | 545     | 296     |
| 09                                        | 234                     | 56       | 307          | 78                          | 360    | 240             |         | 458             | 330     | 472     | 545     | 264     |
| 10                                        | 228                     | 48       | 291          | 80                          | 404    | 219             | 259     | 440             | 302     | 490     | 545     | 245     |
| 11                                        | 219                     | 43       | 277          | 80                          | 377    | 235             | 253     | 423             | 276     | 498     | 548     | 299     |
| 12                                        | 216                     | 37       | 259          | 89                          | 314    | 291             | 286     | 402             | 239     | 477     | 548     | 384     |
| 13                                        | 212                     | 32       | 235          | 94                          | 281    | 326             | 272     | 321             |         | 527     | 548     | 333     |
| 14                                        | 207                     |          | 205          | 98                          | 240    | 318             | 259     | 298             |         | 548     | 548     | 286     |
| 15                                        | 203                     | 25       | 171          | 102                         | 208    | 289             | 254     | 265             |         | 537     | 548     | 291     |
| 16                                        | 203                     | 29       | 132          | 106                         | 312    | 234             | 249     | 234             | 381     | 510     | 548     | 294     |
| 17                                        | 202                     | 40       | 102          | 114                         | 455    | 274             | 250     | 266             | 383     | 499     | 548     | 295     |
| 18                                        | 197                     | 49       | 81           | 129                         | 397    | 246             | 263     | 301             | 391     | 486     | 548     | 294     |
| 19                                        | 194                     | 45       | 76           | 148                         | 363    | 233             | 273     | 318             | 383     | 471     | 548     | 284     |
| 20                                        | 189                     | 42       | 64           | 170                         | 321    | 283             | 280     | 338             | 372     | 465     | 548     | 274     |
| 21                                        | 184                     | 37       | 50           | 190                         | 322    | 338             | 290     | 348             | 367     | 459     | 544     | 268     |
| 22                                        | 179                     | 30       | 23           | 212                         | 412    | 412             | 273     | 368             | 359     | 454     | 522     | 259     |
| 23                                        | 177                     | 28       | 40           | 220                         | 462    | 426             | 255     | 340             | 352     | 449     | 513     | 249     |
| 24                                        | 176                     | 25       | 60           | 210                         | 472    | 403             | 226     | 299             | 336     | 445     | 497     | 242     |
| 25                                        | 173                     | 24       | 79           | 165                         | 438    | 390             | 210     | 265             | 334     | 449     | 477     | 239     |
| 26                                        | 163                     | 20       | 97           | 78                          | 460    | 357             | 210     | 249             | 349     | 456     | 459     | 235     |
| 27                                        | 158                     | 20       | 113          | 68                          | 456    | 315             | 208     | 220             | 361     | 464     | 446     | 232     |
| 28                                        | 148                     | 20       | 124          | 66                          | 445    | 253             | 207     | 214             | 367     | 471     | 428     | 233     |
| 29                                        | 140                     |          | 135          | 93                          | 422    | 240             | 205     | 263             | 378     | 484     | 422     | 235     |
| 30                                        | 126                     |          | 146          | 102                         | 371    | 276             | 206     | 292             | 384     | 490     | 414     | 231     |
| 31                                        |                         |          | 135          |                             | 398    |                 | 207     | 279             |         | 491     |         | 218     |
| *****                                     |                         |          |              |                             |        |                 |         |                 |         |         |         |         |
| MEDIA                                     | 210 3                   | 52 3     | 134          | 109                         | 341    | 316             | 246 3   | 323 3           | 349 3   | 470     | 517     | 286     |
| MAXIMA ABSOLUTA                           | 297 3                   | 120 3    | 309          | 221                         | 495    | 430             | 292 3   | 462 3           | 430 3   | 550     | 548     | 398     |
| MINIMA MEDIA                              | 126 3                   | 20 3     | 18           | 49                          | 115    | 219             | 205 3   | 214 3           | 239 3   | 403     | 414     | 218     |
| ** DATOS PRELIMINARES **                  | *** VALORES ANUALES *** |          |              |                             |        |                 |         |                 |         |         |         |         |
|                                           |                         |          |              |                             |        | MEDIA           | 279     | 3 : INCOMPLETOS |         |         |         |         |
|                                           |                         |          |              |                             |        | MAXIMA ABSOLUTA | 550     |                 |         |         |         |         |
|                                           |                         |          |              |                             |        | MINIMA MEDIA    | 18      |                 |         |         |         |         |

| FECHA DE PROCESO : 2014/08/28 |            | VALORES MEDIOS DIARIOS DE NIVELES (Cms) |              |           |           | ESTACION : 25027120 MARRALU |          | NACIONAL AMBIENTAL |         |          |         |         |
|-------------------------------|------------|-----------------------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------------------------|----------|--------------------|---------|----------|---------|---------|
| ANO 2007                      |            | ANO 2007                                |              | ANO 2007  |           | ANO 2007                    |          | ANO 2007           |         | ANO 2007 |         |         |
| LATITUD                       | 0818 N     | TIPO EST                                | LM           | DEPTO     | CORDOBA   | FECHA-INSTALACION           | 1977-ENE |                    |         |          |         |         |
| LONGITUD                      | 7514 W     | ENTIDAD                                 | 01 IDEAM     | MUNICIPIO | AYAPEL    | FECHA-SUSPENSION            |          |                    |         |          |         |         |
| ELEVACION                     | 27 m.s.n.m | REGIONAL                                | 02 ATLANTICO | CORRIENTE | SAN JORGE |                             |          |                    |         |          |         |         |
| *****                         |            |                                         |              |           |           |                             |          |                    |         |          |         |         |
| DIA                           | ENERO *    | FEBRE *                                 | MARZO *      | ABRIL *   | MAYO *    | JUNIO *                     | JULIO *  | AGOST *            | SEPTI * | OCTUB *  | NOVIE * | DICIE * |
| *****                         |            |                                         |              |           |           |                             |          |                    |         |          |         |         |
| 01                            | 147        | 31                                      | 34           | 323       | 494       | 624                         | 523      | 453                | 585     | 495      | 588     | 315     |
| 02                            | 148        | 27                                      | 44           | 323       | 491       | 619                         | 522      | 459                | 581     | 485      | 580     | 286     |
| 03                            | 158        | 20                                      | 58           | 335       | 480       | 614                         | 516      | 467                | 573     | 475      | 577     | 271     |
| 04                            | 163        | 17                                      | 58           | 357       | 466       | 609                         | 509      | 477                | 570     | 458      | 563     | 256     |
| 05                            | 158        | 15                                      | 69           | 360       | 455       | 602                         | 496      | 483                | 574     | 485      | 558     | 235     |
| 06                            | 155        | 15                                      | 71           | 369       | 450       | 600                         | 488      | 484                | 580     | 491      | 551     | 223     |
| 07                            | 147        | 13                                      | 78           | 380       | 463       | 593                         | 478      | 496                | 587     | 503      | 535     | 216     |
| 08                            | 141        | 17                                      | 84           | 380       | 463       | 583                         | 464      | 508                | 591     | 513      | 518     | 210     |
| 09                            | 139        | 11                                      | 93           | 391       | 470       | 580                         | 458      | 518                | 592     | 518      | 503     | 204     |
| 10                            | 134        | 15                                      | 88           | 390       | 475       | 573                         | 442      | 524                | 580     | 533      | 490     | 193     |
| 11                            | 130        | 23                                      | 114          | 393       | 483       | 563                         | 428      | 533                | 572     | 550      | 480     | 184     |
| 12                            | 134        | 22                                      | 121          | 394       | 486       | 558                         | 413      | 546                | 560     | 566      | 455     | 180     |
| 13                            | 130        | 27                                      | 133          | 394       | 495       | 553                         | 418      | 563                | 554     | 584      | 429     | 180     |
| 14                            | 124        | 23                                      | 134          | 390       | 504       | 550                         | 428      | 613                | 542     | 570      | 415     | 174     |
| 15                            | 123        | 32                                      | 144          | 397       | 511       | 550                         | 435      | 620                | 519     | 590      | 393     | 163     |
| 16                            | 125        | 45                                      | 152          | 413       | 515       | 545                         | 450      | 621                | 499     | 594      | 379     | 163     |
| 17                            | 134        | 58                                      | 155          | 418       | 525       | 540                         | 463      | 625                | 487     | 596      | 376     | 150     |
| 18                            | 130        | 71                                      | 164          | 423       | 550       | 533                         | 470      | 619                | 465     | 598      | 370     | 145     |
| 19                            | 127        | 75                                      | 174          | 430       | 563       | 528                         | 474      | 613                | 440     | 600      | 367     | 145     |
| 20                            | 121        | 67                                      | 185          | 441       | 572       | 520                         | 475      | 595                | 417     | 603      | 360     | 143     |
| 21                            | 114        | 62                                      | 213          | 445       | 584       | 518                         | 478      |                    | 390     | 602      | 378     | 140     |
| 22                            | 109        | 60                                      | 228          | 438       | 580       | 517                         | 477      |                    | 369     | 598      | 383     | 158     |
| 23                            | 104        | 56                                      | 238          | 455       | 590       | 524                         | 455      |                    | 340     | 590      | 388     | 163     |
| 24                            | 93         | 52                                      | 252          | 460       | 591       | 529                         | 437      |                    | 328     | 590      | 393     | 162     |
| 25                            | 89         | 50                                      | 261          | 466       | 596       | 534                         | 419      |                    | 333     | 588      | 390     | 161     |
| 26                            | 77         | 49                                      | 266          | 458       | 599       | 540                         | 410      |                    | 343     | 587      | 387     | 163     |
| 27                            | 66         | 52                                      | 269          | 475       | 607       | 543                         | 414      |                    | 353     | 580      | 380     | 170     |
| 28                            | 54         | 44                                      | 280          | 482       | 610       | 543                         | 421      |                    | 358     | 580      | 373     | 170     |
| 29                            | 48         |                                         | 283          | 477       | 614       | 542                         | 427      |                    | 368     | 575      | 350     | 155     |
| 30                            | 40         |                                         | 286          | 490       | 620       | 537                         | 431      |                    | 384     | 588      | 344     | 154     |
| 31                            | 39         |                                         | 290          |           | 620       |                             | 438      |                    |         | 590      |         | 153     |
| MEDIA                         | 116        | 37                                      | 162          | 411       | 533       | 559                         | 456      | 541 3              | 481     | 557      | 442     | 186     |
| MAXIMA ABSOLUTA               | 165        | 80                                      | 290          | 490       | 620       | 625                         | 525      | 625 3              | 592     | 604      | 590     | 320     |
| MINIMA MEDIA                  | 39         | 11                                      | 34           | 323       | 450       | 517                         | 410      | 453 3              | 328     | 458      | 344     | 140     |
| ** DATOS PRELIMINARES **      |            | *** VALORES ANUALES ***                 |              |           |           | ** ORIGENES DE DATO **      |          |                    |         |          |         |         |

|                 |     |
|-----------------|-----|
| MEDIA           | 373 |
| MAXIMA ABSOLUTA | 625 |
| MINIMA MEDIA    | 11  |

3 : INCOMPLETOS

## 0

1

ESTACION : 25027120 MARRALU  
FECHA-INSTALACION 1977-ENE  
FECHA-SUSPENSION

FECHA-INSTALACION 1977-ENE

FECHA-SUSPENSION

**Table 1**

\*\*\*\*\*

DIA       ENERO \* FEBRE \* MARZO \* ABRIL \* MAYO \* JUNIO \* JULIO \* AGOST \* SEPTI \* OCTUB \* NOVIE \* DICIE \*

|    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 01 |     | 124 | 232 | 302 | 445 | 605 | 664 | 662 | 624 | 590 | 476 | 498 |
| 02 |     | 122 | 264 | 299 | 413 | 597 | 644 | 685 | 621 | 584 | 496 | 502 |
| 03 | 163 | 122 | 264 | 330 | 350 | 595 | 633 | 701 | 619 | 574 | 486 | 507 |
| 04 | 153 | 119 | 248 | 350 | 349 | 599 | 642 | 704 | 622 | 564 | 496 | 500 |
| 05 | 145 | 120 | 241 | 375 | 345 | 598 | 648 | 690 | 634 | 560 | 483 | 511 |
| 06 | 140 | 112 | 239 | 389 | 383 | 599 | 654 | 691 | 641 | 556 | 469 | 508 |
| 07 | 134 | 113 | 285 | 439 | 364 | 565 | 656 | 700 | 643 | 560 | 471 | 504 |
| 08 | 123 | 122 | 444 | 513 | 380 | 559 | 659 | 719 | 642 | 565 | 480 | 515 |
| 09 | 127 | 113 | 471 | 440 |     | 572 | 660 | 737 | 628 | 573 | 473 | 513 |
| 10 | 123 | 116 | 480 |     | 455 | 599 | 645 | 739 | 613 | 582 | 481 | 512 |
| 11 | 121 | 116 | 457 | 585 | 482 | 612 | 634 | 719 | 585 | 585 | 476 | 512 |
| 12 | 115 | 110 | 413 | 578 | 435 | 609 | 618 | 705 | 595 | 588 | 469 | 507 |
| 13 | 115 | 110 | 364 | 474 | 461 | 641 | 594 | 693 | 623 | 593 | 488 | 493 |
| 14 | 110 | 110 | 350 | 428 | 448 | 619 | 582 | 681 | 641 | 592 | 506 | 483 |
| 15 | 102 | 101 | 325 | 488 | 458 | 634 | 582 | 664 | 646 | 591 | 506 | 510 |
| 16 | 102 | 108 | 326 | 578 | 441 | 643 | 596 | 652 | 652 | 578 | 509 | 517 |
| 17 |     | 113 | 308 | 511 | 450 | 663 | 614 | 655 | 642 | 559 | 506 | 526 |
| 18 | 144 | 102 | 293 | 450 | 483 | 691 | 622 | 661 | 616 | 546 | 506 | 535 |
| 19 | 144 | 104 | 325 | 400 | 418 | 729 | 629 | 678 | 597 | 543 | 493 | 547 |
| 20 | 144 | 106 | 323 | 365 | 464 | 732 | 634 | 699 | 587 | 528 | 478 | 559 |
| 21 | 146 | 109 | 307 | 349 | 552 | 735 | 631 | 712 | 582 | 514 | 466 | 568 |
| 22 | 140 | 105 | 306 | 417 | 607 | 715 | 639 | 728 | 587 | 498 | 459 | 569 |
| 23 | 140 | 120 | 332 | 550 | 617 | 699 | 641 | 733 | 589 | 510 | 454 | 558 |
| 24 | 132 | 123 | 317 | 478 | 658 | 685 | 639 | 738 | 590 | 513 | 476 | 544 |
| 25 | 134 | 116 |     | 432 | 678 | 678 | 621 | 715 | 591 | 509 | 478 | 528 |
| 26 | 135 | 113 |     | 464 | 693 | 675 | 619 | 693 | 583 | 500 | 466 | 511 |
| 27 | 137 | 121 |     | 413 | 607 | 678 | 630 | 678 | 577 | 482 | 456 | 511 |
| 28 | 130 | 122 |     | 403 | 625 | 681 | 636 | 662 | 575 | 468 | 451 | 534 |
| 29 | 136 |     |     | 411 | 630 | 684 | 637 | 658 | 579 | 474 | 471 | 530 |
| 30 | 130 |     |     | 479 | 611 | 679 | 643 | 642 | 586 | 477 | 476 | 512 |
| 31 | 122 |     |     |     | 615 |     | 655 | 634 |     | 466 |     | 489 |

|                 |     |   |     |     |   |     |   |     |   |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|-----|---|-----|-----|---|-----|---|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| MEDIA           | 132 | 3 | 114 | 330 | 3 | 437 | 3 | 497 | 3 | 645 | 632 | 691 | 610 | 542 | 480 | 519 |
| MAXIMA ABSOLUTA | 166 | 3 | 127 | 496 | 3 | 603 | 3 | 696 | 3 | 746 | 668 | 740 | 652 | 593 | 510 | 570 |
| MINIMA MEDIA    | 102 | 3 | 101 | 232 | 3 | 299 | 3 | 345 | 3 | 559 | 582 | 634 | 575 | 466 | 451 | 483 |

## DATOS PRELIMINARES ##

\*\*\* VALORES ANUALES \*\*\*

\*\* ORIGENES DE DATO \*\*

|                 |     |
|-----------------|-----|
| MEDIA           | 469 |
| MAXIMA ABSOLUTA | 746 |
| MINIMA MEDIA    | 101 |

3 : INCOMPLETOS

## **ANEXO 2. Registro de los niveles en hoja de EXCEL**

|                                                              |            |               |         |              |                     |        |         |         |         |                      |         |         |         |
|--------------------------------------------------------------|------------|---------------|---------|--------------|---------------------|--------|---------|---------|---------|----------------------|---------|---------|---------|
| INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES |            |               |         |              |                     |        |         |         |         |                      |         |         |         |
| SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL                    |            |               |         |              |                     |        |         |         |         |                      |         |         |         |
| NIVELES MEDIOS DIARIOS DE NIVELES (CMS)                      |            |               |         |              |                     |        |         |         |         |                      |         |         |         |
| AÑO 2000                                                     |            |               |         |              |                     |        |         |         |         |                      |         |         |         |
| ESTACION 25027120 MARRALU                                    |            |               |         |              |                     |        |         |         |         |                      |         |         |         |
| LATITUD                                                      | 803 N      | TIPO ESTACION |         | LM           | DEPTO CORDOBA       |        |         |         | FECHA   | INSTALACION 1968-ABR |         |         |         |
| LONGITUD                                                     | 7521 W     | ENTIDAD       |         | 01 IDEAM     | MUNICIPIO AYAPEL    |        |         |         | FECHA   | SUSPENSION           |         |         |         |
| ELEVACION                                                    | 37 m.s.n.m | REGIONAL      |         | 02 ATLANTICO | CORRIENTE SAN JORGE |        |         |         |         |                      |         |         |         |
| DIA                                                          |            | ENERO *       | FEBRE * | MARZO *      | ABRIL *             | MAYO * | JUNIO * | JULIO * | AGOST * | SEPTI *              | OCTUB * | NOVIE * | DICIE * |
| 1                                                            |            | 248           | 182     | 373          | 147                 | 269    | 334     | 427     | 406     | 334                  | 350     | 431     | 268     |
| 2                                                            |            | 232           | 177     | 383          | 149                 | 259    | 513     | 369     | 362     | 324                  | 352     | 358     | 272     |
| 3                                                            |            | 223           | 175     | 311          | 150                 | 275    | 575     | 363     | 332     | 320                  | 403     | 382     | 317     |
| 4                                                            |            | 222           | 172     | 267          | 168                 | 233    | 527     | 366     | 337     | 352                  | 497     | 343     | 321     |
| 5                                                            |            | 233           | 169     | 252          | 176                 | 316    | 446     | 370     | 404     | 432                  | 339     | 312     | 318     |
| 6                                                            |            | 242           | 169     | 241          | 295                 | 292    | 403     | 414     | 433     | 343                  | 294     | 310     | 353     |
| 7                                                            |            | 222           | 164     | 223          | 213                 | 332    | 416     | 468     | 365     | 294                  | 275     | 304     | 416     |
| 8                                                            |            | 217           | 164     | 256          | 186                 | 328    | 346     | 448     | 370     | 302                  | 303     | 332     | 370     |
| 9                                                            |            | 223           | 161     | 221          | 182                 | 339    | 328     | 346     | 470     | 325                  | 340     | 265     | 337     |
| 10                                                           |            | 226           | 159     | 218          | 167                 | 284    | 313     | 301     | 457     | 443                  | 424     | 264     | 286     |
| 11                                                           |            | 209           | 155     | 214          | 152                 | 321    | 333     | 285     | 365     | 502                  | 513     | 290     | 262     |
| 12                                                           |            | 209           | 154     | 203          | 150                 | 386    | 328     | 281     | 328     | 467                  | 433     | 284     | 258     |
| 13                                                           |            | 203           | 151     | 194          | 182                 | 383    | 295     | 277     | 393     | 378                  | 343     | 302     | 247     |
| 14                                                           |            | 199           | 150     | 188          | 184                 | 323    | 291     | 283     | 413     | 369                  | 355     | 339     | 234     |
| 15                                                           |            | 194           | 148     | 176          | 193                 | 360    | 339     | 352     | 406     | 327                  | 319     | 273     | 228     |
| 16                                                           |            | 187           | 148     | 185          | 184                 | 355    | 328     | 446     | 380     | 356                  | 338     | 258     | 220     |
| 17                                                           |            | 181           | 145     | 184          | 193                 | 339    | 348     | 478     | 385     | 367                  | 337     | 254     | 209     |
| 18                                                           |            | 179           | 148     | 173          | 180                 | 368    | 381     | 426     | 362     | 428                  | 463     | 251     | 202     |
| 19                                                           |            | 178           | 153     | 167          | 220                 | 357    | 383     | 445     | 373     | 371                  | 566     | 273     | 200     |
| 20                                                           |            | 175           | 147     | 161          | 236                 | 351    | 405     | 337     | 302     | 332                  | 586     | 281     | 202     |
| 21                                                           |            | 171           | 147     | 164          | 203                 | 340    | 347     | 362     | 278     | 352                  | 515     | 303     | 195     |
| 22                                                           |            | 169           | 153     | 162          | 185                 | 302    | 340     | 510     | 268     | 359                  | 449     | 259     | 197     |
| 23                                                           |            | 167           | 151     | 152          | 194                 | 275    | 367     | 410     | 320     | 342                  | 349     | 255     | 197     |
| 24                                                           |            | 166           | 212     | 150          | 202                 | 327    | 477     | 334     | 358     | 332                  | 336     | 226     | 191     |
| 25                                                           |            | 183           | 367     | 149          | 278                 | 357    | 423     | 373     | 412     | 394                  | 380     | 222     | 196     |
| 26                                                           |            | 176           | 370     | 147          | 309                 | 450    | 407     | 348     | 390     | 339                  | 336     | 233     | 206     |
| 27                                                           |            | 298           | 265     | 146          | 229                 | 505    | 318     | 418     | 464     | 452                  | 333     | 256     | 193     |
| 28                                                           |            | 233           | 365     | 143          | 209                 | 413    | 334     | 548     | 383     | 508                  | 318     | 261     | 281     |
| 29                                                           |            | 205           | 415     | 141          | 209                 | 378    | 372     | 542     | 344     | 489                  | 285     | 234     | 263     |
| 30                                                           |            | 195           |         | 139          | 354                 | 353    | 353     | 505     | 388     | 423                  | 336     | 229     | 235     |

| A         | B          | C     | D     | E                                                            | F            | G    | H         | I         | J      | K     | L                                         | M     | N     | O   | P |
|-----------|------------|-------|-------|--------------------------------------------------------------|--------------|------|-----------|-----------|--------|-------|-------------------------------------------|-------|-------|-----|---|
|           |            |       |       | INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES |              |      |           |           |        |       |                                           |       |       |     |   |
|           |            |       |       |                                                              |              |      |           |           |        |       | SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL |       |       |     |   |
|           |            |       |       | NIVELES MEDIOS DIARIOS DE NIVELES (CMS)                      |              |      |           |           |        |       |                                           |       |       |     |   |
|           |            |       |       |                                                              |              |      |           |           |        |       |                                           |       |       |     |   |
|           |            |       |       |                                                              |              |      | AÑO 2005  |           |        |       | ESTACION 25027120 MARRALU                 |       |       |     |   |
|           |            |       |       |                                                              |              |      |           |           |        |       |                                           |       |       |     |   |
| LATITUD   | 803 N      |       |       | TIPO ESTACION                                                | LM           |      | DEPTO     | CORDOBA   |        | FECHA | INSTALACION 1968-ABR                      |       |       |     |   |
| LONGITUD  | 7521 W     |       |       | ENTIDAD                                                      | 01 IDEAM     |      | MUNICIPIO | AYAPEL    |        | FECHA | SUSPENSION                                |       |       |     |   |
| ELEVACION | 37 m.s.n.m |       |       | REGIONAL                                                     | 02 ATLANTICO |      | CORRIENTE | SAN JORGE |        |       |                                           |       |       |     |   |
|           |            |       |       |                                                              |              |      |           |           |        |       |                                           |       |       |     |   |
| DIA       |            | ENERO | FEBRE | MARZO                                                        | ABRIL        | MAYO | JUNIO     | JULIO     | AGOSTO | SEPTI | OCTUB                                     | NOVIE | DICIE |     |   |
| 1         |            | 198   | 184   |                                                              | 152          | 151  | 271       | 431       | 381    | 439   | 559                                       | 580   | 596   | 344 |   |
| 2         |            | 196   | 175   |                                                              | 151          | 158  | 247       | 524       | 361    | 413   | 570                                       | 613   | 588   | 397 |   |
| 3         |            | 193   | 171   |                                                              | 150          | 171  | 287       | 448       | 350    | 492   | 555                                       | 637   | 517   | 377 |   |
| 4         |            | 191   | 168   |                                                              | 147          | 286  | 345       | 400       | 354    | 420   | 481                                       | 624   | 507   | 333 |   |
| 5         |            | 188   | 175   |                                                              | 158          | 241  | 290       | 343       | 341    | 444   | 359                                       | 524   | 585   | 313 |   |
| 6         |            | 187   | 173   |                                                              | 163          | 193  | 346       | 439       | 353    | 408   | 361                                       | 497   | 603   | 308 |   |
| 7         |            | 183   | 168   |                                                              | 161          | 160  | 402       | 524       | 366    | 399   | 310                                       | 480   | 523   | 296 |   |
| 8         |            | 191   | 177   |                                                              | 163          | 178  | 309       | 550       | 309    | 320   | 313                                       | 511   | 456   | 283 |   |
| 9         |            | 180   | 273   |                                                              | 156          | 270  | 325       | 515       | 315    | 418   | 316                                       | 513   | 485   | 277 |   |
| 10        |            | 174   | 208   |                                                              | 150          | 220  | 310       | 454       | 314    | 378   | 312                                       | 531   | 426   | 264 |   |
| 11        |            | 170   | 191   |                                                              | 151          | 203  | 292       | 570       | 348    | 340   | 288                                       | 457   | 480   | 258 |   |
| 12        |            | 198   | 181   |                                                              | 153          | 327  | 264       | 585       | 425    | 426   | 330                                       | 378   | 513   | 254 |   |
| 13        |            | 185   | 231   |                                                              | 150          | 259  | 403       | 521       | 551    | 400   | 427                                       | 369   | 463   | 271 |   |
| 14        |            | 181   | 224   |                                                              | 146          | 288  | 498       | 559       | 561    | 447   | 413                                       | 369   | 461   | 305 |   |
| 15        |            | 180   | 209   |                                                              | 146          | 237  | 571       | 569       | 478    | 480   | 474                                       | 469   | 510   | 343 |   |
| 16        |            | 179   | 203   |                                                              | 146          | 395  | 566       | 551       | 442    | 478   | 522                                       | 487   | 512   | 290 |   |
| 17        |            | 184   | 184   |                                                              | 146          | 287  | 505       | 476       | 393    | 502   | 438                                       | 455   | 611   | 253 |   |
| 18        |            | 225   | 181   |                                                              | 136          | 294  | 581       | 437       | 377    | 539   | 398                                       | 481   | 624   | 245 |   |
| 19        |            | 205   | 178   |                                                              | 134          | 244  | 567       | 428       | 444    | 567   | 478                                       | 532   | 650   | 234 |   |
| 20        |            | 154   | 174   |                                                              | 134          | 262  | 467       | 428       | 503    | 458   | 581                                       | 532   | 673   | 231 |   |
| 21        |            | 180   | 173   |                                                              | 151          | 305  | 391       | 491       | 496    | 409   | 586                                       | 513   | 631   | 232 |   |
| 22        |            | 234   | 171   |                                                              | 141          | 341  | 390       | 514       | 581    | 418   | 571                                       | 414   | 526   | 229 |   |
| 23        |            | 223   | 170   |                                                              | 134          | 450  | 453       | 523       | 589    | 379   | 467                                       | 438   | 448   | 231 |   |
| 24        |            | 200   | 158   |                                                              | 144          | 484  | 550       | 553       | 570    | 383   | 483                                       | 457   | 404   | 236 |   |
| 25        |            | 208   | 155   |                                                              | 183          | 428  | 486       | 593       | 581    | 399   | 493                                       | 519   | 414   | 231 |   |
| 26        |            | 218   | 157   |                                                              | 194          | 382  | 380       | 608       | 533    | 438   | 389                                       | 561   | 551   | 258 |   |
| 27        |            | 326   | 151   |                                                              | 183          | 268  | 373       | 604       | 414    | 571   | 391                                       | 556   | 473   | 235 |   |
| 28        |            | 213   | 148   |                                                              | 170          | 350  | 379       | 527       | 357    | 493   | 358                                       | 571   | 380   | 229 |   |
| 29        |            | 199   |       |                                                              | 165          | 398  | 445       | 440       | 347    | 509   | 393                                       | 554   | 337   | 211 |   |
| 30        |            | 187   |       |                                                              | 167          | 367  | 360       | 402       | 392    | 350   | 526                                       | 566   | 326   | 195 |   |
| 31        |            | 172   |       |                                                              | 159          |      |           |           | 444    | 434   |                                           | 601   |       | 184 |   |

| A         | B          | C       | D       | E                                                            | F            | G      | H         | I         | J       | K       | L                                         | M      | N       | O   | P |
|-----------|------------|---------|---------|--------------------------------------------------------------|--------------|--------|-----------|-----------|---------|---------|-------------------------------------------|--------|---------|-----|---|
|           |            |         |         | INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES |              |        |           |           |         |         |                                           |        |         |     |   |
|           |            |         |         |                                                              |              |        |           |           |         |         | SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL |        |         |     |   |
|           |            |         |         | NIVELES MEDIOS DIARIOS DE NIVELES (CMS)                      |              |        |           |           |         |         |                                           |        |         |     |   |
|           |            |         |         |                                                              |              |        |           |           |         |         |                                           |        |         |     |   |
|           |            |         |         |                                                              |              |        | AÑO 2006  |           |         |         | ESTACION 25027120 MARRALU                 |        |         |     |   |
|           |            |         |         |                                                              |              |        |           |           |         |         |                                           |        |         |     |   |
| LATITUD   | 803 N      |         |         | TIPO ESTACION                                                | LM           |        | DEPTO     | CORDOBA   |         | FECHA   | INSTALACION 1968-ABR                      |        |         |     |   |
| LONGITUD  | 7521 W     |         |         | ENTIDAD                                                      | 01 IDEAM     |        | MUNICIPIO | AYAPEL    |         | FECHA   | SUSPENSION                                |        |         |     |   |
| ELEVACION | 37 m.s.n.m |         |         | REGIONAL                                                     | 02 ATLANTICO |        | CORRIENTE | SAN JORGE |         |         |                                           |        |         |     |   |
|           |            |         |         |                                                              |              |        |           |           |         |         |                                           |        |         |     |   |
| DIA       |            | ENERO * | FEBRE * | MARZO *                                                      | ABRIL *      | MAYO * | JUNIO *   | JULIO *   | AGOST * | SEPTI * | OCTUB *                                   | NOVE * | DICIE * |     |   |
| 1         |            | 181     | 174     |                                                              | 196          | 251    | 443       | 424       | 327     | 341     | 320                                       | 283    | 297     | 328 |   |
| 2         |            | 179     | 188     |                                                              | 169          | 228    | 443       | 524       | 275     | 348     | 323                                       | 283    | 289     | 291 |   |
| 3         |            | 177     | 202     |                                                              | 155          | 227    | 506       | 500       | 255     | 484     | 305                                       | 387    | 286     | 334 |   |
| 4         |            | 175     | 211     |                                                              | 154          | 220    | 408       | 504       | 265     | 436     | 303                                       | 558    | 286     | 334 |   |
| 5         |            | 174     | 217     |                                                              | 162          | 213    | 371       | 485       | 345     | 386     | 283                                       | 447    | 268     | 289 |   |
| 6         |            | 285     | 219     |                                                              | 156          | 250    | 463       | 457       | 358     | 374     | 299                                       | 537    | 256     | 285 |   |
| 7         |            | 243     | 188     |                                                              | 151          | 278    | 551       | 437       | 363     | 352     | 369                                       | 444    | 231     | 278 |   |
| 8         |            | 215     | 181     |                                                              | 174          | 299    | 586       | 421       | 484     | 386     | 428                                       | 357    | 284     | 272 |   |
| 9         |            | 200     | 218     |                                                              | 192          | 341    | 548       | 448       | 524     | 330     | 405                                       | 342    | 309     | 272 |   |
| 10        |            | 195     | 213     |                                                              | 194          | 283    | 593       | 367       | 525     | 328     | 324                                       | 332    | 408     | 329 |   |
| 11        |            | 188     | 188     |                                                              | 203          | 259    | 550       | 397       | 501     | 291     | 348                                       | 318    | 331     | 318 |   |
| 12        |            | 183     | 176     |                                                              | 171          | 299    | 492       | 467       | 488     | 218     | 307                                       | 350    | 318     | 318 |   |
| 13        |            | 189     | 185     |                                                              | 195          | 542    | 526       | 487       | 435     | 294     | 310                                       | 437    | 350     | 353 |   |
| 14        |            | 181     | 186     |                                                              | 176          | 480    | 597       | 491       | 514     | 282     | 369                                       | 320    | 364     | 294 |   |
| 15        |            | 180     | 177     |                                                              | 163          | 408    | 511       | 452       | 485     | 291     | 351                                       | 375    | 384     | 294 |   |
| 16        |            | 192     | 171     |                                                              | 158          | 337    | 429       | 458       | 475     | 297     | 311                                       | 342    | 409     | 271 |   |
| 17        |            | 187     | 167     |                                                              | 155          | 290    | 443       | 460       | 493     | 328     | 353                                       | 407    | 418     | 248 |   |
| 18        |            | 179     | 161     |                                                              | 185          | 257    | 461       | 475       | 468     | 331     | 424                                       | 397    | 340     | 239 |   |
| 19        |            | 176     | 159     |                                                              | 235          | 266    | 514       | 554       | 516     | 291     | 558                                       | 333    | 386     | 237 |   |
| 20        |            | 172     | 155     |                                                              | 190          | 312    | 605       | 453       | 498     | 354     | 617                                       | 349    | 331     | 235 |   |
| 21        |            | 171     | 151     |                                                              | 171          | 278    | 640       | 431       | 427     | 477     | 615                                       | 344    | 334     | 241 |   |
| 22        |            | 170     | 150     |                                                              | 190          | 327    | 592       | 478       | 367     | 588     | 486                                       | 367    | 312     | 276 |   |
| 23        |            | 168     | 150     |                                                              | 205          | 284    | 482       | 422       | 394     | 558     | 448                                       | 336    | 342     | 278 |   |
| 24        |            | 165     | 148     |                                                              | 198          | 321    | 440       | 444       | 462     | 540     | 372                                       | 320    | 373     | 358 |   |
| 25        |            | 162     | 145     |                                                              | 194          | 350    | 438       | 332       | 419     | 471     | 402                                       | 286    | 362     | 295 |   |
| 26        |            | 162     | 144     |                                                              | 323          | 302    | 471       | 359       | 364     | 438     | 398                                       | 273    | 382     | 286 |   |
| 27        |            | 165     | 143     |                                                              | 302          | 271    | 460       | 428       | 350     | 493     | 350                                       | 336    | 351     | 393 |   |
| 28        |            | 201     | 143     |                                                              | 481          | 338    | 473       | 319       | 475     | 434     | 293                                       | 315    | 340     | 322 |   |
| 29        |            | 238     |         |                                                              | 537          | 448    | 466       | 467       | 406     | 378     | 292                                       | 338    | 393     | 294 |   |
| 30        |            | 192     |         |                                                              | 484          | 383    | 496       | 425       | 386     | 360     | 318                                       | 306    | 362     | 258 |   |
| 31        |            | 177     |         |                                                              | 302          |        | 498       |           |         | 305     |                                           | 307    |         | 213 |   |