



EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS  
DE LA CUENCA DEL ARROYO FELICIANO, ENTRE RÍOS, ARGENTINA

LUIS  
MARCELO LENZI

2017

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN  
LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS DE LA CUENCA DEL  
ARROYO FELICIANO, ENTRE RÍOS, ARGENTINA**



**LUIS MARCELO LENZI**

TESIS DOCTORAL  
Programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental

La Coruña, Septiembre de 2017

# Evaluación del impacto del cambio climático en los procesos hidrológicos de la cuenca del Arroyo Feliciano, Entre Ríos, Argentina

Autor: Luis Marcelo Lenzi

---

Tesis doctoral UDC / Año 2017

Directores: Eduardo Luis Díaz  
Montserrat Valcárcel Armesto

Tutora: Eva Vidal Vázquez

Programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



**Programa Oficial de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental**

**Tesis Doctoral**

**Evaluación del impacto del cambio  
climático en los procesos hidrológicos de la  
cuenca del Arroyo Feliciano, Entre Ríos,  
Argentina**

**Luis Marcelo Lenzi**

Septiembre 2017



**Dn. Eduardo Luís DÍAZ**, Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos (FCA-UNER) Argentina, y **Dña. Montserrat VALCÁRCEL ARMESTO**, Profesora Titular de la Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela (USC)

#### **CERTIFICAN**

Que la presente memoria titulada ***“Evaluación del impacto del cambio climático en los procesos hidrológicos de la cuenca del Arroyo Feliciano, Entre Ríos, Argentina”***, que para optar al grado de Doctor por la Universidad de A Coruña (UDC) presenta el Ingeniero **Don. Luis Marcelo LENZI**, ha sido realizada bajo nuestra dirección y supervisión dentro del Programa Oficial de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental.

Considerando que constituye trabajo de Tesis Doctoral, autorizamos su presentación.

Y para que así conste, firmamos el presente certificado en A Coruña, a 27 de Julio de 2017.

Fdo.: Eduardo Luis Díaz

Fdo. Montserrat Valcárcel Armesto

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi país, por la posibilidad de estudiar en una universidad pública y gratuita.

A la Universidad de A Coruña, España que me permitió realizar los estudios, y al grupo de investigación “Agua y Suelo” y su equipo de trabajo, que facilitaron mi estadía y además resolvieron todos los trámites imprescindibles para poder llevar adelante esta tesis a distancia.

A mis directores de tesis, Dra. Montserrat Valcárcel Armesto y Dr. Eduardo Luis Díaz, y a mi tutora, Dra. Eva Vidal Vázquez, por sus enseñanzas, guía y consejos durante el desarrollo de esta tesis.

A los integrantes de los diferentes proyectos desarrollados en convenio entre el INA y la UNER-FCA, como Corina Romero, Graciela Boschetti, Griselda Carñel, Eduardo L. Díaz, César Quinteros, Oscar Duarte, que siempre han colaborado y me han alentado a terminar este trabajo.

A los integrantes (Roberto, Juan, Carlos, Viviana, Valle) de los Proyectos de Investigación de la FICH-UNL desarrollados en la cuenca del A Feliciano, por los antecedentes y opiniones aportados.

A Rosana Hammerly y Pablo Cacik, por el asesoramiento en estadística hidrológica.

A mis compañeros del Instituto Nacional del Agua, y a mis amigos de toda la vida, por su afecto y aliento constantes.

A toda mi familia, que siempre ha estado alentándome en este emprendimiento, brindándome su comprensión, cariño y confianza.

Y, para finalizar, y resaltar, nuevamente al Dr. Antonio Paz González por su espera paciente, por su esfuerzo y dedicación, y por su hombría de bien; y al Dr Eduardo L. Díaz por su dedicación, gran paciencia, perseverancia y asesoramiento constantes, y su incondicional apoyo y amistad. A Todos, muchas gracias!

# **Evaluación del impacto del cambio climático en los procesos hidrológicos de la Cuenca del Arroyo Feliciano, Entre Ríos, Argentina**

## **RESUMEN**

La Provincia de Entre Ríos, en Argentina, se ve afectada por la intensificación del uso de los recursos naturales, sin que exista una ordenada gestión de los mismos, en particular en la Cuenca del Arroyo Feliciano, una de las de mayor reconversión de su actividad, pasando de una ganadería extensiva a una vertiginosa expansión de la agricultura, con la introducción del arroz regado con agua superficial y de la soja como los principales cultivos (Benavídez, 2001; Benavídez et al., 2001).

El arroyo Feliciano es un curso de agua permanente que nace en el nordeste del departamento que lleva su nombre, en la cota de 75 m.s.n.m. y desemboca en el río Paraná a una cota aproximada de 20 m.s.n.m. Las áreas drenadas por este curso de agua y sus afluentes están caracterizadas por pendientes generales muy largas y suaves, con síntomas de drenaje deficiente. La cuenca posee una superficie de 8240 km<sup>2</sup>. Presenta un caudal medio de 52,93 m<sup>3</sup>/segundo, (SSRH de la Nación) y un máximo aforado en el 2016 de 2.244 m<sup>3</sup>/segundo. Además, posee una gran densidad de avenamiento (0,51 km/km<sup>2</sup>) producto de los suelos pesados y precipitaciones anuales por encima de los 1100 mm.

Existe una utilización de los recursos superficiales y subterráneos pero en forma moderada, siendo sus principales usos el riego y abrevado animal en el agropecuario, y el potable sólo de fuente subterránea. La región se ha visto afectada por fuertes variaciones del ciclo hidrológico y una gran variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, lo que ha generado graves problemas para la agricultura y la ganadería.

Esta tesis doctoral tiene como objetivo evaluar el impacto del cambio climático en la respuesta hidrológica de la de la cuenca del A° Feliciano, y sobre la

infraestructura (puentes y caminos) de la Provincia de Entre Ríos, Argentina, elaborando un diagnóstico y descripción de la cuenca, relevando la infraestructura actual de monitoreo, uso del suelo y su red hidrológica,

El análisis previo de la serie de caudales diarios medidos muestra una gran variabilidad en su distribución temporal, con coeficientes de dispersión y rango de caudales ( $Q_{\text{máx}} - Q_{\text{mín}}$ ) muy elevados que hacen que los caudales medios y módulos determinados sean prácticamente una abstracción numérica.

El proceso de agriculturización de los últimos años mantiene su tendencia ascendente tanto en el país como en Entre Ríos, presentando el caso del cultivo de la soja un crecimiento del 692% en el periodo 1985-2005, siendo el 63% de la superficie cultivada provincial.

De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, la degradación futura de los recursos hídricos y del suelo será el desafío fundamental que enfrentará la agricultura global en los años venideros. Las predicciones climáticas más recientes establecen que la temperatura superficial promedio global se incrementará de 2 a 7 °C durante el período de 1900 al 2100. Esta temperatura se ha incrementado ya en unos 0,6 °C desde fines del siglo diecinueve.

Para el desarrollo de la actividad agropecuaria, el estado de los caminos es de fundamental importancia, debido a que más prioritariamente el traslado de la producción hacia los centros de comercialización y/ o industrialización se realiza por transporte automotor.

A partir de los antecedentes geológicos, geomorfológicos, climáticos, hidrológicos, de vegetación y de sus suelos, y el uso actual de la tierra, se aplicaron modelos matemáticos para evaluar la respuesta hidrológica en base a los datos disponibles en el estado actual. Además, en base a estimaciones del cambio climático global, se realizó la simulación de escenarios futuros, y se generaron series de caudales máximos y la potencial afectación de los mismos sobre la infraestructura de la cuenca. Para el caso de la modelación hidrológica, fue aplicado un modelo de eventos, lineal y semidistribuido del tipo del HEC-

HMS, que permite estudiar el impacto ambiental de las crecientes, causado por las precipitaciones máximas y sus variaciones y por la transformación del uso de los suelos (Fleming y Scharffenberg, 2010).

Para la simulación del efecto del Cambio Climático en la Cuenca del Arroyo Feliciano se consideró el escenario SRES B2, que supone un mundo con énfasis en las soluciones locales, aumento continuo de la población (menor que en A2), y niveles intermedios de desarrollo económico.

Finalmente se determinó que para las proyecciones de acuerdo al modelo de cambio climático seleccionado, es de esperar un incremento de las precipitaciones de un 20% lo que generará incrementos de los caudales picos variables entre el 35 y hasta el 50%, pudiendo alterar las recurrencias de los eventos de acuerdo a las leyes de probabilidades de valores extremos. Luego fue realizado un Análisis estadístico de Frecuencias, para verificar cómo el incremento de los caudales máximos esperados puede influir en el tiempo de retorno deducido de las inferencias estadísticas. Ello llevará a reconsiderar los diseños de las obras civiles para lograr garantizar las comunicaciones en obras viales y reducir el riesgo de inundación de las ciudades ubicadas en zonas de peligro.



# **Avaliación do impacto do cambio climático nos procesos hidrolóxicos da Conca do Arroio Feliciano, Entre Ríos, Arxentina**

## **RESUMO**

A Provincia de Entre Ríos, na Arxentina, vese afectada pola intensificación no uso dos recursos naturais, sen que exista unha xestión ordenada xestión dos mesmos; en particular na Conca do Arroio Feliciano, unha das de maior reconversión da súa actividade, tense pasado dunha gandaría extensiva a unha vertixinosa expansión da agricultura, coa introdución do arroz, regado con auga superficial, e mais da soia como os principais cultivos.

O Arroio Feliciano é un curso de auga permanente que nace no nordeste do departamento con este mesmo nome, na cota de 75 m. s.n.m. e desemboca no río Paraná a unha cota aproximada de 20 m. s.n.m. As áreas que drena este curso de auga e os seus afluentes están caracterizadas por pendentes xerais moi longas e suaves, con síntomas de drenaxe deficiente. A conca posúe unha superficie de 8240 km<sup>2</sup>. Presenta un caudal medio de 52,93 m<sup>3</sup>/segundo, (fonte: SSRH da Nación) e un máximo aforado no 2016 de 2.244 m<sup>3</sup>/segundo.

Posúe unha gran densidade de drenaxe (0,51 km/km<sup>2</sup>) produto dos solos con texturas pesadas e das precipitacións anuais por encima dos 1100 mm. Existe unha utilización dos recursos superficiais e subterráneos pero en forma moderada, sendo os seus principais usos a rega e abeberado animal no agropecuario, e o potable só de fonte subterránea. A rexión viuse afectada por fortes variacións do ciclo hidrolóxico e unha gran variabilidade espacial e temporal das precipitacións, o que xerou graves problemas para a agricultura e a gandaría.

Esta tese doutoral ten como obxectivo avaliar o impacto do cambio climático na resposta hidrolóxica da conca do Arroio Feliciano, e sobre a infraestrutura (pontes e camiños) da Provincia de Entre Ríos, Arxentina, elaborando un

diagnóstico e descrición da Conca, reproducindo a infraestrutura actual de monitorización, uso do solo e a súa rede hidrolóxica,

A análise previa da serie de caudais diarios medidos mostra unha gran variabilidade na súa distribución temporal, con coeficientes de dispersión e rango de caudais (máximo - mínimo =  $Q_{\text{máx}}$  -  $Q_{\text{mín}}$ ) moi elevados. O que fai que os caudais medios e módulos determinados sexan practicamente unha abstracción numérica.

O proceso de intensificación da agricultura dos últimos anos mantén a súa tendencia ascendente tanto no país como na provincia de Entre Ríos, presentando o caso do cultivo da soia un crecemento do 692% no período 1985-2005, sendo o 63% da superficie cultivada provincial.

De acordo co Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, a previsible degradación futura dos recursos hídricos e do chan será o desafío fundamental que enfrontará a agricultura global nos vindeiros anos. As predicións climáticas máis recentes establecen que a temperatura superficial media global incrementarase de 2 a 7 °C durante o período de 1900 ao 2100. Esta temperatura incrementouse xa nuns 0,6 °C desde fins do século dezanove.

Para o desenvolvemento da actividade agropecuaria, o estado dos camiños é de fundamental importancia, debido a que máis prioritariamente o traslado da produción cara aos centros de comercialización e/ ou industrialización realízase por transporte automotor.

A partir dos antecedentes xeolóxicos, xeomorfolóxicos, climáticos, hidrolóxicos, de vexetación e dos seus solos, e o uso actual da terra, aplicáronse modelos matemáticos para avaliar a resposta hidrolóxica en base ao estado actual de datos dispoñibles. Ademais, tendo en conta estimacións do cambio climático global, realizouse a simulación de escenarios futuros, e xeráronse series de caudais máximos e os potenciais efectos dos mesmos sobre a infraestrutura da conca. Para o caso da modelación hidrolóxica, foi aplicado un modelo de eventos, lineal e semidistribuído do tipo do HEC-HMS, que permite estudar o

impacto ambiental das crecentes, causado polas precipitacións máximas e as súas variacións e mais polas transformacións do uso dos solos ao longo do tempo.

Para a simulación do efecto do Cambio Climático na Conca do Arroio Feliciano considerouse o escenario SRES B2, que supón un mundo con énfase nas solucións locais, aumento continuo da poboación (menor que no escenario A2).e niveis intermedios de desenvolvemento económico.

Finalmente determinouse que para as proxeccións de acordo ao modelo de cambio climático seleccionado, é de esperar un incremento das precipitacións dun 20% o que xerará incrementos dos caudais picos variables entre o 35 e ata o 50%, podendo alterar as recorrencias dos eventos de acordo ás leis de probabilidades de valores extremos. Logo foi realizado unha Análise estatística de Frecuencias, para verificar como o incremento dos caudais máximos esperados pode influír no tempo de retorno obtido das inferencias estatísticas. Estes resultados levan a reconsiderar os deseños das obras civís para lograr garantir as comunicacións en obras viarias e reducir o risco de inundación das cidades situadas en zonas de perigo.

# **Evaluation of the climatic change impact on the hydrological processes at the Arroyo Feliciano catchment, Entre Ríos, Argentina**

## **ABSTRACT**

The Province of Entre Ríos has been affected by the intensification in the use of natural resources, without that it exist an orderly management of the same; in particular the Arroyo Feliciano watershed is one of the ones with a greater activity reconversion activity, as it changed from livestock farming to a vertiginous expansion of the agriculture, with the introduction of rice crops irrigated with superficial water and soybean, the two main crops nowadays.

The Arroyo Feliciano is a course of permanent water that is born in the northeast of the department that carries his name, at a height of 75 m. asl, and it ends in the river Paraná at an approximate height of 20 m. asl. The areas drained by this course of water and his tributaries are characterised mainly by main very long and moderate slopes, with symptoms of deficient drainage. The catchment surface is 8240 km<sup>2</sup>. The mean discharge is 52.93 m<sup>3</sup>/second, (source: SSRH of the Nation) with a maximum of 2.244 m<sup>3</sup>/second, monitored during 2016. The drainage density of drainage (0.51 km/km<sup>2</sup>) is very high and results from both, the heavy textured soils and annual precipitations above the 1100 mm.

Superficial and undergrounds resources until now have been utilised in a moderate way, but in shape moderate; the main uses of superficial water are in the agricultural sector, i.e. irrigation of rice crops, and watering livestock, while subterranean water is the only source of drinking water. The region has been affected by strong variations in the hydrological cycle, as well as and high spatial and temporal variability of rainfall, which generated grave problems in the agriculture and livestock sectors.

This Ph. D. thesis aims to evaluate the impact of climatic change in the hydrological answers of the Arroyo Feliciano catchment, and on the infrastructure

(bridges and ways) of the Province of Entre Ríos, Argentina. For this end, a description and diagnostic of the catchment has been elaborated, on the basis of existing monitoring infrastructure, soil use and hydrological network.

Previous analysis of the recorded series of daily discharges shows a huge variability of its temporal distribution, with very high coefficients of dispersion and ranks of discharges (maximum – minimum =  $Q_{max} - Q_{min}$ ), so that the values of mean discharges and modules, estimated by common methods, are practically a numerical abstraction.

During the last years the process of agriculture intensification showed an ascending tendency, and this both, in the whole country and in the Entre Ríos province, for example production of soybean in the period 1985 to 2005 increased by 692%, while it occupied 63% of the cultivated surface in this province.

Following the Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC), degradation of soil and hydrological resources will be the main challenges that should be addressed by global agriculture during the next years. More recently and following climatic predictions, it has been established that, on average, the global increase on surface temperature will be of about 2 to 7 °C during the period from 1900 to 2100. Also, global temperature has already increased by about 0.6 °C from since the end of nineteen the century.

The condition and quality of ways is basic importance for development of the agricultural sector; this is because production transfer to commercialisation and/or industrialisation centres is mainly performed by vehicle transport.

Taking into account available background on geological, geomorphological, climatic, hydrological, vegetable formations and soils, as well as the present land use, mathematical models have been applied to describe and simulate the present day existing hydrological response. Moreover, simulation of future scenarios, including series of maximum discharges, has been implemented, based on estimates of global climatic change; subsequently, the potential effects of this scenario on the basin infrastructure have been assessed. Hydrological

simulations have been achieved using a linear semidistributed model of events, namely the so-called HEC-HMS model. This model allows studying the environmental impact of river flooding after maximum precipitations induced by climatic change, as well as the changes induced by transformation in the soil.

Simulation of Climatic Change effects on the catchment called "Arroyo Feliciano" have been completed using the so-called SRES B2 scenario, which is based on assumptions emphasising local solutions, continuous increase of population (even if smaller than in A2 scenario), and intermediate levels of economic development.

Finally it was concluded that, in accordance with the projections obtained using the selected model of climatic change selected, precipitation increase of about 20% are expected; in turn, this will bring about increases of peak discharges varying between 35 and 50%, which may change the recurrences period of the events obtained by application of the extreme values laws of probabilities. In addition, a statistical analysis of frequencies has been performed, which allow to verify how the increase in the expected maximum discharges could affect the flow return time obtained by statistically inference. This result leads to reconsideration designs of public civil engineering works in order to gain guarantees for safe communication in the road system and for reducing flood risks at the cities situated in dangerous zones.

## INDICE

I. INTRODUCCIÓN .....	7
I.1. Aspectos del cambio climático.....	7
I.2. Infraestructura vial y problemática en Entre Ríos .....	17
I.3. Otros lugares con importantes afectaciones.....	20
II. HIPÓTESIS.....	24
III. OBJETIVOS.....	24
IV METODOLOGÍA.....	25
IV.1. Selección del área de estudio .....	25
Generalidades .....	25
Características geométricas y físicas de la cuenca.....	29
IV.2. Clima.....	32
Índices climáticos .....	33
Vientos .....	36
Temperatura.....	36
Precipitaciones .....	38
Días de lluvia al año .....	40
IV.3. Suelos .....	41
Unidades Taxonómicas.....	41
IV.4. Esguerrimiento .....	49
Disponibilidades Hídricas Superficiales.....	54
V. DESARROLLO Y RESULTADOS .....	56
V.1- Respuesta Hidrológica de la Cuenca en el Escenario Actual.....	56
V.1.1. Selección de los caudales diarios máximos anuales .....	56
V.1.2. Selección del modelo de simulación .....	58
V.1.3. Implementación del modelo .....	75

V.1.3. Aplicación del Modelo HEC-HMS.....	76
V.1.4. Resultados de la simulación .....	78
V.2. Simulación de la respuesta hidrológica de la cuenca debida a los efectos del cambio climático .....	78
V.2.1. Consideraciones sobre el Cambio Climático.....	79
V.2.2. Resultados regionales obtenidos del Proyecto CIOMTA (2005) .....	97
5.2.3. Trayectorias de Concentraciones Representativas .....	99
V.2.4. Resultados de las simulaciones con las precipitaciones afectadas por el Cambio Climático .....	101
V.3. Análisis de Frecuencia de Caudales .....	102
V.3.1. Análisis de frecuencia a la serie observada de caudales diarios máximos anuales.....	103
V.3.2. Análisis de frecuencia a la serie de caudales diarios máximos anuales simulados con Cambio Climático .....	105
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	119
ANEXOS .....	127



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.1: Índice de temperatura, 1880 hasta el presente, con el período base 1951-1980 (IPCC-ONU).....	7
Figura 2. Red Vial de la Provincia de Entre Ríos.....	18
Figura 3. Colapso Del Puente del Río Gualaguay.....	19
Figura 4. Descalce de la cabecera del puente en camino vecinal.....	19
Figura 5. RN12, en proximidades del nuevo puente sobre el A° Feliciano.....	20
Figura 6. Colapso de la red de desagües pluviales en la ciudad de La Plata (2014).....	21
Figura 7. Corte de la RN 9, tramo Rosario-Córdoba, a la altura de Río Carcarañá.....	21
Figura 8. Corte en la Provincia de Córdoba. Colapso de puente.....	22
Figura. 9: Rotura de puente en Totoral. Provincia de Córdoba.....	22
Figura 10. Colapso desagües pluviales en la ciudad de Santa Fe (2015).....	22
Figura 11. Red de Drenaje de la Provincia de Entre Ríos.SIGRHER. Dirección de Hidráulica.....	25
Figura 12. Ubicación de la Cuenca del Arroyo Feliciano en la Provincia de Entre Ríos y en la República Argentina.....	26
Figura 13. Cuenca del Arroyo Feliciano.....	27
Figura 14. Red de Drenaje de la cuenca del Arroyo Feliciano. Fuente: Arbuet, M <sup>a</sup> A, 2009.....	29
Figura 15. Curva de frecuencia de alturas de la cuenca.....	30
Figura 16. Curva Hipsométrica de la cuenca del A° Arroyo Feliciano.....	30
Figura 17. Rectángulo equivalente.....	30
Figura 18. Perfil longitudinal del curso principal. Arroyo Feliciano.....	31
Figura 19. Regiones climáticas de Entre Ríos. Fuente: Rojas y Saluso, modificado.....	32
Figura 20. Temperatura media anual en °C. Fuente: Rojas y Saluso, modificado.....	36

Figura 21. Temperatura media mensual en °C en San José de Feliciano.....	37
Figura 22. Precipitaciones normales anuales. Fuente: CIOMTA, 2005 modificada. Período de análisis 1971 – 2003.....	38
Figura 23. Distribución de las precipitaciones mensuales promedio.....	39
Figura 24. Caracterización de los suelos de la cuenca.....	41
Figura 25. Porcentajes de suelos de cada orden en la Cuenca Arroyo Feliciano.....	42
Figura 26. Caudales medios mensuales.....	51
Figura 27. Módulos anuales del Arroyo Feliciano. Paso Medina. Serie 1975- 2008.....	52
Figura 28. Curva de duración y frecuencia de caudales. Arroyo Feliciano.....	53
Figura 29. Curva de Duración de Caudales Diarios. 1º tramo.....	53
Figura 30: Derrames anuales Aº Feliciano en Paso Medina.....	54
Figura 31: Láminas escurridas anuales (mm). Aº Feliciano en Paso Medina.....	55
Figura. 32: caudales diarios máximos anuales.....	57
Figura 33. Representación esquemática del comportamiento hidrológico de una cuenca.....	59
Figura 34. Almacenamiento en prisma y en cuña en un tramo de cauce.....	73
Figura 35: Diagrama Topológico Cuenca Arroyo Feliciano.....	76
Figura 36. Esquema de las Relaciones conceptuales que fundamentan los escenarios de SRES. Fuente: Nakicenovic y Swart, 2000.....	81
Figura 37. Escenarios de Emisiones para CO <sub>2</sub> .....	83
Figura 38. Tendencias en la precipitación anual 1900-2000 para América del Sur.....	85
Figura 39. Variación de la precipitación en la Estación Corrientes.....	88
Figura 40. Variación de la precipitación media anual en la Pampa Húmeda.....	89
Figura 41: distribución de estaciones con lluvias mayores a 800mm.....	89
Figura 42. Metodología propuesta para llegar a los escenarios, en la cuenca del Arroyo Feliciano.....	92
Figura 43. Estructura conceptual de un modelo de circulación general atmosférico- oceánico (tomado de: Viner y Hulme (1997)).....	93
Figura 44. Estaciones y celdas del MCG (utilizado por el CIOMTA, 2005).....	94
Figura 45. Línea base de Temperatura y precipitación.....	98

Figura 46. Precipitación media anual para Escenario A2.....	99
Figura 47. Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP), (IPCC, 2013a).....	100
Figura 48. Ajuste de distribuciones estadísticas a valores observados de qmd.....	105
Figura 49. Ajuste de distribuciones estadísticas a caudales diarios maximizados.....	108

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Red de Avenamiento. Arroyo Feliciano.....	28
Tabla 2. Clasificación de las zonas climáticas Según el índice de Lang.....	34
Tabla 3. Zonas climáticas según el índice de Martone.....	35
Tabla 4. Zonas climáticas según el índice de Dantin et al.....	35
Tabla 5. Probabilidad de precipitaciones anuales.....	39
Tabla 6: Datos hidrométricos recopilados.....	49
Tabla 7. Síntesis de caudales diarios del A° Feliciano. Paso Medina, serie 1975-2008.....	50
Tabla 8: Caudales diarios máximos anuales.....	56
Tabla 9. Síntesis de los principales Modelos del Programa HEC-HMS.....	64
Tabla 10. Valores de la velocidad de la onda.....	74
Tabla 11. Código y Denominación de las estaciones pluviométricas Red DHER.....	73
Tabla 12. Año Hidrológico, Caudales Observados y Simulados.....	78
Tabla13 Procedimientos usados por el modelo LARS-WG para cada variable climática.....	101
Tabla 14. Caudales observados, simulados, y simulados con Cambio Climático...102	
Tabla 15. Estadísticos de los Caudales Máximos en condición de Cambio Climático.....	104
Tabla 16. Estudio estadístico de Caudales Máximos diarios simulados con Cambio Climático.....	106

## I. INTRODUCCIÓN

### I.1. Aspectos del cambio climático.

Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) resultantes de ciertas actividades humanas, han sido la principal causa del calentamiento del planeta durante los últimos 150 años. Este proceso que continúa, es conocido como Cambio Climático (fig.1). En realidad se trata de un calentamiento global del planeta que implica también un importante cambio climático no sólo en temperatura sino en las otras variables climáticas como la precipitación, los vientos y la humedad, (Barros et al. 2006; Re y Barros, 2009).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC - ONU) dice que «la mayoría de los aumentos observados en la temperatura media del planeta desde la mitad del siglo XX, son *muy probablemente* debidos al aumento observado en las concentraciones de GEI antropogénicos» (Houghton, 1990; 1992).

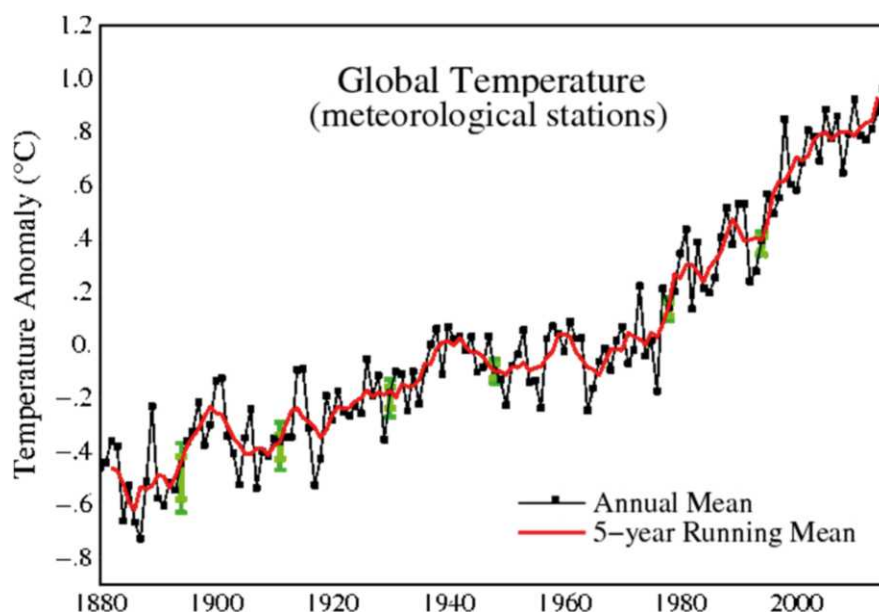


Figura 1. Índice de temperatura, 1880 hasta el presente, con el período base 1951-1980 (IPCC- ONU). (barras verdes= estimaciones de incertidumbre).

Hasta no hace mucho, el uso de la información climática descansaba en la premisa que el clima era estacionario, al menos en la escala de décadas, y que, por lo tanto, el clima futuro sería igual al del pasado inmediato. Así, las series de los

elementos climáticos y de sus derivados hidrológicos eran tratadas estadísticamente como estacionarias. Hoy, la hipótesis de que las series climáticas o de sus derivados son estacionarias aparece como poco apropiada (Barros et al, 2006).

Cada vez hay menos dudas que el planeta ha entrado en un rápido cambio climático inducido por las emisiones de gases de efecto invernadero. En consecuencia, la hipótesis casi siempre implícita de que las estadísticas del clima pasado pueden representar las del clima futuro ya no es válida. Todo el arsenal metodológico que se basaba en esta simple presunción para el cálculo de parámetros de diseño de infraestructuras, la planificación del uso de los recursos hídricos, del territorio, de la actividad forestal o de la agricultura a mediano plazo debería ser revisado (Barros et al., 2006; Saurral y Barros, 2009).

Para gran parte del territorio nacional, las series climáticas ya no son estacionarias. Además, tampoco es una actitud prudente suponer, a priori y sin mayor análisis, que se seguirán manteniendo los valores o tendencias de los últimos años. Por otra parte, para asegurar una adaptación exitosa en la agricultura, en la generación de energía y en otros usos del agua, sería importante saber cuáles serán las condiciones climáticas de las próximas décadas. Dada la importancia que el sector energético y el agropecuario revisten en la economía argentina, no es exagerado decir que estas condiciones climáticas deben ser consideradas en cualquier proyección o planificación cuidadosa de las futuras condiciones socioeconómicas.

Bertoni et al (2010), hace la siguiente distinción en relación a la variabilidad y al cambio climático: “Aunque la variabilidad climática, el cambio climático y la variabilidad hidrológica son tres fenómenos diferenciados, e interrelacionados, el correcto tratamiento de ellos exige diferenciarlos claramente. La variabilidad climática es entendida como las variaciones del clima en función de los condicionantes naturales del globo terrestre y de sus interacciones. El cambio climático, por su parte, es entendido como las alteraciones de la variabilidad climática producto de las acciones antrópicas (hipótesis sustentada por algunos grupos científicos), o debido a variaciones naturales entre las que se destaca la actividad solar (hipótesis alternativa sustentada por otros grupos científicos).

La variabilidad hidrológica se efectiviza cuando ocurren alteraciones sobre las principales entradas y/o salidas de un sistema hidrológico, es decir, sobre la precipitación, la evapotranspiración y/o los caudales. Sus causas son variadas, destacándose entre ellas: (a) la variabilidad natural de los procesos climáticos, (b) el impacto del cambio climático y (c) los efectos del uso del suelo y otras alteraciones antrópicas de los sistemas hídricos.

Cualesquiera sean sus causas, estas alteraciones pueden significar, entre otros efectos, modificaciones en las condiciones originalmente supuestas en el proyecto (o diseño) hidrológico de una obra hídrica. Ello puede derivar en el aumento de la incertidumbre asociada al normal funcionamiento de la obra y hasta en el incremento del riesgo por daños potenciales y/o irreversibles de la estructura.”

El cambio climático se ha convertido en uno de los grandes temas de interés a nivel mundial. La Organización Meteorológica Mundial y el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (PNUMA) han constituido, en 1988, lo que se llama el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), o Panel Intergubernamental del Cambio Climático, con el fin de llevar el pulso de los cambios en el clima mundial y las repercusiones que esto conlleva en la cotidianidad de las tareas del ser humano y en los panoramas de sostenibilidad de la vida en el planeta (IPCC 2001; 2002; 2014). Este Panel, con una relativa periodicidad, elabora informes que resumen los principales hallazgos en cuanto a las implicaciones del cambio climático y las potenciales causas, principalmente de origen antropogénico. Hasta el presente, han realizado 5, (divididos en tres áreas de trabajo que actualizan la información sobre las “Bases físicas del cambio climático”, “Impactos, adaptaciones y vulnerabilidad”, y “Mitigación del cambio climático”, respectivamente):

- ✓ IPCC First Assessment Report: Climate Change 1992 (FAR).
- ✓ IPCC Second Assessment Report: Climate Change 1995 (SAR).
- ✓ IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001 (TAR).
- ✓ IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4).
- ✓ IPCC Fifth Assessment Report (2013-2014) (AR5).

En el contexto del Cambio Climático global, la única forma aceptada por la comunidad científica internacional para estimar las condiciones climáticas futuras en términos cuantitativos, es el desarrollo de escenarios climáticos. La metodología más extendida para ello es el uso de modelos climáticos globales combinados con modelos regionales de alta resolución. Sin embargo, estos modelos presentan algunas falencias en la simulación de las precipitaciones medias y extremas en la región de la Cuenca del Plata y zonas vecinas, donde no reproducen adecuadamente la magnitud, el patrón geográfico, el ciclo anual y las características de las precipitaciones extremas. Ello obedece a diversas razones y no puede ser corregido simplemente por el proceso de “downscaling” con el anidado de modelos de alta resolución en las salidas de datos de los modelos climáticos globales. Estas falencias se deben, entre otras causas, a su incapacidad para representar los sistemas convectivos de mesoescala y a la subestimación de la frecuencia de las perturbaciones atmosféricas como los pasajes frontales. Por lo tanto, es necesario desarrollar el conocimiento sobre los sistemas convectivos de mesoescala, mejorar la parametrización de los procesos de precipitación en los modelos, lograr una correcta simulación de los procesos físicos regionales de la atmósfera y de sus interacciones con el suelo, la hidrología superficial y el océano.

Los cambios en el clima se han vuelto más que evidentes, sobre todo en los últimos años, lo que hace pensar en las consecuencias que esto puede traer a la forma como tradicionalmente se han hecho todas las actividades humanas. Específicamente, son de reciente interés las repercusiones que el cambio climático pueda traer a la forma en que están diseñadas y construidas las estructuras que dan servicios vitales a nuestras ciudades y comunidades en general. Este ha sido un tema de debate que ha llegado incluso a la firma de un protocolo por parte de varias asociaciones de ingenieros civiles, llamado “Protocolo la Ingeniería Civil y el Cambio Climático”, que pretende que los profesionales en ingeniería busquen nuevas alternativas para desarrollar tecnologías y materiales que reduzcan las emisiones contaminantes, durante todo el ciclo de vida de los sistemas de infraestructura; y plantea la necesidad de desarrollar e implementar herramientas, políticas y prácticas para la evaluación del riesgo y la adaptación de los cambios en infraestructura originados por el cambio climático (Doré et al., 2005; UPADI, 2011).



Según el informe SREX 2013 del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), las pérdidas económicas derivadas de desastres relacionados con fenómenos climáticos entre 2001-2006 presentan aproximadamente 1% del Producto Bruto Interno (PBI) en los países de medio ingreso, a diferencia del 0.1% en países de ingreso alto.

El IPACC, implementado por la Cooperación Alemana al Desarrollo (GIZ), el Ministerio de Economía y el Ministerio del Ambiente, promueve la importancia de incorporar la variable de cambio climático en la identificación, formulación y evaluación social de los proyectos de inversión pública (PIP). De esta manera, se mejoraría la sostenibilidad de las inversiones públicas, se reduciría el riesgo de desastres y se aumentaría la capacidad de adaptación de la población para afrontar los efectos de la variabilidad climática y el cambio climático.

En España, García Tejerina ha presentado el Plan PIMA Adapta, que destina 12,1 millones de euros a más de 40 actuaciones para impulsar la adaptación al cambio climático en España, destaca que el Plan permite “la puesta en marcha de proyectos concretos en todo el país, con carácter pionero y con vocación de continuidad”. Incluye una batería de 46 actuaciones en los ámbitos de las costas, el dominio público hidráulico y los Parques Nacionales, para regeneración de playas, protección de marismas o humedales, restauración de dunas y lagunas, hábitats o de adaptación de masas forestales. Valora el “giro completo que el Gobierno ha dado a la política de cambio climático con la intención de reducir nuestras emisiones y a la vez crear actividad económica y empleo de calidad a través de proyectos realizados en España”.

Este Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático en España, (PIMA Adapta), incluye una inversión de 12,1 millones de euros para más de 46 actuaciones en la costa, el dominio público hidráulico y los Parques Nacionales. El objetivo es poner en marcha, con carácter pionero y con vocación de continuidad en el tiempo, proyectos concretos de adaptación al cambio climático. Las zonas del litoral son las que tienen un mayor riesgo de sufrir los impactos, por lo que la reforma de la Ley de Costas aprobada en 2013 incluyó la elaboración de una Estrategia para la Adaptación de la Costa a estos efectos,

actualmente en fase de tramitación de evaluación ambiental estratégica. Se busca conseguir un diagnóstico riguroso de los riesgos asociados al cambio climático que las afectan y las posibles medidas que se puedan adoptar.

Así, el Plan PIMA ADAPTA incorpora más de 40 proyectos en materia de gestión del litoral en Cantabria, Asturias, Galicia, País Vasco, Cataluña, Comunidad Valenciana, Murcia, Andalucía, Baleares, Canarias, Ceuta y Melilla. Trata de reducir la exposición de la costa frente al mar y, para ello, se llevarán a cabo actuaciones de regeneración de playas, restauración de dunas, estabilización de las partes bajas de estuarios y obras de protección que reduzcan la erosión. Además, prevé mantener el buen estado de los ecosistemas costeros con proyectos de restauración y protección de marismas o humedales, e iniciativas para promover las áreas costeras o marinas protegidas, entre otras, junto a la mejora de la investigación y el conocimiento y de otras acciones de concienciación y divulgación en este ámbito.

En el caso de la Argentina, la primera pregunta que debe hacerse es: cómo se prepara para esta situación con Cambio Climático desde el punto de vista de los recursos hídricos:

### **Recursos Hídricos**

La magnitud que tienen en la Argentina los fenómenos de las inundaciones, ha motivado que dicho tema haya sido objeto de diversos estudios y planes. Con especial énfasis en el objetivo de mitigar las inundaciones, se mencionan:

- El “Plan Federal de Control de las Inundaciones” que atiende a cuencas del sur de la Provincia de Santa Fe y del noreste de la Provincia de La Pampa; el que ha sido encarado por el Gobierno Nacional.
- Diversos Programas encarados por el Gobierno Nacional para los inundaciones de los grandes ríos del Litoral; en especial el “Programa de Protección contra las Inundaciones” (PPI).
- Con un sentido más integral pueden mencionarse: El “Plan Maestro Integral para la Cuenca del Río Salado Sur” (1999) que fuera continuado por el “Plan de Desarrollo Integral de la Cuenca del Río Salado

Como instancia de superación a los planes anteriores, cabe destacar que en el año (2006) y por iniciativa de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, el Comité Hídrico Federal (COHIFE) ha puesto en marcha los estudios de un “Plan Nacional de Recursos Hídricos” (PNRH), con el objetivo de lograr un horizonte más amplio de planificación y tender una plataforma de discusión y acuerdos interjurisdiccionales. A su vez, cabe destacar que la programación prevista incluye un subprograma específico referido a “Instrumentos para la Gestión del Cambio Climático” (Comité Intergubernamental de la Cuenca del Plata, 2005). El panorama planteado resulta alentador en relación a la inclusión de las problemáticas devenidas del Cambio Climático dado que, además de crearse espacios de planificación federal amplios, se ha previsto un ámbito específico para dicha problemática.

### **Agricultura**

La situación de compatibilidad en los aspectos referidos a las actividades agropecuarias, presenta un panorama diferente del anterior. Es probable que ello se deba a la preeminencia de la iniciativa privada en este sector, lo cual ha facilitado la rápida adaptación autónoma al incremento de las precipitaciones en amplias regiones.

Ello no implica que la presencia del Estado sea innecesaria; por el contrario, el mismo debería hacerse presente para que las adaptaciones autónomas que usufructúan los cambios climáticos favorables del presente, se desarrollen sin comprometer situaciones futuras. Con gran retraso, pero con creciente momento y ligado a la política sobre los Recursos Hídricos, el Estado está contribuyendo a mitigar o solucionar los excesos hídricos que afectan negativamente al actual desarrollo del sector (Lenzi 2003; Lenzi et al., 2006).

En términos generales, se registra ausencia de planes y programas de acompañamiento a las actividades agropecuarias en relación a las importantes tendencias climáticas observadas. Ello se manifiesta en políticas no explícitas como la multiplicación de permisos de desmonte para abrir tierras a la actividad agropecuaria, sin la debida consideración que garantice la continuidad de los procesos ecológicos y ni siquiera la propia sustentabilidad de las actividades.

Con la fuerte expansión de la agricultura, en parte ligada a las tendencias climáticas, surgieron necesidades en el transporte de los crecientes volúmenes generados. Al respecto, en tanto la capacidad de almacenamiento y transporte automotor, ambos propios del sector privado, se incrementaron al ritmo de la demanda, los restantes aspectos referidos a la infraestructura no registraron igual dinámica. Entre éstos puede citarse la reactivación de algunos ramales ferroviarios, así como el mantenimiento y la adaptación a las nuevas condiciones climáticas de la red vial, tanto en relación a las redes principales, como en la adecuación de los caminos secundarios y rurales, en especial, en las zonas recientemente abiertas a la producción comercial. Sin embargo, en la actualidad se advierte un nuevo rumbo que se manifiesta en una gran inversión y nuevos planes en obras viales, y en planes de reactivación de algunos ramales ferroviarios, así como sobre la mejora de las condiciones de navegación en la Hidrovía Paraná-Paraguay.

### **Sistema Urbano**

En relación al sistema urbano, es necesario diferenciar distintas situaciones, dadas las diversas afectaciones que puede sufrir y las variadas medidas de adaptación factibles. En primer término, cabe mencionar los problemas de inundaciones ocasionados por efecto de los excesos hídricos de diverso tipo. Al respecto, valen las consideraciones realizadas para los Recursos Hídricos; más aún, dado que algunos de los planes enfocaban prioritariamente las inundaciones urbanas. De igual manera, se prevé que el plan en ejecución para la Provincia de Santa Fe también dé espacio preferencial a dicha problemática, dados los estragos que las mismas han ocasionado en ciudades de dicha provincia (inundación de un tercio del Gran Santa Fe, en el año 2003, y, en menor proporción en el 2007).

### **Medidas no estructurales**

En relación con las medidas no-estructurales dirigidas a la capacitación de la población, y que incluyen la concientización sobre los riesgos, la educación sobre la prevención y la información sobre los planes de contingencia, como ya se ha explicitado, este tipo de planes están habitualmente a cargo de los mismos organismos de Defensa Civil que se ocupan de las tareas de respuesta posterior a

los eventos; organismos que existen tanto a nivel nacional como provincial, y también de los gobiernos locales de las ciudades más importantes.

Esta simultaneidad de tareas y la generalizada poca cultura de prevención, resulta en desmedro de los planes y acciones de capacitación. Es por ello que, si bien no hay un relevamiento detallado, es probable que los planes de prevención tengan escasa capacidad de ejecución y eficacia, a lo cual debe agregarse las dificultades propias de la articulación que debería producirse entre todos los niveles y organismos concurrentes con criterio de red de trabajo.

En cuanto al sistema de alerta temprana, ha habido iniciativas para su perfeccionamiento, pero las mismas se han visto demoradas por distintas circunstancias. Últimamente parece crecer la tendencia al desarrollo de sistemas provinciales, caso de Santa Fe, Córdoba, Chaco y Entre Ríos.

En síntesis, resulta más auspiciosa la compatibilidad referida a las medidas de índole estructural referidas a los excesos hídricos, que a las no-estructurales.

La segunda pregunta que se plantea es ¿Qué relevancia puede tener el cambio climático en el desarrollo de la infraestructura vial de un país y en este caso el de la Cuenca del Arroyo Feliciano de la Provincia de Entre Ríos en Argentina?

Tradicionalmente, el diseño estructural se ha basado en patrones climáticos del pasado, donde los eventos extremos precipitaciones y caudales son analizados a partir del ajuste a leyes estadísticas de extremos, pero sin considerar las posibles alteraciones más allá de los patrones considerados como “normales”. Principalmente se consideraba necesario acotar las predicciones, debido a que el diseño llevado a extremos muy altos suele resultar en infraestructuras mucho más costosas. El detalle es que estos eventos extremos presentaban períodos de retorno de hasta algunos cientos de años, lo que ahora ya no es tan cierto, pues cada vez se vuelven más frecuentes según los registros recientes.

Los eventos que alcanzan niveles muy cercanos o incluso superan a los parámetros de diseño de las estructuras, previo al denominado Cambio Climático,

es lo que se vuelve preocupante, sobre todo para aquellas obras que pueden llegar a producir afectaciones a la vida y a otras infraestructuras aguas abajo

Por otra parte, se debe considerar que, dado el costo que el desarrollo de infraestructura representa para las economías de los países, ésta debería estar diseñada para que dure muchos años, y por ende debe soportar el impacto que el medio pueda generar sobre ella por largo tiempo.

El cambio climático ha generado en los últimos años innumerables daños a la infraestructura, ya que mucha de ésta no estaba diseñada con factores de seguridad suficientes para soportar el embate de la naturaleza, por lo que ha sufrido un fuerte deterioro. Se ha comprobado que pequeñas variaciones en el clima, en especial las precipitaciones, pueden generar grandes daños en la infraestructura existente.

En este sentido, y entendiendo que la vulnerabilidad puede ser definida por la incapacidad de la infraestructura para absorber los efectos negativos del clima sobre ella, se deben diseñar las estructuras, en función del carácter, la magnitud y la velocidad del cambio en los patrones de clima que van a imperar durante la vida útil de la misma. Se puede decir entonces que no es válido considerar que los eventos registrados en el pasado predicen el futuro del comportamiento de las lluvias extremas y por ende los caudales máximos de un hidrograma.

Existen experiencias de países que han desarrollado planes piloto para aplicar una metodología de evaluación del impacto que el cambio climático genera sobre las estructuras. Un ejemplo lo constituye el de Canadá, que evalúa los riesgos críticos a los que dicha infraestructura está expuesta producto de los cambios en los patrones climáticos desde su diseño y hasta la actualidad y, además, proyectados a futuro. Los proyectos deben asimismo diseñar y crear un desarrollo institucional en la cuenca, provincia o país, para poder analizar los efectos del cambio climático y aprender las necesidades de adaptación, con el fin de planificar labores de mantenimiento preventivo en las estructuras existentes y rediseñar las que se van a construir, con el fin de recuperar o, mejor aún, prever las pérdidas por operación deficiente o falta de mantenimiento de éstas. Se espera que esto sea para evaluar

el riesgo y la vulnerabilidad que tiene, al menos, la infraestructura pública, y se puedan plantear estrategias para adaptarse a los cambios.

Las políticas que está desarrollando el país en materia de cambio climático no profundizan directamente en la evaluación de la potencial afectación a su infraestructura de primera necesidad y no se tienen programas concretos enfocados a atender o por lo menos estudiar los efectos del cambio climático en las obras civiles. Sería conveniente que se considere la necesidad de generar una evaluación de riesgo asociada a su capacidad de respuesta ante eventos extremos que dañen su infraestructura primaria y a la luz de esto se contemple una serie de acciones para mitigar posibles afectaciones severas que puedan poner en riesgo el flujo de la economía regional y provincial.

## **I.2. Infraestructura vial y problemática en Entre Ríos**

La red vial, en conjunto con la traza de las líneas férreas, de la Provincia de Entre Ríos, fue diseñada en distintos períodos y con metodologías de cálculo que fueron evolucionando en complejidad creciente.

En la época en que se construyeron los ramales ferroviarios no había serie de niveles, ni caudales, ni precipitaciones, pero las longitudes de los puentes, alcantarillas, y otro tipo de obras de arte son en general adecuadas y estuvieron basadas en la observación (baqueanos o pobladores del lugar) y en conceptos de la geomorfología (valle de inundación, cauce menor y terrazas primarias, e información secundaria)

La infraestructura vial actual (fig. 2), fue desarrollada posteriormente al ferrocarril por la Dirección Nacional de Vialidad y la Dirección Provincial de Vialidad. Las alturas de sus terraplenes y las secciones hidráulicas de alcantarillas y puentes, se basaron en el cálculo de niveles y caudales de proyecto generalmente a partir de fórmulas empíricas (Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, fórmula de Ruhle, etc), lo que resultó en muchos casos en secciones de puentes menores y calzadas con bajos niveles.



Figura 2. Red Vial de la Provincia de Entre Ríos

Esos diseños han generado problemas de colapso de sus estructuras (puentes y alcantarillas) y de interrupciones en el tránsito por elevación de los niveles de agua sobre la calzada. Ejemplos de ello lo constituyen los ríos Nogoyá (colapso de los pilotes centrales) y Gualeguay (colapso de los extremo del puente, destrucción y caída total del mismo (fig. 3).



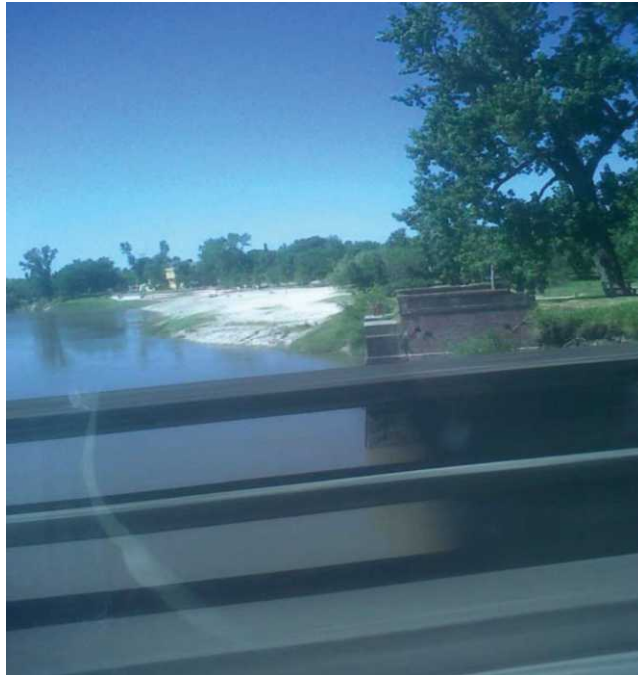


Figura 3. Colapso del Puente del Río Gualeguay. Vista Aguas Arriba

En el caso particular de la Cuenca del Arroyo Feliciano, en los últimos años se han producido interrupciones en el tránsito tanto en rutas internas de la provincia (fig. 4) como en la RN12, en Paso Quebracho.



Figura 4. Descalce de la cabecera del puente en camino vecinal.

La RN12 experimentó una de sus interrupciones en febrero de 2003, cuando una importante crecida afectó la estabilidad del puente que cruza al arroyo en el “paso” mencionado, y volvió a repetirse en abril de 2016, después de haberse construido un nuevo puente de mayores dimensiones sobre el mismo curso de agua (fig. 5).



Figura 5. RN12, en proximidades del nuevo puente sobre el A° Feliciano.

### **I.3. Otros lugares con importantes afectaciones**

- Buenos Aires

Durante los años 2014 y 2015 se han producido eventos hidrológicos que han originado el colapso de las estructuras de desagües pluviales en ciudades como La Plata (Provincia de Buenos Aires). El dato oficial emitido por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) durante el temporal que soportó la ciudad de La Plata fue de 181 milímetros, aunque no se descarta que haya llovido más de 250 en algunos lugares muy próximos. La histórica precipitación oficialmente fue de 181 milímetros, 125 de ellos entre las 18 y las 21hs del 2 de abril (fig.6). En cambio, el evento más intenso del que se tiene registro en la Ciudad de Buenos Aires corresponde al del año 2001, cuando en sólo dos horas cayeron 103 milímetros.



Figura 6. Colapso de la red de desagües pluviales en la ciudad de La Plata (2014)

Otras provincias:

En el año 2015 las precipitaciones han sido extremas en las Provincias de Santa Fe, Córdoba, San Luis y Tucumán, registrándose en períodos de una semana valores superiores a la media anual de las localidades afectadas. Ello ha provocado el colapso de la infraestructura vial y el anegamiento de varias ciudades (fig. 7 a 10).



Figura 7. Corte de la RN 9, tramo Rosario-Córdoba, a la altura de Río Carcarañá



Figura 8. Corte en la Provincia de Córdoba. Colapso de puentes.



Figura 9. Rotura de puente en Totoral. Provincia de Córdoba



Figura 10. Colapso desagües pluviales en la ciudad de Santa Fe (2015).

Es de destacar no solamente la magnitud de las precipitaciones sino su poder de afectación y su gran extensión areal (cubriendo varias provincias).

Pero uno de las situaciones más destacadas, por su importancia comercial y estratégica vía de comunicación, son los cortes que, desde hace algunos años, viene experimentando la autopista que une Rosario con Buenos Aires, las dos ciudades más importantes del país. Finalizada en el año 1978, prácticamente no había experimentado interrupciones hasta hace unos 10 años. En cambio, en los últimos años 3 años ha sufrido una por año, poniendo de manifiesto, tal vez, la ocurrencia de mayores precipitaciones, con una frecuencia también mayor. .

## **II. HIPÓTESIS**

Es posible, mediante la aplicación de modelos matemáticos realizar una evaluación del cambio climático global.

Se puede estudiar; mediante la simulación de escenarios futuros y generación de series de caudales, el impacto de las crecientes causado por el cambio climático global.

## **III. OBJETIVOS**

Evaluar el impacto del cambio climático, en la respuesta hidrológica de la de la cuenca del arroyo Feliciano, y sobre la infraestructura (puentes y caminos) de la Provincia de Entre Ríos, Argentina.

Estimar el impacto de las crecientes producido por el incremento de las precipitaciones debido al cambio climático, y generar recomendaciones de manejo a nivel de cuenca, y de diseño de la infraestructura vial (caminos y puentes).

## IV. METODOLOGÍA

La metodología consistió en simular el comportamiento hidrológico de una cuenca para condiciones de lluvias, superiores a las actuales que dieron origen a los hidrogramas de crecida máximos anuales. Esas lluvias extremas fueron definidas aplicando a las actuales los aumentos derivados del impacto del cambio climático. Se obtuvo así una nueva serie de caudales anuales, maximizados por CC. Luego, se realizó un análisis de frecuencia a la serie de caudales máximos anuales originales y a la nueva serie afectada por el CC.

### IV.1. Selección del área de estudio

#### Generalidades

La Provincia de Entre Ríos se caracteriza por una extensa red de drenaje, producto de las elevadas precipitaciones (más de 1000 mm anuales), de sus suelos y del relieve con pendientes medias a altas (fig. 11).

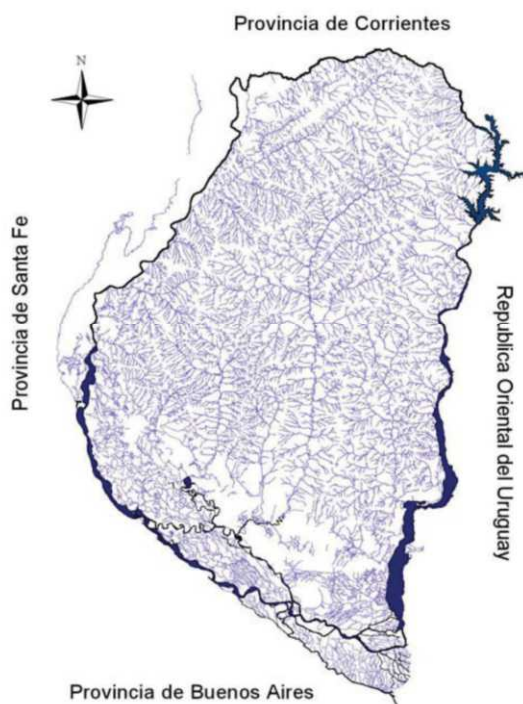


Figura 11. Red de Drenaje de la Provincia de Entre Ríos  
SIGRHER. Dirección de Hidráulica

El principal curso de agua es el río Gualeguay, que prácticamente recorre, con sentido norte –sur, toda la parte central de la provincia, y luego le siguen el Feliciano, el Guayquiraró y el Gualeguaychú (INCYTH, 1986; 1990; Pedraza, 1991; Cacik, 2002).

Para este estudio fue seleccionada la cuenca del arroyo Feliciano (IGM, 2000), porque tiene la serie más extensa de caudales diarios registrados, y de mediciones pluviométricas coincidentes (Morresi et al., 2006; Zucarelli y Morresi, 2000; Zucarelli et al., 2002), (fig. 12).



Figura 12. Ubicación de la Cuenca del Arroyo Feliciano en la Provincia de Entre Ríos y en la República Argentina.

La denominación de la cuenca recuerda al nombre de Don Feliciano Rodríguez, acompañante de Don Juan de Garay en la fundación de Santa Fe y propietario de tierras a orillas de este arroyo.



Las costas del curso inferior estuvieron pobladas por indios del grupo de chanáes, los coletones, y por esta razón, los primeros exploradores españoles llamaron río Caletones a este curso de agua (“Geografía Elemental de Entre Ríos”, Magdalena P. Chemin – Walkiria Gabas, 1992).

Esta cuenca es la segunda más grande de la provincia y se extiende por tres departamentos entrerrianos: Federal, Feliciano y, en menos medida La Paz. Tiene una orientación general NE-SO, presentando una superficie, en su desembocadura, de 8203 km<sup>2</sup>, un perímetro de 474,5 km, una longitud total de los cursos: 4160 km, y una longitud del curso principal de 262 km (Duarte et al., 2005; 2006; 2007).

Las principales localidades son: Federal (18015 habitantes) San José de Feliciano (12.084), Sauce de Luna (2998), San Gustavo (1.618) y Colonia Avigdor (692). La cota máxima es de 80 metros IGN y descarga en el Río Paraná a una cota de 20 metros IGN (fig. 13), (Romero et al., 2007; Romero, 2013).

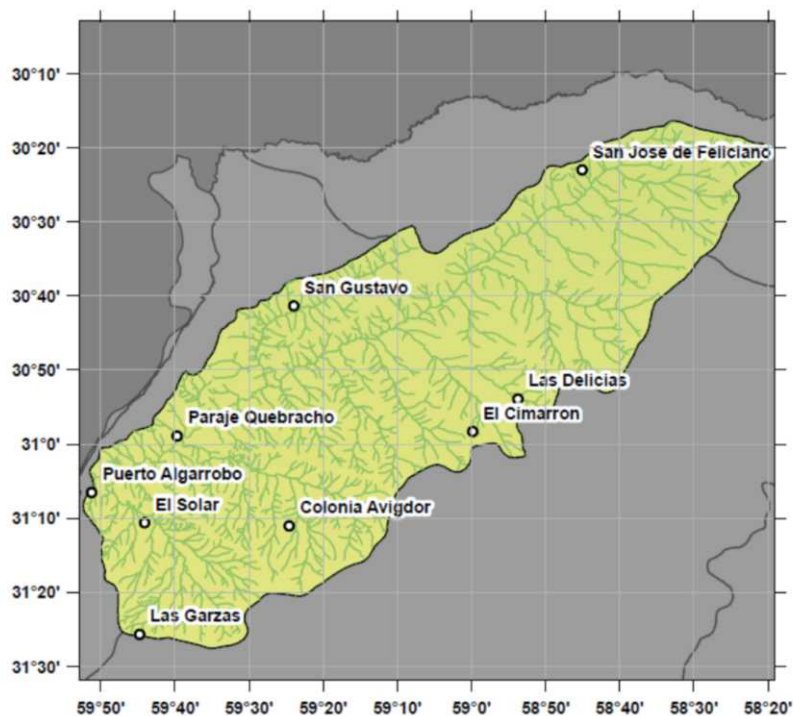


Figura 13. Cuenca del Arroyo Feliciano

Gran parte de esta cuenca está cubierta de montes naturales, con suelos con serios problemas de erosión. (“Carta de Suelos de la República Argentina Departamento Feliciano”, INTA – Gobierno de Entre Ríos, 1986).

Presenta una extensa red de avenamiento, compuesta por 24 arroyos, Tabla 1.

**Tabla 1.** Red de Avenamiento. Arroyo Feliciano.

<b>Orden</b>	<b>Nombre del afluente</b>
1	A. Del Ciervo
2	A. Del Yeso
3	A. Estacas
4	A. Chimango
5	A. El Loro
6	Lag. Lázaro
7	A. Arena
8	A. Grande
9	A. El Serrano
10	A. Don Gonzalo
11	A. Las Palmitas
12	A. Carancho
13	A. Grande
14	A. Sauce
15	A. Alcaraz
16	A. Aguará
17	A. Alviso
18	A. El Sauce
19	Lag. Blanca
20	A. Viboras
21	A. Atencio
22	A. Gato
23	A. Banderas
24	A. De las Achiras

Debido a controles estructurales fuertes, tiene un solo afluente por margen derecha, estando el resto situado en su margen izquierda (fig. 14).



Figura 14. Red de Drenaje de la cuenca del Arroyo Feliciano.

Fuente: Arbuét, M<sup>a</sup> A, 2009.

### Características geométricas y físicas de la cuenca

La Forma de la cuenca se expresa por el Índice de compacidad de la misma, que es una relación entre el área y el perímetro (Zamanillo y Larenze, 2008). Para el caso de la cuenca del Arroyo Feliciano es de 1.47.

La fig. 15 presenta la Curva de frecuencia de alturas, determinada a partir de las curvas de nivel y las superficies entre las mismas, acumuladas.

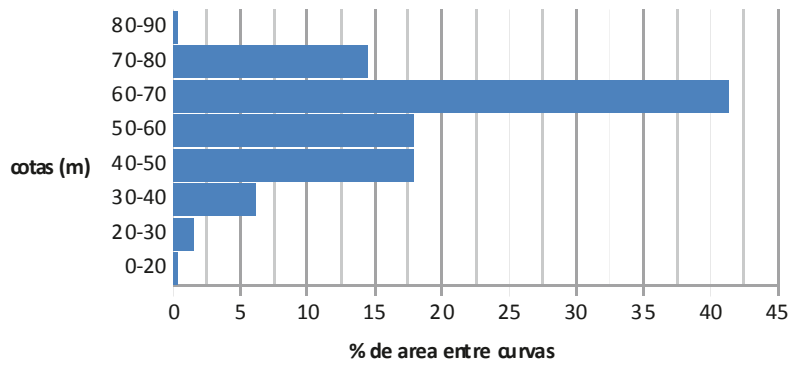


Figura 15. Curva de frecuencia de alturas de la cuenca

La fig. 16 presenta la curva hipsométrica y la fig. 17 muestra el Rectángulo Equivalente.

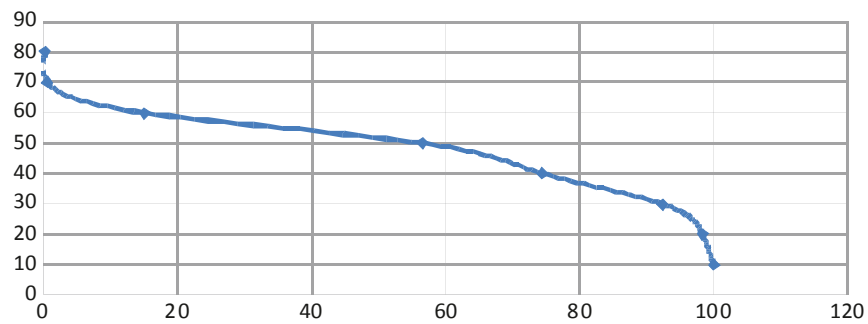


Figura 16. Curva Hipsométrica de la cuenca del A° Arroyo Feliciano.

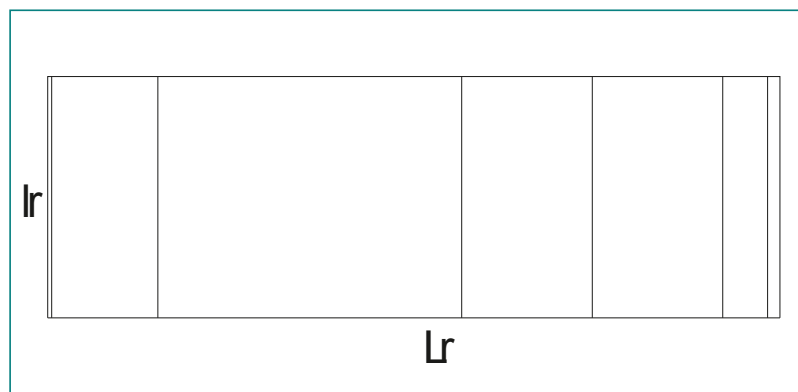


Figura 17. Rectángulo equivalente.

La altura más frecuente se encuentra entre las cotas 60-70 metros y presenta una pendiente media del cauce principal de 0,267 m/km. El Índice de pendiente es 0,17 y la densidad de drenaje de 0,491. La fig. 18 presenta el perfil longitudinal del Arroyo Feliciano.

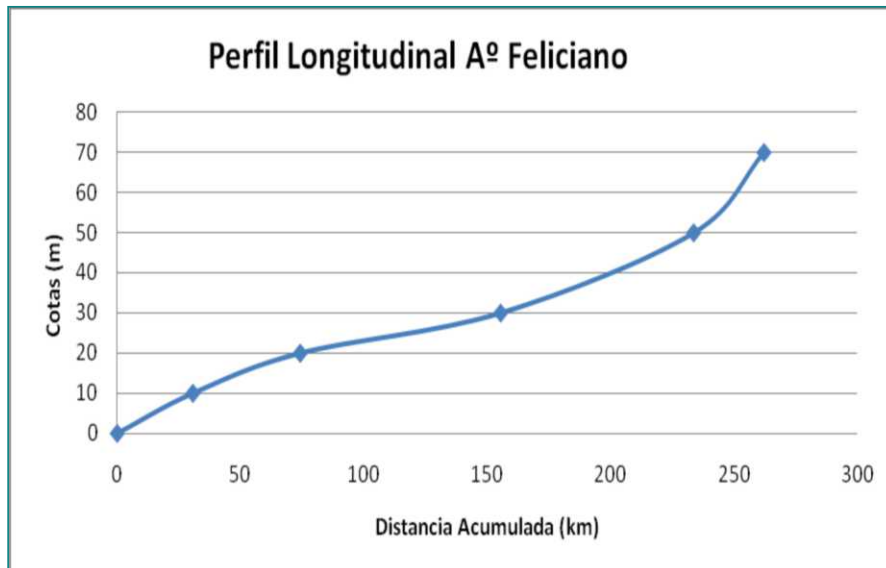


Figura 18. Perfil longitudinal del curso principal. Arroyo Feliciano

## IV.2. Clima.

La provincia de Entre Ríos presenta un clima húmedo de llanura. Su posición geográfica intermedia entre el ecuador y el polo hace que las temperaturas promedio se ubiquen en el rango de templadas, entre 17°C al sur y 20°C hacia el norte de la provincia; con un régimen regular de precipitaciones durante todo el año.

Según Rojas y Saluso (1987), la provincia de Entre Ríos se encuentra ubicada dentro de los climas de dominio atlántico, y se divide en dos regiones climáticas: una pequeña franja al Norte de la provincia que corresponde al clima subtropical húmedo de llanura y otra que cubre el resto de su territorio y corresponde al clima templado húmedo de llanura (fig. 19).



Figura 19. Regiones climáticas de Entre Ríos

Fuente: Rojas y Saluso, modificado.

Esto obedece a la convergencia periódica de distintas masas de aire. Una, tropical cálida y húmeda, proviene del anticiclón permanente del Atlántico Sur; ingresa como viento del noreste, recrudeciendo en el verano por el desplazamiento hacia el sur del anticiclón y por la atracción ejercida en esa estación por la depresión continental noroeste que estimula su ingreso hasta el centro del continente. Por su

condición de aire marítimo es el causante del mayor monto de lluvias. Otras masas de aire frío son de origen continental (suroeste) o marítimo (sudestada) y también polar (Rojas y Saluso, op.cit.).

Su predominio alternado, su frecuencia estacional, sus sucesivas transformaciones y el intercambio meridiano de aire tropical y polar, explican la diferenciación dinámica y gradual del clima (Rojas y Saluso, op.cit.).

La región de clima subtropical húmedo de llanura, se caracteriza por inviernos suaves. La amplitud térmica no excede los 13 °C y el alto grado de humedad del aire reduce su oscilación diaria. La influencia constante de los vientos del noreste influye en las abundantes lluvias, con medias de 1200 mm. (Rojas y Saluso, op.cit.). Estas altas precipitaciones obedecen a la convergencia periódica de distintas masas de aire: una que ingresa como vientos del Noreste, mayor en verano por el desplazamiento hacia el sur del anticiclón del Atlántico Sur, y otras de origen continental (S.O.) o marítimo (S.O.) o polar (INTA, 1990).

La región de clima templado húmedo de llanura se caracteriza por su condición de planicie abierta, sin restricciones a la influencia de los vientos húmedos del noreste; al accionar de los vientos secos y refrigerantes del suroeste (causantes de los cambios repentinos en el estado del tiempo), y a los vientos del sureste (aire frío saturado de humedad, que da lugar a semanas enteras de cielo cubierto, lluvias y temperaturas muy estables). Este clima, caracterizado por su suavidad y ausencia de situaciones extremas, es el de mayor aptitud para el cultivo de secano de cereales y forrajeras, y para la cría de ganado (Rojas y Saluso, op.cit.).

### **Índices climáticos**

Según la clasificación de Koppen (1936) la región de la cuenca del Arroyo Feliciano pertenece al grupo **C** “Templado y húmedo”, subgrupo **f** “sin estación seca”, y subdivisión **a** “temperatura media del mes más cálido superior a 22 °C”, con veranos calurosos o muy calurosos, temperatura media del mes más frío entre 0 y 18 °C, y con un régimen regular de precipitaciones durante todo el año.

El índice de Lang es útil para clasificar el tipo de clima presente en una región, utilizando solamente dos variables y mediante un cálculo sencillo, Tabla 2. El índice de Lang se calcula mediante la expresión:

$$I_L = \frac{P}{T}$$

donde:

P = precipitación media anual en mm

T = temperatura media anual en °C

**Tabla 2.** Clasificación de las zonas climáticas Según el índice de Lang

$I_L$	Zonas climáticas
$0 < I_L < 20$	Desiertos
$20 < I_L < 40$	Zona árida
$40 < I_L < 60$	Zona húmeda de estepa y sabana
$60 < I_L < 100$	Zona húmeda de bosques ralos
$100 < I_L < 160$	Zona húmeda de bosques densos
$I_L > 160$	Zona hiperhúmeda de prados y tundras

En el área de la cuenca, con una precipitación media anual de 1081,1 mm y una temperatura media anual de 19,1 °C, el índice de Lang da como resultado  $I_L = 56,6$  calificando en “Zona húmeda de estepa y sabana”.

El índice de Martonne (1926) también se utiliza para clasificar zonas climáticas, Tabla 3, según la expresión:

$$I_M = \frac{P}{T + 10}$$

donde :

P = precipitación media anual en mm

T = temperatura media anual en °C



**Tabla 3.** Zonas climáticas según el índice de Martone

$I_M$	Zonas climáticas
$0 < I_M < 5$	Desierto
$5 < I_M < 10$	Semi desierto
$10 < I_M < 20$	Estepas y países poco mediterráneos
$20 < I_M < 30$	Regiones del olivo y de los cereales
$30 < I_M < 40$	Regiones sub húmedas de prados y bosques
$I_M > 40$	Zonas húmedas a muy húmedas

El índice de Martonne para la región en estudio es de  $I_M = 37,15$ , clasificando como “regiones subhúmedas de prados y bosques”.

Dantín, Cereceda y Revenga, ver Tabla 4, utilizaron la expresión:

$$I_{DR} = 100T/P$$

donde:

P = precipitación media anual en mm

T = temperatura media anual en °C

**Tabla 4.** Zonas climáticas según el índice de Dantin et al.

$I_{DR}$	Zonas climáticas
$I_{DR} > 4$	Zonas áridas
$4 > I_{DR} > 2$	Zonas semiáridas
$I_{DR} < 2$	Zonas húmedas y sub húmedas

El índice  $I_{DR}$  para la cuenca del Arroyo Feliciano resultó en 1,77 “Zonas húmedas y subhúmedas”.

La caracterización climática en este trabajo, fue realizada en base a datos de estaciones climáticas de la zona en estudio recopilados por la Dirección de Hidráulica y Recursos hídricos.

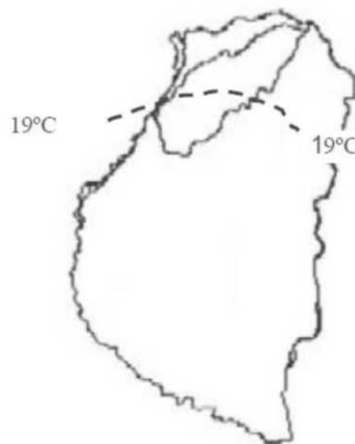
### **Vientos**

A lo largo del año predominan vientos del NE. En verano y primavera tienen mayor incidencia los vientos N, NE, E y SE; y el aumento en otoño e invierno de los vientos S y SO (pero sin ser predominantes), (Rojas y Saluso, op.cit.).

En lo que respecta a la velocidad, las mayores intensidades se registran en los meses de septiembre y octubre, mientras que a abril le corresponden las menores. En general toda el área se caracteriza por poseer un régimen de vientos con intensidades de suaves a leves, lo que se evidencia en los promedios diarios mensuales que oscilan entre 10 y 12 km/h (Burkhardt y Woth, 2007).

### **Temperatura.**

Según (Rojas y Saluso, op.cit. la temperatura media anual decrece conforme al aumento de la latitud (fig. 20).



**Figura 20.** Temperatura media anual en °C

Fuente: Rojas y Saluso, modificado.

Se procesaron las series de temperatura diaria correspondientes a los últimos 20 años de la estación meteorológica de Feliciano (1986- Agosto de 2006) para el análisis de la marcha anual de dicha variable. La temperatura media anual fue de 19,1 °C, siendo el mes más cálido Enero con 25,4 °C y el mes más frío Julio con 12,7°C; la baja amplitud térmica media anual de 12,7°C hace que el descanso invernal no sea muy prolongado (fig. 21).

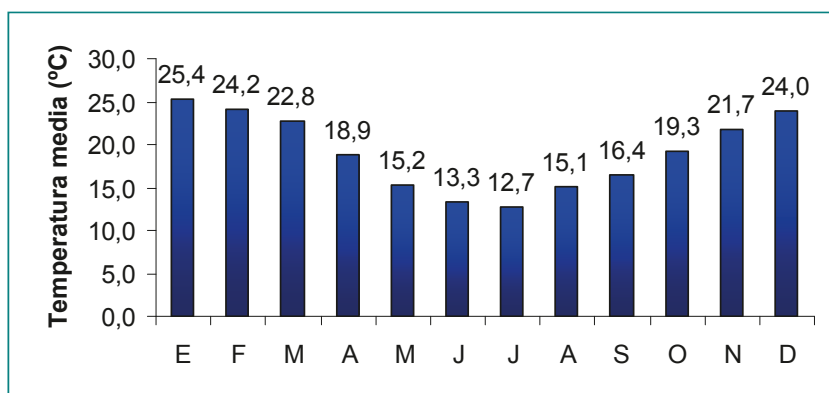


Figura 21. Temperatura media mensual en °C en San José de Feliciano.

Para analizar los períodos de temperaturas sobresalientes, se tuvo en cuenta el año 1986 hasta el 2005, ya que la serie de 2006 no estaba completa al momento de realización. Los años más cálidos para la serie fueron 1989 y 1997, ambos con una media anual de 19,8°C, y el más frío 1986 con 18,4°C.

Según CIOMTA (2005), el rango para las temperaturas máximas absolutas en la región se encontraría entre 38 y 42 °C, aumentando las mismas hacia el norte de la cuenca; mientras que las temperaturas normales medias máximas serían entre 23 y 25 °C, siguiendo el mismo patrón progresivo al disminuir la latitud.

La media diaria anual de humedad relativa para la provincia supera el umbral de 60% en toda su extensión, valor que se incrementa de norte a sur.

En términos generales, de noviembre a febrero inclusive, los promedios diarios mensuales se ubican entre el 60 y 70 %; y en junio y julio las medias mensuales más elevadas superiores a 80 % (período 1951-60).

El efecto combinado de la temperatura, el viento y la humedad relativa influye en la evapotranspiración que es uno de los datos necesarios para el planeamiento del manejo del agua (Rojas y Saluso, op.cit.).

## Precipitaciones

La aptitud agrícola y ganadera de un lugar depende no sólo de la cantidad anual de lluvias sino también de las épocas del año en que normalmente ellas ocurren. Por ello si se desea caracterizar un clima desde el punto de vista hídrico debe considerarse no sólo a la lluvia anual sino también como se distribuye la misma durante el curso del año (CIOMTA, 2005; Fowler et al., 2007).

Las precipitaciones anuales crecen de Suroeste a Noreste, ya que en el suroeste de la cuenca (departamento de La Paz) el rango es entre 1201 y 1300 mm anuales, hacia el centro- norte (departamentos de Federal y Feliciano) sería de 1301 a 1400 mm, y al noroeste de la cuenca en la cabecera del arroyo Feliciano hay valores superiores a 1400 mm anuales.

Según INTA (1986), este patrón se debe a la influencia del ciclón del Atlántico Sur, por ello, la parte norte de la provincia es la que recibe las lluvias más abundantes (fig. 22).

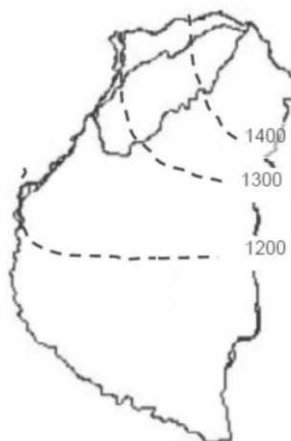


Figura 22. Precipitaciones normales anuales

Fuente: CIOMTA, 2005 modificada.

Período de análisis 1971 – 2003

La distribución de las precipitaciones medias mensuales se presenta en la fig. 23.

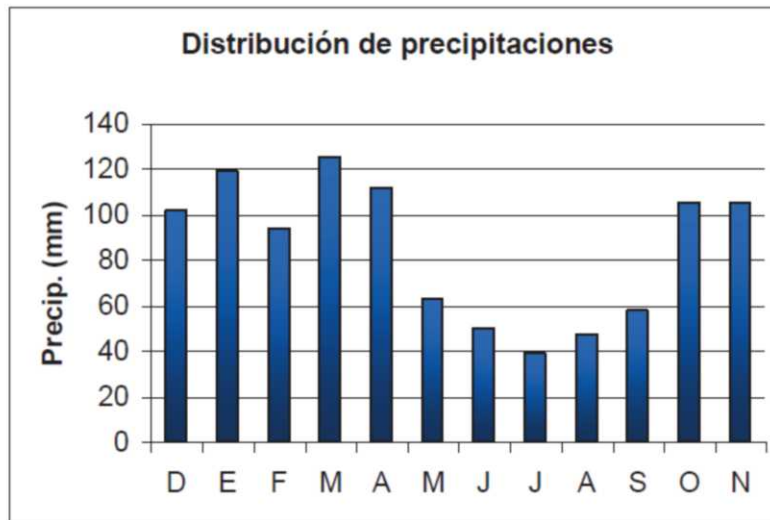


Figura 23. Distribución de las precipitaciones mensuales promedio

Las mayores precipitaciones producen en los meses Marzo, Enero y Abril; y la menor en el mes de Julio. Es importante destacar que el 74,8 % de las precipitaciones anuales ocurren desde el mes de octubre hasta abril (inclusive).

Las precipitaciones normales anuales, para toda el área de la cuenca, arrojó un valor de 1086,1 mm anuales. Los años más lluviosos resultaron ser los años 2002 (1726,5 mm), 1978 (1617,5 mm), y 1998 (1548,1 mm); mientras que los años de mayor sequía fueron 1962 (564,7 mm), y 1952 (615 mm).

Analizando los datos de los últimos 20 años (serie 1986– 2005), se determinó la cantidad de de lluvias anuales para distintos rangos, Tabla 5.

**Tabla 5.** Probabilidad de precipitaciones anuales

Rango de Precipitaciones anuales	Cantidad de veces	Número Cada 10 años
800-1000	5	2,5
1001-1200	4	2
1201-1400	6	3
1401-1600	4	2
> 1600	1	0,5

### **Días de lluvia al año:**

En general suele llover entre 90 y 100 días al año en el área en estudio, salvo en una delgada franja al oeste en que la probabilidad es de 80 a 90 días (datos de CIOMTA, op.cit.), siguiendo la tendencia decreciente del número de días de lluvias anual, en dirección Noreste – Suroeste.

### IV.3. Suelos

Para la caracterización de los suelos de la cuenca, se hace referencia a las categorías taxonómicas de Orden, Suborden, Gran Grupo y Subgrupo. El mapa de suelos (fig. 24) presenta los límites y ubicación de cada Orden, obtenidos mediante imágenes georreferenciadas.

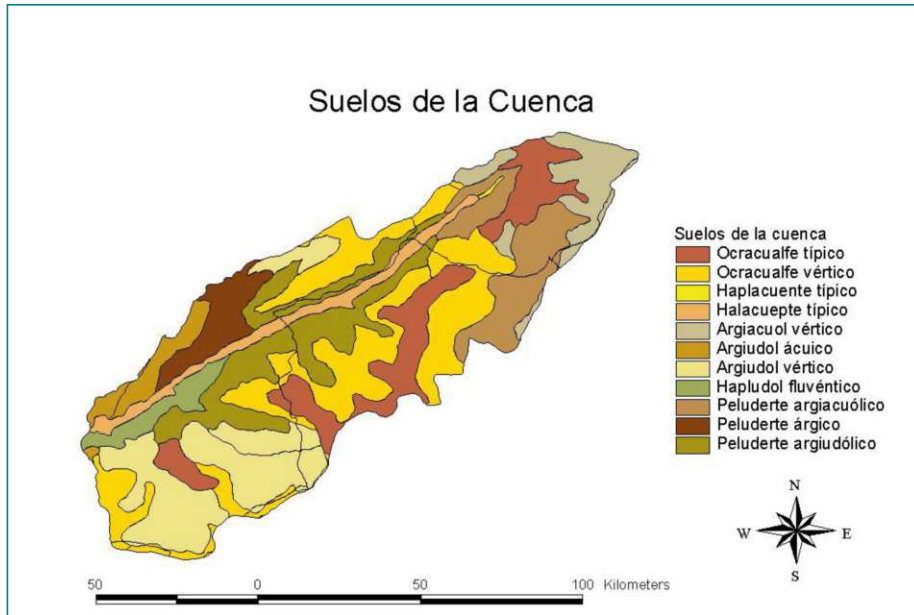


Figura 24. Caracterización de los suelos de la cuenca.

#### Unidades Taxonómicas.

Los suelos de la cuenca del arroyo Feliciano se dividen en los siguientes órdenes:

- Vertisoles
- Alfisoles
- Molisoles
- Inceptisoles
- Entisoles

La fig. 25 muestra la proporción con que representan órdenes a la cuenca.

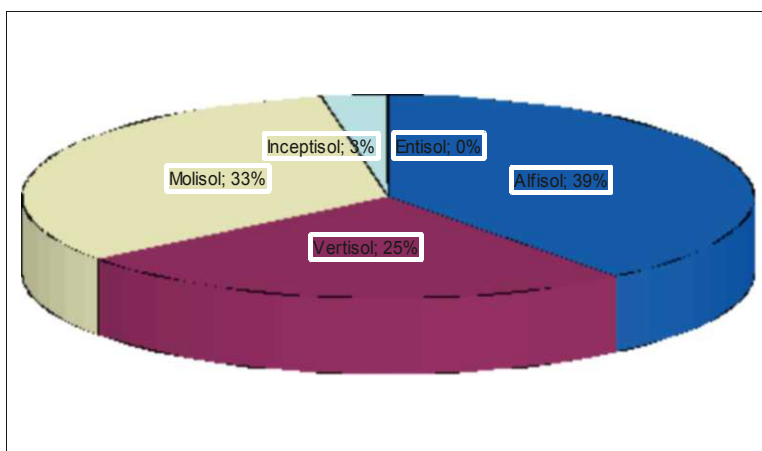


Figura 25. Porcentajes de suelos de cada orden en la Cuenca Arroyo Feliciano.

A continuación, son presentadas las principales características que distinguen a cada orden, utilizando las Cartas de Suelos de la Provincia de Entre Ríos (INTA, 1984, 1986, 1990 y 1993).

#### **Orden Vertisol.**

Este orden agrupa suelos negros o muy oscuros (INTA, 1984), con altos contenidos de arcilla (una vez mezclados los primeros 18 cm., deben tener más de 30 % de arcilla en todos los subhorizontes hasta una profundidad de 50 cm.), y que además tienen grietas de más de 1 cm. de ancho y 50 cm. de largo, y una o más de las siguientes combinaciones:

- a) Microrrelieve gilgai;
- b) Caras de fricción (Slickensides) en suficiente cantidad como para intersectarse ; y
- c) Agregados estructurales cuneiformes entre los 25 y 100 cm. de profundidad.

Este orden se encuentra íntimamente relacionado con las arcillas (esmeclitas de relación 2:1 como las montmorillonitas), de gran capacidad de absorción de agua, por lo que presentan gran variación de volumen entre su estado en húmedo y seco (expansión – contracción).



Este proceso de desecación y humectación se da en forma despareja con la profundidad, produciendo tensiones internas en el perfil que forman las caras de fricción (slickensides), movimientos diferenciales de la masa del suelo (churning), grietas profundas y el desarrollo del microrrelieve "gilgai" (INTA, 1993).

Los subórdenes se dividen según el régimen de humedad del suelo, que en este caso corresponden al régimen "údic", donde el suelo está normalmente húmedo (al menos alguna parte del perfil), y nunca está seco más de 90 días acumulativos en el año; por esta razón las grietas se abren y cierran una o más veces por año (suborden: *Udertes*). La intensidad del color en húmedo, inferior a 2 (muy oscuro), define al gran grupo de los **Peludertes** (INTA, 1993).

#### **Peludertes árgicos.**

Es el Vertisol típico de la provincia de Entre Ríos, suelos de colores muy oscuros hasta casi un metro de profundidad, y con un horizonte B2 con características de un horizonte argílico, salvo por la presencia de cutanes microscópicos de iluviación.

#### **Peludertes argiacuólicos.**

Son Vertisoles con características hidromórficas. Reúne condiciones para ser considerado un (o parte de un) epipedón mólico y un horizonte argílico con abundantes caras de fricción (slickensides).

Tienen microrrelieve gilgai muy bien desarrollado, con ciclos entre cresta y cresta de hasta 7 metros, y una diferencia de altura entre cresta y bajo de 15 a 20 cm.

Poseen drenaje deficiente, con exceso de agua en el perfil durante los períodos lluviosos, y déficit después de cierto tiempo sin precipitaciones. Debido a la baja permeabilidad de los horizontes subsuperficiales, parte del agua escurre superficialmente, generando problemas de erosión (en surcos y cárcavas), agravados por el sobrepastoreo.

### **Peludertes argiudólicos.**

Son muy similares a los argiacuólicos, con la excepción del horizonte superficial, que reúne todas las condiciones para ser considerado un epipedón mólico.

### **Orden Alfisol.**

Los planosoles son unos de los suelos más problemáticos de la provincia. Están imperfectamente drenados y después de la mayoría de las lluvias quedan con exceso de agua sobre la superficie (encharcamiento). Se los halla en las zonas menos desarrolladas socioeconómicamente, ubicados en áreas altas planas a muy suavemente onduladas.

Se caracterizan por tener un epipedón corto, muy limoso, con colores claros y una estructura desfavorable; muy duro en seco y muy plástico cuando está mojado. A este horizonte le sigue, casi abruptamente, un subsuelo muy denso, oscuro y arcilloso, prácticamente impermeable e impenetrable por las raíces. En seco se forman grietas anchas y profundas (INTA, 1984). Son muy leve a moderadamente alcalinos (en profundidad), con más del 35 % de saturación de bases, de estructuración prismática o columnar que constituyen un horizonte argílico fuertemente desarrollado (Bt), (INTA, 1993).

Es típico de los planosoles la presencia de grandes colonias de hormigas, que a pesar de ser comunes en el norte de la provincia, no se las encuentra raramente en suelos molisoles y vertisoles. Las especies de hormigas son *Atta vollenweideri* (grandes, rojas) y *Acromyrmex lundi* (hormiga negra común, más chica), construyen grandes hormigueros, con cúpulas redondas de hasta 75 cm. de altura y un diámetro que varía entre 1 y 5 metros (INTA, 1984).

Pertenecen al gran grupo de los **Ocracualfes**, alfisoles de régimen "údic", con elevado contenido de arcillas del tipo esmectitas en el horizonte Bt (INTA, 1993).

### **Ocraculfes típicos.**

Son suelos sin epipedón mólico y con un horizonte argílico (INTA, 1984).

### **Ocracualfes vérticos.**

Tienen un epipedón muy lixiviado, los colores en seco no alcanzan a ser oscuros y poseen alguna característica vértica (INTA, 1984).

### **Orden Molisol.**

Los Molisoles son suelos pardos oscuros, con horizontes superficiales limosos, bien estructurados, bien provistos de materia orgánica y fácil de trabajar; seguidos por horizontes subsuperficiales densos, arcillosos, poco permeables y penetrables. El horizonte superficial es poco profundo, oscuro, con una textura franco limosa a franco arcillo limosa, y estructura en bloques y granular, bien provisto de materia orgánica (2 a 4 %) de buena calidad, alta saturación en bases y muy buena provisión de nutrientes. Le sigue un horizonte B<sub>2</sub> textural, con textura franco arcillo limosa a arcillo limosa, con baja permeabilidad y difícil de penetrar por las raíces (INTA, 1984).

En general tienen características algo distintas a los molisoles del suroeste de la provincia, en parte por aportes recientes de limos eólicos, y en parte, por haberse desarrollado sobre materiales lacustres y palustres (limos calcáreos) de la Formación "Hernandarias" (INTA, 1993). A nivel de suborden se diferencian los *Acuoles* y los *Udoles*.

Los primeros corresponden a los que tienen un régimen de humedad "ácuico", y en donde el factor predominante de su génesis es el exceso de humedad (hidromorfismo), estando el perfil saturado con agua y en un ambiente netamente reductor por la ausencia de oxígeno. Hay un solo gran grupo dentro de la cuenca, que son **Argiacuoles** (con horizontes argílico), con un solo subgrupo: *Argiacuoles vérticos*.

En los segundos, en cambio, el régimen de humedad es "údico", cuando el perfil permanece húmedo la mayor parte del año, y nunca está seco por más de 90 días acumulativos en el año. A nivel de gran grupo, entre los *Udoles*, tenemos

aquellos en los cuales el material madre está formado por una mezcla de limos calcáreos y loess retransportado, pero en donde sí se dieron los procesos de eluviación e iluviación, con la consiguiente formación de un horizonte de acumulación de arcilla (horizonte argílico) que los hace pertenecer al gran grupo de los **Argiudoles** (INTA, 1993).

#### **Argiacuoles vérticos.**

Se ubican en áreas generalmente planas, sin red de drenaje, o solo con una red muy incipiente. Estos suelos presentan generalmente una secuencia de horizontes A1-B2t-B3, con un epipedón mólico generalmente profundo, oscuro y de textura franco-limosa o franco-arcillo-limosa. El horizonte argílico presenta abundantes caras de fricción (slickensides) y grietas cuando está seco. Son características las concreciones de hierro manganeso en todo el perfil (INTA, 1993).

#### **Argiudoles vérticos.**

Son los Argiudoles no hidromórficos que presentan características vérticas, aunque generalmente son más hidromórficos que lo que corresponde al subgrupo (evidenciado por la presencia de moteados de hierro y manganeso dentro de los primeros 40 cm. del perfil, producto de las alternancias en las condiciones de reducción y oxidación de estos elementos (INTA, 1993).

#### **Argiudoles ácuicos:**

Se caracterizan por tener perfiles más profundos, a veces con un epipedón algo engrosado, seguido de un horizonte B2 textural de espesor considerable. Después de grandes lluvias algunos sufren un leve encharcamiento, mientras que otros se anegan (INTA, 1993).

#### **Hapludol fluvéntico:**

En el Hapludol, el horizonte B<sub>2</sub> no alcanza a tener características de argílico (INTA, 1984).

### **Orden Entisol.**

Los suelos de este orden se caracterizan por no presentar desarrollo pedogenético (o muy escaso), por lo que carecen de horizontes de diagnóstico. Son suelos aluviales del valle del arroyo Feliciano, con un paisaje de albardones y esteros. Están caracterizados por perfiles heterogéneos compuestos por capas de textura variable (muy limosa a arcillosa según la dinámica de deposición fluvial). Son pobres a muy pobremente drenados, por lo general gleizados entre los 50 y 100 cm.

Por las condiciones de drenaje, la textura de las capas superficiales y la sucesión irregular de capas con 5-8% de materia orgánica parcialmente descompuesta, estos Entisoles pertenecen al suborden *Acuentes*, y al gran grupo de los Haplacuentes.

#### **Haplacuyente típico:**

Responde a las características mencionadas en *Orden Entisol*.

### **Orden Inceptisol.**

Estos suelos tienen un desarrollo pedogenético relativamente mayor que los Entisoles, por lo cual tienen un o más horizontes de diagnóstico.

Estos, sin embargo, son el resultado de procesos de evolución incipientes en un grado muy inferior a los procesos de lixiviación o meteorización extremas que conducen a la consiguiente formación de horizontes de eluviación (argílicos o spódicos).

Estos suelos se extienden en el valle fluvial del arroyo Feliciano con un paisaje de albardones y esteros. Los esteros ocupan las áreas cóncavas, sin salida natural hacia el arroyo principal, quedando inundado por períodos prolongados.

Pertenecen al gran grupo de los **Haplacueptes**, formados por capas de textura franco-arcillo-limosa, gleizados a partir de los 40-50 cm. de profundidad y con una capa freática fluctuante cerca de la superficie.

Son ácidos a ligeramente ácidos en superficie y, por lo general, neutros en profundidad. Pueden poseer capas subsuperficiales levemente alcalinas a alcalinas.

Los suelos de los valles del Arroyo Feliciano comprenden un conjunto de suelos aluviales de albardones, esteros y playas alcalinas “blanquizales”, meandros antiguos colmatados y algunas terrazas altas e intermedias.

Los albardones más cercanos a los cursos de agua, se caracterizan por presentar una disposición en capas de textura variable, siendo limoso en superficie y aumento de la fracción arcilla en profundidad. Las principales limitantes de esta unidad es que se inundan con cada crecida del arroyo, aunque solo por corto tiempo.

Los “esteros” ocupan áreas cóncavas, sin salida natural hacia el curso principal. Son bajos pantanosos que quedan inundados durante períodos prolongados, ya sea por inundación o por acumulación de aguas pluviales.

Están cubiertos por pajonales densos. Son sucesiones de capas con alto contenido de arcilla, con tenores que en la primera capa superan el 50 %.

Las playas se ubican a continuación de los esteros (partiendo del curso), elevándose el terreno en terrazas o pendientes suaves, pero no en todos los casos existen. El horizonte superficial es de textura franco limosa, siendo el subsuelo limoso o arcilloso. Los “blanquizales” se encuentran en partes planas, cercanos a los esteros, y se caracterizan por tener horizontes lavados y masivos, con bastante arena. El uso actual es el ganadero de cría.

Los Suelos de las cabeceras de arroyos y tributarios menores se ubican en un paisaje plano cóncavo de arroyos y tributarios menores, a veces, en proceso de entallado.

Los suelos que la cubren son perfiles uniformes con desarrollo incipiente de horizontes arcillo limosos a arcillosos; pobre a muy pobremente drenados. Por su baja permeabilidad y lento escurrimiento, después de lluvias copiosas quedan bajo agua por mucho tiempo.

#### IV.4. Escurrimiento

El régimen de escurrimiento del Arroyo Feliciano es de tipo pluvial. En general, su cuenca de aportes presenta suelos con muy baja capacidad de infiltración, lo que unido a su geomorfología y al buen régimen de lluvias (que oscilan, aproximadamente, entre los 800 y 1300 mm anuales) originan períodos con altos volúmenes de escorrentía superficial (principalmente en otoño) seguidos de otros muy escasos, que se tornan nulos o casi nulos en épocas de estiaje prolongado (Ceirano et al., 1992).

En la Provincia de Entre Ríos, la serie de niveles hidrométricos-caudales más antigua (mayor longitud de la serie) corresponde al A° Feliciano. Existen dos secciones de control: Paso Quebracho (niveles) y Paso Medina (niveles y caudales). La primera tiene un área de aporte de 8400 km<sup>2</sup>, mientras que la segunda 5562 km<sup>2</sup>. En esta última, las mediciones comienzan a partir del año 1975 y se extienden hasta el presente (Morín et al., 1989; Gioria et al., 1986). La sección de control se ubica en el puente de la RP6. El caudal máximo registrado fue de 2244 m<sup>3</sup>/s en el año 2016.

. En la Tabla 6 se detalla la información hidrométrica recopilada por la Sub-Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

Tabla 6: Datos hidrométricos recopilados

<b>Curso de agua</b>	<b>Lugar de medición</b>	<b>Variable</b>	<b>Período de registro</b>	<b>Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)</b>
A° Feliciano	Paso Quebracho	Niveles medios diarios	1990-2016	8240
A° Feliciano	Paso Medina	Caudal medios Niveles medios diarios	1975-2016	5562

Las principales características de la serie de caudales diarios se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Síntesis de caudales diarios del A° Feliciano.  
Paso Medina, serie 1975-2008.

Caudales Medios Diarios (m <sup>3</sup> /seg) A° Feliciano -P° Medina, serie 1975-2008												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
<b>Mínimo</b>	0.2	0.17	0.32	0.46	0.46	0.094	0.13	0.04	0.09	0.27	0.31	0.09
<b>Medio</b>	41.53	51.39	69.82	122.63	75.71	52.23	26.17	14.49	24.81	40.47	54.60	47.88
<b>Máximo</b>	1934.4	1001.3	2179.9	2065.3	830.2	1978.9	511.9	135.5	875.1	512.4	651.9	665.8

El máximo de los caudales diarios registrados en el período fue 2180 m<sup>3</sup>/seg, el mínimo 0.04 m<sup>3</sup>/seg, y el caudal diario promedio 51.7 m<sup>3</sup>/seg. En el año 2016, una situación de grande lluvias en 4 días, permitió aforar un caudal el caudal mayor: 2264 m<sup>3</sup>/seg, en abril del 2016.

Algunos de los índices estadísticos, indicativos de la dispersión de los valores de la serie analizada, son los siguientes:

- rango =  $(Q_{\text{máx}} - Q_{\text{mín}}) = 2.263,96 \text{ m}^3/\text{seg}$ ,
- relación "r" =  $Q_{d,\text{máx}}/Q_{\text{mód}} = 43,79$
- coeficiente de variabilidad (Cv) o de Pearson =  $\text{desvío standard} / Q_{\text{mód}} = 228.3\%$ .

Los índices determinados muestran la gran variabilidad que presenta el caudal diario en relación a sus valores medios.

Los caudales mensuales promedios de la serie presentan un solo máximo en abril (122.7 m<sup>3</sup>/seg), mientras que el mínimo se produce en agosto (14.5 m<sup>3</sup>/seg). Los caudales mensuales máximos en cambio, presentan varios picos durante el año entre los que sobresalen marzo y abril (438 y 460.7 m<sup>3</sup>/seg), y una gran amplitud en relación a los caudales mensuales mínimos (fig. 26). Éstos presentan el mayor valor en marzo (0,59 m<sup>3</sup>/seg.) mientras que los mínimos se producen en octubre y en febrero, con 0,31 m<sup>3</sup>/seg. El rango de los caudales mensuales del período (460.7-0.31= 460.39 m<sup>3</sup>/seg), la relación "r" entre el caudal mensual máximo y el módulo ( $r= 460.7/45.7=10.08$ ), y el coeficiente de variabilidad (Cv= 1,73 %), definen, todavía, una dispersión elevada, pero bastante menor si se compara estos índices con los determinados en la serie de caudales diarios.



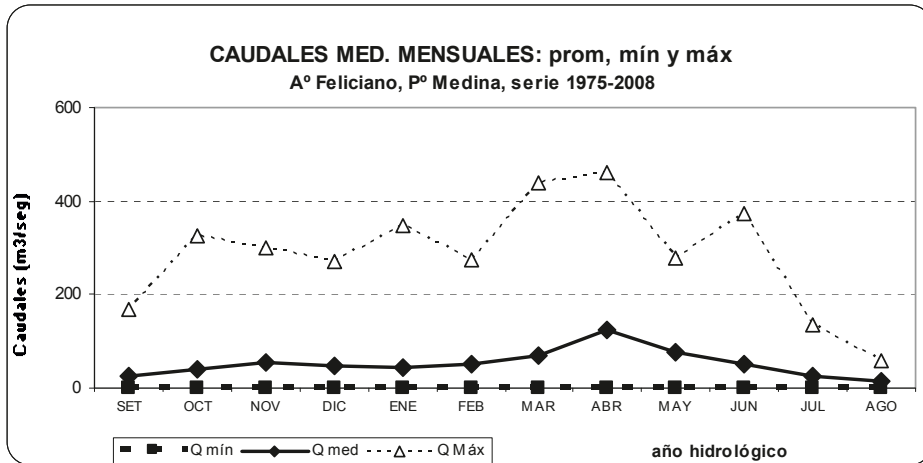


Figura 26. Caudales medios mensuales

La Figura 26 muestra la variabilidad de los caudales medios mensuales a lo largo del año hidrológico. La extensión de la serie (más de 32 años) permite, además, mostrar la gran irregularidad interanual que este curso de agua tiene, si se grafican, cronológicamente, los caudales medios anuales del período de registro (fig. 27).

Los módulos de los años hiper-húmedos 1997-98 y 2001-02 (130.5 y 117.7 m<sup>3</sup>/seg, respectivamente) contrastan notablemente con los de los años secos 96-97 y 81/82 (5,0 y 8,61 m<sup>3</sup>/seg), fig. 27, evidenciando el elevado grado de irregularidad que también se presenta en forma interanual. Los caudales medios diarios (ó medios mensuales) de un período de observaciones, ordenados en forma decreciente y graficados, expresan el valor de caudal que es sobrepasado para un número de días del año. Esta curva se denomina curva de duración de caudales y, a partir de la misma, se pueden definir algunos caudales característicos:

- caudal característico máximo: es el caudal que es sobrepasado diez días al año;
- caudal característico medio: es el caudal sobrepasado ciento ochenta y dos días al año, es decir que en términos de probabilidad, sería el caudal que en el año tiene el 50 % de posibilidades de ser excedido. En función de estadísticos descriptivos este caudal puede considerarse como la *mediana* de toda la serie.

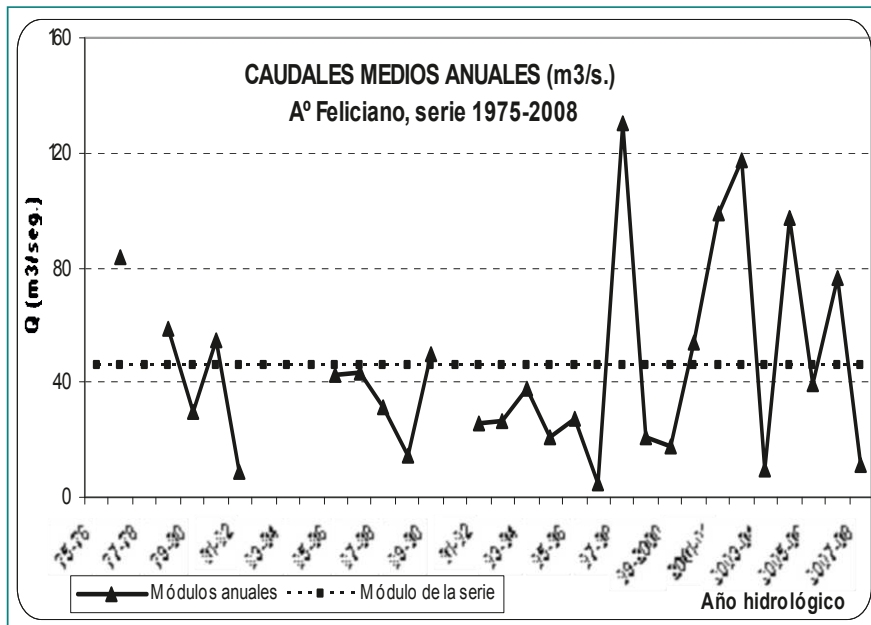


Figura 27. Módulos anuales del Arroyo Feliciano.  
Paso Medina. Serie 1975-2008.

- caudal característico mínimo: es el caudal que es sobrepasado 355 días al año.

Estos valores pueden resultar muy útiles cuando los registros que se disponen presentan grandes dispersiones en relación a los valores medios, puestas de manifiesto cuando los coeficientes de variabilidad (o de Pearson)  $C_v$  y el coeficiente “r” presentan valores muy elevados, o los rangos son de notable amplitud, como ha ocurrido en el ítem precedente.

La curva de duración de los caudales diarios del arroyo Feliciano, en el período 1975-2008, se presenta en la fig. 28.

Los caudales diarios característicos determinados han sido:

- Q característico mín.:  $0,35 \text{ m}^3/\text{seg.}$
- Q característico medio ( $Q_{50\%}$ ):  $7,0 \text{ m}^3/\text{seg.}$
- Q característico máx.:  $320 \text{ m}^3/\text{seg.}$

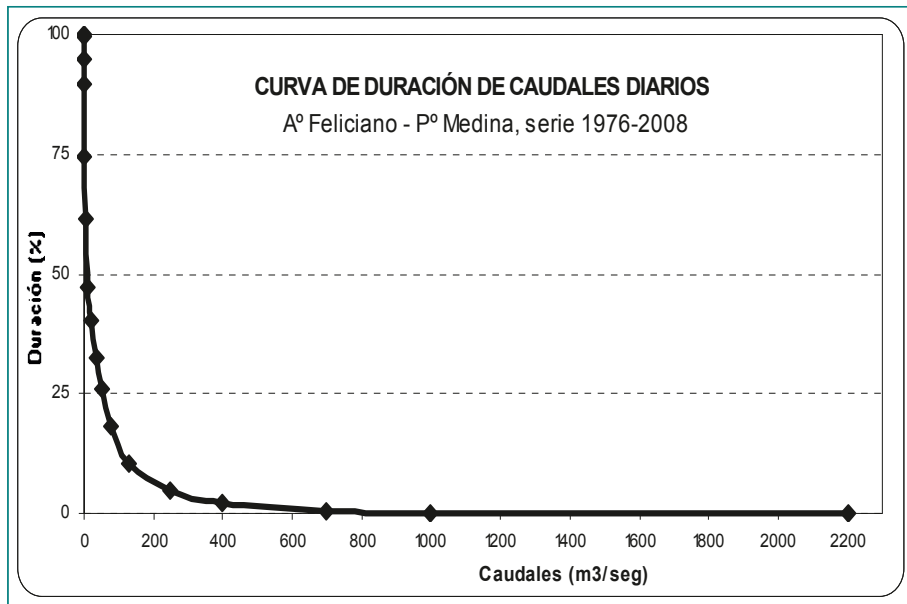


Figura 28. Curva de duración y frecuencia de caudales. Arroyo Feliciano

Dada la gran irregularidad de los caudales diarios de toda la serie, la gráfica no sigue una línea decreciente más o menos recta sino que desciende, en su primera parte, prácticamente en forma vertical y asintótica al eje de las ordenadas. Para poder disponer de una mayor apreciación de este primer tramo, el mismo se presenta en la fig. 29.

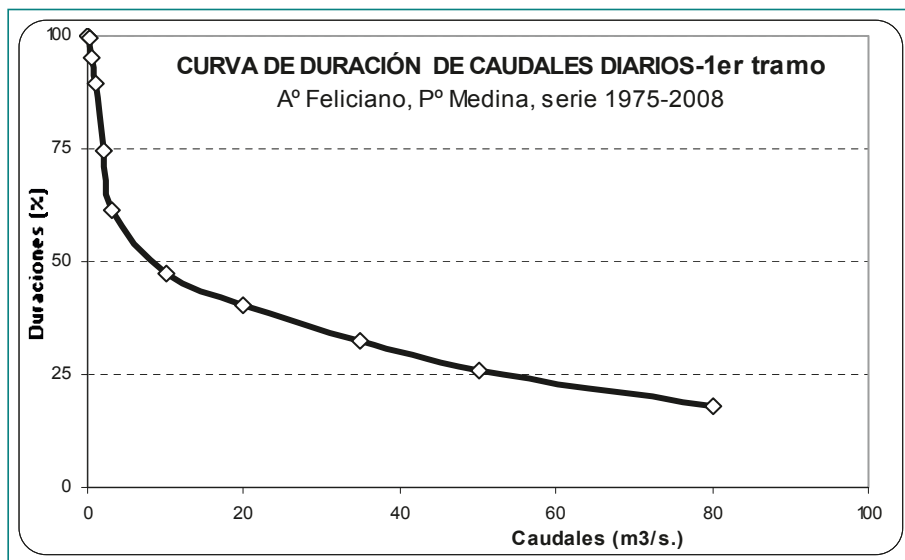


Figura 29. Curva de Duración de Caudales Diarios. 1º tramo

Si se considera la serie de caudales diarios del período completo de registros, se puede apreciar que su módulo ( $45,7 \text{ m}^3/\text{seg}$ ) es casi siete veces mayor que el caudal característico medio determinado ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ), y más de 100 veces que el caudal característico mínimo ( $0,35 \text{ m}^3/\text{seg}$ ). Si, además, a este último caudal se lo compara con el caudal que es sobrepasado sólo 10 días al año, y que implica una diferencia en tres órdenes de magnitud, se pone en evidencia las grandes limitaciones en la disponibilidad de esta fuente superficial de agua si no se realiza previamente una regulación adecuada de la misma.

### Disponibilidades Hídricas Superficiales

La esorrentía de una cuenca expresa su potencial hídrico. Para este curso de agua, los derrames anuales determinados fluctúan entre un mínimo de  $157 \text{ Hm}^3$  (1996/97) y un máximo de  $4117 \text{ Hm}^3$  (en el año 1997/98), correspondiéndole un valor medio de  $1442 \text{ Hm}^3$  (fig. 30).

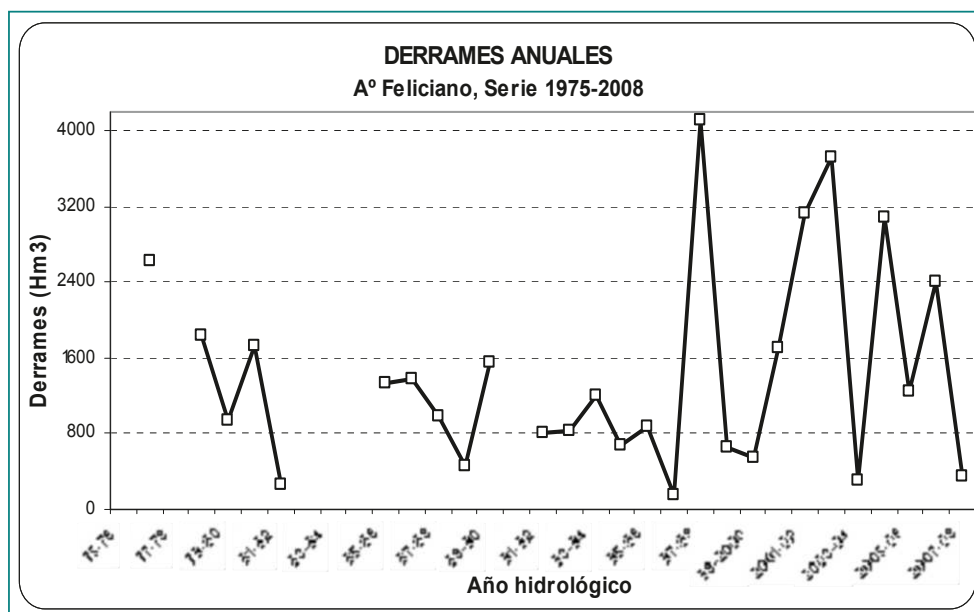


Figura 30. Derrames anuales A° Feliciano en Paso Medina

La figura 30 es ilustrativa de los años hiper-húmedos (97/98 y 2001/02), y de la influencia que éstos pueden tener en la determinación del valor medio, sobre todo cuando los registros son de corta extensión y pertenecen al período último.

Los derrames anuales pueden ser expresados también en términos de *lámina*, como una altura (en mm) de agua de escurrimiento sobre la cuenca, ó como un caudal específico, es decir como el caudal que produce 1 km<sup>2</sup> de superficie de aporte. En la fig. 31 siguiente son presentadas los escurrimientos anuales (en lámina) de la cuenca de aporte.

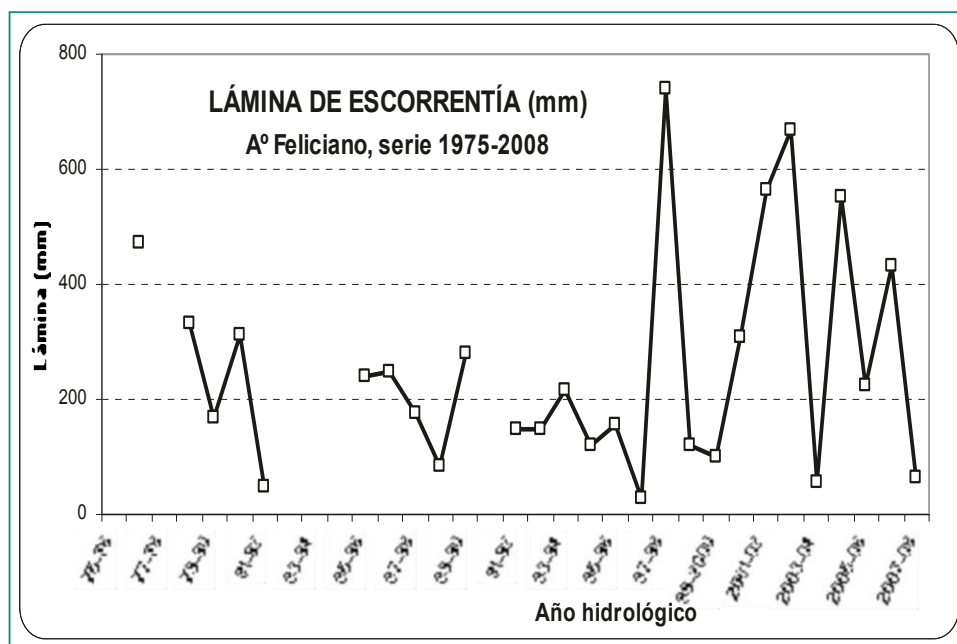


Figura 31. Láminas escurridas anuales (mm). A° Feliciano en Paso Medina

En la fig. 31 también puede apreciarse el elevado grado de irregularidad interanual existente, en donde se puede pasar de una lámina de escurrimiento de solamente 28 mm, en un año hidrológico seco como 1996/97, a la mayor de todas, de 740 mm., al año inmediato siguiente.

En general, la potencialidad del recurso hídrico superficial está expresada en los derrames anuales que, para el río Feliciano y durante el período 1975-2008, se ha determinado en la sección de control Paso Medina (RP6), y cuya elevada aleatoriedad ha quedado particularmente evidenciada en las figuras e ítems precedentes.

## V. DESARROLLO Y RESULTADOS

### V.1- Respuesta Hidrológica de la Cuenca en el Escenario Actual

#### V.1.1. Selección de los caudales diarios máximos anuales

De los registros de caudales medios diarios determinados hasta septiembre de 2016, fue seleccionado el mayor por cada año hidrológico. La Tabla 8 presenta la serie obtenida, con su fecha de ocurrencia, en la sección de control Paso Medina, y la figura 33 su distribución cronológica. Los caudales diarios máximos anuales registrados oscilaron entre 108 y 2244 m<sup>3</sup>/seg.

Tabla 8: caudales diarios máximos anuales.

Fecha	Q [m3/s]	Fecha	Q [m3/s]
9/29/1975	162.2	4/27/1996	925.3
4/22/1976	806.5	3/9/1998	2179.9
4/12/1977	436.0	7/1/1999	511.9
3/28/1978	206.6	9/12/2000	431.8
9/21/1978	875.1	1/28/2001	648.1
11/13/1979	292.3	4/26/2002	731.2
5/20/1981	340.9	4/27/2003	2065.3
6/15/1982	108.1	4/23/2004	189.7
9/28/1982	124.9	2/10/2005	878.8
4/4/1983	326.5	6/7/2005	1978.9
2/25/1984	611.0	6/3/2006	657.6
4/25/1985	481.7	12/28/2006	665.8
4/26/1986	845.5	3/8/2007	525.0
4/2/1987	376.7	10/15/2007	154.2
1/24/1988	1639.1	10/19/2008	351.9
4/19/1989	446.7	11/26/2009	1575.9
4/26/1990	721.5	2/22/2010	1338.4
6/17/1991	331.6	10/29/2011	656.1
5/3/1992	716.9	10/10/2012	829.2
4/24/1993	557.1	11/14/2013	779.0
11/4/1993	641.0	8/23/2015	732.0
5/4/1994	320.3	8/4/2016	2243.6
3/9/1995	223.5		

En la fig. 32 se graficó en forma cronológica el caudal diario máximo para cada año hidrológico de la serie de trabajo.

A° Feliciano - Q diario máximo anual

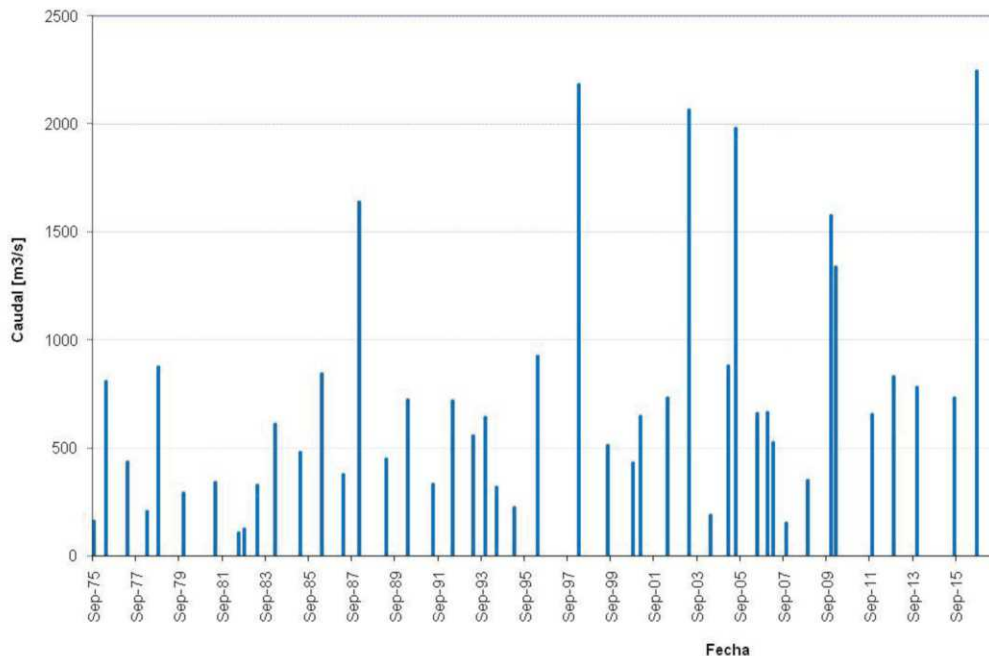


Figura. 32: caudales diarios máximos anuales

Además, como se disponen de los hidrogramas que los contienen y también se han podido recopilar las precipitaciones diarias que les dieron origen, resulta factible ajustar a los mismos algunos de los modelos de transformación "lluvia-caudal" de dominio público existentes.

En las últimas décadas, se ha podido observar un incremento en las precipitaciones diarias, mensuales y anuales. Las precipitaciones diarias no sólo son más intensas sino que también son un poco más frecuentes, especialmente durante el período otoñal. Es lógico suponer, entonces, que la respuesta hidrológica de la cuenca frente a ese futuro incremento de precipitaciones, generará caudales picos también mayores, que impactarán con una mayor frecuencia, o con mayores efectos, en el medio o en las obras de infraestructura existentes. Entonces, si a las precipitaciones de los hidrogramas seleccionados se las incrementaran en un cierto porcentaje, su transformación en caudales dará origen a otra serie de hidrogramas anuales maximizados. Para poder realizar esa transformación se necesita primero

hacer un paso previo que consiste en realizar la simulación de los hidrogramas de cada crecida máxima anual en el escenario actual.

### **V.1.2. Selección del modelo de simulación**

Atendiendo a los diferentes modelos numéricos disponibles y a las bondades o atributos de los mismos, se seleccionó para la simulación de la situación actual , y futura con cambio climático, el Modelo HEC-HMS.

El Programa HEC-HMS ha sido desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (H.E.C.) del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. HEC-HMS es un componente de última generación del conjunto de Programas HEC de este organismo y es un software de interfase gráfica y uso amigable.

El programa simula el proceso de transformación lluvia-caudal y procesos de propagación naturales o controlados. HEC-HMS ha reemplazado al Programa HEC-1 de amplio uso en Hidrología. HEC-HMS mejora las capacidades de HEC-1 y proporciona capacidades adicionales para modelación distribuida y simulación continua.

Los siguientes ítems describen los modelos matemáticos que son incluidos en el Programa HEC-HMS.

#### **Características Generales**

La generación de caudales circulantes por el punto de desagüe de una determinada cuenca comienza al producirse una determinada precipitación sobre el conjunto de la misma.

Tomando como referencia el esquema mostrado en la fig. 33, la *precipitación* puede tener lugar sobre distintos tipos de superficie (vegetación, superficie del terreno, o masas de agua), dado lugar a diferentes procesos dentro del ciclo hidrológico.



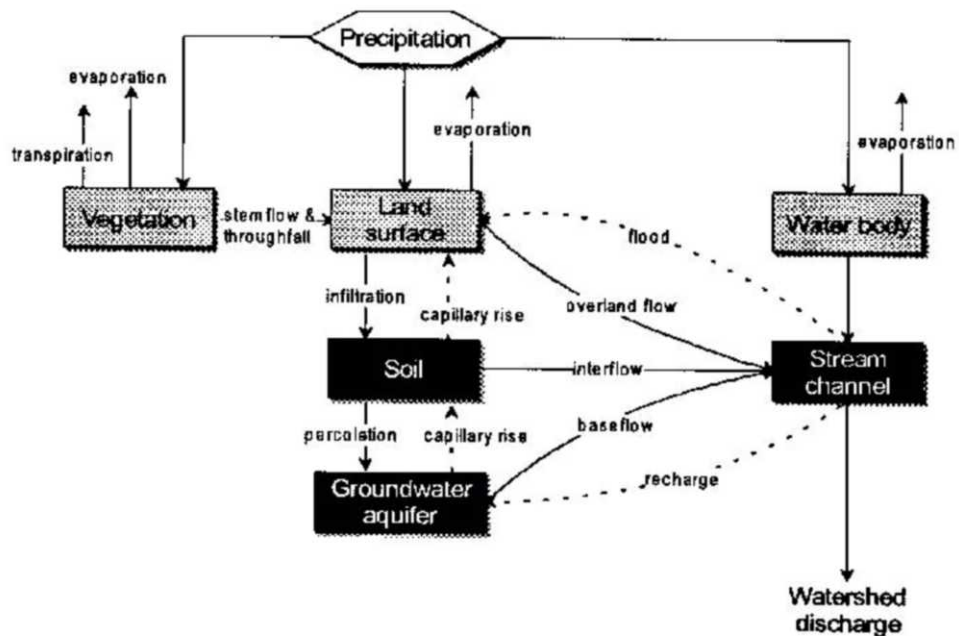


Figura 33. Representación esquemática del comportamiento hidrológico de una cuenca

Por otro lado, se debe tener en cuenta que una parte del agua procedente de la precipitación, según las épocas y las características concretas de la cuenca, retorna a la atmósfera a través del proceso de *evaporación* que se produce desde la vegetación, desde la superficie del terreno y desde la superficie de las masas de agua (ríos y lagos). A esto hay que añadir el agua que se devuelve a la atmósfera a través del fenómeno de *transpiración* de las plantas.

Parte del agua interceptada por la vegetación escurre por las hojas, ramas, etc., hasta alcanzar la superficie del terreno, donde se junta con el agua precipitada directamente sobre dicha superficie. Allí, el agua se almacena y, dependiendo de características tales como el tipo de suelo, su contenido de humedad, etc., una parte se infiltra.

El agua procedente de *infiltración* se almacena temporalmente en la capa superior del suelo, parcialmente saturada; desde donde se puede desplazar en varias direcciones, según las circunstancias. Así, puede ascender otra vez a la

superficie del terreno por capilaridad, puede moverse horizontalmente, como *flujo hipodérmico*, alcanzando eventualmente un cauce fluvial, o puede desplazarse verticalmente hacia capas acuíferas más profundas, mediante la *percolación*. El agua en el acuífero se mueve lentamente, si bien, en ocasiones, puede constituir el *flujo base* que se incorpora a los cauces fluviales.

El agua superficial que no es capaz de ser almacenada ni infiltrada escurre sobre la superficie del terreno, constituyendo el *flujo superficial*, siguiendo la línea de máxima pendiente, hasta alcanzar un cauce fluvial, a lo largo del cual se desliza, hasta alcanzar el punto final de desagüe de la cuenca considerada.

El caudal circulante por un determinado punto de un cauce fluvial está constituido por la suma de caudales procedentes de escorrentía superficial, del flujo hipodérmico y del flujo base.

De acuerdo con esta descripción física del proceso, resulta obvia la necesidad de llevar a cabo dos tipos de modelación matemática hidrológica. Una primera modelación debe hacer referencia a la morfología y a las características físicas de la cuenca; mientras que una segunda modelación, más compleja quizá que la anterior, debe centrarse en la representación de los procesos hidrológicos que tienen lugar en el seno de la cuenca.

Siempre se debe tener presente el objetivo del estudio que se pretende llevar a cabo. Así, hay casos en los que el objetivo se centra en determinar el área inundada con un cierto período de retorno. Ello lleva implícito, en cierta medida, la consideración de aguaceros de corta duración y gran intensidad, no siendo necesario considerar el movimiento del agua en las capas del suelo.

Otras veces se trata de evaluar los recursos hídricos superficiales, en cuyo caso hay que comenzar por disponer de datos de precipitación relativos a períodos largos de tiempo, en los que se incluirán obviamente episodios lluviosos, de mayor o menor intensidad y duración, así como intervalos más o menos largos de ausencia de precipitaciones. En estos casos, es imprescindible considerar, de manera detallada, los procesos de evapotranspiración, infiltración y percolación, así como la variación del contenido de humedad en el suelo y en el subsuelo.

El programa HEC-HMS incluye en su formulación modelos de eventos y modelos continuos, que permiten abordar el tratamiento de ambos tipos de situaciones.

Para la simulación del proceso de transformación lluvia-caudal, el Programa HEC-HMS considera los siguientes componentes:

- a) *Precipitación*: es la variable de entrada y puede ser ingresada como un evento observado, como un hietograma de proyecto basado en un cálculo estadístico o un pronóstico, o como una precipitación máxima probable.
- b) *Pérdidas producidas durante una tormenta*: permite estimar el volumen de escurrimiento, en función de la precipitación y las características de la cuenca.
- c) *Escorrimento Directo*: que considera el escurrimiento sobre la superficie del terreno, almacenamiento y pérdida de energía en la cuenca y en la red de canales.
- d) *Propagación del escurrimiento*: permite calcular el almacenamiento y el tránsito de agua en el sistema de canales.

Todas estas componentes son similares a las ya incluidas en el Programa HEC-1. Adicionalmente, HEC-HMS incorpora:

- e) *Modelo de escurrimiento distribuido*: para usar con datos distribuidos de precipitación, tales como los obtenidos de radar meteorológico.
- f) *Modelo Continuo de Humedad de Suelo*: permite simular la respuesta de la cuenca con base de tiempo continuo, en períodos interlluviosos.
- g) *Calibración Automática*: permite estimar ciertos parámetros del modelo y condiciones iniciales, dadas las observaciones y condiciones hidrometeorológicas.
- h) *Vínculos para el manejo de una base de datos*: para el almacenamiento de los datos generados y su conexión con otras herramientas de análisis disponibles, manejo de base de datos en extensión dss (data storage system).

### **Clasificación del HEC-HMS**

Los modelos matemáticos pueden ser clasificados según diferentes criterios. Básicamente, el Programa HEC-HMS es un modelo matemático, determinístico, en el cual la mayoría de los modelos que lo componen son de eventos y de parámetros concentrados. El Programa HEC-HMS incluye modelos de tipo empíricos (Hidrograma Sintético de Snyder) y conceptuales (onda cinemática). Los modelos incluidos en HEC-HMS poseen dos tipos de parámetros: parámetros con *significado físico* (aquéllos que se pueden relacionar con propiedades físicas de las cuencas) y parámetros *de proceso* (aquéllos que no pueden establecerse por mediciones).

### **Modelado de la Cuenca**

Con objeto de representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de una determinada cuenca, se debe hacer una representación esquemática de la misma, que refleje, de la mejor manera posible, su morfología y las características de su red de drenaje. En dicha representación esquemática se utilizan generalmente diversos tipos de elementos, dentro de los cuales se desarrollan los procesos hidrológicos.

En este sentido, el programa HEC-HMS incluye diferentes tipos de elementos, cuya descripción y funcionalidad se indican a continuación.

- a) *Subcuenca*: Este tipo de elemento se caracteriza porque no recibe ningún flujo entrante y da lugar a un único flujo saliente, que es el que se genera en la subcuenca a partir de los datos meteorológicos, una vez descontadas las pérdidas de agua, transformado el exceso de precipitación en escorrentía superficial y añadido el flujo base.
  
- b) *Tramo de cauce*: Se caracteriza porque recibe uno o varios flujos entrantes y da lugar a un solo flujo saliente. Los flujos entrantes, que provienen de otros elementos de la cuenca, tales como subcuencas u otros tramos de cauce, se suman antes de abordar el cálculo del flujo saliente. Este tipo de elementos se suele utilizar para representar tramos de ríos o arroyos en los que se produce el tránsito de un determinado hidrograma.

- c) *Embalse*: Es un tipo de elemento que recibe uno o varios flujos entrantes, procedentes de otros elementos y proporciona como resultado del cálculo un único flujo saliente. Se utiliza para poder representar fenómenos de laminación de avenidas en lagos y embalses.
- d) *Confluencia*: Se caracteriza porque recibe uno o varios flujos entrantes y da lugar a un solo flujo saliente, con la particularidad de que el flujo saliente se obtiene directamente como suma de los flujos entrantes, considerando nula la variación del volumen almacenado en la misma. Permite representar la confluencia propiamente dicha de ríos o arroyos, aunque ello no es imprescindible, ya que los flujos entrantes pueden proceder también de subcuencas parciales.
- e) *Derivación*: Este tipo de elemento se caracteriza porque da lugar a dos flujos salientes, principal y derivado, procedentes de uno o más flujos entrantes. Se puede utilizar para representar la existencia de vertederos laterales que derivan el agua hacia canales o zonas de almacenamiento separadas del cauce propiamente dicho.
- f) *Fuente*: Junto con la subcuenca, es una de las dos maneras de generar caudal en el modelo de cuenca. Se suele utilizar para representar condiciones de contorno en el extremo de aguas arriba y el caudal considerado puede proceder del resultado del cálculo efectuado en otras cuencas.
- g) *Sumidero*: Recibe uno o varios flujos entrantes y no da lugar a ningún flujo saliente. Este tipo de elemento puede ser utilizado para representar el punto más bajo de una cuenca endorreica o el punto de desagüe final de la cuenca en cuestión.

La combinación de estos tipos de elementos, con las adecuadas conexiones entre ellos, constituye finalmente la representación esquemática de la cuenca total.

### Síntesis de los modelos incluidos en el Programa HEC-HMS

El Programa HEC-HMS utiliza modelos separados para representar cada componente del proceso lluvia-caudal, incluyendo los descritos en la Tabla 9, la cual presenta los principales modelos a disposición para la simulación de las componentes del proceso lluvia-caudal.

Tabla 9. Síntesis de los principales Modelos del Programa HEC-HMS

<i>Modelos que estiman el volumen de escurrimiento</i>	CN (SCS) Green y Ampt Modelo Continuo de Humedad de Suelo (SMA)
<i>Modelos para el cálculo del escurrimiento directo</i>	Hidrograma Unitario Sintético de Snyder Hidrograma Unitario Sintético de Clark Hidrograma Adimensional del SCS Onda Cinemática
<i>Modelos de Flujo Base</i>	Recesión Exponencial Reservorio Lineal
<i>Modelos de Tránsito de crecidas en la red de canales</i>	Onda Cinemática Modelo de Puls Método de Muskingum Método de Muskingum Cunge

### Modelos que estiman el volumen de escurrimiento

La elección de un modelo para el cálculo del escurrimiento directo depende de:

- (i) disponibilidad de información para calibración y estimación de los parámetros;
- (ii) aplicabilidad del modelo seleccionado;
- (iii) finalmente la experiencia del modelista.

El Programa HEC-HMS posee, entre otros, los siguientes modelos para estimar el volumen de escurrimiento directo: Modelo de CN, Modelo de Green y Ampt, Modelo Continuo de Humedad de Suelo.

*(i) Modelo de Curva Número del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (CN)*

El Servicio de Conservación de Suelos desarrolló en 1972 un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta. Dicho modelo, llamado de Curva Número (CN) permite estimar el exceso de precipitación en función de la precipitación, la condición de humedad antecedente y el complejo hidrológico suelo-vegetación. Se trata de un método simple, que consta de un único parámetro (CN) y es ampliamente utilizado.

*(ii) Modelo de Green y Ampt*

La ecuación de Green y Ampt es una representación simplificada del proceso de infiltración sobre el terreno. Supone un perfil de suelo homogéneo y una distribución uniforme de la humedad del suelo antecedente. Supone además que el movimiento del agua en el suelo se da en la forma de un frente húmedo de avance y no tiene en cuenta la difusión de la humedad de suelo, pero la ecuación es uno de los mejores modelos disponibles para describir la infiltración durante una lluvia.

Se trata de un modelo conceptual que permite evaluar la infiltración producida durante una precipitación cuyos parámetros principales son la conductividad hidráulica, la succión del frente de humedad y el déficit de humedad del suelo. Sus parámetros pueden ser estimados a partir de información de suelos, su uso no está muy difundido ya que no existe mucha experiencia en su empleo.

*(iii) Modelo Continuo de Humedad de Suelo (SMA)*

Este modelo simula el movimiento del agua a través de distintos niveles de almacenamiento: almacenamiento de agua por la cobertura vegetal, almacenamiento en la superficie del suelo, almacenamiento en el perfil de suelo y almacenamiento de agua subterránea. Conocida la precipitación y la evapotranspiración potencial, el modelo estima el escurrimiento superficial, el flujo

subterráneo y la percolación. Los parámetros del modelo deben ser determinados por calibración con datos observados.

### **Modelos para el cálculo del escurrimiento directo**

Dentro de este grupo de modelos, el Programa HEC-HMS presenta dos alternativas diferentes: los *modelos empíricos*, que son los Hidrogramas Unitarios tradicionales, cuyos parámetros tienen significado físico limitado y un *modelo conceptual* que es la teoría de la onda cinemática para el escurrimiento en cuenca, la cual intenta representar los mecanismos físicos que gobiernan el exceso de precipitación sobre la superficie de la cuenca y en los pequeños colectores de la misma.

#### **(i) Hidrograma Unitario Sintético de Snyder**

Fue desarrollado en 1938 por Snyder para cuencas aforadas ubicadas en los montes Apalaches de los Estados Unidos con áreas variables entre 30 y 30 000 Km<sup>2</sup> y permite estimar el escurrimiento en función de las características de la cuenca. A partir de diferentes relaciones, pueden hallarse cinco características de un hidrograma unitario para una duración de lluvia dada. Dichas características son: caudal pico por unidad de área de la cuenca, tiempo de retardo de la cuenca, tiempo base y dos anchos típicos del hidrograma unitario. Los parámetros correspondientes a las características físicas de las cuencas son la longitud total del curso principal y la longitud del curso principal desde la sección de control hasta el centro de gravedad de la misma.

#### **(ii) Hidrograma Unitario Sintético de Clark**

Clark deriva su Hidrograma Unitario Sintético representando dos procesos críticos en la transformación del exceso de la precipitación en escurrimiento: proceso de *traslación* pura seguido de un proceso de *atenuación*. Si bien ambos procesos se manifiestan en forma conjunta, Clark los considera separados, es decir, primero realiza la traslación del flujo producido por una lluvia neta unitaria hasta la sección de control y posteriormente incorpora la atenuación mediante la propagación de dicho hidrograma a través de un elemento ficticio de almacenamiento lineal ubicado a la salida de la cuenca.



A efectos de determinar el tiempo de traslado del flujo desde las diferentes zonas de la cuenca, es necesario dividirla mediante líneas isócronas o líneas de igual tiempo de traslado. La posición de las líneas isócronas puede ser determinada a partir de la planialtimetría de la cuenca.

### **(iii) Hidrograma Adimensional del SCS**

El Servicio de Conservación de Suelos (SCS) provee un Hidrograma Unitario Paramétrico, que fue derivado de las observaciones de un gran número de pequeñas cuencas agrícolas de los Estados Unidos. Dados el caudal pico y el tiempo de retardo para la duración de exceso de precipitación, el hidrograma unitario puede estimarse a partir del hidrograma sintético adimensional para una cuenca dada.

### **(iv) Modelo de Onda Cinemática**

Como una alternativa a los modelos empíricos que representan los Hidrogramas Unitarios, el Programa HEC-HMS incorpora el modelo conceptual basado en la teoría de la onda cinemática. Esta teoría representa el movimiento del agua en la cuenca de captación y en la red de cauces o canales a través de las ecuaciones de Saint Venant (unidireccional) considerando únicamente las fuerzas de gravedad y fricción principales para el flujo superficial.

Se reconoce que es difícil e innecesario representar detalladamente la geometría del suelo, empleando por ello un enfoque simplificador reemplazando las complejidades naturales por elementos simples, tales como planos de escurrimiento en cuenca y segmentos de cauce para modelar la dinámica del escurrimiento superficial.

### **Modelos de flujo base**

Un hidrograma de caudal es una gráfica que representa la tasa de flujo como función del tiempo en una sección dada del río. Los picos, que se originan por las tormentas, se conocen como *escorrentía directa*, mientras que el flujo con pocas variaciones en los períodos sin lluvias se conoce como *flujo base*. Se han sugerido varias técnicas para separar el flujo base de la escorrentía directa, una de las más antiguas es la curva de recesión del flujo base. El Programa HEC-HMS presenta

dos metodologías para la separación de dichos flujos: el Modelo de Recesión Exponencial y el Modelo de Reservorio Lineal.

#### **(i) Modelo de Recesión Exponencial**

La curva de abatimiento normal fue descrita por Horton (1945) y se conoce también como curva maestra de recesión del flujo base, es una gráfica característica de las recesiones de flujo que se calcula superponiendo muchas de las curvas de recesión que se observan en una corriente dada. Usualmente estas curvas de recesión toman la forma de decaimiento exponencial.

#### **(ii) Modelo de Reservorio Lineal**

El modelo de Reservorio Lineal se usa en conjunto con el Modelo Continuo de Humedad de Suelo para simular el almacenamiento y movimiento del flujo subsuperficial como el almacenamiento y movimiento del agua través del reservorio lineal. Los reservorios son lineales porque la salida para cada paso de tiempo de la simulación es una función lineal del almacenamiento medio durante el paso de tiempo.

#### **Modelos de transito de crecidas en la red de canales**

El Programa HEC-HMS incluye, entre otros, los siguientes métodos para la propagación del flujo en la red de drenaje: Modelo de Puls, Modelo de Muskingum, Modelo de Muskingum Cunge. Cada uno de estos modelos calcula el hidrograma aguas abajo, dado un hidrograma de entrada aguas arriba.

Cada modelo de propagación de crecidas incluido en el Programa HEC-HMS resuelve las ecuaciones de cantidad de movimiento y conservación de la masa. Sin embargo, algunos de ellos eliminan ciertos términos de dichas ecuaciones para arribar a la solución. Cuando se selecciona un modelo, se deben considerar las hipótesis simplificativas y condiciones de aplicabilidad del mismo a efectos de disminuir las incertidumbres.

#### **(i) Modelo de Puls**

El Modelo de Puls, también conocido como tránsito de piscina nivelada, es un procedimiento para hallar el hidrograma de salida desde un embalse con una

superficie de agua horizontal, conocido su hidrograma de entrada y las características de almacenamiento-caudal a la salida.

### **(ii) Modelo de Muskingum**

El Modelo de Muskingum es un modelo de tránsito hidrológico que se usa habitualmente para relaciones caudal-almacenamiento variables. La formulación original del Modelo de Muskingum fue desarrollada por McCarthy en 1939 y se basa en la ecuación de continuidad y una relación empírica entre el almacenamiento y el caudal ponderado obtenida en base a los caudales de entrada y salida del tramo del río en dos intervalos de tiempo consecutivos.

### **(iii) Modelo Muskingum Cunge**

Cunge, en 1969, demostró que la ecuación en diferencias del modelo de Muskingum es una analogía con la ecuación de onda cinemática. Dado que esta ecuación sólo tiene en cuenta el traslado de la onda de crecida, el autor concluyó que la atenuación del caudal pico debe a la discretización numérica.

Por otra parte, a pesar de la popularidad y facilidad de su uso, el Modelo Muskingum posee parámetros que no tienen significado físico y son difíciles de obtener. El Modelo de Muskingum Cunge propone la obtención de parámetros en función de las características geométricas del canal.

### **Calibración del Programa HEC-HMS**

Cada uno de los modelos incluidos en el Programa HEC-HMS posee parámetros. Algunos de esos parámetros pueden ser estimados a partir de las propiedades de las cuencas y los canales de la red de drenaje. Sin embargo, existen otros parámetros que no pueden ser estimados por observaciones o mediciones del sistema hídrico (Chorley et al., 1957).

El proceso por el cual cada parámetro se ajusta para tratar de representar el sistema real, se denomina *calibración*. El Programa HEC-HMS busca automáticamente el juego de parámetros que mejor ajusta comparando el hidrograma observado con el hidrograma simulado. Si el ajuste no es satisfactorio, repite el procedimiento, hasta llegar al juego de parámetros óptimo.

Para hallar una medida numérica de la diferencia entre los resultados del modelo y los valores observados, se utiliza una función objetivo. Las funciones objetivo empleadas en el programa HEC-HMS son las siguientes:

- (i) Suma de los errores absolutos;
- (ii) Suma de los residuos al cuadrado;
- (iii) Porcentaje de error en el caudal pico;
- (iv) Error cuadrático medio ponderado.

### **Método de Muskingum**

El escurrimiento de una onda en un canal produce atenuación de la misma debido al almacenamiento (tanto en el canal como en las planicies de inundación), a la fricción con la superficie del canal y a las variaciones de las características del mismo. En las ecuaciones, esos efectos son representados por la continuidad del volumen (ecuación de continuidad), los términos de inercia, fricción y presión (ecuación dinámica).

Los ríos y canales pueden tener diferentes características, predominando en cada caso uno o más efectos sobre el escurrimiento. Chow et al., (1994) clasificó los modelos de escurrimiento en *hidrológicos* e *hidráulicos*. En el primer grupo se encuentran los modelos que consideran solamente el efecto de almacenamiento en el escurrimiento y en el segundo grupo se encuentran los que usan las ecuaciones de Saint Venant.

La clasificación inicial de Chow se ha modificado, dando lugar a los modelos de Onda Cinemática, Modelos Difusivos y Modelos Hidrodinámicos. Se utilizó la ecuación dinámica sin el término de escurrimiento lateral.

Los términos con signo negativo son pequeños en ríos con gran pendiente, donde la fuerza de la gravedad es preponderante. Cuando ocurren efectos de aguas abajo hacia aguas arriba sobre el escurrimiento o la pendiente de la línea de agua altera sustancialmente el caudal, el término de presión debe ser considerado. Los

términos de inercia son importantes cuando ocurren variaciones considerables en la velocidad.

Los modelos que utilizan la ecuación de continuidad y la de cantidad de movimiento, despreciando los términos de presión y de inercia, son los modelos de *Onda Cinemática*. En algunos sistemas en que existe el efecto de aguas abajo sobre el escurrimiento proveniente de aguas arriba, los modelos anteriores no pueden representar este proceso, por lo tanto se debe introducir al *Modelo de Onda Cinemática*, el término de presión. En este caso se tienen los *Modelos de Difusión*. Dichos modelos no consideran los términos de inercia.

Dichos términos son importantes cuando ocurren variaciones temporal y espacial de la velocidad. En este caso se emplean los modelos hidrodinámicos consideran la totalidad de los términos de las ecuaciones de Saint Venant.

La importancia de los métodos de propagación de caudales se observa en la cantidad de métodos que existen y que se han desarrollado desde 1900. NERC (1975) clasifica a los mismos de acuerdo a tres grandes grupos:

- a) Métodos hidrológicos o de almacenamiento.
- b) Métodos basados en la ecuación de convección-difusión.
- c) Métodos que usan la solución numérica de las ecuaciones completas de Saint Venant para flujo gradualmente variado en canales abiertos.

Los métodos hidrológicos o de almacenamiento son los más numerosos y los más simples para realizar el traslado de la onda de crecida. El término "método hidrológico" se refiere a que se basa en el concepto de almacenamiento del flujo y no incluye los efectos de la resistencia al flujo. Dichos métodos se basan en la ecuación de continuidad en la cual el cambio en el almacenamiento  $dS/dt$  en el tramo es la diferencia entre el caudal de entrada  $I$  en la sección de aguas arriba y el caudal de la salida  $O$  en la sección aguas abajo.

$$\Delta S / \Delta t = I - O$$

Ecuación 2. Ecuación de continuidad

donde:

$\Delta S$  = variación del almacenamiento

$I$  = entrada del sistema

$O$  = salida del sistema

El método también necesita una segunda relación algebraica entre el almacenamiento de  $I$  y  $O$ . Uno de los más populares y de uso satisfactorio es el de Muskingum (Mac Carthy, 1938) que emplea la siguiente relación algebraica lineal:

$$S = K(X * I + (1X) * O)$$

Ecuación 3. Ec. de Muskingum

donde  $K$  es el parámetro de almacenamiento y  $X$  establece la importancia relativa entre  $I$  y  $O$ . El valor de los parámetros se obtiene en función de las características del canal en estudio.

$$(I_1 + I_2) / 2 - (O_1 + O_2) / 2 = (S_2 - S_1) / \Delta t$$

Ecuación 4. Balance entre caudales y almacenamientos.

Este modelo representa el volumen de almacenamiento constituido por dos sumandos: uno de almacenamiento en prisma y otro en cuña., tal como se esquematiza en la fig. 34. Durante la fase de crecimiento del hidrograma, el caudal de entrada es mayor que el caudal de salida, produciéndose un almacenamiento en forma de cuña positiva. Por el contrario, durante la fase de recesión, el caudal de salida es mayor que el de entrada, dando como resultado el desarrollo de una cuña negativa. Además, existe un almacenamiento en prisma a lo largo de la longitud del cauce.

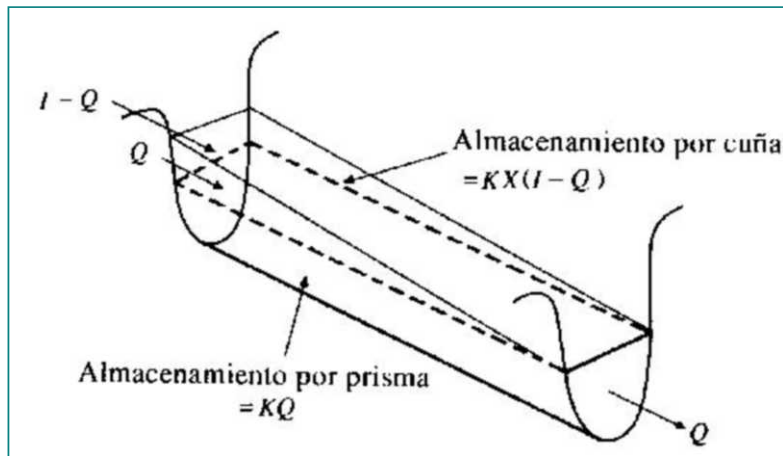


Figura 34. Almacenamiento en prisma y en cuña en un tramo de cauce

Suponiendo que el área de la sección transversal del flujo es directamente proporcional al caudal circulante, el volumen de almacenamiento en prisma resulta igual a  $KQ$ , siendo  $K$  un coeficiente de proporcionalidad. En cuanto al volumen de almacenamiento en cuña, su valor es igual a  $KX(I - Q)$ , en donde  $X$  es un factor de ponderación ( $0 \leq X \leq 0.5$ ).

Cuando  $X=0$ ,  $S=K \cdot Q$ , lo que significa que el almacenamiento es función únicamente del caudal de salida, lo que equivale al método de Puls Modificado con el almacenamiento linealmente relacionado a la descarga. La atenuación es máxima.

Cuando  $X=0.50$ , el caudal de entrada y el de salida reciben el mismo coeficiente de ponderación. Un valor de  $X=0.5$  produce traslación pura, sin atenuación. La solución puede ser inestable para valores de  $X$  próximos a 0.5.

### Estimación de los parámetros $K$ y $X$

El parámetro  $K$  representa el tiempo de recorrido de un hidrograma, o de una onda de crecida, a lo largo del tramo de estudio, mientras que el parámetro  $X$  constituye un coeficiente de ponderación entre los caudales entrantes y salientes del tramo.

Existen dos formas de estimar los parámetros  $K$  y  $X$ : (i) en tramos de ríos aforados y (ii) en tramos no aforados.

- (i) En tramos aforados, los parámetros pueden determinarse a partir de los hidrogramas de entrada y salida registrados.

$K$ , el tiempo de desplazamiento, puede estimarse como el espacio de tiempo entre los centroides de los hidrogramas, entre los picos de los hidrogramas o entre los puntos medios de la fase de crecida de los hidrogramas.

$X$  se puede obtener por calibración a partir de datos observados una vez que  $K$  ha sido determinado.

- (ii) En tramos no aforados,  $K$  puede ser estimado como el tiempo de desplazamiento de una onda a lo largo del tramo:

$$K = \Delta x / V_w$$

donde  $\Delta x$  es la longitud del tramo y  $V_w$  es la velocidad de la onda (celeridad).

La velocidad de la onda se puede estimar a partir de la velocidad media de la corriente con los factores que se presentan en la Tabla 10:

Tabla 10. Valores de la velocidad de la onda

<i>Forma del canal</i>	<i>Factor <math>V_w/V_{media}</math></i>
Rectangular ancho	1.67
Parabólico ancho	1.44
Triangular	1.33

En canales naturales,  $V_w$  puede estimarse como 1.5 veces la velocidad media del agua (USACE, 1994). La velocidad media se puede aproximar utilizando la ecuación de Manning, a partir de la sección transversal representativa y el caudal.



El parámetro  $X$  es difícil de estimar en cuencas no aforadas. La experiencia demuestra que en canales de muy poca pendiente y cuando el agua inunda la planicie de inundación,  $X$  tiene un valor próximo a 0. En ríos de mayor pendiente, con canales bien definidos que no desbordan, el valor de  $X$  será cercano a 0.5.

Una desventaja de los métodos hidrológicos es que asumen una única relación entre  $H$  y  $Q$  a lo largo del tramo. Eso es contrario a lo que se observa en las crecidas naturales en las cuales, el caudal para un determinado nivel es mayor en crecida y es menor cuando se produce la recesión. Directamente relacionado a esto (la no existencia de una única relación H-Q) es la atenuación del caudal pico ( $Q_p$ ) a lo largo del tramo.

### **V.1.3. Implementación del modelo**

#### **- Discretización en subcuencas**

En estudios anteriores se ha aplicado a la cuenca del A° Feliciano un modelo de simulación de onda cinemática (Morín et al, 1989), en donde, a partir de un detallado análisis de la dinámica hídrica superficial y de la planialtimetría disponible, fue realizada una primera subdivisión del área de estudio, que dio como resultado 194 segmentos de cuenca y 92 segmentos de cauce (276 segmentos en total). Para hacerla, se consideraron características homogéneas de áreas, pendientes, cobertura vegetal, suelos y densidad de drenaje. En cada una de ellas se determinaron sus parámetros físicos, geométricos, e hidráulicos: superficies, desniveles, longitudes principales del flujo, pendientes, coeficientes de rugosidad, y condición hidrológica de los suelos.

Posteriormente fue realizada una segunda subdivisión, con valores medios ponderados de las características físicas e hidráulicas, que arrojó un total de 81 segmentos, de los cuales 54 son de cuenca y 27 de cauce, porque, uno de los objetivos, además de la disminución de los tiempos de computación y del estudio de la variación de los coeficientes de calibración, había sido analizar la influencia de los "delta t" de trabajo en la atenuación de los hidrogramas. Como esta segunda discretización había presentado muy buenos resultados, constituyó la base del diagrama topológico del modelo a implementar.

El modelo HEC\_HMS fue implementado considerando como base la subdivisión, ya presentada, de la cuenca en 54 subcuencas y 27 tramos de cauce, y una sección de salida coincidente con la sección de control Paso Medina El diagrama topológico resultante es presentado en la fig. 35.

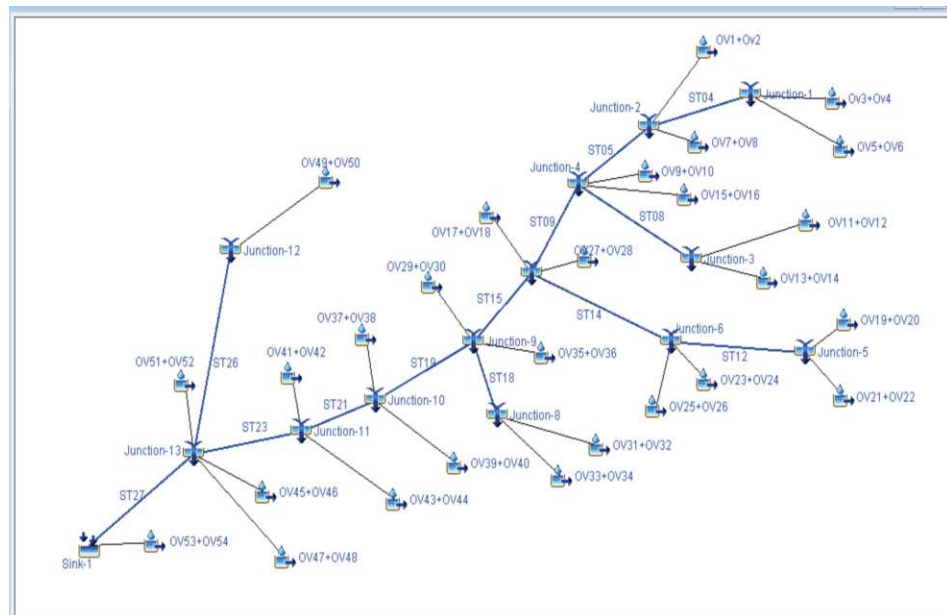


Figura 35: Diagrama Topológico Cuenca Arroyo Feliciano

### V.1.3. Aplicación del Modelo HEC-HMS

Cada hidrograma de crecida fue asociado a las lluvias que le dieron origen. Para ello se utilizaron las precipitaciones diarias provenientes de la red de 22 pluviómetros de la Dirección de Hidráulica de la provincia, de los cuales estaban ubicados en el interior de la cuenca (4) y el resto en el perímetro de la misma, coincidentes en gran parte con las estaciones del ferrocarril. La Tabla 11 presenta el código y denominación de las mismas.

Tabla 11. Código y Denominación de las estaciones pluviométricas

Orden	Código DPH	Nombre
1	102	Banderas
2	104	Colonia Avigdor
3	106	Bovril
4	107	S.J. Feliciano
5	108	El Cimarrón
6	109	El Carmen-Yeso Oeste
7	111	Estacas
8	113	La Esmeralda
9	114	La Verbena
10	115	La Calandria
11	121	San Gustavo
12	123	Ea. San Juan del Puerto
13	124	Atencio
14	402	Conscripto Bernardi
15	407	Federal
16	414	Los Conquistadores
17	421	Sauce de Luna
18	603	San Víctor
19	701	Ea. Buena Esperanza
20	705	San Jaime
21	803	Col Oficial N° 3
22	809	La Paz

Determinados los días del tiempo base de cada Hidrograma, se fueron conformando los archivos con los datos diarios de precipitación de cada pluviómetro. La lluvia media sobre cada subcuenca fue determinada mediante el método de los polígonos de Thiessen, estableciendo los factores de ponderación areales para cada subcuenca. Las pérdidas fueron calculadas por el método de la curva número (CN); la transformación lluvia –caudal aplicando onda cinemática, y la propagación en cuenca y en cauce también por este último método. Los hidrogramas de crecida simulados fueron calibrados individualmente, a fin de obtener la más mínima diferencia entre caudal pico observado y calculado. Esta condición es necesaria porque después se determinarán los porcentajes de incremento que experimentarán los caudales pico afectados por el cambio climático.

#### V.1.4. Resultados de la simulación

La Tabla 12 presenta los caudales pico simulados para la serie de caudales máximos anuales seleccionados.

Tabla 12. Año Hidrológico, Caudales Observados y Simulados

Año hidrológ.	Q obs	Q model	Año hidrológ.	Q obs	Q model
1975/1976	806.5	797.6	1995/1996	925.27	933.7
1976/1977	566.6	faltan datos	1996/1997	131.2	133.0
1977/1978	206.6	208.2	1997/1998	2179.9	2187.0
1978/1979	875.1	873.6	1998/1999	511.9	519.6
1979/1980	292.3		1999/2000	431.8	435.1
1980/1981	340.9	342.3	2000/2001	648.1	656.7
1981/1982	108.1	faltan datos	2001/2002	731.2	774.0
1981/1982	87.8	88.7	2002/2003	2065.3	2067.9
1982/1983	326.5	329.0	2003/2004	189.8	190.0
1983/1984	611.0	612.0	2004/2005	1978.9	1986.7
1984/1985	481.7		2005/2006	657.6	663.2
1985/1986	854.6		2006/2007	525.0	524.0
1986/1987	376.7	382.2	2007/2008	154.2	155.6
1987/1988	1934.4	1990.8	2008/2009	351.9	358.6
1988/1989	446.0	453.8	2009/2010	1575.9	1584.0
1989/1990	721.5	723.8	2010-2011	faltan datos	
1990/1991	331.6	336.2	2011/2012	656.1	672.6
1991/1992	716.9	728.0	2012/2013	829.2	831.8
1992/1993	557.1	561.7	2013/2014	779.0	787.9
1993/1994	641.0	650.9	2014/2015	732.0	740.8
1994/1995	223.5	222.1	2015/2016	2243.6	2264.0

Los caudales simulados presentan una diferencia que varía entre el 0,2 y el 5 % en relación a los caudales observados. Estos valores se encuentran dentro del rango de precisión de la ecuación H-Q que relaciona a las alturas hidrométricas con los caudales aforados. Una gran parte de los hidrogramas simulados y observados son presentados en el anexo n°2.

#### V.2. Simulación de la respuesta hidrológica de la cuenca debida a los efectos del cambio climático

### **V.2.1. Consideraciones sobre el Cambio Climático**

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) redacta, cada varios años, Informes Especiales sobre Escenarios de Emisiones (Special Reports on Emission Scenarios (SRES)). Contienen tanto las proyecciones del cambio climático global y sus causas, como las consecuencias del calentamiento global. Se debe indicar que los SRES contienen proyecciones de posibles climas futuros. Con el tiempo estos escenarios se alteran de acuerdo con la población y desarrollo tecnológico y socio económico.

**Escenarios de Emisiones:** Los escenarios de emisiones son un componente central de cualquier evaluación del cambio climático. Se deben diferenciar ciertos conceptos:

**Escenario Climático:** Es un clima futuro posible, basado en un conjunto internamente consistente de relaciones climatológicas, que se construyó explícitamente para investigar las consecuencias potenciales de un cambio climático antropogénico (Department of Climate Change, Australian Government, 2009).

**Proyecciones Climáticas:** Respuestas del Sistema Climático a un escenario de emisiones de gases de invernadero y aerosoles, tal como lo simula un modelo climático.

**Escenario de Cambio Climático:** es la diferencia entre un posible clima futuro y el clima actual o clima control.

Los escenarios de emisiones se basan en la evaluación de una posible estrategia de mitigación, y políticas para la prevención del cambio climático (CIMA, 2015).

El IPCC ha propuesto cuatro familias de escenarios. La línea narrativa de cada una de estas familias describe un futuro demográfico, político-social, económico y tecnológico. Dentro de cada familia uno o más escenarios consideran la energía global, la industria y otros desarrollos y sus implicaciones.

Las cuatro familias de escenarios denominadas A1, A2, B1 y B2, combinan dos conjuntos o dimensiones de tendencias divergentes: una que varía entre desarrollos con prioridades en valores económicos o ambientales y otra que va desde un aumento en la homogenización global al mantenimiento de condiciones heterogéneas entre regiones. Por lo tanto dos escenarios enfatizan en riqueza material y los otros dos en sostenibilidad y equidad. Adicionalmente, dos escenarios enfatizan en globalización y dos en regionalización. Por lo que se resume que el centro del enfoque de SRES se encuentra cuatro polos a lo largo de dos ejes principales:

- Económico vs. Ambiental
- Global vs. Regional.

La fig. 36 presenta las combinaciones de estos cuatro polos llevan a cuatro argumentos primarios:

- **A1** Economía globalizada: Crecimiento económico y globalización liberal (intensivo (fuerzas del mercado)- énfasis en riqueza humana)
- **A2** Proteccionismo: Crecimiento económico con un mayor enfoque regional (énfasis en riqueza humana regional)
- **B1** Sostenibilidad social: Ambientalmente sensible con fuertes relaciones globales (énfasis en sostenibilidad y equidad- extensivo (desarrollo sostenible))
- **B2** Sostenibilidad local: Ambientalmente sensible con un fuerte enfoque regional (énfasis en sostenibilidad y equidad- extensivo (desarrollo sostenible)).

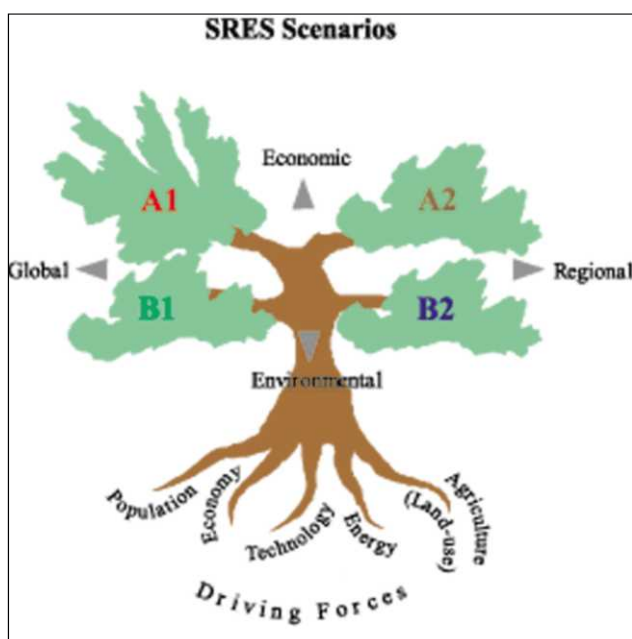


Figura 36. Esquema de las Relaciones conceptuales que fundamentan los escenarios de SRES. Fuente: Nakicenovic y Swart, 2000.

Cada argumento describe un paradigma global basado en características, valores y actitudes sociales predominantes que determinan, por ejemplo, el alcance de la globalización, los patrones del desarrollo económico y la calidad de los recursos ambientales. Por su naturaleza, los argumentos son sumamente especulativos. Sin embargo, sí, proporcionan puntos de partida identificables que se definen y son consistentes con los juegos de datos disponibles sobre algunas variables proyectadas (entre los más notables, población, ingresos, usos de la tierra y emisiones). Han sido utilizados en evaluaciones previas y actuales y proporcionan una base para comparaciones entre países.

Los escenarios A1 y B1 se enfocan en soluciones globales a la sostenibilidad económica, social y ambiental, con A1 enfocado al crecimiento económico y B1 enfocado a la sensibilidad ambiental. A2 y B2 se enfocan en soluciones regionales con fuerte énfasis en la independencia. Difieren en que A2 se enfoca en el crecimiento económico fuerte y B2 en la sensibilidad ambiental.

El IPCC describe sus diferencias de la siguiente manera: “Mientras los argumentos A1 y B1, a grados diferentes, acentúan la exitosa convergencia económica global y las interacciones sociales y culturales, A2 y B2 se enfocan en el nacimiento de diversos caminos de desarrollo regional” .

El escenario A1 asume un crecimiento económico fuerte y la globalización liberal caracterizados por un bajo crecimiento demográfico, un alto crecimiento de PBI (Producto Bruto Interno), un uso energético alto a muy alto, poco a mediano cambio en el uso de la tierra, disponibilidad media a alta de recursos (del petróleo y gas convencionales y no-convencionales) y rápidos avances tecnológicos.. A1 se enfoca en las soluciones de mercado; ahorros e inversiones elevados, especialmente en educación y tecnología; y la movilidad internacional de personas, ideas y tecnología.

El escenario A2 describe un mundo con crecimiento económico regional caracterizado por un alto crecimiento demográfico, un crecimiento mediano de PBI, el alto uso energético, medianos a altos cambios en el uso de la tierra, la baja disponibilidad de los recursos del petróleo y gases convencionales y no convencionales, y avances tecnológicos lentos. Este escenario asume un mundo muy heterogéneo que se enfoca en la independencia y en la conservación de identidades locales, y asume que el crecimiento económico “per-cápita” y el cambio tecnológico son más fragmentados y lentos que en otros escenarios.

El escenario B1 describe un mundo convergente que acentúa las soluciones globales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Enfocado en la sensibilidad ambiental y las fuertes relaciones globales, B1 es caracterizado por un crecimiento demográfico bajo, un crecimiento alto del PIB, una baja utilización energética, grandes cambios en el uso de la tierra, la baja disponibilidad de recursos del petróleo y gas convencionales y no-convencionales, y avances tecnológicos medios. El escenario B1 asume los ajustes rápidos en la economía para los sectores de servicio e información, las disminuciones en la intensidad material, y en la introducción de tecnologías limpias y uso eficiente de recursos. Un tema principal en el escenario B1 es un alto nivel de conciencia ambiental y social combinado con el enfoque global al desarrollo sostenible.



El escenario B2, así como el escenario A2, se enfoca en soluciones regionales para la sostenibilidad económica, social y ambiental. El escenario se enfoca en la protección ambiental y la igualdad social, y es caracterizado por un crecimiento mediano de la población y el PIB, el uso energético mediano, medianos cambios en el uso de la tierra, mediana disponibilidad de recursos, y avances tecnológicos medianos. La fig. 37 muestra los 4 tipos de escenarios en función de los grados de emisión de CO<sub>2</sub>:

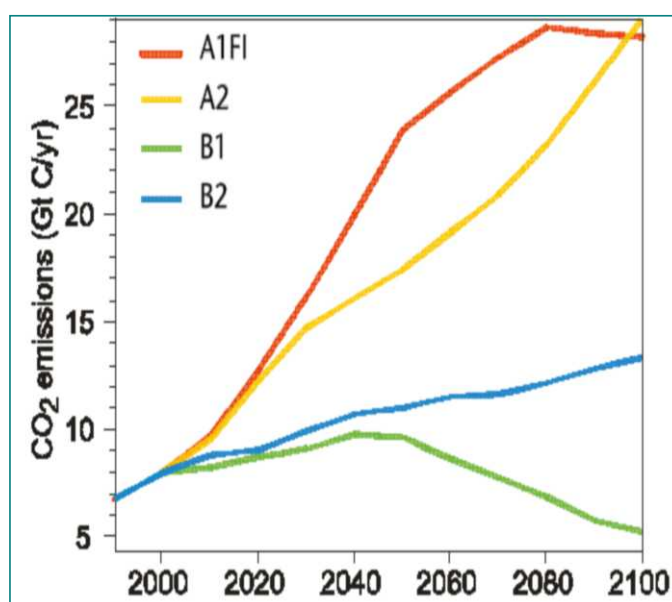


Figura 37. Escenarios de Emisiones para CO<sub>2</sub>.

Fuente: Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable Nación (2007)

La República Argentina ha dado pasos importantes en el tema, ratificando la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en el año 1994 mediante la Ley N° 24.295, y el Protocolo de KYOTO a través de la Ley N° 25.438 en el año 1997. Fuente Sec. de Ambiente y Desarrollo Sustentable Nación (2007)

Como parte de las obligaciones asumidas con la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y teniendo en cuenta sus responsabilidades comunes pero diferenciadas, el Gobierno de la República

Argentina debe elaborar, actualizar, publicar y facilitar a la Conferencia de las Partes, inventarios nacionales de las emisiones antropogénicas por las fuentes y de la absorción por los sumideros de todos los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal.

De esta forma, se presentó una Primera Comunicación Nacional en julio de 1997 y una revisión en el año 1999. A fines del 2006, se terminó de elaborar la Segunda Comunicación Nacional, la cual permitió a la Argentina cumplir con los compromisos establecidos en el Artículo 12.1 de la CMNUCC.

Asimismo, en el marco de las Comunicaciones Nacionales, además del Inventario de Gases, se elaboraron distintos estudios sobre la Vulnerabilidad al Cambio Climático en diferentes regiones del país y estudios sobre la Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en distintos sectores emisores.

Se planteó un diagnóstico de la situación actual (línea base ambiental); y se hizo un planteo de escenarios futuros (2080/2090) teniendo en cuenta aspectos relacionados a las condiciones socioeconómicas, el clima, los recursos hídricos y el uso de los suelos en la Región, para las condiciones previstas en los dos escenarios climáticos seleccionados para el análisis (A2 y B2). Las estimaciones realizadas para las diferentes variables fueron:

### **Precipitaciones**

En el SE de América del Sur, se estima que la precipitación anual, en la última centuria, ha experimentado un incremento cercano al 40% (fig. 38).

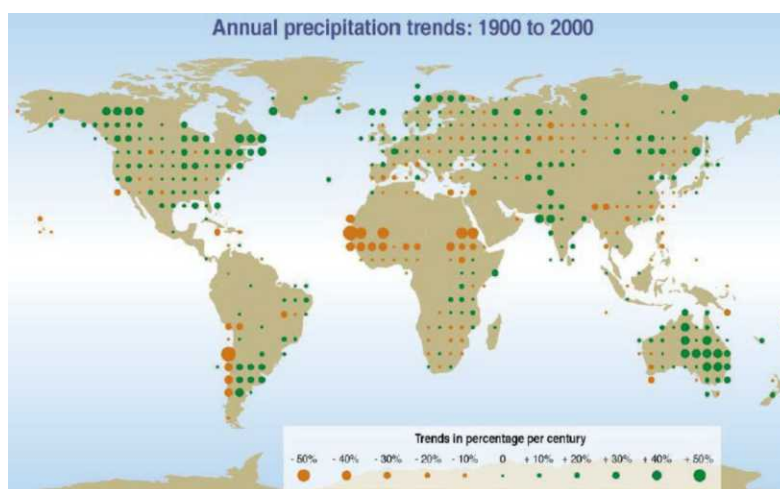


Figura 38. Tendencias en la precipitación anual 1900-2000 para América del Sur.

### Temperatura

Se estimaron, para ambos escenarios, aumentos de temperaturas promedio (Escenario A2: 1,8°C a 4°C y Escenario B2, 2°C a 2,5°C).

### Uso del suelo

Se aplicó un modelo utilizando una serie histórica de datos agrometeorológicos de 30 años (período 1976 a 2005), considerando un suelo del tipo: Argiudol Típico (uno de los de mayor aptitud productiva), con una secuencia de siembra: trigo-maíz y trigo-soja, sometido a dosis estándar de abonos y plaguicidas. Podrían incrementarse los rendimientos en un 50 % ó más. La Producción potencial de los cultivos se incrementaría en forma proporcional al aumento del gas carbónico (100% y 50%, para el escenario A2 y B2).

Se incrementaría la demanda de agua potencial en 290 mm/año para A2 y en 120 mm/año para B2 en promedio.

La productividad del cultivo de soja aumentará significativamente, aunque no es posible estimar cuáles podrían ser los techos de los rendimientos.

Se espera un incremento del uso de plaguicidas y abonos entre 2 y 6 veces el consumo actual.

Se producirá un incremento de la producción agrícola entre un 70 y un 250%; y un incremento significativo de la superficie forestada aunque no la productividad areal.

Las problemáticas ambientales identificadas fueron: degradación y erosión de los suelos, aumento de la intensidad de las lluvias, duplicación del valor "R", subdivisión de la tierra, arrendamientos a corto plazo, ineficiente aplicación de la ley de conservación de suelos e incertidumbre de la sustentabilidad a largo plazo. (Vulnerabilidad a la Variabilidad y al Cambio Climático Programa Marco).

En lo que respecta a la hidrológica superficial se experimentaría un aumento severo del déficit hídrico en la región, por lo que será necesario Incorporar o aumentar el abastecimiento de agua para riego en la región durante meses de primavera/verano.

Dificultad para sostener la producción agrícola y el abastecimiento de agua para consumo humano con recurso hídrico local en los sectores Centro-Oeste de las provincias de Formosa y Chaco.

Debido al incremento de la temperatura del aire, que generará un aumento evapotranspiración, se producirá una disminución de los excesos hídricos. Ello implicaría una reducción tanto de la escorrentía directa como de la recarga subterránea.

Los cursos de agua locales verían reducidos sus caudales medios, lo que implicaría un cambio en la tendencia de aumento registrada en las últimas 3 décadas.

En lo que hace a las inundaciones de origen fluvial, se espera que la frecuencia e intensidad de los fenómenos El Niño continúen aumentando en las próximas décadas. Por lo tanto, los niveles de riesgo actuales referidos a inundaciones de origen fluvial aumentarán en los escenarios A2 y B2.

Para las inundaciones de origen pluvial se espera que la frecuencia e intensidad de los sistemas convectivos de mesoescala continúen aumentando en las próximas décadas, producto del cambio climático. En consecuencia, los niveles de riesgo actuales referidos a inundaciones de origen pluvial aumentarán en los escenarios A2 y B2.

Asociando las características generales del contexto y de las macro fuerzas que gravitarán en los territorios (todas adoptadas a modo de supuestos), se espera una región litoral mesopotámica que a fines del presente siglo refleje las siguientes características socioeconómicas:

**Escenario A2:**

- Fuertes niveles de expansión de la vulnerabilidad territorial en las áreas más próximas a los grandes ríos de la región (por asentamiento en áreas expuestas a amenazas de origen hídrico).

**Escenario B2:**

- En términos de incremento esperado en el PBI, a un ritmo igual o superior al esperado en el escenario A2.

El Estudio **Cambio Climático en la Cuenca del Plata: (Extraído de Barros et al. 2006)** se enmarca en el Proyecto: “Tendencias en el ciclo hidrológico de la cuenca del Plata: Creando conciencia y herramientas para el manejo de los recursos hídricos”, el cual fuera financiado por el Instituto Interamericano para el Cambio Global (IAI). Se resumen a continuación algunas de las consideraciones sobre el cambio climático en la cuenca del Plata:

**Precipitaciones** (Extraído de Berbery et al, 2006).

Durante el último siglo el Sudeste de Sudamérica ha experimentado importantes cambios en su régimen de precipitación, y como consecuencia se ha afectado el balance hidrológico de la región, particularmente sobre la cuenca del Plata. Se han observado cambios en varias regiones del mundo, pero en Sudamérica se han encontrado los de mayor magnitud. Además las tendencias se

han intensificado en los últimos 30 a 40 años debido a los cambios en la circulación atmosférica y probablemente también por el cambio de uso de suelo.

Como consecuencia del aumento de la precipitación en regiones semiáridas de República Argentina, se ha incrementado la extensión de tierras para la agricultura, lo que ha sido beneficioso para el aumento de las rentas, pero al mismo tiempo han aparecido problemas ecológicos. Aunque las regiones semiáridas se han beneficiado con el aumento de la precipitación, otras regiones se inundan más frecuentemente, y en algunos casos, algunas zonas se encuentran casi permanentemente anegadas.

Las tendencias positivas en la precipitación en el centro y Sudoeste de Argentina se deben a las tendencias de los años neutros del ENSO, mientras que en Paraguay y en una amplia región alrededor de la triple frontera entre ese país, Brasil y Argentina las tendencias positivas están mayormente originadas en las tendencias de la fase de El Niño. Una de las manifestaciones de esas tendencias puede apreciarse en la fig. 39, que presenta la evolución cronológica de las precipitaciones anuales en la ciudad de Corrientes. La otra, en la fig. 40, que muestra la misma tendencia, pero en la pampa húmeda (Barros et al. 2000).

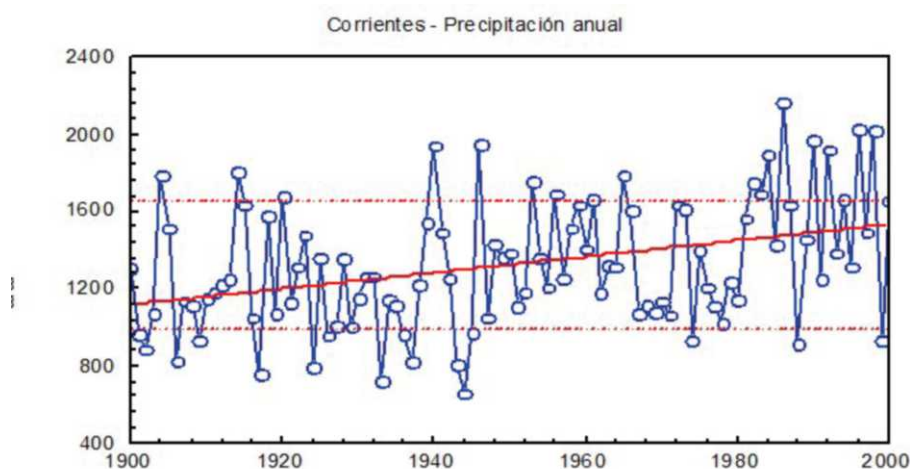


Figura 39. Variación de la precipitación en la Estación Corrientes.

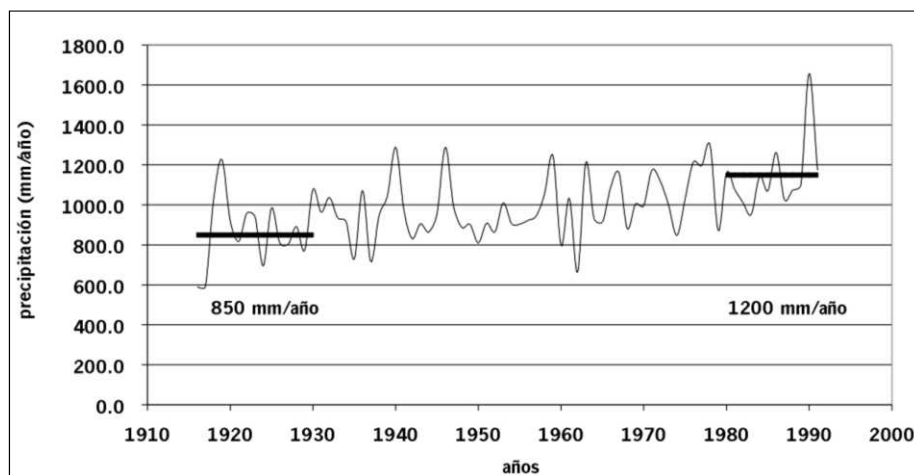


Figura 40. Variación de la precipitación media anual en la Pampa Húmeda.

El aumento regional de las precipitaciones se pone de manifiesto cuando son analizadas la distribución de las estaciones con precipitaciones anuales mayores a 800 mm (fig. 41, Nuñez et al):

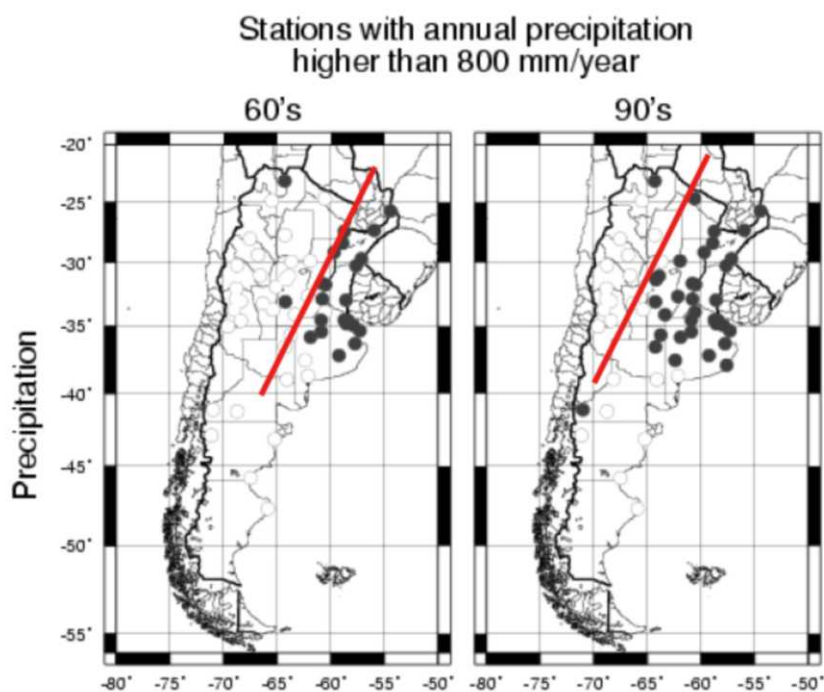


Fig. 41: distribución de estaciones con lluvias mayores a 800 mm

La frecuencia de precipitaciones intensas también se ha incrementado desde fines de 1970, pero esta tendencia se ha hecho más marcada luego de 1990, con las consecuentes pérdidas de vidas, daños en la infraestructura y en las propiedades personales.

Las características y rasgos de las tendencias de la precipitación de las últimas décadas implican que la región está bajo nuevas condiciones climáticas que necesitan ser tomadas en cuenta para la planificación y la administración de los recursos hídricos.

#### **Evaporación** (extraído de Báez, 2006).

Las tendencias de la evapotranspiración real (ETR) fueron determinadas utilizando un modelo de balance hídrico simplificado en el centro y Oeste de la cuenca del Plata, que abarca las regiones de Oeste de Argentina (Santiago del Estero) y de Paraguay (Mariscal Estigarribia); el Río Paraguay y Litoral de Argentina: Puerto Casado, Concepción, Asunción, Santa Fe y Junín; y Este de Paraguay (Encarnación y Ciudad del Este). La ETR mensual se calcula en base a la relación entre la evapotranspiración potencial (ETP), obtenida por el método de Thornthwaite (1948), la precipitación (P) y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (W), que se asume como máximo 100 mm.

Los resultados de las tendencias de precipitación y ETR indican valores positivos en todas las localidades analizadas, en tanto que con la temperatura media, ocurre situación similar, con excepción de Mariscal Estigarribia, Paraguay, donde la tendencia es negativa. La mayor magnitud de la tendencia en la ETR se verifica en Mariscal Estigarribia con 6 mm/año, seguido de Ciudad del Este, al Este de Paraguay, con 4,32 mm/año. Las tendencias más pequeñas en la ETR se verifican en Concepción, Paraguay con 0,41 mm/año y Junín, Argentina con 0,83 mm/año. Con la excepción de Mariscal Estigarribia (Oeste de Paraguay), pareciera que las mayores tendencias en la ETR ocurren al Este de Paraguay y el litoral de Argentina.

Las tendencias de la precipitación y la ETR parecen ser casi similares en todo el Oeste de la cuenca del Plata y en el Norte del Paraguay. En el resto de la región estudiada y a medida que la precipitación excede a la ETP significativamente, las



tendencias de la ETR son menores que la de la precipitación, dando lugar así a tendencias en el escurrimiento y consecuentemente en los caudales del mismo signo que las de la precipitación.

Se han realizado otros estudios a nivel regional y de la República Argentina en lo que respecta al cambio climático, que si bien la tendencia general es coincidente, presenta ciertas divergencias en ciertas variables climáticas.

Por otra parte, el **Centro de Investigaciones, Observaciones y Monitoreo Territorial Ambiental (CIOMTA)** de la Universidad Católica Argentina realizó un análisis del Cambio Climático en un área extensa donde la cuenca del arroyo Feliciano se encuentra comprendida. El CIOMTA tuvo como tarea, conocer y difundir las condiciones e influencias del Cambio Climático y los sumideros de carbono en la Región Centro Norte-Noreste de la República Argentina (Provincias de Santa Fe, Entre Ríos, Corrientes, Misiones, Formosa, Chaco, Santiago del Estero, y parte de Córdoba, Tucumán y Salta), en una superficie de 850.000 Km<sup>2</sup>, donde habitan aproximadamente 12.000.000 de personas.

El proyecto tuvo como objetivo general el de contribuir a la generación de condiciones para la superación de la pobreza y la mejora del nivel de vida de la población rural, a través del fortalecimiento de las capacidades de los organismos locales en la planificación y la adopción de políticas adecuadas en materia medio-ambiental y de desarrollo sustentable, según las problemáticas y directivas de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto. Los trabajos incluyeron la identificación y delimitación de los geosistemas presentes y la evaluación, cuantificación y optimización de los mismos para actuar como sumideros de carbono.

La metodología seguida para llegar desde las propuestas de escenarios de cambio climático del SRES (Special Report on Emissions Scenarios) a los escenarios de cambio climático de la cuenca se resume en la fig. 42.

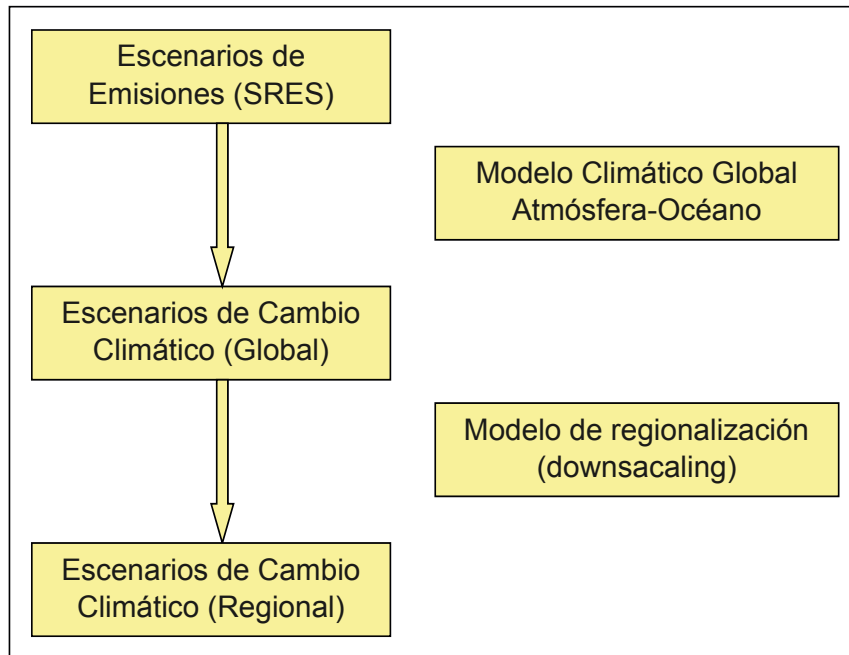


Figura 42. Metodología propuesta para llegar a los escenarios, en la cuenca del Arroyo Feliciano.

Los modelos de circulación general acoplados "océano-atmósfera" (MCGAO), representan el intento de simulación del sistema climático global (incluyendo la atmósfera, los océanos, la biosfera, la criósfera y la superficie terrestre) y están constituidos esencialmente por sistemas de ecuaciones que expresan las leyes físicas que gobiernan el sistema. Se utilizan tanto para realizar experimentos de control, es decir, orientados a la descripción del clima contemporáneo, como para cuantificar la respuesta futura del clima a perturbaciones inducidas por actividades humanas. Es decir, la respuesta al cambio en alguno de los parámetros y procesos que controlan el estado del sistema. Intentan explicar cómo el sistema climático responderá a esa perturbación intentando restablecer el equilibrio.

Las diferentes concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles que se utilizan para perturbar el sistema y analizar cómo responde éste a esos cambios, surgen como resultado de diferentes escenarios de emisión. Estos escenarios se construyen a partir de una variedad de hipótesis socioeconómicas

(demográficas, sociales, económicas y tecnológicas) que son consideradas como las fuerzas impulsoras en la producción de las emisiones futuras.

Los modelos climáticos dividen todo el planeta en grillas que tienen una resolución horizontal de 300 a 500 km y a la atmósfera y el océano en unas decenas de capas verticales. Si bien, en la dirección vertical, los modelos ofrecen una resolución satisfactoria, la resolución horizontal es pobre si se quiere precisar en la predicción de los posibles impactos del cambio del clima (fig. 43).

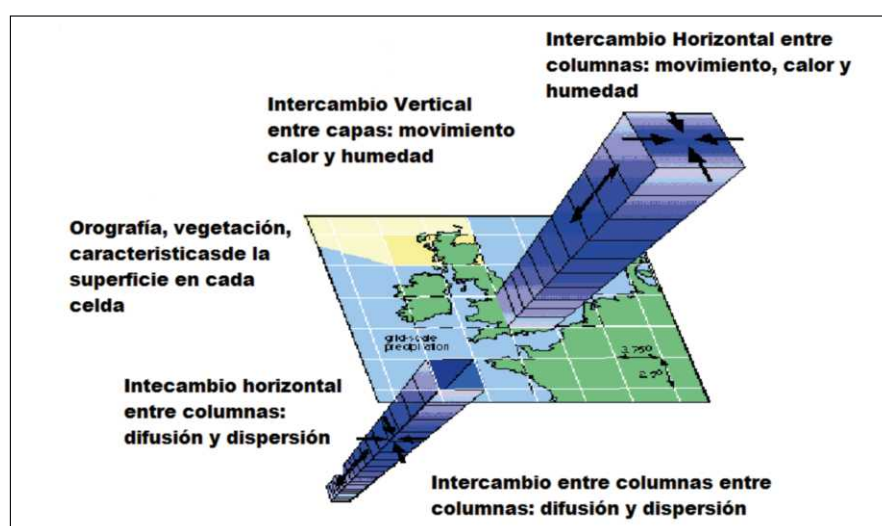


Figura 43. Estructura conceptual de un modelo de circulación general atmosférico-oceánico (tomado de: Viner y Hulme (1997)).

En forma paralela, se utilizaron los datos provenientes del modelo de circulación general HadCM3 (suministrados por el Climate Impacts LINK project - DEFRA Contract EPG 1/1/154 desarrollado en el Centro Hadley y la Oficina Meteorológica del Reino Unido). Este modelo tiene 19 niveles en el componente atmosférico con una resolución horizontal de 2.5° en latitud por 3.75° en longitud.

En superficie representa una celda de aproximadamente 417 km x 278 km en el ecuador y de 295 km x 278 km a los 45° de latitud. Los datos tomados corresponden a las proyecciones basados en los escenarios conocidos por las siglas A2 y B2, ver fig. 44.

El primero corresponde a una evolución de emisiones de GEI más creciente que el segundo. Así, en el A2 la concentración global de CO<sub>2</sub> llegaría en el año 2100 a ser un 120% más que la actual y en el B2 aproximadamente el doble (100%), debido a que el escenario A2 supone un crecimiento más rápido de la población respecto al B2. Ambos tienen una orientación hacia el desarrollo regional.

En este caso, como se intenta evaluar los impactos en la agricultura, los cambios que nos interesan son aquellos que ocurren cerca de la superficie (Mehdi et al., 2007).

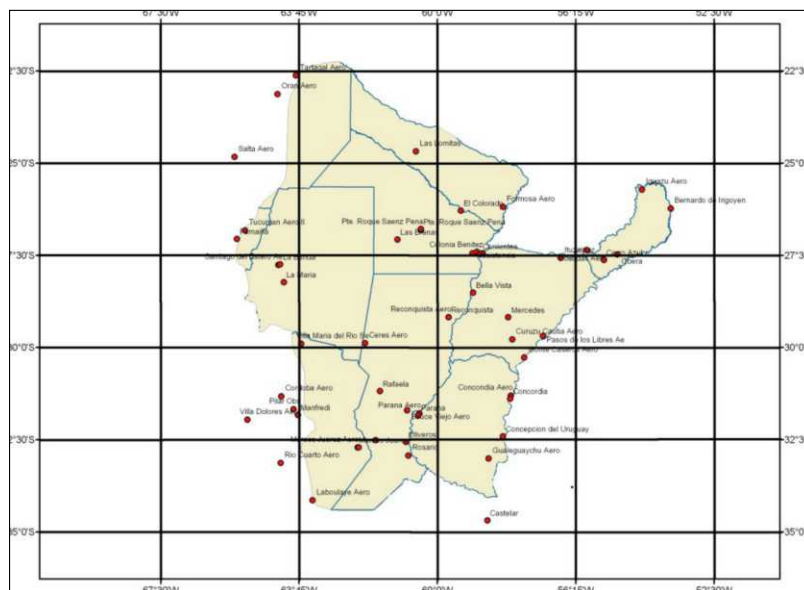


Figura 44. Estaciones y celdas del MCG (utilizado por el CIOMTA, 2005)

Dado que los Modelos de Circulación Global (MCG) no proporcionan resultados a la escala espacial y temporal que requieren los modelos hidrológicos, ha sido necesario desarrollar algoritmos de reducción de escalas (“downscaling”) y de desagregación temporal de la serie de datos climatológicos para traducir los resultados de los MCG a escala local y frecuencia diaria (Samper et al., 2007).

Para esta reducción se utilizan básicamente métodos estadísticos (“downscaling” estadístico) o modelos climáticos (sistemas de ecuaciones diferenciales: “downscaling” dinámico acoplados a los modelos MCGAO en un área

geográfica delimitada (región). Las primeras tienen sus orígenes en la climatología sinóptica y en la predicción del clima y son muy variadas, utilizando una amplia gama de métodos estadísticos desde regresiones a redes neuronales o análogas.

Algunas técnicas para conseguir esa "regionalización" (o "downscaling") son bastante complejas. La idea es combinar en forma coherente, las proyecciones de un modelo de circulación general a nivel global en la atmósfera con las características climáticas locales.

Como el objetivo es cuantificar impactos relacionados a variaciones climáticas, previamente se debió lograr la generación de series climáticas de futuros escenarios potenciales para las estaciones meteorológicas de la zona de estudio, afectando las estadísticas que describen el clima local con los cambios derivados de los modelos globales.

Wilby y Wigley (2001) mencionan que el LARS-WG (Semenov et al.1998) es uno de los dos modelos importantes generadores de tiempo, disponibles.

Esencialmente el modelo calcula propiedades estadísticas de la serie de datos observados utilizados de base, a partir de lo cual crea distribuciones estadísticas empíricas y genera bases de datos climáticos diarios a futuro (Semenov y Barrow, 2002). Por lo tanto, la estrategia que se ha seguido a fin de regionalizar los datos producidos por el Modelo Global consistió en la utilización del LARS-WG, para la simulación de los datos de la estación INTA Paraná. Estos datos se producen en la forma de series de tiempo diario para un conjunto de variables del clima (precipitación, temperatura máxima y mínima y radiación solar).

El modelo utilizado tiene la habilidad de producir series sintéticas a escala diaria y la suposición fundamental es que las correlaciones estadísticas entre las variables del clima derivadas de datos observados, son válidas bajo una suposición de cambio en el clima (Arruti, 2011; Ayala-Carcedo, 2008).

Los pasos fundamentales que se siguieron para la generación de series sintéticas fueron:

**Calibración del modelo:** Los datos reales de cada estación meteorológica (observados) son analizados a fin de determinar sus características estadísticas. Esta información es almacenada en dos archivos de parámetros.

**Validación:** Mediante una herramienta (Qtest), el mismo programa permite corroborar si las series generadas pueden considerarse como provenientes de la misma "población". Esta comprobación, que determina si las distribuciones, valores medios y desviaciones estándar de los datos sintéticos son perceptiblemente diferentes de las del archivo original, se realiza mediante las pruebas estadísticas: chi-cuadrado, t-student y F- Snedecor respectivamente.

**Generación de series sintéticas de tiempo:** Los archivos construidos durante la calibración con los datos reales son utilizados para la generación de las series sintéticas (con las mismas características de los datos originales, pero difieren en la base del día a día).

**Generación series futuras:** Si se pretende obtener series sintéticas que correspondan a un cambio de clima en particular, pueden también ser generadas indicando los cambios derivados de un modelo climático global a un archivo llamado "escenario", que el LARS-WG utiliza cuando genera las series.

El archivo "escenario" es el que utiliza el programa para perturbar los parámetros estadísticos a fin de incorporar cambios en valores medios (temperatura, precipitación y radiación solar) y cambios en variabilidad (cambios a la desviación estándar de la temperatura o a la longitud de series de días de lluvia y series de días secos).

Los datos de las variables meteorológicas son los observados de la estación meteorológica del INTA Paraná, en el período 1971-2000, cuyo control de calidad fue efectuado en el CIOMTA.

Con la aplicación de LARS-WG a estas series, se generaron los archivos de parámetros que corresponden a una descripción estadística de las características del clima en cada punto de medición.

Los rangos que se consideran fueron: Período Actual ó línea base: "1971-2000" Futuro A2 "2030-2059" y "2070-2099" Futuro B2 "2030-2059" y "2070-2099"

Los índices de cambio se construyeron a partir de los datos de las proyecciones del Modelo de Circulación General Atmósfera-Océano (AOGCM) y para cada una de las celdas de la grilla que contienen la estación meteorológica estudiada.

Para la generación de estos parámetros el CIOMTA utilizó también el LARS-WG como herramienta. Siguió el criterio para cada celda del AOGCM:

- Se introdujo como dato de entrada al modelo la serie que representa la Línea Base (1971-2000), obtenida del AOGCM, y se generaron los archivos de estadísticas de la Línea Base.
- Luego se dio entrada a una serie futura obtenida del AOGCM y se generaron las estadísticas correspondientes a esa serie futura.
- A partir de las estadísticas de las series futura y actual, construyen (mediante varios programas desarrollados en el Centro) un archivo denominado "escenario" que contiene los índices de cambio que resultaron de comparar esa serie futura con la que se toma como base.

Los cambios relativos en las medias de temperatura y radiación son aditivos (futuro-línea base). Pero los de la precipitación mensual, longitud de series lluviosas y secas y la desviación estándar de temperatura son multiplicativos (futuro/línea base).

Para la generación de las series futuras se partió de considerar los parámetros estadísticos que se obtuvieron de los datos medidos y se introdujo el archivo "escenario" generado según la celda del modelo global a la cual pertenece la estación. Con estas premisas, el generador LARS-WG construyó las series sintéticas futuras afectadas por los índices del escenario elegido (A2 o B2).

### **V.2.2. Resultados regionales obtenidos del Proyecto CIOMTA (2009)**

Se obtuvieron para cada estación meteorológica las series sintéticas que representan a la línea base (1971-2000) así como las series sintéticas de los dos futuros considerados A2 y B2, para los rangos: "2030-2059" y "2070-2099".

Gráficamente, los resultados de la “línea base” de la temperatura y precipitación media anual se muestran en la fig. 45.

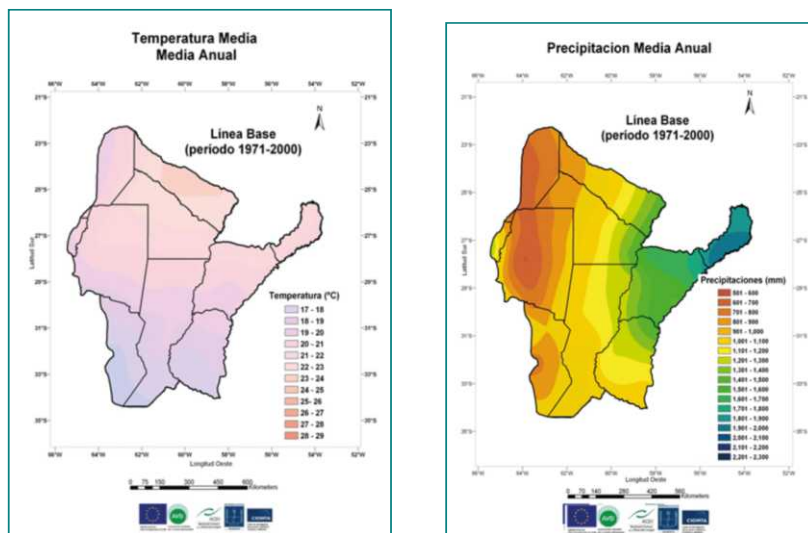


Figura 45. Línea base de Temperatura y precipitación.

Cabe aclarar que los resultados de los futuros considerados A2 y B2 que se obtienen no son predicciones climáticas sino "proyecciones" de cómo podría variar el clima futuro tomando como base o referencia las características actuales.

Se analizaron los cambios proyectados para las temperaturas medias y precipitaciones anuales para los dos escenarios de emisiones A2 y B2, correspondientes a "2030-2059" y "2070-2099", tomando como referencia los valores modelados de la línea base (1971-2000).

En el escenario A2 se pudo determinar, para el período "2030-2059", un incremento de la temperatura media en la zona de estudio que oscila entre 1,6°C y 2,6 °C. En cuanto a la precipitación anual se produjeron algunos focos de disminución de hasta un 15% (norte de Santiago del Estero, sur de Salta, noroeste de Chaco y sur-este de Corrientes), y, contrariamente, se originó una amplia zona de aumentos de alrededor de un 15% al oeste (sobre Santiago, Santa Fe y Córdoba) y en el norte de Corrientes y sur de Misiones.



- En el período "2070-2099": Las temperaturas medias se incrementan aún más, encontrándose aumentos que oscilan entre 3,3 °C y 6,3°C. Al mismo tiempo, la precipitación anual disminuye en el noroeste, pero en general, sobre la mayor parte de la zona de estudio se incrementan en un 20% hasta llegar a un 40% en el centro del área. La siguiente figura (nº 46) permite visualizar un corrimiento de la zona más húmeda hacia el oeste de la zona de estudio para A2, al final del período.

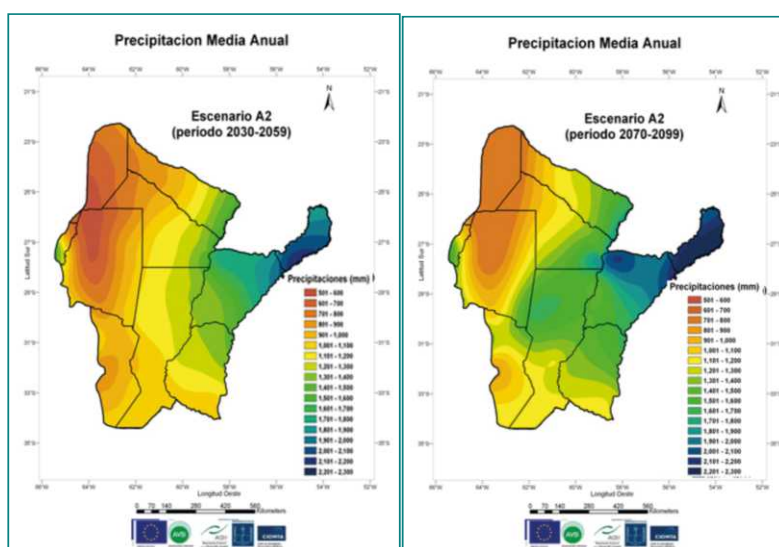


Figura 46. Precipitación media anual para Escenario A2

En el escenario B2, período "2070-2099", se verificó un aumento en las temperaturas medias en el rango: 2,4 °C a 3,8 °C, alrededor de unos dos grados más que en el tramo "2030-2059"; siendo el aumento de las precipitaciones del orden del 10 %. Es dable esperar para cuenca en estudio, entonces, una proyección en el incremento de las precipitaciones por efecto del CC del orden del 20%, para los escenarios B2 y A2.

### 5.2.3. Trayectorias de Concentraciones Representativas

Actualmente, el IPCC utiliza las Trayectorias de Concentraciones Representativas (Representative Concentration Pathways- RCP-) para tipificar las proyecciones de los distintos escenarios de emisiones acumuladas hasta el 2100 de gases de efecto invernadero (GEI). Son variables en un rango amplio y están

determinadas en función de la actividad económica, la cantidad de habitantes, el uso de la energía y de los suelos, actividad industrial etc. (IPCC, 2014b).

Considera cuatro escenarios de emisiones (fig.47). Uno, de mitigación rigurosa (RCP2,6), que tiene como meta mantener el calentamiento global  $2^{\circ}\text{C}$  o menos por encima de las temperaturas preindustriales, dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con emisiones de GEI muy altas (RCP8.5).

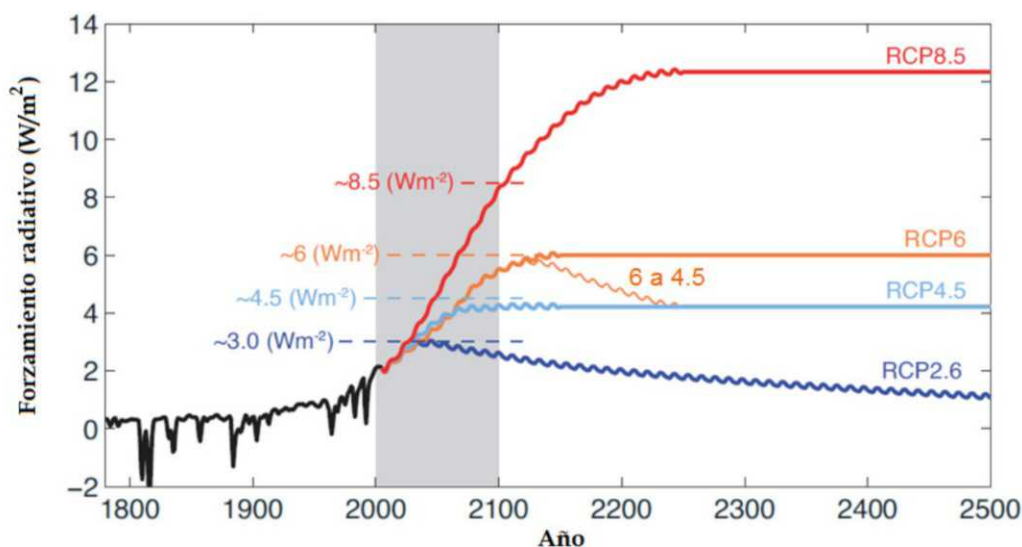


Figura 47. Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP), (IPCC, 2013a).

Los efectos de los GEI se manifiestan, entre otras cosas, en el aumento de la temperatura y el nivel medio del mar. Los valores de los mismos, para los 4 RCP, son presentados en la tabla siguiente, en donde los números 2.6; 4.5; 6.0 y 8.5 se refieren al “forzamiento radiativo”, en  $[\text{W}/\text{m}^2]$ , producido por la acumulación de los gases antropogénicos hasta el 2100.

Tabla 13: Incrementos proyectados de los valores medios de la temperatura y nivel del mar con respecto al período 1986-2005- (IPCC, 2014b)

Escenario	Concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono en 2100	Incremento de temperatura 2081-2100		Incremento del nivel medio del mar 2081-2100	
		Promedio	Rango	Promedio	Rango
RCP2.6	421 ppm	1,0°C	0,3 - 1,7°C	0,40m	0,26-0,55m
RCP4.5	538 ppm	1,8°C	1,1 - 2,6°C	0,47m	0,32-0,63m
RCP6.0	670 ppm	2,2°C	1,4 - 3,1°C	0,48m	0,33-0,63m
RCP8.5	936 ppm	3,7°C	2,6 - 4,8°C	0,63m	0,45-0,82m

En el último informe el IPCC, las proyecciones de los modelos climáticos globales establecen un aumento de las precipitaciones extremas con el calentamiento global. El aumento de la media mundial de los períodos de retorno de 20 años, para la precipitación máxima anual de 24 horas, estaría comprendido entre 6% y 7% por cada °C de calentamiento medio global, con estimaciones comprendidas en el rango de 4 a 10% cada °C en la mayoría de los modelos de simulación (Kharin et al, 2007), (Kharin et al, 2013), (IPCC, 2013b, Chinowsky et al., 2011; Wrigth et al., 2012). Por otra parte, Cabré et al (2010), estima un rango +1,5 °C a +2,5 °C de incremento de temperatura previsto en la cuenca del Plata para el año 2050. Combinando estos valores se obtiene un rango comprendido entre 6% y 25% de aumento de Pmax20 en la cuenca en estudio (Garat et al., 2017).

#### **V.2.4. Resultados de las simulaciones con las precipitaciones afectadas por el Cambio Climático**

De acuerdo con el ítem anterior, para la simulación de los efectos del CC, las precipitaciones que originaron cada uno de los hidrogramas de crecida fueron incrementadas en un 20%. Con esos nuevos valores de precipitaciones, se volvieron a simular cada uno de los diferentes hidrogramas de crecida.

La Tabla 14 presenta los resultados de las simulaciones realizadas para cada uno de los eventos máximos anuales registrados en el período 1975 a 2016.

Tabla 14: Caudales observados, simulados, y simulados con cambio climático

Año hidrológ.	Q obs	Q model	Q mod +CC	Año hidrológ.	Q obs	Q model	Q mod +CC
1975/1976	806.5	797.6	1246.0	1995/1996	925.27	933.7	1381
1976/1977	566.6	faltan datos		1996/1997	131.2	133.0	267.0
1977/1978	206.6	208.2	311.8	1997/1998	2179.9	2187.0	3101.0
1978/1979	875.1	873.6	1417.8	1998/1999	511.9	519.6	844.0
1979/1980	292.3			1999/2000	431.8	435.1	638.2
1980/1981	340.9	342.3	519.6	2000/2001	648.1	656.7	903.6
1981/1982	108.1	faltan datos		2001/2002	731.2	774.0	1043.0
1981/1982	87.8	88.7	155.4	2002/2003	2065.3	2067.9	2685.7
1982/1983	326.5	329.0	541.0	2003/2004	189.8	190.0	342.0
1983/1984	611.0	612.0	795.0	2004/2005	1978.9	1986.7	2474.5
1984/1985	481.7			2005/2006	657.6	663.2	916.5
1985/1986	854.6			2006/2007	525.0	524.0	709.5
1986/1987	376.7	382.2	717.0	2007/2008	154.2	155.6	302.8
1987/1988	1934.4	1990.8	2694.3	2008/2009	351.9	358.6	588.5
1988/1989	446.0	453.8	766.5	2009/2010	1575.9	1584.0	2206.0
1989/1990	721.5	723.8	855.0	2010-2011	faltan datos		
1990/1991	331.6	336.2	541.7	2011/2012	656.1	672.6	966.7
1991/1992	716.9	728.0	1137.8	2012/2013	829.2	831.8	1360.2
1992/1993	557.1	561.7	758.0	2013/2014	779.0	787.9	1175.5
1993/1994	641.0	650.9	992.0	2014/2015	732.0	740.8	1022.0
1994/1995	223.5	222.1	454.0	2015/2016	2243.6	2264.0	3105.0

Del análisis de los caudales obtenidos surge que los mismos, en la mayoría de los casos, presentan aumentos que varían del 30% al 70% con un promedio del orden del 50%, para las precipitaciones afectadas por un incremento hipotético del 20 % debido al CC.

### V.3. Análisis de Frecuencia de Caudales.

En la Facultad de Hidrología y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral se han desarrollado varios programas computacionales de análisis estadístico de frecuencias que permiten estimar la magnitud del caudal asociado a un determinado período de retorno (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, 2006). En este caso fue seleccionado el programa AFMULTI (Paoli et al, 1991; Bolzicco et al., 1990) para ser aplicado luego a la serie de caudales diarios máximos anuales observados.

El análisis de frecuencia consiste en calcular los parámetros de las distribuciones de probabilidad y determinar con el factor de frecuencia la magnitud del evento para un período de retorno específico.

De las distintas funciones de distribución y procedimientos de estimación de parámetros disponibles en la bibliografía, fueron seleccionadas 7 distribuciones con un método de ajuste particular para cada una:

- 1 Log Normal,
- 2 Gumbel,
- 3 General de Valores Extremos (GEV),
- 4 Pearson III,
- 5 Log Pearson III,
- 6 Exponencial,
- 7 Wakeby.

Además de ajustar a estas distribuciones y obtener valores para distintas recurrencia  $X(T)$ , este programa calcula los test de Bondad de Ajuste de  $X^2$  y Kolmogorov-Smirnov, así como los errores cuadráticos medios de frecuencia (ECMF) y variable (ECMV), para cada una de esas distribuciones.

### **V.3.1. Análisis de frecuencia a la serie observada de caudales diarios máximos anuales**

En la Tabla nº13 del ítem se presentaron los caudales diarios máximos anuales observados desde 1976 hasta 2016, y los simulados con el HEC-HMS. A 36 valores anuales de esos caudales diarios observados se les aplicó el modelo de Análisis de frecuencias, AFMULTI. Los resultados se muestran en la Tabla 15 y en la fig.48.

Tabla 15. Estadísticos de los Caudales diarios Máximos en el escenario actual:

```

ESTUDIO ESTADISTICO DE : CAUDALES MÁXIMOS DIARIOS ANUALES (SERIE 1975-2016)
SERIE DE CALCULO : QMÁX
ESTACION : ESTACION PASO MEDINA- ARROYO FELICIANO
ANO INICIAL : 7576      ANO FINAL : 1516
CANTIDAD DE VALORES : 36

ESTADISTICOS :
VARIABLE ORIGINAL (X) :
  MEDIA      DESVIO      COEF.      COEF.      COEF.      COEF.
              ASIMETRIA    VARIACION  ASIM/VARI  CURTOSIS
  763.7      607.82      1.40      .7959      1.76      3.49

MOMENTOS PONDERADOS:
  MW1      MW2      MW3      MW4      MGEV1    MGEV2      MG1
  226.76   116.23   73.27   51.32   536.96   426.43     225.61

VALORES EXTREMOS :
  MAXIMO      MINIMO      RANGO      INDICES :
  2244.      88.      2156.      MAXIMA      MINIMA      MIN-MAX      MAX-MIN
  2244.      88.      2156.      2.938      .115      .039      25.500

ESTIMADORES DE LOS PARAMETROS :
DISTRIBUCION      P A R A M E T R O S
LOGGAUSS:      Xm= .763722200E+03      S= .607819200E+03
GUMBEL:      AG= .450858400E+03      GM= .503486800E+03
GEV :      AGEV= .342858700E+03      UGEV= .464613000E+03      G= -.232550900E+00
PEARSON:      MEDP= .763722200E+03      DESP= .607819200E+03      SKEW= .140448500E+01
EXPONENCIAL:      Xm= .763722200E+03      S= .607819200E+03

ESTIMADORES DE LOS PARAMETROS :
DISTRIBUCION      P A R A M E T R O S
LOGGAUSS:      Xm= .763722200E+03      S= .607819200E+03
GUMBEL:      AG= .450858400E+03      GM= .503486800E+03
GEV :      AGEV= .342858700E+03      UGEV= .464613000E+03      G= -.232550900E+00
PEARSON:      MEDP= .763722200E+03      DESP= .607819200E+03      SKEW= .140448500E+01
EXPONENCIAL:      Xm= .763722200E+03      S= .607819200E+03

VALORES DE LA VARIABLE PARA DISTINTAS PROBABILIDADES
PROBABILIDAD  LOGGAUSS      GUMBEL      GEV      PEARSON      EXPONENC.
.0020      4486.7      3304.9      5244.1      3405.6      3933.3
.0050      3630.0      2891.1      4042.1      3092.7      3376.3
.0100      3048.5      2577.5      3287.5      2753.7      2955.0
.0200      2518.6      2262.7      2643.5      2409.3      2533.7
.0500      1891.3      1842.6      1931.8      1942.2      1976.8
.1000      1466.4      1518.1      1478.4      1576.1      1555.5
.2000      1077.5      1179.7      1080.0      1191.9      1134.2
.3000      862.8      968.3      864.0      953.5      887.7
.4000      713.6      806.3      713.9      774.3      712.8
.5000      597.6      668.7      595.8      626.3      577.2
.6000      500.4      542.9      494.9      496.3      466.4
.7000      413.9      419.8      402.3      376.0      372.7
.8000      331.4      288.9      310.2      258.1      291.5
.9000      243.5      127.5      204.7      131.3      219.9
.9500      188.8      8.8      132.6      54.6      187.1
.9800      141.8      .0      63.9      .0      168.2
.9900      117.1      .0      23.9      .0      162.0
.9950      98.4      .0      .0      .0      158.9
.9980      79.6      .0      .0      .0      157.1
.9990      68.6      .0      .0      .0      156.5

```

BONDAD DE AJUSTE

	LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	EXPONENC.
KOLMOGOROFF:	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
CHI CUADRADO:	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
ECMF :	.0470	.0712	.0432	.0628	.0532
ECMV :	194.89	192.08	206.15	177.87	177.86

SIMBOLOGIA PARA LA BONDAD DEL AJUSTE :

A: SE ACEPTA LA HIPOTESIS.

R : SE RECHAZA LA HIPOTESIS.

SE CONSIDERAN 3 NIVELES DE SIGNIFICACION: 5, 1 Y 0.1 % DE ACUERDO A SU UBICACION DE IZQUIERDA A DERECHA EN EL CARACTER DE CALIFICACION.

--- : EL NUMERO DE INTERVALOS DE CLASE RESULTANTE EN EL TEST DEL CHI-CUADRADO ES MENOR QUE 5

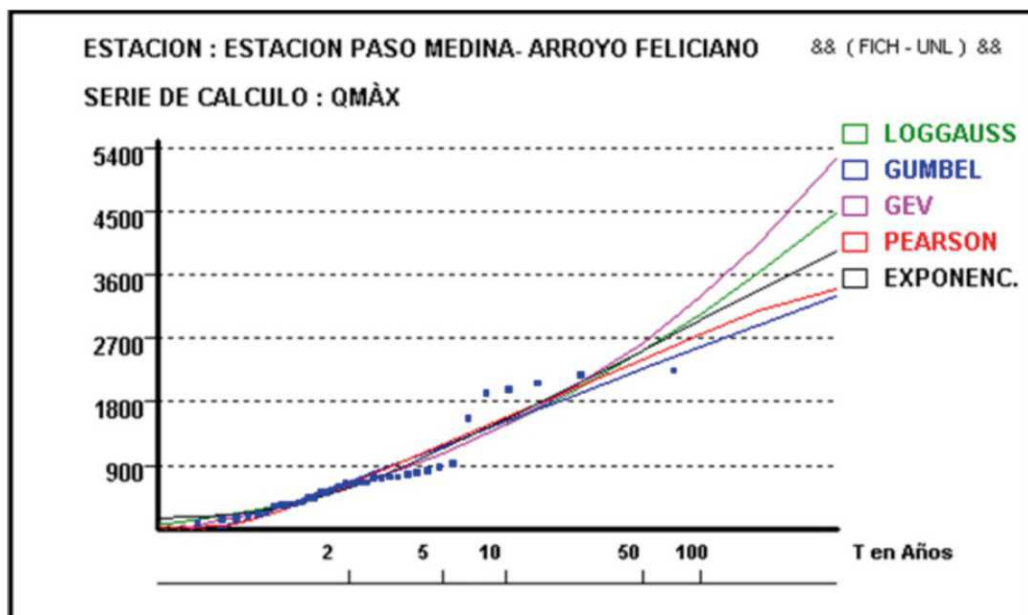


Figura 48. ajuste de distribuciones estadísticas a valores observados de qmáx

### V.3.2. Análisis de frecuencia a la serie de caudales diarios máximos anuales simulados con Cambio Climático

En la Tabla 14 se presentaron los caudales diarios máximos anuales simulados con Cambio Climático, es decir, producidos por lluvias aumentadas un 20%. A esos 36 valores anuales de caudal diario maximizado se les aplicó el modelo de Análisis de Frecuencias, AFMULTI. Los resultados se muestran en la Tabla16 y en la fig. 49.

Tabla 16. Estudio estadístico de Caudales Máximos diarios simulados con CC:

ESTUDIO ESTADISTICO DE : CAUDALES MAX DIARIOS ANUALES CON CC+20 (SERIE 1975-2016)  
 SERIE DE CALCULO : QMAX  
 ESTACION : ESTACION PASO MEDINA- ARROYO FELICIANO  
 AÑO INICIAL : 7576 AÑO FINAL : 1516  
 CANTIDAD DE VALORES : 34

ESTADISTICOS :  
 VARIABLE ORIGINAL (X) :  

MEDIA	DESUDIO	COEF. ASIMETRIA	COEF. VARIACION	COEF. ASIM/VARI	COEF. CURTOSIS
1134.7	823.08	1.25	.7254	1.73	3.21

MOMENTOS PONDERADOS:  

MW1	MW2	MW3	MW4	MGEV1	MGEV2	MG1
350.52	183.18	117.19	83.15	784.21	616.87	349.11

VALORES EXTREMOS :  

MAXIMO	MINIMO	RANGO	INDICES : MAXIMA	MINIMA	MIN-MAX	MAX-MIN
3105.	155.	2950.	2.736	.137	.050	20.032

ESTIMADORES DE LOS PARAMETROS :  
 DISTRIBUCION PARA METROS  

DISTRIBUCION	Xm=	S=	AG=	GM=	AGEV=	UGEV=	DESP=	G=	SKEW=
LOGGAUSS:	.113473500E+04	.823081400E+03	.629765000E+03	.771235000E+03	.501555700E+03	.723482500E+03	.823081400E+03	-.199212200E+00	
GUMBEL:									.125163900E+01
GEV :									
PEARSON:									
EXPONENCIAL:									

VALORES EXTREMOS :  

MAXIMO	MINIMO	RANGO	INDICES : MAXIMA	MINIMA	MIN-MAX	MAX-MIN
3105.	155.	2950.	2.736	.137	.050	20.032

ESTIMADORES DE LOS PARAMETROS :  
 DISTRIBUCION PARA METROS  

DISTRIBUCION	Xm=	S=	AG=	GM=	AGEV=	UGEV=	DESP=	G=	SKEW=
LOGGAUSS:	.113473500E+04	.823081400E+03	.629765000E+03	.771235000E+03	.501555700E+03	.723482500E+03	.823081400E+03	-.199212200E+00	
GUMBEL:									.125163900E+01
GEV :									
PEARSON:									
EXPONENCIAL:									

VALORES DE LA VARIABLE PARA DISTINTAS PROBABILIDADES

PROBABILIDAD	LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	EXPONENC.
.0020	5967.3	4684.4	6887.1	4580.9	5426.8
.0050	4901.9	4106.4	5436.5	4183.7	4672.6
.0100	4168.6	3668.2	4500.8	3753.3	4102.1
.0200	3491.5	3228.5	3683.3	3313.6	3531.6
.0500	2676.3	2641.8	2755.4	2713.2	2777.4
.1000	2113.3	2188.4	2147.6	2237.5	2206.9
.2000	1587.6	1715.8	1600.3	1732.1	1636.4
.3000	1291.7	1420.5	1297.5	1413.7	1302.6
.4000	1083.0	1194.3	1084.0	1171.0	1065.8
.5000	918.5	1002.1	914.2	967.6	882.2
.6000	779.0	826.3	767.7	786.0	732.1
.7000	653.2	654.3	632.1	614.6	605.2
.8000	531.4	471.5	495.8	442.5	495.3
.9000	399.2	246.0	338.1	250.1	398.4
.9500	315.3	80.3	229.2	127.4	353.9
.9800	241.7	.0	124.4	23.0	328.3
.9900	202.4	.0	63.1	.0	319.9
.9950	172.1	.0	11.9	.0	315.8
.9980	141.4	.0	.0	.0	313.3
.9990	123.2	.0	.0	.0	312.5



PROBABILIDADES PARA DISTINTOS VALORES DE LA VARIABLE

VARIABLE	AÑO	F R E C U E N C I A S					GEV	PEARSON	EXPONENC.
		FREC. EXP	LOGGAUSS	GUMBEL					
3105.	1516	.0147	.0305	.0243	.0348	.0276	.0336		
3101.	9798	.0441	.0307	.0244	.0349	.0278	.0337		
2694.	8788	.0735	.0490	.0461	.0534	.0514	.0553		
2685.	203	.1029	.0495	.0468	.0540	.0521	.0559		
2475.	405	.1324	.0637	.0647	.0682	.0710	.0722		
2206.	910	.1618	.0889	.0974	.0932	.1046	.1001		
1454.	9596	.1912	.2400	.2869	.2430	.2855	.2496		
1417.	7879	.2206	.2525	.3014	.2553	.2988	.2611		
1360.	1213	.2500	.2731	.3247	.2757	.3203	.2798		
1247.	7576	.2794	.3191	.3749	.3212	.3664	.3210		
1175.	1314	.3088	.3524	.4094	.3540	.3982	.3503		
1138.	9192	.3382	.3709	.4280	.3721	.4153	.3664		
1043.	102	.3676	.4225	.4777	.4224	.4613	.4113		
1022.	1415	.3971	.4348	.4891	.4344	.4719	.4219		
992.	9394	.4265	.4529	.5055	.4519	.4873	.4375		
967.	1112	.4559	.4685	.5194	.4669	.5003	.4510		
916.	506	.4853	.5017	.5483	.4988	.5276	.4799		
904.	1	.5147	.5098	.5551	.5066	.5341	.4869		
855.	8990	.5441	.5439	.5833	.5390	.5611	.5168		
844.	9899	.5735	.5518	.5897	.5465	.5672	.5237		
795.	8384	.6029	.5879	.6182	.5806	.5949	.5559		
766.	8889	.6324	.6100	.6352	.6012	.6115	.5758		
758.	9293	.6618	.6162	.6399	.6070	.6161	.5814		
710.	607	.6912	.6540	.6678	.6420	.6440	.6163		
638.	9900	.7206	.7124	.7093	.6956	.6863	.6727		
589.	809	.7500	.7528	.7370	.7321	.7151	.7139		
520.	8081	.7794	.8092	.7747	.7827	.7556	.7764		
441.	8283	.8088	.8704	.8154	.8375	.8008	.8546		
385.	9495	.8382	.9095	.8422	.8731	.8319	.9147		
342.	304	.8676	.9357	.8615	.8979	.8547	.9638		
312.	7778	.8971	.9516	.8742	.9136	.8701	.9996		
303.	708	.9265	.9560	.8779	.9181	.8746	.9999		
267.	9697	.9559	.9713	.8922	.9348	.8921	.9999		
155.	8182	.9853	.9969	.9301	.9730	.9400	.9999		

BONDAD DE AJUSTE

	LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	EXPONENC.
KOLMOGOROFF:	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA
CHI CUADRADO:	---	---	---	---	---
ECMF :	.0389	.0573	.0341	.0520	.0496
ECMV :	224.34	213.90	238.75	198.86	206.22

SIMBOLOGIA PARA LA BONDAD DEL AJUSTE :

A : SE ACEPTA LA HIPOTESIS.

R : SE RECHAZA LA HIPOTESIS.

SE CONSIDERAN 3 NIVELES DE SIGNIFICACION: 5, 1 Y 0.1 % DE ACUERDO A SU UBICACION DE IZQUIERDA A DERECHA EN EL CARÁCTER DE CALIFICACION.

--- : EL NUMERO DE INTERVALOS DE CLASE RESULTANTE EN EL TEST DEL CHI-CUADRADO ES MENOR QUE 5

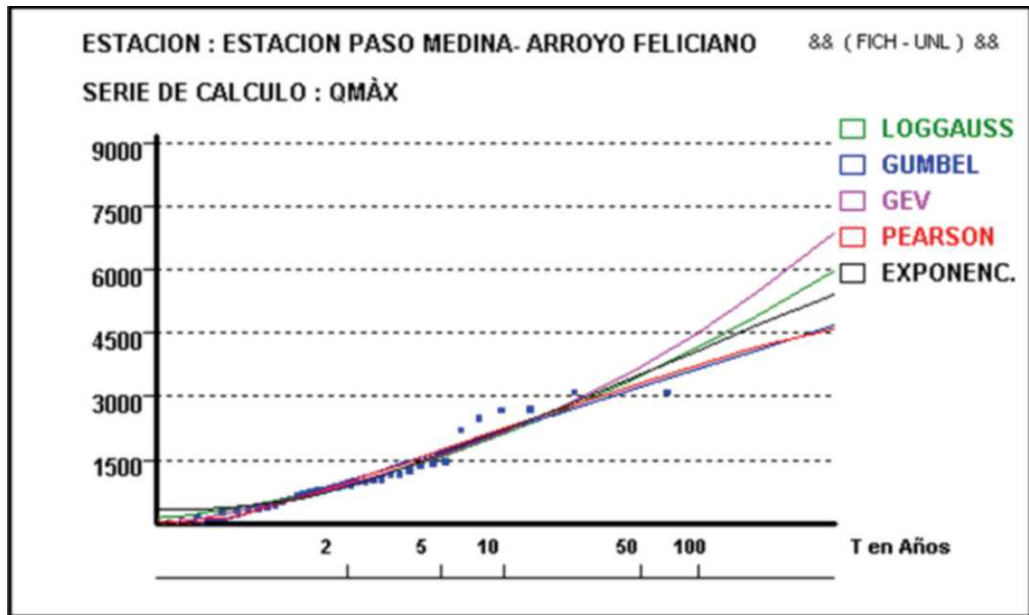


Figura 49. Ajuste de distribuciones estadísticas a caudales diarios maximizados

A modo de ejemplo, en el ítem anterior se puede observar que para una recurrencia de 100 años ( $T=100$ ), Gumbel indica que el caudal, en el escenario actual sería  $2578 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Ese valor de caudal, en el escenario con cambio climático (CC) se da, pero para una recurrencia bastante menor, de 20 años ( $Q_{20\text{años}} = 2648 \text{ m}^3/\text{s}$ ). En forma complementaria, puede estimarse que, un caudal de proyecto de una obra hidráulica de TR 100 años que necesita contemplar los efectos del CC, en la situación actual debería determinarse el Q de recurrencia 500 años.

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha seleccionado una cuenca que dispone de series de registros pluviométricos y de caudales diarios con un período de tiempo lo suficientemente extenso para poder realizar un análisis estadístico de frecuencias. Tiene una superficie de aproximadamente 5600 km<sup>2</sup> en la sección de control de Paso Medina, presentando caudales medios de 51,7 m<sup>3</sup>/s y un máximo aforado en el 2016 de 2.244 m<sup>3</sup>/s; lo que es un índice de la respuesta del sistema frente a eventos extremos.

El régimen de escurrimiento es de tipo pluvial. En general, la cuenca de aportes presenta suelos con muy baja capacidad de infiltración debido al predominio de suelos Vertisoles (25%) y Alfisoles (39%); su régimen de lluvias origina períodos con altos volúmenes de escorrentía superficial (principalmente en otoño) seguidos de otros muy escasos, que se tornan nulos o casi nulos en épocas de estiaje prolongado.

Los valores de Lámina Anual Escurrida varían entre un mínimo de 28 mm, en condiciones de año seco, hasta valores de 740 mm en condiciones de años híper húmedos.

El análisis de la serie de caudales diarios muestra una gran variabilidad en su distribución temporal, con coeficientes de dispersión y rango de caudales ( $Q_{\text{máx}} - Q_{\text{mín}}$ ) muy elevados, que hacen que los caudales medios y módulos determinados sean prácticamente una abstracción numérica.

Para la aplicación del modelo HEC-HMS se ha utilizado la red pluviométrica de la Dirección de Hidráulica de la provincia de Entre Ríos. La mayor parte de las estaciones de medición están ubicadas próximas al perímetro de la cuenca. Esto responde a que la traza de los ferrocarriles y de la red vial fueron desarrolladas en la divisoria de aguas de las principales cuencas hidrográficas, como es el caso del arroyo Feliciano. Esta situación, asociada a la baja confiabilidad de los datos de lluvias, ha llevado a que la mayoría de los eventos no hayan podido ser reproducidos con una única calibración, debiendo realizarse ajustes en cada una de las crecidas máximas simuladas.

La aplicación del modelo HEC-HMS implicó discretizar la cuenca en 54 subcuencas, 13 nodos, 13 secciones de traslado, 27 subsecciones de conducción, y una sección de salida coincidente con la estación hidrométrica Paso Medina.

La lluvia media sobre cada subcuenca fue determinada mediante el método de los polígonos de Thiessen, y las pérdidas fueron calculadas por el método de la curva número (CN). Dada la presencia de un relieve ondulado en todas las subcuencas, la transformación lluvia –caudal se resolvió aplicando onda cinemática, y la propagación (o traslado) en cauce también por este último método.

La simulación numérica aplicada a los hidrogramas reales de cada crecida seleccionada, presentó buenos ajustes, en la mayoría de los casos con determinaciones del caudal pico modelado menores al 5% en relación al observado.

El modelo es amigable y ha demostrado su aptitud para la simulación matemática de una cuenca de las dimensiones, variabilidad de suelos, uso de la tierra y relieve como la del Arroyo Feliciano.

Los modelos globales usados por el CIOMTA estimaron que para el área de la cuenca del Feliciano, las precipitaciones pueden verse aumentadas hasta un 20 %. Este valor es el que surge del Modelo Global LARS-WG. Por ello, para las proyecciones de acuerdo al modelo de cambio climático seleccionado, se asumió un incremento de las precipitaciones diarias de un 20%. Estos porcentajes fueron luego confirmados en uno de los últimos informes del CIMA.

Se tomó como período de análisis entre los años 2030-2059 y 2070-2099, comparando éstas con la considerada serie actual (1976-2016). Los resultados evaluados para el escenario adoptado B2, indican un incremento de la temperatura media anual de 1,5°C para el periodo 2030-2059 y se ha estimado de 2,7 °C en el periodo 2070-2099.

En lo que respecta a las precipitaciones medias anuales se estima sufrirán un incremento de 90 mm para el periodo 2030-2059, y 230 mm para el periodo 2070-2099.

Las simulaciones de los eventos históricos registrados con un incremento en las precipitaciones del 20% generaron incrementos de los caudales pico variables entre el 30% y el 70%, en la mayoría de los casos, lo que alterará las recurrencias de los eventos, de acuerdo a las leyes de probabilidades de valores extremos. Estos valores llevarán a reconsiderar los tiempos de recurrencia de los diseños de las obras civiles, para lograr garantizar las comunicaciones en obras viales y reducir el riesgo de inundación de las ciudades ubicadas en zonas de riesgo.

Se realizó el Análisis Estadístico de Frecuencias, aplicando el programa AFMULTI a la serie de caudales diarios máximos anuales en las condiciones actuales, y a la serie de caudales diarios en condiciones con Cambio Climático; es decir caudales obtenidos a partir de lluvias incrementadas un 20%. Se utilizaron las regresiones estadísticas de Log Normal, Gumbel, General Valores Extremos, Pearson III, Log Pearson III, y Exponencial.

Se determinaron los test de Bondad de Ajuste de  $X^2$  y Kolmogorov-Smirnov, así como los errores cuadráticos medios de frecuencia y variable para cada una de las distribuciones.

Los eventos extremos, que en algunos casos presentaban períodos de retorno de hasta cien años, se volverán cada vez más frecuentes y, por lo tanto, los tiempos de recurrencia disminuirán, de acuerdo al resultado de las simulaciones realizadas.

Se considera conveniente: implementar una red de medición mediante una red agroclimática que permita determinar valores confiables de la lámina precipitada; mejorar el monitoreo diario de la sección de control de caudales en Paso Medina, e incorporar una nueva sección de control aguas arriba con una superficie de aporte de al menos el 25% de la superficie total de la cuenca. Esto último permitirá un mejor ajuste del tiempo de traslado de la onda de crecida.

A los fines de un mejoramiento en la gestión de la cuenca ante los posibles cambios, será necesario una mejor y más fluida interrelación entre organismos del estado provincial y nacional. Los de mayor significancia son la Dirección Provincial de Vialidad de la Provincia de Entre Ríos y la Dirección Nacional de Vialidad, las que con el proyecto, desarrollo y mantenimiento de la red vial inciden en la dirección de los escurrimientos superficiales y aumentan la velocidad de propagación del flujo en las banquetas y cunetas. Se deberán implementar obras de control adecuadas como alcantarillas, derivaciones, tramos de almacenamiento temporarios, que permitan disminuir, al menos en parte, los picos de crecidas.

El Ministerio de la Producción de la Provincia de Entre Ríos, a través de la Secretaría de Recursos Naturales como Autoridad de Aplicación de las obras de sistematización para control de la erosión hídrica mediante la construcción de terrazas de intercepción, deberá propender a que las mismas produzcan una amortiguación de los picos a nivel establecimiento mediante el diseño de canales empastados y de reservorios temporarios. .

Una debilidad que presenta el sistema es que no se dispone de Autoridad de Cuenca que posea poder de policía para intervenir en el manejo del sistema y establecer instrumentos legales provinciales que concedan a estos organismos dicha facultad que actualmente se diluye en distintos organismos del estado provincial que manejan parte de la política hídrica sin una adecuada gestión institucional al depender de dos Ministerios Provinciales.

Se deberán priorizar acciones del uso del suelo y de ordenamiento territorial, promover programas de concientización en el manejo de los excesos hídricos a nivel parcelario, determinar la línea de ribera de los cursos principales, de manera de evitar y controlar la ocupación de dicho territorio, elaborar planes de contingencias ante inundaciones y emergencia en áreas de riesgo hídrico.

Incorporar como elemento clave en un Plan de Contingencia a organismos de las áreas de salud por posibles accidentes, Cuerpo de Bomberos de las localidades más cercanas, conocer y actualizar la disponibilidad de equipamiento en el caso de

tener que resolver catástrofes producto de afectaciones a la infraestructura, en especial puentes y alcantarillas de la red vial principal.

Mantener una adecuada comunicación con las fuerzas de seguridad provincial y nacional que estén preparadas para actuar en emergencias.

Determinar que las tareas de coordinación deberán ser llevadas adelante por Defensa Civil de la Provincia de Entre Ríos, la que deberá contar con los elementos adecuados para llevar a cabo dicha tarea.

El presente trabajo de investigación provee el conocimiento base para definir estrategias apropiadas de evaluación del impacto del Cambio Climático Global para el escenario seleccionado B2 de las modificaciones en los caudales pico de cuencas hidrográficas. Las simulaciones y sus resultados son posibles de ser extrapoladas a otras dentro de la provincia con características orográficas y suelos de la Cuenca del Arroyo Feliciano.

Por todo lo expuesto se considera que se encuentra demostrada la hipótesis planteada que: “Es posible, mediante la aplicación de modelos matemáticos, realizar una evaluación del cambio climático global. Se puede estudiar; mediante la simulación de escenarios futuros y generación de series de caudales, el impacto de las crecientes causado por el cambio climático”.

## CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

This study has been carried out after selection of a catchment with a series of daily rainfall and discharges records, and this during a time period with enough length to perform robust statistical analysis of frequencies. It has a surface area of about 5800 km<sup>2</sup> in the control section called Paso de Medina, average discharges values are 51,7 m<sup>3</sup>/s and a maximum gauged discharge in 2016 of about 2.244 m<sup>3</sup>/s; which has been taken as an index of the answer of the system facing extreme events.

The runoff regime is pluvial type. In general, soils of the catchment are characterized by a very low infiltration capacity, because of the predominance of Vertisols (25%) and Alfisols (39%). The rainfall regime originates periods with high superficial runoff volumes (mainly in autumn) followed by periods with very scarce runoff, which may be null or almost null in long periods of drought.

Annual values of runoff may range from a minimum of 28 mm, during dry years, until to 740 mm, during hiperhumid years.

Analysis of series of daily discharges showed a big variability regarding their temporal distribution; coefficients of dispersion and rank of discharges (i.e., Q<sub>máx</sub> - Q<sub>min</sub>) were very high; therefore, both mean discharge and modules are rather a numerical abstraction, without hydrological sense.

The HEC-HMS model was executed using the rainfall network of the "Dirección de Hidráulica" from Entre Ríos province. Most of the stations providing measurement are located next to the perimeter of the studied catchment. The reason for this lies in that in the past railways and road network have been constructed following the watershed divide of the main catchments, and this is also the case at Arroyo Feliciano. Because of this features, and also due to the fact of the scarce reliability of measured rainfall data, several events could not be reproduced by means of a single calibration, and therefore adjustments were needed for each of the simulated flooding events.



Application of HEC-HMS model involved discretization of the study catchment, yielding 54 subcatchments, 13 nodes, 13 transfer sections, 27 subsections of flow and a section at the catchment end, matching the hydrometric station of "Paso Medina"

The average rain at each subcatchment has been approximated using the method of Thiessen polygons, while water losses were estimated using the method of the curve number (CN). Because of the predominant undulated relief in all of the target catchments, the transformation rain-discharge has been solved by applying the kinematic wave, and in addition stream water propagation (or transfer) also was computed by this method.

Numerical simulation performed from the measured hydrograms during each flood event showed good fits, in most of the studied cases, so that the modelled discharge peaks differed less than 5% from the observed peaks.

This model has been shown to be user-friendly and also demonstrated its aptitude for mathematical simulation at a catchment with the characteristics of Arroyo Feliciano, regarding size, soil variability, soil use patterns and relief.

Global models of the atmosphere were able to estimate that in the area of the Arroyo Feliciano catchment, precipitation could increase by 20 %. This value is the result arising from the Global Model LARS-WG. Thus, the projections simulated by the climatic model selected assumed an increase of the daily precipitations of about 20%.

The periods of analysis chosen for projections were 2030-2059 and 2070-2099, and these were compared with the current series selected (1976-2016). The results obtained for the B2 scenario adopted, indicate an increase of the annual average temperature by 1,5°C for the period 2030-2059, while it was estimated by 2,7 °C for the period 2070-2099.

Estimations of average annual rainfall showed increased values of 90 mm for the period 2030-2059, and 230 mm for the period 2070-2099.

Simulations based on historical events recorded with increasing rainfall of 20% resulted in variable increases of peak discharges, ranging between 35% and 50%, this is expected to change the recurrence periods of the events, following the probability laws of extreme values. These increased values show the need to reconsider recurrence periods in the designs of the civil engineering works, in order to achieve a guarantee of safe communications in the roads and also to reduce the risk of flood of the cities located in dangerous zones.

A Statistical Analysis of Frequencies of the maximum daily discharges experimentally measured has been performed using the AFMULTI code; this exercise has been also performed using the series of daily discharges simulated under conditions of Climatic Change, namely discharges obtained from a scenario of 20% increased rain. In both cases, several statistical regressions have been used, namely Log Normal, Gumbel, General Extreme Values, Pearson III, Log Pearson III, Exponential and Wakeby.

Several tests, including the  $X^2$  Goodness-of-Fit, and Kolmogorov-Smirnov tests, as well as the mean quadratic errors of the frequency for each one of the distributions obtained.

Extreme events, showing in particular cases return periods by the order of one hundred years, should be increasingly frequent and, therefore, the recurrence times should decrease, following the result of the simulations performed.

Implementation of a network of measurement, namely an agroclimatic network is considered very convenient and recommended. This network should allow determining reliable values of precipitation; improving the daily monitoring at the control section of discharges in Paso Medina, and incorporate a new control section located upstream, responsible for at least a contribution of about 25% of the total surface of the catchment. This new control section should allow better adjustments of the transfer time of the flood wave.

Amelioration of catchment management in a scenario of possible climatic changes will require a better and more fluent interrelationship between organisms at the provincial and national level. Most significant organisms are the Provincial Direction of Roads of the Entre Ríos Province the National Direction of Roads. They act on the runoff direction, the increased values of flow propagation in roadsides and ditches thought project design and through development and maintenance of the network. Thus, there is a need to implement adequate measures of control, including scuppers, stretches of derivation, temporal storage sections that attain flood control in exceptional conditions.

The Ministry of Production of the Entre Ríos Province, through the Office of Natural Resources, which is the Authority responsible for application and systematisation of engineering works for controlling water erosion by means of construction of interception terrace, should take into account that these structures should produce a buffer effect of peaks at the farming level by designing special and appropriate channels and temporal reservoirs.

A weakness of the actual system is related to the lack of a Catchment Authority, with police power to allow participation in the management of the system and to establish legal instruments at the province level in order to facilitate this task; this is important, because nowadays, responsibilities are diluted in different organisms of the province that are only able to handle a part of hydrological police, but don't show a suitable institutional management, due to a lack of coordination between two Ministries of the province.

Actions related to the safe use soil, landscape ordination and promotion of awareness programs regarding management of hydrological surpluses at the field level should be prioritized; in addition, river bank of the main courses should be determined in order to avoid the occupation of this territory and control it, and contingency plans regarding floods and emergency in hydrological risk areas should be designed.

Also, key elements should be incorporated in a Contingency Plan, including organisms of the areas of health, because of possible accidents, fire brigade located at the nearest places. In addition, the availability of equipment should be updated in

order to confront catastrophes arising from infrastructure disturbs, especially bridges and scuppers of the main road network.

A suitable communication with the provincial and national security forces in charge of emergency actions should be maintained.

Coordination tasks that should be carried out by Civil Defence of the Entre Ríos Province should be decided, this Authority should have adequate elements to perform its allocated tasks.

The research work provided basic knowledge to define appropriate strategies for evaluating the impact of Global Climatic Change for a selected scenario, named as B2 scenario, regarding modifications in the peak discharges at hydrological catchments. The simulations carried out and the corresponding results could be extrapolated to other catchments of the studied province with landscape and soil characteristics similar to those of the Arroyo Feliciano.

The Committee responsible for Catchment management will be also for the alert of the system, in the presence of possible new events and to perform this tasks he should be able to monitor in real continued time no less than 10 % of the rainfall stations located in the basin.

From the above exposition, it follows that the hypothesis considered in this work has been demonstrated, i. e. "It is possible to perform an evaluation of the global climatic change by applying mathematical models. Simulation of future scenarios and generation of series of discharge, allow characterization of the environmental impact of foods associated to global climatic change".

## VII. BIBLIOGRAFÍA

Arbuet Moraes, M<sup>a</sup> A. (2009). Efectos Hidrológicos del Cambio de Uso del Suelo en el Litoral Argentino. Estudio de caso: cuenca del A° Feliciano, provincia de Entre Ríos. Tesis de Maestría en Ingeniería en Recursos Hídricos - Facultad de Ing. y Cs. Hídricas- Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

Arruti, A. M. (2011). "La construcción sostenible y el cambio climático". <http://www.americaeconomica.com/portada/opiniones/marzo09/270309/arruti270309.htm> el 07 de abril de 2011.

Ayala-Carcedo, F.J. (2008). "Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos en España y Viabilidad del Plan Hidrológico Nacional 2000". [En línea] Red Temática de Ciencias de la Tierra de España [Fecha la consulta: 17 de Julio de 2008] Disponible en:<http://tierra.rediris.es/documentos/cambioclima.pdf>.

Báez J. (2006). "Tendencias de la evaporación. Cap VII .El Cambio climático en la Cuenca del Plata". Editores: Vicente Barros, Robin Clarke y Pedro Silva Días - 1a ed. - Buenos Aires : Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CONICET 232 p. ; ISBN 950-692-066-4.

Barros, V., Clarke, R. & Silva Días, P. (2006). "El Cambio Climático en la Cuenca del Plata". Buenos Aires, Argentina: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET.

Becker, Dan. (1997). "Global Warming Central: Debate numbers three". <http://www.law.pace.edu>.

Benavídez R., Díaz E. y O. Duarte (2001). "Eficiencia y rentabilidad del riego en cultivos de arroz y citrus". Fac Ciencias Agropecuarias- Universidad Nacional de Entre Ríos.

Benavídez, R. (2001). "Eficiencia y rentabilidad del riego en cultivos seleccionados (arroz y citrus). Análisis de su posible expansión". Facultad de Ciencias Agropecuarias-UNER, E. Ríos.

Berbery, E.; Doyle M. y V. Barros (2006). "Tendencias Regionales en la precipitación". Cap V .El cambio climático en la Cuenca del Plata. Editores: Vicente Barros, Robin Clarke y Pedro Silva Días - 1a ed. - Buenos Aires : Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CONICET 232 p. ; 23x16 cm. ISBN 950-692-066-4.

Bolzicco, J.; Paoli, C. U.; L. Fabiano (1990). "Modelo de balance mensual y su aplicación a la cuenca del arroyo Feliciano". Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Publ. F.I.C.H.-U.N.L.- N° 040-90.

Burkhardt R. & K. Woth (2007). "Extremes of near-surface wind speed over Europe and their future changes as estimated from an ensemble of RCM simulations", *Climatic Change*, 81:267–280 DOI 10.1007/s10584-006-9227-y

Cacik, P. (2002). "Diseño de la Red Hidrológica e Hidrometeoro lógica de la Zona Centro-Norte de la Provincia de Entre Ríos". Convenio: Consejo Federal de Inversiones – Dirección de Hidráulica de E. Ríos. Inédito.

Cabré, M.F., Solman, S.A. & M.N. Nuñez (2010). "Creating regional climate change scenarios over southern South America for the 2020's and 2050's using the pattern scaling technique: validity and limitations" In: *Climatic Change* (2010) 98:449–469. DOI 10.1007/s10584-009-9737-5. : Springer Science+Business Media.

Ceirano, E. B.; Morín J.; Zucarelli G.V.; Morresi, M.; Fabiano L. (1992). Modelo OCINE-2 en cuenca del A° Feliciano; segmentaciones diferentes. Publicación FICH-UNL N° 047/1992.

CIMA (2015). "Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones" Tercera Comunicación Nacional Sobre Cambio Climático. Buenos Aires, Argentina.: Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

CIRIA, 2007. "*The SUDS Manual*". Londres, UK: Construction Industry Resea CIOMTA. "2005". "Centro de Investigación Observación y Monitoreo Territorial y Ambiental". Boletín informativo de publicación trimestral- Año 2 – N° 5 y 6 – Marzo/Junio. Pág 2-13.

Chinowsky P., Hayles C., Schweikert A., Strzepek N., Strepek K., Schlosser A. (2011). Climate Change: comparative impact on developing and developed countries, *Engineering Project Organization Journal*, 1:1, 67-80

Chorley, R. Malm D. and H. Pogorzelski (1957). A new standard for estimating drainage basin shape. *Amer. J.Sci.* 255, 138-141.

Chow, V. T., Maidment D. y L. Mays (1994). *Hidrología Aplicada*, Mc Graw-Hill Interamericana, Santa Fe de Bogotá, Colombia. ISBN: 958-600-171-7. pp 299.

Comité Intergubernamental de la Cuenca del Plata (2005). "Programa Marco para la Gestión Sostenible de los recursos hídricos de la Cuenca del Plata, en

relación con los efectos hidrológicos de la variabilidad y el Cambio Climático”. PNUMA.

De Martonne, E. (1926). “Aréisme et l'indice d'aridité”. Comptes rendus de l'Academie des Sciences de Paris, 182.

Department of Climate Change, Australian Government, (2009). “Climate change risks to Australia's Coast”, A first pass national Assessment, <http://www.climatechange.gov.au/~media/publications/coastline/cc-risks-full-report.pdf>

Doré, G.; Drouin, P.; Pierre, P. and P. Desrochers (2005). “Estimation of the Relationships of Road Deterioration to Traffic and Weather in Canada”, Final Report, BPR Reference: M61-04-07 (60ET), TC Reference: T8080-04-0242.

Duarte, O.C.; Díaz, E.L.; E. Zamanillo (2005). “Proyecto Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Arroyo Feliciano”. Cátedra de Riego y Drenaje de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos.

Duarte, O.C. y E.L. Díaz (2006). “Caracterización hidrológica de la cuenca del río Paraná”. En: Bases para la Conservación de Suelos y Aguas en la Cuenca del Río Paraná, Editado por Antonio Paz González. Xunta de Galicia-UNER. Pág. 39-44.

Duarte, O.C.; Díaz, E.L.; Romero, E.C.; Chajud, A.; Rothman, S.; Lenzi, L. y A. Hillton (2007). “Evaluación agrohidrológica de represas de almacenamiento para riego de Entre Ríos”. XXI Congreso Nacional del Agua 2007. Mayo de 2007. San Miguel del Tucumán.

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. (2006) “Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos en el Litoral – Mesopotamia”. Resumen Ejecutivo Argentina. Actividades habilitantes para la 2ª Comunicación Nacional del Gobierno de la República Argentina a las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático TF 51287/AR. pag 129.

Fleming M.J. and W.A. Scharffenberg (2010). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual, v. 3.5. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineers Center.

Fowler, H.J.; Ekstrom, M.; Blenkinsop, M.S. and A.P. Smith (2007). “Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble”. Journal of Geophysical Research, Vol. 112, D18104,

doi:10.1029/2007JD008619, 2007, Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections, *Climatic Change*, 81:71–95 DOI 10.1007/s10584-006-9226-z.

Garat, E., (2017). “Incorporación de la incerteza del cambio climático en la gestión del drenaje urbano”. Tesis de doctorado, FCEIA, UNR, Rosario.

Gioria, R.; Paoli, C.U.; Ceirano, E.B.; Morin, J. y L.M. Lenzi (1986). “Modelo OCINE de simulación de crecidas y su aplicación”. Publicación FICH-UNL N°027.

Horton R. (1945). “Erosional development of streams and their drainage basins”; hydrophysical approach to quantitative morphology. En: *Geol. Soc. Am. Bull*, vol.56 pp 275 – 370.

Houghton, J.T., Jenkins, G.J. and J.J. Ephraums (1990). “The Climatic Change. Scientific Assessment of the IPCC. Cambridge University Press, trad. Por el Instituto Nacional de meteorología en 1992.

Houghton, J.T.; Callander, B.A. and S.K. Varney (1992). “Climate Change”. The Supplemental Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press. pp. 200.

IGM (2000). “SIG 250. Sistema de Información Geográfica de la República Argentina”. Escala 1:250.000. Formato Digital.

INCYTH (1986). “Mapa de Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la República Argentina a Escala 1:2.500.000”. Ezeiza. Pcia. de Buenos Aires

INCYTH (1990). “Mapa de cuencas hídricas de la República Argentina escala 1:250.000”. Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Hídricas. Buenos Aires. Argentina.

INTA – Estación experimental Agropecuaria Paraná. (1984). “Suelos y erosión de la Provincia de Entre Ríos” Tomo I. Plan Mapa de Suelos de la Provincia de Entre Ríos. Pág. 9 – 109.

INTA – Estación experimental Agropecuaria Paraná. (1986). “Cartas de Suelos de la República Argentina”. Departamento Feliciano. Provincia de Entre Ríos. Plan Mapa de Suelos.

INTA – Estación experimental Agropecuaria Paraná. (1990). “Cartas de Suelos de la República Argentina. Departamento La Paz. Tomo I. Provincia de Entre Ríos. Plan Mapa de Suelos.



INTA – Estación experimental Agropecuaria Paraná. (1993). “Cartas de Suelos de la República Argentina. Departamento Federal. Provincia de Entre Ríos. Plan Mapa de Suelos. Buenos Aires. Imprenta CONI S.A.C.I.F.I.

IPCC (2001). Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the . : Cambridge University Press.

IPCC (2002). Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Documento Técnico V: Cambio climático y biodiversidad. Editores: H. Gitay, A. Suárez, R.T.Watson y D.J. Dokken. OMM- PNUMA.

IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzer: Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.).

Köppen W. (1936). Der geographische System der Klimate“. En: Handbuch der Klimatologie. Vol. 1 (C). Borntraeger. Berlín. 44 p.

Lenzi, L.M. (2003). “Estimación de la disponibilidad del recurso hídrico superficial con destino a riego en una cuenca del centro-este de Entre Ríos”. Instituto Nacional del Agua. Centro Regional Litoral. Informe Final. Inédito.

Lenzi, L.M., Duarte, O. y E. Díaz. (2006). “Recursos Hídricos superficiales”. En el libro: “El Arroz. Su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos”. Editorial: Universidad Nacional de Entre Ríos y Ediciones de la Universidad Nacional del Litoral. Director de Obra: René A. Benavídez. ISBN: 950-698-168-X. Año de edición: 2006. Volumen: Uno. Pp 125 – 136.

Mehdi B., Webber H. y C. Madramootoo (2007). “El cambio climático global y el agua en la agricultura.” Revista de la red IPTRID. Número 26, Febrero 2007. Publicación semestral. ISSN 1021-268X. Pag 23-25.

Morín, J.; Lenzi, L.M.; Zucarrelli, V.; Paoli, C. U.; Ceirano, E.B. y L. Fabiano (1989). “Aplicación del modelo OCINE a la Cuenca del Arroyo Feliciano”. Publicación FICH-UNL N° 31.89. 43 páginas.

Morresi, M. V.; Zucarelli, G. V. y M. Paris (2006). “Modelación hidrológica de eventos máximos. Aplicación a la cuenca del arroyo Feliciano (Provincia de Entre Ríos-Argentina)”. Departamento Hidrología-Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.//www.hidricos.obraspublicas.gov.ar.

Nakicenovic, N y R. Swart. (2000). "Special Report on Emissions Scenarios". Cambridge University Press, Cambridge, UK. SRES [En línea] [Fecha la consulta: 9 de Julio de 2009] Disponible en:<<http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/023.htm>>.

Organización Meteorológica Mundial (1994) Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. Guía de prácticas hidrológicas. OMM N° 168. ISBN 92-63-30168-9. pp 818.

Paoli, C. U.; Bolzicco, J. y P. Cacik (1991). "Análisis de frecuencia para la determinación de la Crecida de diseño". FICH-UNL. 20 páginas.

Paoli, C.y G. Malinow (editores). 2010. Conclusiones. Publicación del Seminario-Taller Criterios para la determinación de crecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes. EdicionesUNL ISBN 978-987-657-371-9. Santa Fe.

Paoli, C.; Hämmerly, R.; Giacosa R.; Sosa D.; Cacik P. y A Villordo 2013. Los cambios Globales en el régimen hidrológico de la Cuenca del Arroyo Cululú. Capítulo 24 del libro – Bases conceptuales y metodológicas para el Ordenamiento Territorial en el Medio Rural - Región Centro, Argentina. Libroclíc Ediciones ISBN 978-987-29233-0-3

Pedraza, R. (1991). Estudio hidrológico rural cuenca río Gualaguaychú", Informe final, Convenio Consejo General de Inversiones Provincia de Entre Ríos, 1991.

Re, M. & Barros, V., 2009. "Extreme rainfalls in SE South America". Climatic Change, 96, 119–136.

Rojas, A.C. y J.H. Saluso (1987). "Informe Climático de la Provincia de Entre Ríos" INTA Paraná – Entre Ríos. Publicación Técnica n° 14.

Romero, E.C., Duarte, O.; Díaz, E. L. y R. Valenti (2007). "El Uso del Medio Natural en la Cuenca del Arroyo Feliciano". Determinación mediante SIG. Congreso sobre Uso y Manejo del Suelo. Coruña, 25 al 27 de junio de 2007. España. ISBN 987-84-9749-248-5.

Romero, E.C. (2013). Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y Bosques Nativos en la Cuenca del A° Feliciano, Entre Ríos, Argentina. Tesis de Doctorado. Instituto Universitario de Xeología de la Universidad de La Coruña.

Samper, J.; Alvares, D.; Pisani, B. y M. García (2007). "Evaluación del efecto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos en la cuenca del Ebro con

GIS\_BALAN".. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Vol VIII. Ed: Giráldez Cervera y F. Jiménez Hornero.

Saurral, R. y V. Barros (2009). Estudio de la climatología y la hidrología de la Cuenca del Plata en un conjunto de modelos climáticos globales. *Meteorológica*, 34

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable Nación. (2007) Segunda Comunicación de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Resumen Ejecutivo (200 pag)-Tomo I ( 670 pag.) y II (631 pag.).

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2009). "EL cambio climático en Argentina". 89 p. Edición Digital.

Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2001), "Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina".

Subsecretaría de Recursos Hídricos Nación (2009). Estadística Hidrológica". Disponible en World Wide Web: <<http://hidricos.obraspublicas.gov.ar/estad2008/principal.htm>>. [Consulta: Abril 2009].

Semenov, M.A. and E.M. Barrow (2002). "LARS-WG - User Manual-A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies". Developed by Mikhail A. Semenov Version 3.0- - August 2002.

Thornthwaite C. (1948).. "An approach towards a rational classification of climate".. Reprinted from *The Geographical Review*, 38 (1): 55-94.

USACE (United States Army Corps of Engineers), Hydrologic Engineers Center. 1994. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual.

U.S. Climate Change Science Program (2008). "Synthesis and Assessment Product, 2008, Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure": Gulf Coast Study, Phase I

UPADI. (2011). "Organizaciones de ingeniería civil firman protocolo sobre cambio climático". Recuperado el 7 de abril de 2011, de:[http://www.cfia.or.cr/boletin\\_UPADI/junio\\_09/documentos/Microsoft%20Word%20-%20noticias4.pdf](http://www.cfia.or.cr/boletin_UPADI/junio_09/documentos/Microsoft%20Word%20-%20noticias4.pdf) el 07 de abril de 2011.

Viner, D. and M. Hulme (1997). The climate impacts LINK Project.Hadley Centre for climate prediction and research.

Wilby R. and T. Wigley (2001). "Down-scaling general circulation issues in climateWorld Meteorological Organization, Manual on Stream Gauging. Fieldwork.

Volume I, Operational Hydrology Report N° 13, World Meteorological Organization- N° 519,” Geneva, Switzerland.

Wright, L.; Chinowsky, P.; Strzepek, K.; Jones, R.; Streeter, R.; Smith, J.B.; Mayotte, J.M.; Powell, A.; Jantarasami, L. and W. Perkins (2012). “Estimated effects of climate change on flood vulnerability of U.S. bridges, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change”, DOI: 10.1007/s11027-011-9354-2

World Meteorological Organization, (1980b). “Manual on Stream Gauging. Computation of discharge”. Volumes II, Operational Hydrology Report N° 13, World Meteorological Organization- N° 519, Geneva, Switzerland.

Zamanillo, E y G. Larenze (2008). “Tormentas de diseño para la Provincia de Entre Ríos”. Edit Universidad Tecnológica Nacional. ISBN 978-950-42-0109-0. Pp 109.

Zucarelli, G.V. y M. Morresi (2000). “Geomorfología Cuantitativa de la Cuenca del Arroyo Feliciano (Provincia de Entre Ríos)”. Cuadernos del CURiHAM. Vol. 6 N° 1. Primer Semestre 2000. Pp. 36-47.

Zucarelli, G.V.; Morresi, M. and R. Hammerly (2002). Evaluación preliminar de la red pluviométrica en la cuenca del A° Feliciano, E. Ríos, Argentina. Revista del CURiHAM- UNR, vol.8, N°1, pp 167-177.

## ANEXOS

### ANEXO I: Tratamiento estadístico de los caudales.

El comportamiento de las variables aleatorias discretas o continuas se describe con la ayuda de Distribuciones de Probabilidad. La variable se designa por mayúscula y un valor específico de ella por minúscula. Por  $P(x = a)$  se denota la probabilidad de que un evento asuma el valor  $a$ ; similarmente  $P(a \leq x \leq b)$  denota la probabilidad de que un evento se encuentre en el intervalo  $(a,b)$ . Si se conoce la probabilidad  $P(a \leq x \leq b)$  para todos los valores de  $a$  y  $b$ , se dice que se conoce la Distribución de Probabilidades de la variable  $x$ .

Por otro lado si  $x$  es un número dado y considerando la probabilidad  $P(X \leq x)$ :

$$F(x) = P(X \leq x):$$

y denominando a  $F(x)$  la función de distribución acumulada.

Las propiedades de las distribuciones pueden ser definidas completamente en términos de los momentos. Los momentos en estadística son similares a los momentos en física (rotación respecto al origen)

$$M^r = \int_{-\infty}^{\infty} x^r f(x) dx \quad \text{para la variable continua}$$

$$M^r = \sum_{j=1}^n x^r f(x) \quad \text{para la variable discreta}$$

o respecto a la media (eje de rotación diferente al origen)

$$M^r = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^r f(x) dx \quad \text{para la variable continua}$$

$$M^r = \sum_{j=1}^n (x - \mu)^r f(x) \quad \text{para la variable discreta}$$

## Parámetros Estadísticos

Los estadísticos extraen información de una muestra, indicando las características de la población. Los principales estadísticos son los momentos de primer, segundo y tercer orden correspondiente a la media, varianza, y asimetría respectivamente.

La media  $\mu$  es el valor esperado de la variable misma. Primer momento respecto al origen. Muestra la tendencia central de la distribución

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

el valor estimado de la media a partir de la muestra es

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

La Varianza  $\sigma^2$  mide la variabilidad de los datos. Es el segundo momento respecto a la media.

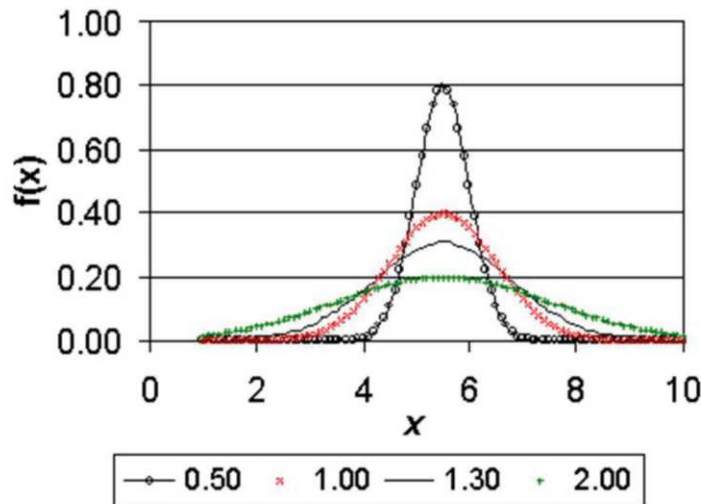
$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$$

El valor estimado de la varianza a partir de la muestra es

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

en el cual el divisor es n-1 en lugar de n para asegurar que la estadística de la muestra *no sea sesgada*, es decir, que no tenga una tendencia, en promedio, a ser mayor o menor que el valor verdadero.

Las unidades de la varianza son la media al cuadrado, la desviación estándar  $\sigma$  es una medida de la variabilidad que tiene las mismas dimensiones que la media y simplemente es la raíz cuadrada de la varianza, se estima por s. El significado de la desviación estándar se ilustra en la Figura 1.



**Figura 1.** Efectos de la función de densidad de probabilidad causados por cambios en la desviación estándar.

Coeficiente de variación  $C_v = \frac{\sigma}{\mu}$  es una medida adimensional de la variabilidad su estimado es  $C_v = \frac{s}{\bar{x}}$

El Coeficiente de asimetría  $\gamma$  mide la distribución de los valores de una distribución alrededor de la media se mide por la asimetría. Se obtiene a partir del tercer momento alrededor de la media, dividiéndolo por el cubo de la desviación estándar para que sea adimensional.

$$E[(x - \mu)^3] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 f(x) dx \quad \text{tercer momento respecto a la media}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sigma^3} E[(x - \mu)^3]$$

Un estimativo del coeficiente de asimetría está dado por  $C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2) * s^3}$

El Análisis de Frecuencia es una herramienta utilizada para, predecir el comportamiento futuro de los caudales en un sitio de interés, a partir de la información histórica de caudales. Es un método basado en procedimientos estadísticos que permite estimar la magnitud del caudal asociado a un período de retorno. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, La incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada. Cuando se pretende realizar extrapolaciones para períodos de retorno mayor que la longitud de la serie disponible, el error relativo asociado a la distribución de probabilidades utilizada es más importante, mientras que en interpolaciones la incertidumbre está asociada principalmente a la calidad de los datos a modelar; en ambos casos la incertidumbre es alta dependiendo de la cantidad de datos disponibles (*Ashkar, et al. 1994*). La extrapolación de frecuencias extremas en una distribución empírica de crecientes es extremadamente riesgosa (*Garcon, 1994*).

El análisis de frecuencia consiste en determinar los parámetros de las distribuciones de probabilidad y determinar con el factor de frecuencia la magnitud del evento para un período de retorno específico.

Las principales distribuciones de probabilidad utilizadas en hidrología, la forma de estimar sus parámetros, el factor de frecuencia y los límites de confianza son indicadores de que tanta incertidumbre se tiene con las extrapolaciones, puesto que determinan el rango de valores donde realmente estarían las variables, si el rango es muy grande la incertidumbre es muy alta y si es pequeño, por el contrario, habrá mucha confianza en el valor estimado.

La Distribución Normal es una distribución simétrica en forma de campana, también conocida como Campana de Gauss. Aunque muchas veces no se ajusta a los datos hidrológicos tiene amplia aplicación por ejemplo a los datos transformados que siguen la distribución normal. La Función de densidad se expresa por

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-1(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \quad -\infty < x < \infty$$

Los dos parámetros de la distribución son la media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$  para los cuales  $\bar{x}$  (media) y  $s$  (desviación estándar) son derivados de los datos. Y la estimación de parámetros se realiza mediante las fórmulas:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$



$$s = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

El Factor de frecuencia si se analizan con los X sin transformar el K se calcula como

$$K_T = \frac{x_T - \mu}{\sigma}$$

Este factor es el mismo de la variable normal estándar

$$K_T = F^{-1}\left(1 - \frac{1}{T}\right)$$

Por otra parte los límites de confianza se expresan como:

$$X_T \pm t_{(1-\alpha)} S_e$$

donde  $\alpha$  es el nivel de probabilidad  $t_{(1-\alpha)}$  es el cuantil de la distribución normal estandarizada para una probabilidad acumulada de  $1-\alpha$  y  $S_e$  es el error estándar

La distribución lognormal de dos parámetros se aplica si los logaritmos Y de una variable aleatoria X se distribuyen normalmente se dice que X se distribuye normalmente.

Esta distribución es muy usada para el cálculo de valores extremos por ejemplo Qmáx, Qmínimos, Pmáx, Pmínima. Tiene la ventaja que  $X > 0$  y que la transformación Log tiende a reducir la asimetría positiva ya que al utilizar logaritmos se reducen en mayor proporción los datos mayores que los menores. Presenta la limitación que tiene solamente dos parámetros, y requiere que los logaritmos de las variables estén centrados en la media. Su función de densidad se expresa como:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{\sigma_y^2}\right\} \quad x > 0$$

$y = \ln x$

donde:

$Y = \ln x$

$\mu_y$  media de de los logaritmos de la población (parámetro escalar), estimado  $\bar{y}$

$\sigma_y$  Desviación estándar de los logaritmos de la población estimado.

La estimación de parámetros se realiza mediante la ecuación:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i)$$

$$s_y = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(x_i) - \bar{y})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

#### **Factor de frecuencia:**

Puede trabajarse en el campo original y en el campo transformado.

1. Campo transformado: Si se trabaja en el campo transformado se trabaja con la media y la desviación estándar de los logaritmos, así:

$$\ln(X_{Tr}) = x_{Tr} + K S_y$$

de donde,

$$X_{Tr} = e^{\ln(x_{Tr})}$$

con K con variable normal estandarizada para el tiempo de recurrencia determinado  $T_r$ ,  $x_y$  media de los logaritmos y  $S_y$  es la desviación estándar de los logaritmos.

En el caso del análisis del campo original: Si se trabaja con los X sin transformar el coeficiente K se calcula como

$$Kt = \frac{\text{Exp}\left\{K_T * (\text{Ln}(1 + Cv^2))^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\text{ln}(1 + Cv^2)}{2}\right)\right\} - 1}{Cv}$$

K es la variable normal estandarizada para el  $T_r$  dado,  $Cv = \frac{s}{x}$  es el coeficiente de variación, x media de los datos originales y s desviación estándar de los datos originales.

Los límites de confianza en el campo transformado se expresan mediante la fórmula:

$$\text{Ln}(X_{T_r}) \pm t_{(1-\alpha)} S_T$$

$$S_e = \frac{(\delta S_y)}{\sqrt{n}} \quad \delta = \left(1 + \frac{K_T^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

donde:

n : número de datos

Se: error estándar

$K_T$ : variable normal estandarizada.

La distribución Gumbel o Extrema Tipo I es una familia importante de distribuciones usadas en el análisis de frecuencia hidrológico es la distribución general de valores extremos, la cual ha sido ampliamente utilizada para representar el comportamiento de crecientes y sequías (máximos y mínimos).

Su Función de densidad se expresa como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[\frac{-x - \beta}{\alpha} - \exp\left(\frac{-x - \beta}{\alpha}\right)\right]$$

En donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la distribución.

La estimación de parámetros para esta distribución se estiman mediante la relación:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s$$

$$\beta = \bar{x} - 0.5772\alpha$$

donde  $\bar{x}$  y  $s$  son la media y la desviación estándar estimadas con la muestra.

Por otro lado el Factor de frecuencia se estima mediante la fórmula:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.5772 + \ln \left[ \ln \left( \frac{T_T}{T_T - 1} \right) \right] \right\}$$

Donde  $T_r$  es el periodo de retorno. Para la distribución Gumbel se considera que el caudal para un período de retorno de 2.33 años es igual a la media de los caudales máximos.

Sus límites de confianza son:

$X_t \pm t_{(1-\alpha)}$  Se

$$Se = \frac{\delta \cdot s}{\sqrt{n}}$$

$$\delta = [1 + 1.1396K_T + 1.1K_T^2]^{1/2}$$

$K_T$  es el factor de frecuencia y  $t_{(1-\alpha)}$  es la variable normal estandarizada para una probabilidad de no excedencia de  $1-\alpha$ .

La distribución Gamma de Tres Parámetros o Pearson Tipo 3 ha sido una de las más utilizadas en hidrología. Como la mayoría de las variables hidrológicas son sesgadas, la función Gamma se utiliza para ajustar la distribución de frecuencia de variables tales como crecientes máximas anuales, Caudales mínimos, Volúmenes de flujo anuales y estacionales, valores de precipitaciones extremas y volúmenes de lluvia de corta duración. La función de distribución Gamma tiene dos o tres parámetros.

**Función de densidad:**

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left( \frac{x - \hat{x}_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp\left( - \frac{x - \hat{x}_0}{\alpha} \right)$$

donde,

$$\begin{aligned} x_0 \leq x < \alpha & \text{ para } \alpha > 0 \\ \alpha < x \leq x_0 & \text{ para } \alpha < 0 \end{aligned}$$

$\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de escala y forma, respectivamente, y  $x_0$  es el parámetro de localización.

La estimación de los parámetros para esta distribución se realiza mediante las ecuaciones:

$$\beta = \left( \frac{2}{C_s} \right)^2; \quad \alpha = s \frac{C_s}{2}; \quad \hat{x}_0 = \bar{x} - \alpha \beta$$

Cs es el coeficiente de asimetría,  $\bar{x}$  y  $s$  son la media y la desviación estándar de la muestra respectivamente.

El factor de frecuencia se expresa como:

$$K \approx z + (z^2 - 1) \frac{Cs}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left( \frac{Cs}{6} \right)^2 - (z^2 - 1) \left( \frac{Cs}{6} \right)^3 + z \left( \frac{Cs}{6} \right)^4 + \frac{1}{3} \left( \frac{Cs}{6} \right)^5$$

donde z es la variable normal estandarizada. El valor de K se encuentra tabulado de acuerdo al valor de Cs calculado con la muestra.

Los Intervalos de confianza son:

$$X_t \pm t_{(1-\alpha)} Se$$

$$Se = \frac{\delta \cdot S}{\sqrt{n}}$$

Donde S es la desviación estándar de la muestra, n es el número de datos y  $\delta$  se encuentra tabulado en función de Cs y Tr.

Si los logaritmos Y de una variable aleatoria X se ajustan a una distribución Pearson tipo III, se dice que la variable aleatoria X se ajusta a una distribución Log Pearson Tipo III. Esta distribución es ampliamente usada en el mundo para el análisis de frecuencia de Caudales máximos. Esta se trabaja igual que para la Pearson Tipo III pero con  $X_y$  y  $S_y$  como la media y desviación estándar de los logaritmos de la variable original X.

La función de densidad se expresa como:

$$f(x) = \frac{1}{x^\alpha \Gamma(\beta)} \left( \frac{\ln(x) - y_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left( - \frac{\ln(x) - y_0}{\alpha} \right)$$

donde,

$y_0 \leq y < \alpha$  para  $\alpha > 0$

$\alpha \leq y \leq y_0$  para  $\alpha < 0$

$\alpha\beta$  son los parámetros de escala y forma, respectivamente, y  $y_0$  es el parámetro de localización.

Para la estimación de los parámetros se aplican las fórmulas:

$$\hat{\beta} = \left( \frac{2}{C_s} \right)^2; \quad \alpha = s_y \frac{C_s}{2}; \quad \hat{x}_0 = \bar{x}_y - \alpha \hat{\beta}$$

donde  $C_s$  es el coeficiente de asimetría,  $\bar{x}_y$  y  $s_y$  son la media y la desviación estándar de los logaritmos de la muestra respectivamente.

Para determinar el factor de frecuencia se utilizan las fórmulas:

$$\ln(Y_{Tr}) = \bar{x}_y + K * s_y$$

$$K \approx z + (z^2 - 1) \frac{C_s}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left( \frac{C_s}{6} \right)^2 - (z^2 - 1) \left( \frac{C_s}{6} \right)^3 + z \left( \frac{C_s}{6} \right)^4 + \frac{1}{3} \left( \frac{C_s}{6} \right)^5$$

donde  $z$  es la variable normal estandarizada

Este valor de  $K$  se encuentra tabulado de acuerdo al valor de  $C_s$  calculado con la muestra.

Los intervalos de confianza pueden estimarse mediante la fórmula:

$X_t \pm t_{(1-\alpha)} Se$

$$Se = \frac{\delta \cdot S_y}{\sqrt{n}}$$

Donde  $S_y$  es la desviación estándar de los logaritmos de la muestra,  $n$  es el número de datos y  $\delta$  se encuentra tabulado en función de  $C_s$  y  $Tr$ .

Para el ajuste de Distribuciones de la modelación de caudales máximos se utilizan, entre otras, las distribuciones Log - Normal, Gumbel y Log-Gumbel

principalmente. Para seleccionar la distribución de probabilidades de la serie histórica se deben tener en cuenta algunas consideraciones.

Cuando en la serie histórica se observan “outliers1[1]” es necesario verificar la sensibilidad del ajuste debido a la presencia de estos, (*Ashkar, et al. 1994*). Para el ajuste a las distribuciones Log-Normal, Log-Gumbel y Log-Pearson se requiere transformar la variable al campo logarítmico para modelarla, con lo que se disminuye la varianza muestral, pero también se filtran las variaciones reales de los datos. Las distribuciones de dos parámetros fijan el valor del coeficiente de asimetría, lo que en algunos casos puede no ser recomendable.

La distribución Log - Normal de dos parámetros sólo es recomendable si el coeficiente de asimetría es cercano a cero. Las distribuciones Gumbel y Log - Gumbel son recomendables si el coeficiente de asimetría de los eventos registrados es cercano a 1.1. Para ajustar distribuciones de tres parámetros (Log Normal III, Log Pearson) se requiere estimar el coeficiente de asimetría de la distribución; para ello es necesario disponer de una serie con longitud de registros larga, mayor de 50 años, (*Kite, 1988*). Las distribuciones de dos parámetros son usualmente preferidas cuando se dispone de pocos datos, porque reducen la varianza de la muestra, (*Ashkar, et al. 1994*).

Es por ello que para seleccionar la distribución de probabilidades adecuada se debe tratar de utilizar información adicional del proceso hidrológico que permita identificar la forma en que se distribuye la variable. Usualmente es muy difícil determinar las propiedades físicas de los procesos hidrológicos para identificar el tipo de distribución de probabilidad que es aplicable.

*Kite (1988)* y *Mamdouh (1993)* afirman que no existe consistencia sobre cuál es la distribución que mejor se ajusta a los caudales máximos y recomiendan seleccionar el mejor ajuste a criterio del modelador con la prueba de ajuste gráfico o basado en el comportamiento de las pruebas estadísticas de bondad del ajuste (por ejemplo Chi Cuadrado, Smirnov-Kolmogorov, Cramer-Von Mises) en las que se calcula un estimador y se compara con un valor tabulado para determinar si el ajuste es adecuado o no. En la prueba de ajuste gráfica se dibujan los valores registrados en la serie contra la distribución teórica de probabilidades y de manera visual (subjetiva) se determina si el ajuste es adecuado o no.

Cuando la información es adecuada el análisis de frecuencia es la metodología más recomendable para la evaluación de eventos extremos, ya que la estimación depende solamente de los caudales máximos anuales que han ocurrido



en la cuenca y no da cuenta de los procesos de transformación de la precipitación en escorrentía. Obviamente tiene algunas limitaciones relacionadas con el comportamiento de la serie histórica y con el tamaño y calidad de los datos de la muestra.

Cuando se presenten cambios o tendencias en la serie histórica se deben utilizar técnicas estadísticas que permitan removerlos para poder realizar el análisis de frecuencias (Kite, 1988; Mamdouh, 1993; Ashkar, et al. 1994).

La selección inadecuada de la distribución de probabilidades de la serie histórica arrojará resultados de confiabilidad dudosa, (Ashkar, et al. 1994).

El tamaño de la muestra influye directamente en la confiabilidad de los resultados, así a mayor período de retorno del estimativo mayor longitud de registros necesarios para mejor confiabilidad en los resultados.

El ajuste a distribuciones se puede hacer de dos técnicas, con el factor de frecuencia o determinando la distribución empírica de los datos muestrales, por el Método de Plotting Position.

El Método "Plotting Position" trabaja con la probabilidad de excedencia asignada a cada valor de la muestra. Se han propuesto numerosos métodos empíricos. Si  $n$  es el total de valores y  $m$  es el rango de un valor en una lista ordenada de mayor a menor ( $m=1$  para el valor máximo) la probabilidad de excedencia se puede obtener por medio de las siguientes expresiones

$$P = \frac{m}{n}$$

California

$$P = \frac{m}{n+1}$$

Weibull

$$P = \frac{2m-1}{2n}$$

Hazen

La expresión más utilizada es la Weibull. Con las anteriores expresiones se halla lo que se conoce como la distribución empírica de una muestra, esta luego se puede ajustar a una de las distribuciones teóricas presentadas anteriormente. Los resultados pueden ser dibujados en el papel de probabilidad; este es diseñado para

que los datos se ajusten a una línea recta y se puedan comparar los datos muestrales con la distribución teórica (línea recta).

Para determinar que tan adecuado es el ajuste de los datos a una distribución de probabilidades se han propuesto una serie de pruebas estadísticas que determinan si es adecuado el ajuste. Estos son análisis estadísticos y como tal se deben entender, es decir, no se puede ignorar el significado físico de los ajustes.

### Prueba Smirnov- Kolmogorov

El estadístico Smirnov Kolmogorov considera la desviación de la función de distribución de probabilidades de la muestra  $P(x)$  de la función de probabilidades teórica, escogida  $P_0(x)$  tal que

$$D_n = \max(P(x) - P_0(x))$$

La prueba requiere que el valor  $D_n$  calculado con la expresión anterior sea menor que el valor tabulado  $D_n$  para un nivel de probabilidad requerido. Esta prueba es fácil de realizar y comprende las siguientes etapas:

El estadístico  $D_n$  es la máxima diferencia entre la función de distribución acumulada de la muestra y la función de distribución acumulada teórica escogida.

Se fija el nivel de probabilidad  $\alpha$ , valores de 0.05 y 0.01 son los más usuales.

El valor crítico  $D_\alpha$  de la prueba debe ser obtenido de tablas en función de  $\alpha$  y  $n$ . Si el valor calculado  $D_n$  es mayor que el  $D_\alpha$ , la distribución escogida se debe rechazar.

La Prueba Chi Cuadrado es una medida de las discrepancias entre las frecuencias observadas ( $f_o$ ) y las frecuencias calculadas ( $f_c$ ) por medio de una distribución teórica está dada por el estadístico  $\chi^2$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_o - f_c)^2}{f_c} \quad \text{en donde} \quad \sum f_o = \sum f_c$$

Si el estadístico  $\chi^2=0$  significa que las distribuciones teórica y empírica ajustan exactamente, mientras que si el estadístico  $\chi^2>0$ , ellas difieren.

La distribución del estadístico  $\chi^2$  se puede asimilar a una distribución Chi-cuadrado con  $(k-n-1)$  grados de libertad, donde  $k$  es el número de intervalos y  $n$  es

el número de los parámetros de la distribución teórica. La función  $\chi^2$  se encuentra tabulada.

Si se supone una hipótesis  $H_0$  es aceptar que una distribución empírica se ajusta a una distribución Normal. Si el valor calculado de  $\chi^2$  por la ecuación anterior es mayor que algún valor crítico de  $\chi^2$ , con niveles de significancia  $\alpha$  de 0.05 y 0.01 (el nivel de confianza es  $1-\alpha$ ) se puede decir que las frecuencias observadas difieren significativamente de las frecuencias esperadas (o calculadas) y entonces la hipótesis  $H_0$  se rechaza, si ocurre lo contrario entonces se acepta.

Aunque no existe una definición generalmente aceptada, se puede entender como valores extremos, muy superiores a los demás registrados (*Ashkar, et al. 1994*).

### **PERÍODO DE RETORNO PARA DISEÑO**

En la elección del período de retorno, frecuencia o probabilidad a utilizar en el diseño de una obra, es necesario considerar la relación existente entre la probabilidad de excedencia de un evento, la vida útil de la estructura y el riesgo de falla aceptable, dependiendo, este último, de factores económicos, sociales, ambientales, técnicos y otros.

La confiabilidad del diseño, representada por la probabilidad que no falle la estructura durante el transcurso de su vida útil, considera el hecho que no ocurra un evento de magnitud superior a la utilizada en el diseño durante la vida útil, es decir, no debe presentarse un evento de magnitud superior a la usada en el diseño durante el primer año de funcionamiento de la estructura, durante el segundo, y así sucesivamente. Dado que la probabilidad de ocurrencia para cada uno de estos eventos es independiente, la probabilidad de falla o riesgo ( $r$ ) durante el período de vida útil de la estructura se determina mediante la siguiente expresión, en función del período de retorno ( $T$ , años) y la vida útil ( $n$ , años):

$$r = 1 - (1-1/T)^n$$

Teniendo presente los conceptos antes analizados, así como la experiencia nacional y de otros países, se deberán emplear para el diseño de las diferentes obras de drenaje de las Carreteras (Autopistas, Rutas Primarias y Secundarias) y de los caminos (Colectores, Locales y de Desarrollo).

Es importante recalcar que un valor de diseño correspondiente a un período de retorno de 50 años, tiene en promedio una probabilidad de ser igualado o superado igual a 0,02 en un año cualquiera; sin embargo, la probabilidad que sea igualado o sobrepasado en un período de 10 años sube a 0,18; en un período de 25 años sube a 0,38 y en un período de 50 años sube a 0,64. Es decir, se requiere usar en el diseño un período de retorno alto, para contar con una seguridad de

funcionamiento razonable de la obra durante su vida útil.

El análisis de frecuencia de las crecidas registradas utiliza la información histórica para predecir los eventos futuros. Este análisis es esencial en obras de importancia, y en cursos de agua con régimen permanente y registros de caudal. La curva de frecuencia de crecidas, que asocia a cada crecida una probabilidad de ocurrencia, puede abordarse por ajuste gráfico a los puntos observados o por el uso de modelos de distribución de probabilidades.

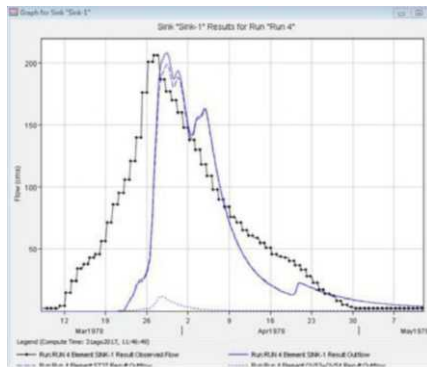
La información necesaria para realizar este análisis está constituida por la crecida máxima instantánea o máxima diaria observada en cada uno de los años de registro, denominándose a la muestra en este caso, serie anual. Para utilizar este análisis de frecuencia es deseable contar con un mínimo de 20 años de registro. En situaciones de registros más cortos se recurre al uso de las llamadas series parciales, las cuales se forman seleccionando todas las crecidas mayores que un cierto límite fijado arbitrariamente.

Tanto el análisis de series parciales como anuales, exige que los eventos seleccionados sean estadísticamente independientes entre sí (no pertenezcan a la misma crecida) y que se compruebe debidamente la calidad y representatividad de la información. Los resultados utilizando series anuales o parciales son prácticamente coincidentes para períodos de retorno superiores a 10 años.

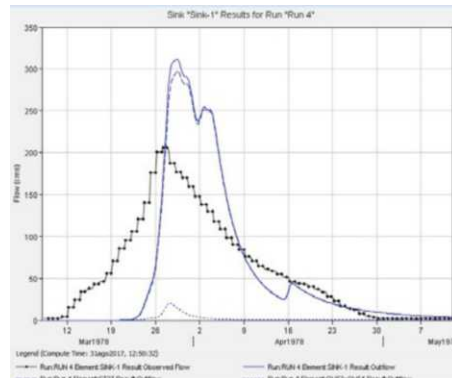
## ANEXO 2.

### Hidrogramas observados, simulados, y simulados con CC

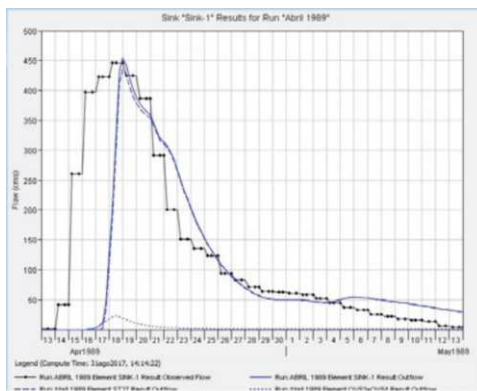
Marzo 78, SIN CC:



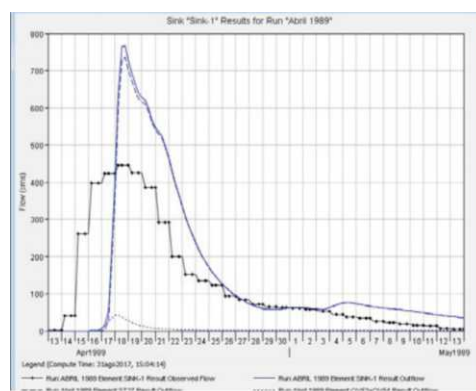
Marzo 78, con CC 20%:



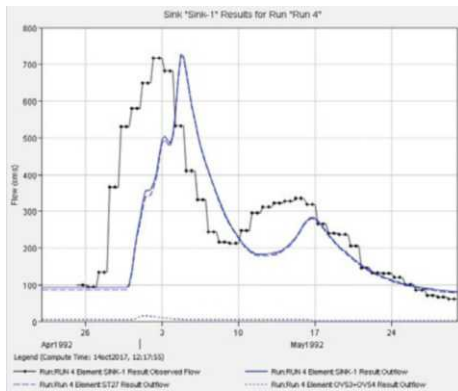
Abril 1989 sin CC:



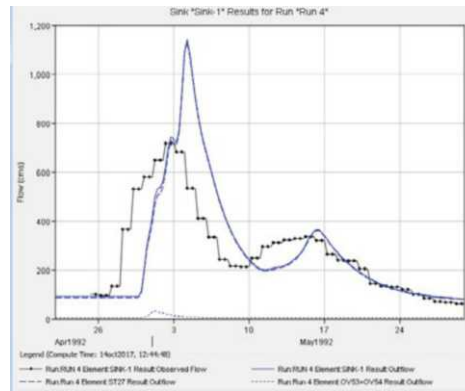
Abril 1989 CC20%:



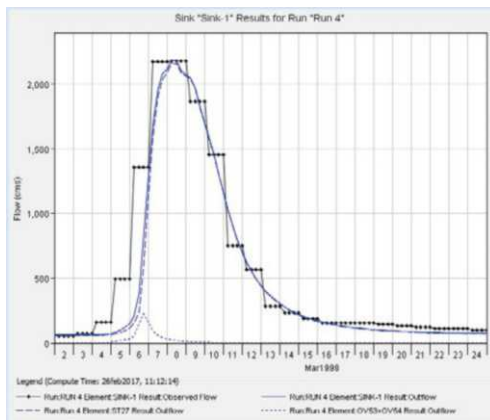
Crecida Mayo 1992, s/CC:



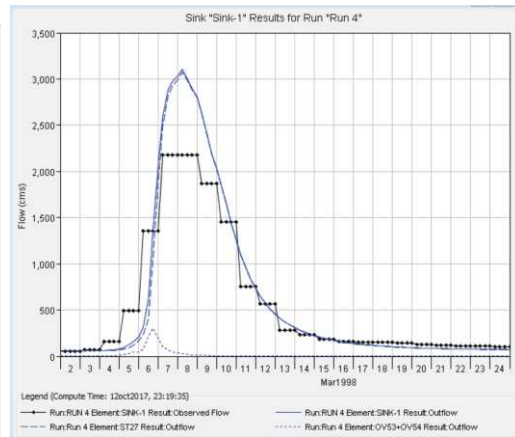
Mayo 1992, c/CC:



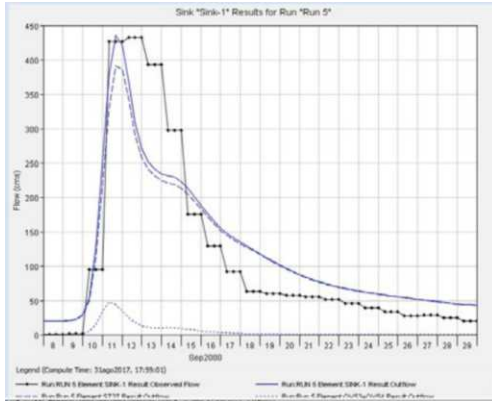
Crecida 1998-marz-08



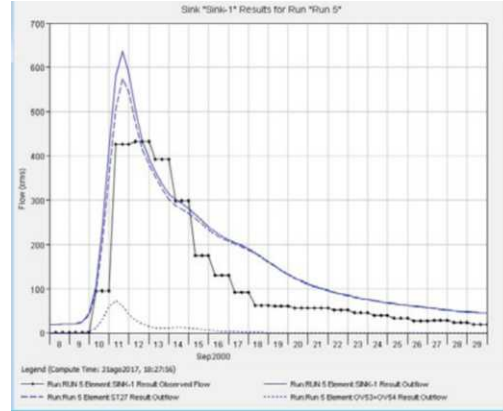
Crecida 1998-marz-08, c/CC20%



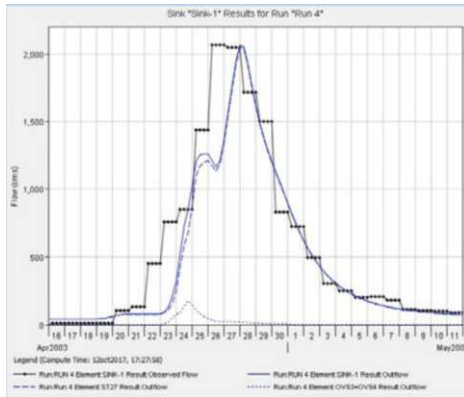
Felic- sept 2000 SIN CC:



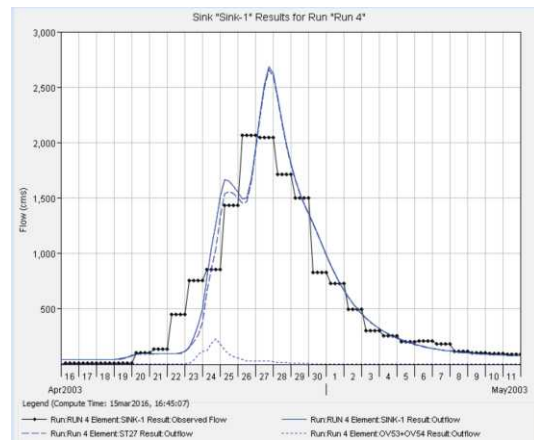
Felic- sept 2000 CC20%:



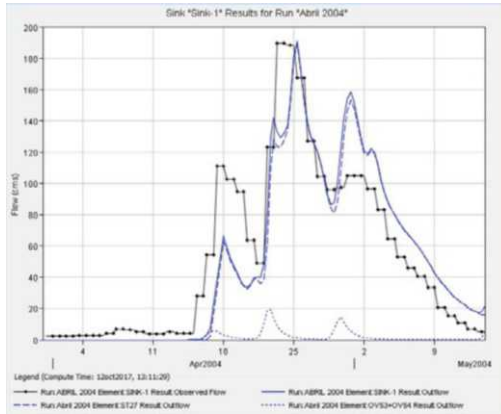
Crecida 2003-Abril



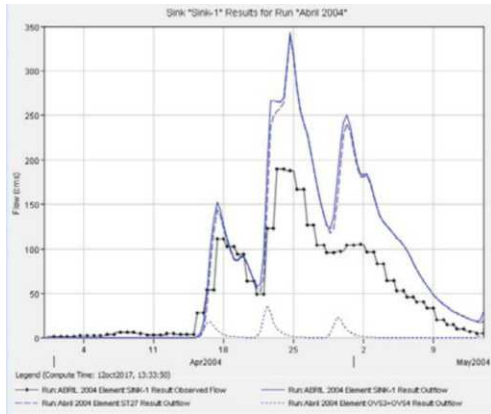
Crecida 2003-Abril, c/CC



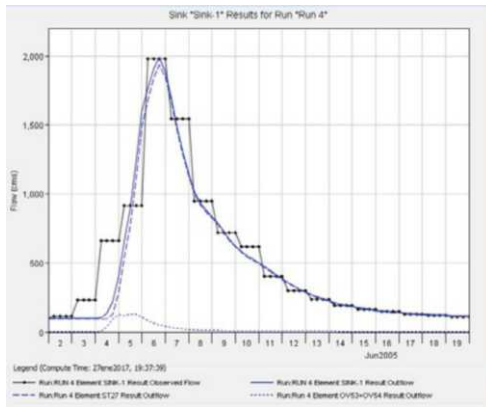
Crecida 2004-04:



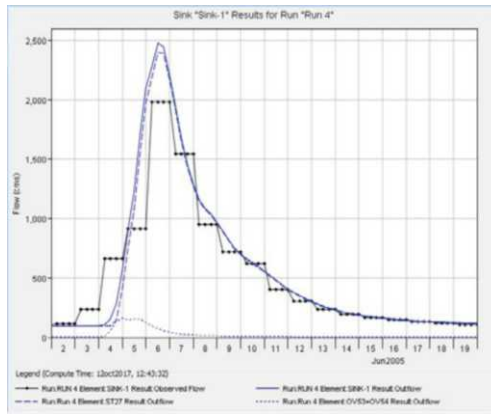
Crecida 2004-04, c/CC:



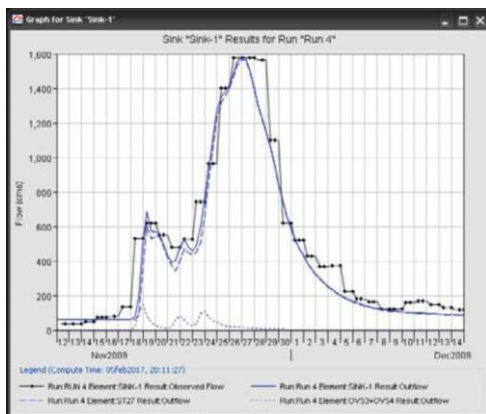
Crecida 2005-06



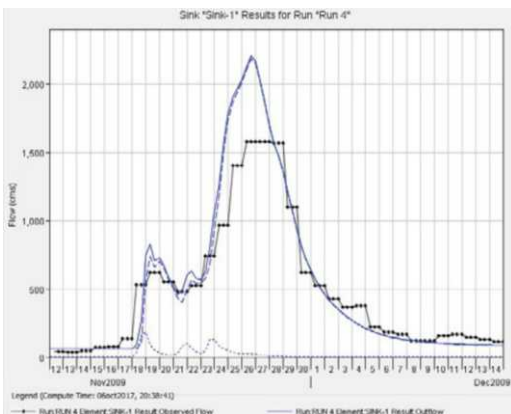
Crecida 2005-06, c/CC



Crecida 2009-11:

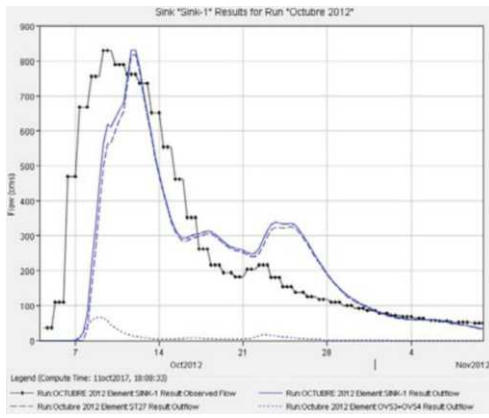


Crecida 2009-11, c/CC:





Crecida 2012-10:



Crecida 2012-10, c/CC:

