

# Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Respuesta del sistema delta del río Paraná, en la provincia de Entre Ríos, ante una crecida media ordinaria  
*Carñel, Griselda - Díaz, Eduardo - Zarate, Judith - Boschetti, Norma G. - Duarte, Oscar*

El efecto de las estructuras de defensa costera en las localidades de Mar Chiquita y Mar de Cobo, provincia de Buenos Aires

*San Martín, Laura - Buniconro, María P. - Marcomini, Silvia C. - López, Rubén A.*

Protección invisible de un edificio sobre la duna frontal en la playa de Pehuen-co, provincia de Buenos Aires

*Caló, Jorge - Caputo, Ricardo - Di Martino, Claudina - Marcos, Angel*

Implementación de un modelo matemático distribuido de escurrimiento superficial en la cuenca del Río Tercero - Carcarañá

*Stenta, Hernán - Riccardi, Gerardo - Basile, Pedro - Trivisonno, Franco*

El acuífero libre costero de Monte Hermoso, Argentina. Generalidad. Recurso y reserva

*Di Martino, Claudina - Albouy, René - Cifuentes, Olga - Marcos, Angel*

Análisis de riesgo de inundación mediante modelación de escurrimiento en zona urbana de la ciudad de Oberá, Misiones

*Rodríguez, Tomás - Riccardi, Gerardo - Ruberto, Alejandro*

Las obras de intervención sobre la planicie de inundación del Paraná y el desarrollo urbano del área de Santa Fe

*Sato, Rodolfo - Mihura, Enrique - García, María Daniela - Birri, María Laura - Mines, Patricia*

Morfometría comparada de tres cuencas hídricas en la ladera occidental de la sierra de Comechingones.

San Luis, Argentina

*Sosa, Graciela - Ojeda, Guillermo*

Predicción de inundaciones y sistemas de alerta: Avances usando datos a tiempo real

en la cuenca del arroyo del Azul

*Cazenave, Georgina - Vives, Luis*

Evaluación del riesgo sísmico para Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina, aplicando el programa Selena

*Abascal, Liliana del Valle - González Bonorino, Gustavo*

Portada: Túnel en la Ruta Nacional N° 150 - San Juan, Argentina. *Fotografía: Franco M. Francisca*

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



**Revista de Geología  
Aplicada a la Ingeniería  
y al Ambiente**

ISSN 2422 - 5703  
  
 9 772422 570003


**ASAGAI**  
 ASOCIACIÓN ARGENTINA  
 DE GEOLOGÍA APLICADA  
 A LA INGENIERÍA

Córdoba - Argentina

# **Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente**

Publicación Oficial de



Maipú 645, Piso 1° - C1006ACG  
Ciudad Autónoma de Buenos Aires

editores@asagai.org.ar  
www.asagai.org.ar  
Tel/Fax (011)4322-2820

Número 33 • 2014

ISSN 2422 - 5703





---

## REVISTA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA Y AL AMBIENTE

### EDITOR JEFE

*MSc Geólogo Norberto Jorge Bejerman*  
Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba  
Argentina  
editores@asagai.org.ar

### EDITOR ASOCIADO

*Prof. Dr. José Chacón*  
Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad de Granada  
España  
jchacon@ugr.es

### COMITÉ EDITORIAL

*Prof. Dr. Helder Iglésias Chaminé*  
Departamento de Engenharia Geotécnica  
Politécnico do Porto  
Portugal  
hic@isep.ipp.pt

*Dra. Silvina A. Marfil*  
Departamento de Geología  
Universidad Nacional del Sur  
Argentina  
smarfil@uns.edu.ar

*Dr. Julio Luis del Río*  
Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario  
Unidad Nacional de Mar del Plata  
Argentina  
julioluisdelrio@gmail.com

*Dra. Graciela E. Tello*  
Universidad Nacional de la Patagonia Austral  
Unidad Académica Río Turbio. Santa Cruz  
Argentina  
gtello28@yahoo.com

*Prof. Dr. Luis I. González de Vallejo*  
Departamento de Geodinámica  
Universidad Complutense de Madrid  
España  
vallejo@geo.ucm.es

*Dra. Ofelia Tujchneider*  
Departamento de Hidrología y Ambiente  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad nacional de El Litoral. Santa Fe  
Argentina  
pichy@fich1.unl.edu.ar

### SECRETARIO

*Dr. Francisco Locati*  
CICTERRA (CONICET - UNC)  
Argentina  
flocati@efn.uncor.edu

### PRODUCCIÓN EDITORIAL

Encargada de Diseño *Paula Paredes*  
paulaparedes13@hotmail.com

Webmaster *Guillermo Saint*  
saintdisegno@arnet.com.ar

---

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

**COMISIÓN DIRECTIVA 2010 - 2014**

PRESIDENTE	<i>Norberto Jorge Bejerman</i>
VICEPRESIDENTE	<i>Fabio S. Luna</i>
SECRETARIO	<i>Rubén A. López</i>
TESORERO	<i>Adrián Angel Silva Busso</i>
VOCAL TITULAR	<i>Cristina Dapeña</i>
VOCAL TITULAR	<i>Mabel Mena</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Luis Mario Giaconi</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>José L. Guerrero</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>Fernando Díaz</i>
REVISOR DE CUENTAS SUPLENTE	<i>Carlos Marconi</i>

Maipú 645, Piso 1º - C1006ACG - Ciudad Autónoma de Buenos Aires  
asagai@asagai.org.ar  
www.asagai.org.ar

# INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Staff		I
Comisión Directiva		II
Respuesta del sistema delta del río Paraná, en la provincia de Entre Ríos, ante una crecida media ordinaria	<i>Carñel, Griselda - Díaz, Eduardo - Zarate, Judith - Boschetti, Norma G. - Duarte, Oscar</i>	1
El efecto de las estructuras de defensa costera en las localidades de Mar Chiquita y Mar de Cobo, provincia de Buenos Aires	<i>San Martín, Laura - Buniconro, María P. Marcomini, Silvia C. - López, Rubén A.</i>	13
Protección invisible de un edificio sobre la duna frontal en la playa de Pehuen-co, provincia de Buenos Aires	<i>Caló, Jorge - Caputo, Ricardo - Di Martino, Claudina - Marcos, Angel</i>	25
Implementación de un modelo matemático distribuido de escurrimiento superficial en la cuenca del Río Tercero - Carcarañá	<i>Stenta, Hernán - Riccardi, Gerardo - Basile, Pedro - Trivisonno, Franco</i>	33
El acuífero libre costero de Monte Hermoso, Argentina. Generalidad. Recurso y reserva	<i>Di Martino, Claudina - Albouy, René - Cifuentes, Olga - Marcos, Angel</i>	43
Análisis de riesgo de inundación mediante modelación de escurrimiento en zona urbana de la ciudad de Oberá, Misiones	<i>Rodriguez, Tomás - Riccardi, Gerardo - Ruberto, Alejandro</i>	51
Las obras de intervención sobre la planicie de inundación del Paraná y el desarrollo urbano del área de Santa Fe	<i>Sato, Rodolfo - Mibura, Enrique - García, María Daniela - Birri, María Laura - Mines, Patricia</i>	63
Morfometría comparada de tres cuencas hídricas en la ladera occidental de la sierra de Comechingones. San Luis, Argentina	<i>Sosa, Graciela - Ojeda, Guillermo</i>	73
Predicción de inundaciones y sistemas de alerta: Avances usando datos a tiempo real en la cuenca del arroyo del Azul	<i>Cazenave, Georgina - Vives, Luis</i>	83
Evaluación del riesgo sísmico para Tolhuín, Tierra del Fuego, Argentina, aplicando el programa Selena	<i>Abascal, Liliana del Valle - González Bonorino, Gustavo</i>	93
Instrucciones para autores		107
Formulario de suscripción o compra		111



## MISIÓN Y OBJETIVOS DE LA PUBLICACIÓN

### Misión y objetivos de la publicación

La *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* es la publicación oficial en Argentina de la asociación miembro de la *International Association of Engineering Geology and the Environment*. La *Geología Aplicada a la Ingeniería* se define, en los estatutos de la IAEG, como "la ciencia dedicada a la investigación, estudio y solución de los problemas ambientales e ingenieriles que correspondan como resultado de la interacción entre la geología y las obras y actividades del ser humano, así como de la predicción y del desarrollo de medidas previsoras o de corrección de los peligros geológicos". La *Geología Aplicada a la Ingeniería* comprende: "la definición de la geomorfología, estructura, estratigrafía, litología y los acuíferos de las formaciones geológicas, las propiedades químicas e hidráulicas de todos los materiales involucrados en la construcción, extracción de recursos y cambio ambiental; la valoración del comportamiento hidrológico y mecánico de los suelos y macizos rocosos; la predicción de los cambios de las anteriores propiedades con el tiempo; la determinación de los parámetros a tener en cuenta en el análisis de estabilidad de las obras de ingeniería y de los terrenos; el mantenimiento y mejora de la condición ambiental del terreno"

La *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* tiene por objeto fomentar la publicación y difusión de artículos originales de calidad en todos los ámbitos propios, así como la difusión de noticias sobre eventos y publicaciones de interés en la temática. Está dirigida a científicos y profesionales geólogos, ingenieros y tecnólogos.

En todos los casos, las opiniones vertidas en esta publicación son responsabilidad de los autores y no reflejan posiciones oficiales de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería. Todos los artículos son sometidos a un proceso de revisión por pares a cargo de especialistas de reconocido prestigio que colaboran, a tal fin, voluntariamente y sin lucro alguno, con la Revista.

### Leyenda de protección de derechos de autor

Todos los artículos publicados en esta Revista cuentan con protección de los derechos de autor. Ninguna parte del material publicado aquí podrá ser reproducido, transmitido, almacenado o utilizado en ninguna forma o por cualquier medio gráfico, electrónico, o mecánico, incluyendo, pero no limitándose a, el fotocopiado, grabación, escaneo, digitalización, grabación en cinta, distribución en la Web, redes de información, o sistemas de almacenamiento y recuperación, sin permiso previamente aceptado del Editor.

El autor podrá incluir una versión del artículo en su propio sitio Web o en el de su institución. Los Autores podrán reproducir el Artículo, total o parcialmente, y difundir su contenido o ponerlo a disposición del público, en formato impreso o electrónico, como parte de un contenido docente o como una recopilación, para su uso en el ámbito académico o de investigación en la institución a la que pertenezcan, citando que fue publicado en la revista.

### Precio de la revista

Quienes estén interesados en adquirir un ejemplar de la Revista, cuyo costo es de 400 pesos, deberán contactarse con la Editorial ([editores@asagai.org.ar](mailto:editores@asagai.org.ar)).

En la página 111 encontrará el formulario a completar a tal efecto



## Aims and objectives

*The Journal of Engineering and Environmental Geology (JEEG) is the official publication in Argentina of the corresponding association of the **International Association of Engineering Geology and the Environment**. "Engineering geology, is defined in the statutes of the IAEG as the science devoted to the investigation, study and solution of engineering and environmental problems which may arise as the result of the interaction between geology and the works or activities of man, as well as of the prediction of and development of measures for the prevention or remediation of geological hazards. Engineering geology embraces: the definition of the geomorphology, structure, stratigraphy, lithology and ground water conditions of geological formations; the characterisation of the mineralogical, physico-geomechanical, chemical and hydraulic properties of all earth materials involved in construction, resource recovery and environmental change; the assessment of the mechanical and hydrological behaviour of soil and rock masses; the prediction of changes to the above properties with time; the determination of the parameters to be considered in the stability analysis of engineering works and earth masses; the improvement and maintenance of the environmental condition and properties of the terrain".*

*The aims of this journal are the publication and diffusion of original quality paper in all related fields and also the diffusion of news about related events and publications of interest. It is addressed to scientist and professional geologists, engineers and technologists.*

*In any case, the opinions expressed in this publication are responsibility of the authors and do not reflect official positions of the Argentina Association of Engineering Geology. All items are submitted to a peer review process by renowned specialists who collaborate to that end, voluntarily and without any profit, with the Journal.*

## Authors Copyrights

*All papers published in this Journal are protected by copyrights. No part of published material covered herein may be reproduced, transmitted, stored, or used in any form or by any means graphic, electronic, or mechanical, including but not limited to photocopying, recording, scanning, digitizing, taping, Web distribution, information networks, or information storage and retrieval systems, without a previously accepted permission by the Editor.*

*The author(s) will be allowed to include a paper version in his own or institutional Web site. The author(s) may reproduce the paper, totally or partially, and diffuse it contain or let it available to the public in impressed or electronic format only as a part of a teaching context or as a state-of-the art reviewing, for it use in a academic context or for researches in their institution, by citing its previous publication in this Journal.*

## Price of the Journal

*All interested in buying a copy of any Journal issue, with the actual cost of ARS 400, should be in contact with the Editor ([editores@asagai.org.ar](mailto:editores@asagai.org.ar)).*

*In page 111 an application form to be fulfilled and sent to the Editor is available.*



## Respuesta del sistema delta del río Paraná, en la provincia de Entre Ríos, ante una crecida media ordinaria

## Response of the Paraná river delta system, in the province of Entre Ríos, to an ordinary average river rising

Carñel, Griselda <sup>1</sup>✉ - Díaz, Eduardo - Zarate, Judith - Boschetti, Norma G. - Duarte, Oscar

Recibido: 22 de abril de 2014 • Aceptado: 24 de noviembre de 2014

### Resumen

*El Delta del Paraná está originado por el aporte sedimentario del río Paraná. Sus depósitos representan el cambio ambiental de estuárico a fluvial en el río de la Plata y se encuentran entre los 2 m y el nivel del mar actual. Consiste en un conjunto de islas y una compleja red de cursos fluviales que, en algunos sectores, varían de posición por erosión y depósito.*

*El objetivo de este trabajo fue identificar las superficies no afectadas por la inundación, (suelo firme y humedales) durante la crecida ordinaria del río Paraná en el período julio-septiembre de 2013 en el Delta entrerriano, utilizando herramientas de teledetección y SIG.*

*Se trabajaron imágenes del satélite Landsat 8 delimitando siete "zonas modales" representativas de la geomorfología del Delta. Se analizaron alturas hidrométricas en once puertos y en cinco fechas a lo largo de la crecida.*

*Se confirmó la transferencia de flujos laterales entre el curso principal y el valle. En los casos de intervención antrópica, el proceso es magnificado, las zonas modales tienen comportamientos diferentes. Se observó que el nivel del río en los puertos de Paraná, Rosario y Diamante se aproximó a los niveles de alerta, mientras que en Villa Paranacito se mantuvieron casi constantes, verificándose la capacidad de amortiguación del valle. Consecuentemente, la limpieza de los cursos del valle de inundación con sentido de escurrimiento hacia el río Paraná permitirá una rápida evacuación del agua mitigando los efectos de crecidas de baja recurrencia, sin afectar los humedales típicos.*

**Palabras clave:** Delta del río Paraná - crecidas ordinarias - Landsat 8 - flujos laterales - modificación.

### Abstract

*The Paraná River Delta is composed of sediment particles from the Paraná River. Its sediments represent the environmental change from estuary to fluvial in the Plata River and they are found between the 2 m and the current sea level. The Paraná Delta is made up of an island set and a complex fluvial course network that in some areas varies in position due to erosion and deposition.*

1. Universidad Nacional de Entre Ríos, Facultad de Ciencias Agropecuaria. Ruta provincial N°11 km 10, Oro Verde - Entre Ríos.

✉ gecarñel@yahoo.com.ar

The purpose of this work was to identify the surfaces not affected by the river rising (lands not subject to flooding and wetlands) due to an ordinary Paraná River rising during the period July-September 2013 in the Entre Ríos Delta using remote sensing tools and GIS. Images from Landsat 8 satellite were studied and seven representative "modal zones" of Delta geomorphology were delimited. Hydrometric heights were analyzed from eleven ports and in five different dates along the river rising. The transference of lateral flows between the main course and the valley was confirmed. The process is magnified in cases of antropoc intervention. Modal zones showed different behaviors. It was observed that the river level in the Ports of Paraná, Rosario and Diamante was near to alert levels, while in Villa Paranacito Port, it was found to be almost constant being the valley amortiguation capacity verified. Consequently, cleaning the courses of the flooding valley flowing into the Paraná River will allow a quick drainage of water reducing the effects of low recurrence risings without affecting the typical wetlands.

**Keywords: Paraná River Delta - ordinary river risings - Landsat 8 - lateral flows - modification.**

## INTRODUCCIÓN

La Cuenca del Delta del Paraná, se desarrolla sobre la margen Nororiental de la provincia de Buenos Aires, el Sur de Entre Ríos y una porción relativamente pequeña del Oeste de Santa Fe. La mayor parte se encuentra en la provincia de Entre Ríos ocupando un 80% de la superficie, luego continúa Buenos Aires con el 15% y por último, la provincia de Santa Fe con un 5%.

El área de estudio corresponde a la provincia de Entre Ríos, dónde el Delta comprende los departamentos de Diamante, Paraná, Victoria, Gualeguay, Gualeguaychú e Islas del Ibicuy; con una superficie de 1.952.984,43 hectáreas.

El Delta del Paraná es una típica forma de agradación progradante originada en un neto ambiente fluvial por el aporte sedimentario del río Paraná. Sus depósitos representan el cambio ambiental de estuárico a fluvial en el río de la Plata y se encuentran entre los 2 m y el nivel del mar actual. Consiste en un conjunto de islas y una compleja red de cursos fluviales que, en algunos sectores, varían de posición por erosión y depósito. El Delta puede definirse como un vasto macrosistema de humedales donde influyen las características propias del paisaje. El curso principal del río Paraná se encuentra excavado en sedimentos pre-holocenos y holocenos con profundidades de más de 20 m (Cavallotto, et al., 2005). En su tramo final corre dentro de una llanura aluvial con un caudal de 16.000 m<sup>3</sup>/s que puede llegar a 60.000 m<sup>3</sup>/s en las crecidas extraordinarias y forma un amplio delta que comienza a la altura de la localidad de Diamante en Entre Ríos y finaliza en el río de la Plata.

El Delta del Paraná está considerado como un macrosistema de humedales debido a su extensión e importancia, ya que es uno de los ecosistemas más productivos del planeta.

La Convención sobre Humedales (Ramsar, 1971) define a un humedal como "las extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporarias, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda los seis m". Para este trabajo, se considera un humedal al sitio donde: se encuentra en algún momento del año presencia de agua, ya sea saturando los suelos o cubriéndolo superficialmente ó a escasa profundidad y que cuente con especies vegetales adaptadas a condiciones de anegamiento, así como la ausencia de aquellas no tolerantes a los pulsos de inundación (Kalesnik y Quintana, 2006)

El Delta del Paraná es una región heterogénea con una gran diversidad de recursos y en consecuencia, con una gran variedad de actividades productivas que dependen principalmente de los servicios ambientales de los humedales.

Las crecidas del río Paraná (a partir del Paraná Medio) corresponden a los eventos denominados de tipo "lentas"; se manifiestan en un lapso que permite advertir a la población. Se asocian al binomio "crecida-estiaje", dónde el elemento común a ambas es la precipitación que, con sus excesos y déficit en un territorio determinado, genera daños y deterioros en el paisaje cultural, aunque constituyen episodios naturales del funcionamiento, estructura y dinámica del sistema natural (Fritschy, 2012).

Los niveles hidrométricos registrados en el Delta para 2013 corresponden a una crecida ordinaria del río, con una recurrencia del orden de 2 años (Zamanillo et al., 2013).

La característica hidráulica principal en el Delta entrerriano, es el elevado valor del cociente: radio de curvatura sobre el ancho de cauce. Este proceso fluvial activo retrabaja los sedimentos previamente depositados, principalmente los de las llanuras de avenamiento impedido y la llanura de mareas. Esta es una zona con cotas de 6 a 8 msnm. Es así que los cursos fluviales discurren por canales más estables que en el Delta inferior propiamente dicho (Boschetti et al., 2013).

En el Delta, Los eventos de inundación se producen cuando el nivel normal de los ríos es alterado por alguno de los siguientes factores:

- Mareas luni-solares que tienen su influencia sobre el estuario del río de la Plata y provocan oscilaciones periódicas en el nivel de agua.
- Crecidas del río Uruguay relacionadas con precipitaciones en la alta cuenca (al menos en el Delta Frontal)
- Crecidas del río Paraná relacionadas con precipitaciones en la alta cuenca, aportes de agua de los cursos que desembocan en el Delta, y que localmente pueden producir un efecto similar aunque de menor intensidad.
- Vientos del sector Sudeste que provocan dificultades en la evacuación del agua provocando desbordes e inundando zonas anegadizas. Esto puede complicarse en conjunto con otros eventos meteorológicos o aportes de agua de la alta cuenca
- Onda oceánica: la onda de marea oceánica que llega a la desembocadura del río de la Plata se interna en el estuario pero sufriendo deformaciones a medida que avanza en el río. Aunque el volumen de agua que descargan

en el río de la Plata sus grandes afluentes es casi constante, no lo es de forma continua pues la onda de marea eleva o disminuye su superficie. La onda modifica la descarga de los afluentes, creando situaciones hidráulicas en el estuario, de las cuales resultan corrientes de direcciones y velocidades variables.

El río Paraná tiene un sistema de crecidas cuya permanencia puede variar entre un mes (ordinarias) y 6 meses (crecida extraordinaria, como la de 1983). Según estos tiempos de permanencia, el sistema hidrológico se comporta de diferentes maneras, lo que puede ser explicado por la diferencia de velocidades entre el curso principal del río Paraná y el de su valle de inundación.

Durante el inicio de un evento de crecida la respuesta de los niveles hidrométricos en el cauce principal reacciona más rápidamente que en el valle de inundación, dando lugar a una transferencia lateral desde el curso principal hacia el valle.

En el caso inverso, cuando se produce el período de receso, el valle de inundación por la red de drenaje mantiene más tiempo el volumen de agua almacenado, y por ende los niveles hidrométricos son superiores a los del cauce principal. De ésta forma, el sistema descarga lentamente hacia el curso principal.

La teledetección es una técnica, cuyo nombre proviene del inglés "remote sensing", que se refiere no sólo a la captación de datos a distancia, sino también a su posterior tratamiento. Es por lo tanto, una técnica de adquisición y procesamiento de datos de la superficie terrestre a través de sensores remotos y sistemas computacionales. El fundamento teórico en que se basa la teledetección es la interacción entre la materia observada y el flujo radiativo, y en que cada cuerpo reacciona ante él según su composición y estado energético. Dicho de otra forma, los cuerpos pueden emitir, absorber, reflejar o transmitir energía electromagnética y su comportamiento dependerá de las características de la energía incidente, pero fundamentalmente de su temperatura y composición interna.

Su aplicación en los recursos naturales se basa en que los elementos de la naturaleza tienen una respuesta espectral propia que se denomina signatura espectral. De esta forma estudia las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, y pone de manifiesto las correlaciones existentes entre éstas y las características de los diferentes materiales terrestres. Entre las ventajas proporcionadas por estos sistemas destacan, la cobertura global y exhaustiva, perspectiva panorámica, observación multiescala, información sobre regiones no visibles del espectro, multitemporalidad de las observaciones, transmisión a tiempo real y registro digital de la información (Chuvioco, 2002).

Se trabajó con Sistema de Información Geográfica como una herramienta que permite "una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión" (Langle, R. 2013).

La metodología SIG se ha incorporado en diversos campos, siendo utilizada para realizar mapas de recursos mineros, evaluación de impacto ambiental, manejo de recursos naturales, paisaje, realización de censos, análisis y evaluación ambiental y prevención de desastres naturales.

Los SIG y la teledetección desempeñan un papel importante, para analizar y relacionar los datos referidos a un área

dada, especialmente en lo que refiere a detección -directa o indirecta-, extrapolación e interpolación, cálculo de áreas, seguimiento y modelación (Van Lynden y Mantel, 2001).

## OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fue identificar las superficies no afectadas por la inundación, (suelo firme y humedales) durante la crecida ordinaria del río Paraná en el período julio-septiembre de 2013 en el Delta entrerriano, con respecto a la situación de alturas medias utilizando herramientas de teledetección y SIG.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con imágenes correspondiente al satélite Landsat 8. Éste fue puesto en órbita el 11 de Febrero de 2013 y cuenta con dos instrumentos de toma de datos: el OLI (Operational LandImager, o Generador Operacional de Imágenes de Tierra) y el TIRS (Thermal Infrared Sensor, o Sensor Infrarrojo Térmico).

- OLI (Operational LandImager): es una cámara para observación de la Tierra en ocho rangos de longitudes de onda (visible a infrarrojo cercano). Tiene 30 metros de resolución en modo multiespectral y 15 metros en modo pancromático, cubriendo un ancho de 185 kilómetros de la superficie terrestre.
- TIRS (Thermal Infrared Sensor): es una cámara infrarroja que se utiliza para medir y cuantificar la gestión de los recursos hidrológicos en la agricultura. Tiene una resolución de 100 metros y las imágenes obtenidas tienen un ancho de 185 kilómetros. (Ariza, 2013)

Se procesaron seis imágenes OLI Landsat 8 (Tabla 1), obtenidas de la página web del Servicio Geológico de Estados Unidos.

**Tabla 1. Imágenes obtenidas de Landsat 8, según las escenas y fechas.**

Escena	Fechas	
225 - 083	25 de julio 2013	10 de agosto 2013
225 - 084	25 de julio 2013	27 de septiembre 2013
226 - 083	16 de julio 2013	17 de agosto de 2013

Las escenas de Landsat 8 tienen un total de 11 bandas espectrales, 9 tomadas por el OLI y 2 por el TIRS. Para el análisis de las imágenes, se utilizaron las bandas 1 a 7 y 9 y se trabajó con el programa ERDAS IMAGINE® Versión 8.4 (ERDAS Inc., 1999).

Cartográficamente se utilizó la Proyección de Gauss-Krüger en Faja 5, Sistema de Referencia Global WGS84.

Para la sistematización de los datos atributivos y vectoriales se usó el programa específico ArcGis 10® (Environmental Systems Research Institute, 2010).

A los efectos de reducir el procesamiento se delimitaron siete "zonas modales" (Figura 1) que son representativas de la geomorfología del Delta y que ya fueran definidas en un trabajo anterior de comparación multitemporal de situaciones hídricas en el área (Boschetti et al. 2013):

- Antiguo Delta o el actual Predelta

- Área Sur del Enlace Vial Rosario-Victoria (mixto)
- Isla Lechiguanas (Llanuras de mareas)
- Playas Norte (mixto)
- Playas Sur (Llanuras de playas)
- Antigua albufera
- Delta Actual.

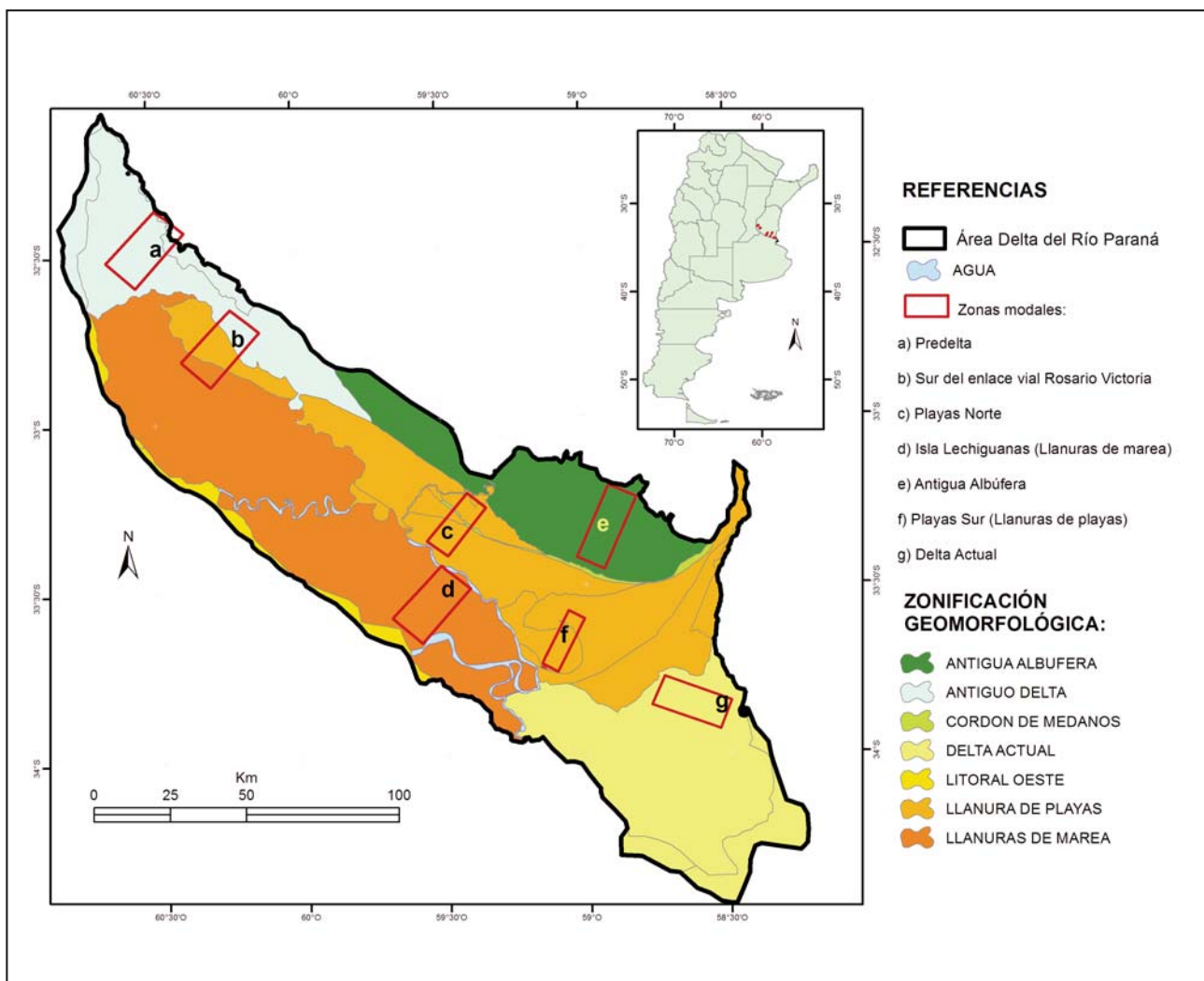
Dos de las zonas modales tienen una representación mixta:

- Sur del enlace vial Rosario-Victoria que está ocupada en un 42 % por “llanuras de playa” y en un 26 % por “llanuras de mareas”, siendo ambas estuáricas de ingresión marina; y el “antiguo delta” en un 32 % del área.
- Playas Norte constituidas por un 97 % de “llanuras de playa” y 3 % de “cordón de médanos”.

Se utilizaron los datos de niveles hidrométricos, tanto de alerta y evacuación (Tabla 2), como los correspondientes al período julio-septiembre de 2013, medidos por la Prefectura Naval Argentina.

**Tabla 2. Niveles de alerta y evacuación para los puertos que comprende el Delta entrerriano.**

Puertos	Nivel de alerta (m)	Nivel de evacuación (m)
Paraná	4,7	5,0
Diamante	5,3	5,5
Victoria	4,6	4,9
Rosario	5,0	5,3
San Nicolás	4,2	5,0
Ramallo	3,5	4,0
Villa Constitución	4,0	4,5
Puerto Ruiz	4,5	5,0
Baradero	2,8	3,1
San Pedro	3,4	3,6
Villa paranacito	2,3	2,6



**Figura 1. Ubicación de las zonas modales analizadas.**

## RESULTADOS

Se procesaron las imágenes digitalmente a los efectos de obtener subescenas por zonas modales. De ésta forma se obtuvieron catorce (14) nuevas imágenes multiespectrales. La superficie de las zonas modales se detalla en la Tabla 3.

Las clasificaciones no supervisadas digitales fueron realizadas solamente en éstas, a fin de identificar y cuantificar en tres categorías de ocupación de las mismas:

- Agua libre (lagunas, ríos, brazos, canales, etc.).
- Humedal (zona de la superficie que está temporal o permanentemente inundada con presencia de vegetación hidrófila).
- Suelo firme (albardones, suelos descubiertos, pasturas, cultivos y arenas).

**Tabla 3. Superficie que ocupa cada zona modal.**

Zona modal	Superficie (ha)
Predelta	29,470
Área Sur del Enlace Vial Rosario- Victoria (Mixto Playas Sur)	29,500
Isla Lechiguanas (Llanuras de mareas)	29,401
Playas Norte (mixto).	16,509
Playas al Sur (Llanuras de playas)	11,503
Antigua albufera.	25,656
Delta Actual.	23,832

En la tabla 4 se detalla la variación en superficie ocupada por las distintas categorías en las zonas modales ocurrida en fechas analizadas.

A partir de datos hidrométricos y las cotas IGN (Instituto Geográfico Nacional, ex Militar) del cero de los hidrómetros, se determinaron las cotas de “pelo de agua” en los puertos para las fechas analizadas, y la comparación con la de alerta del cauce principal y el valle de inundación, que comprenden el Delta entrerriano (Tabla 5).

Con los niveles hidrométricos trabajados, se observa que la diferencia entre evacuación y alerta oscila entre 30 cm y 50 cm. En el puerto de Paraná el 25 de julio, el nivel del agua sobrepasó la cota de alerta y sin llegar al nivel de evacuación comenzó la bajante. Situación similar se dió en el puerto de Diamante dónde el nivel del agua prácticamente llegó al nivel de cota de alerta el 16 de julio. En los puertos Victoria, Rosario, San Nicolás, Ramallo, Villa Constitución, Puerto Ruiz, Baradero y San Pedro, los niveles hidrométricos no alcanzaron al nivel de alerta. En el puerto de Villa Paracito, la altura del río permaneció constante por debajo de la cota de alerta para todas las fechas analizadas.

Se representaron las alturas hidrométricas (Figura 2) para el período analizado dónde se observa el desplazamiento del “pico de crecida” según la ubicación Norte-Sur del puerto.

**Tabla 4. Diferencia de superficie que ocupa cada categoría entre los meses de julio- septiembre de 2013.**

Zona modal	Categoría	agosto	julio	Diferencia (Ha)
Predelta	Agua	19876	12295	7581
	Humedal	7786	9783	-1996
	Suelo	2071	7662	-5590
Área Sur del Enlace Vial Rosario- Victoria (Mixto playas Sur)	Agua	18990	9853	9137
	Humedal	5900	10423	-4522
	Suelo	4873	9488	-4615
Isla Lechiguanas (Llanuras de mareas)	Agua	7863	12364	-4502
	Humedal	12431	12615	-185
	Suelo	9417	4783	4635
Playas Norte (mixto)	Agua	6312	6576	-265
	Humedal	4209	4380	-171
	Suelo	6141	5726	415
Playas al Sur (Llanuras de playas)	Agua	2607	2859	-252
	Humedal	4272	4354	-82
	Suelo	4717	4415	303
Antigua albufera.	Suelo	14283	14283	0
	Humedal	10309.6	10309,6	0
Delta Actual*	Agua	3380	3914	-534
	Humedal	9784	11441	-1657
	Suelo	10777	8273	2504

\*Para esta zona modal se tomaron los datos del mes de septiembre.

Tabla 5. Comparación de cotas I.G.M con respecto a la cota de alerta en los puertos analizados.

Puertos	16/07/13	25/07/13	10/08/13	17/08/13	27/09/13	Cota de Alerta
	Cotas I.G.M					
Paraná	13,8	14,6	13,9	13,6	12,0	14,3
Diamante	11,4	12,0	11,6	11,3	9,5	12,0
Victoria	5,4	5,7	6,2	6,1	5,1	6,3
Rosario	8,1	8,6	8,5	8,4	6,7	9,1
San Nicolás	5,0	5,3	5,3	5,3	4,0	6,2
Ramallo	4,2	4,4	4,6	4,4	3,3	5,0
Villa Constitución	5,4	5,8	5,8	5,8	4,4	6,1
Puerto Ruíz	2,3	2,3	2,6	2,1	2,1	5,2
Baradero	2,5	2,6	2,8	2,6	1,9	3,5
San Pedro	3,0	3,1	3,3	3,1	2,3	4,3
Villa Paranacito	1,1	1,1	1,4	0,9	0,9	2,0

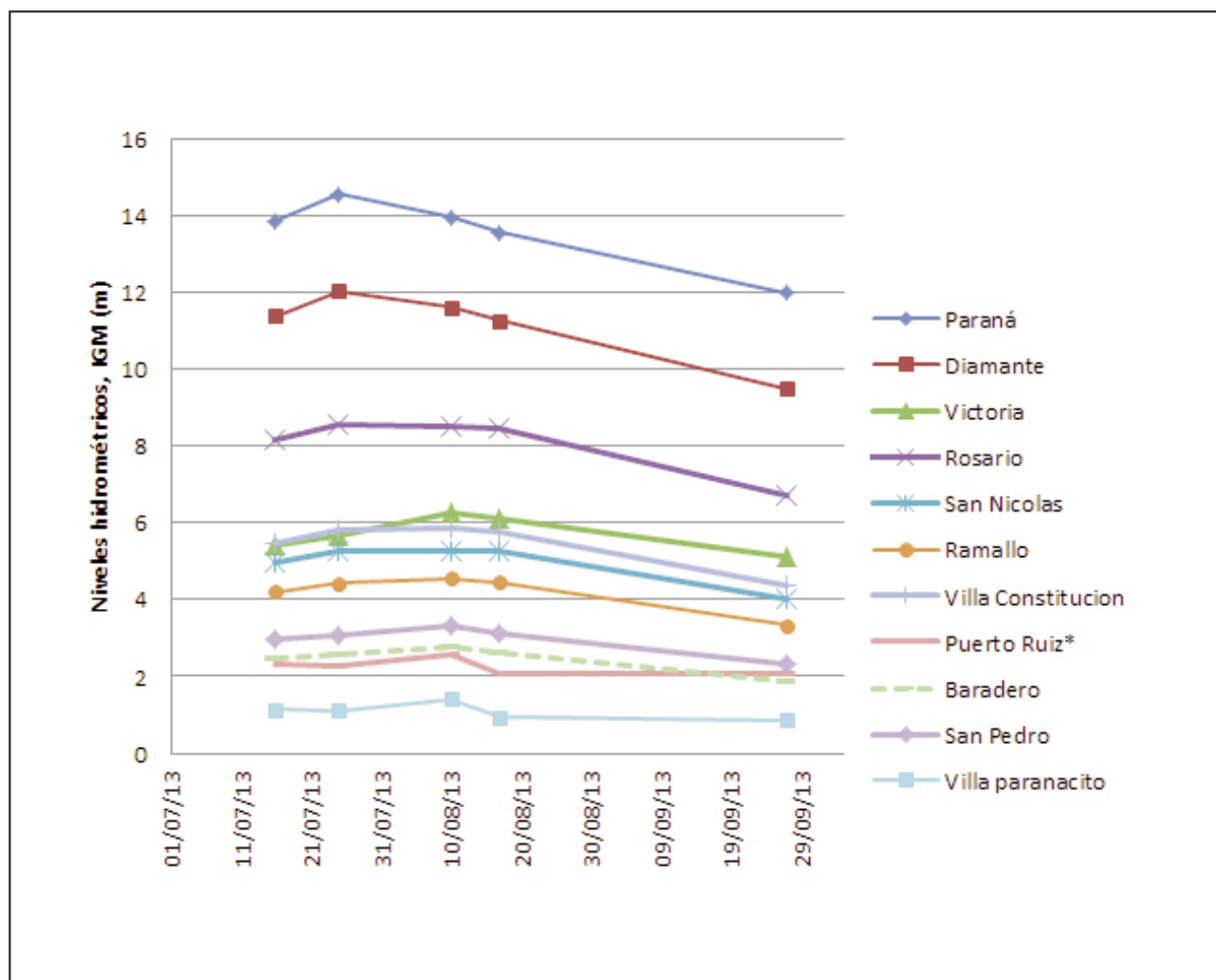


Figura 2. Gráfico de alturas hidrométricas periodo julio-septiembre de 2013.

A lo largo del avance de la onda de crecida se observa que los picos van disminuyendo aguas abajo. En lo que respecta al cauce principal, en los puertos de Paraná y Diamante los picos se producen en el mes de julio mientras que en Rosario y siguientes, se desplazan temporalmente hacia el mes de agosto. El impacto del almacenamiento del valle de inundación queda manifiesto en las escalas hidrométricas de los puertos que se encuentran aguas abajo, donde la diferencia de los niveles está en el orden del metro entre condiciones normales y el pico de crecida media ordinaria.

Con respecto a Puerto Ruiz, las variaciones se explican porque está medido en la desembocadura del río Gualeguay y su régimen se debe fundamentalmente a la influencia de las crecidas generadas por precipitaciones en su cuenca de aporte.

Los efectos de amortiguación hidráulica del sistema deltaico, se verifican a través del análisis de las imágenes (zonas modales) en el transcurso de la crecida ordinaria julio-septiembre de 2013.

A partir de las superficies con las diferentes categorías, se pudo comprobar cómo aumenta el área ocupada por agua en las zonas geomorfológicas de Predelta (categoría agua de un 26 % de julio a agosto) y Área Sur del Enlace Vial Rosario-Victoria (31 % en igual periodo). En cambio, en el resto de las zonas modales no se observó variación significativa.

En general, lo que ocurre en el Predelta se explica por la transferencia lateral de agua desde el cauce principal del río al valle de inundación durante el inicio del evento, así como de la menor velocidad del agua por la rugosidad y morfología del valle lo que se expresa en la permanencia del agua (Figura 3).

En la zona modal Área Sur del Enlace Vial Rosario-Victoria (Mixto Playas Sur) adicionalmente se presenta, el efecto de los terraplenes y puentes en la permanencia de niveles aguas abajo (Figura 4).

En la zona modal Llanuras de playas y cordón medano del centro del Delta, la inexistencia de variación se explica por ser un establecimiento protegido mediante un terraplén, así como por estar ubicado en la desembocadura del río Gualeguay, está más influenciado por éste, que por el Paraná en crecidas ordinarias.

En el caso Islas Lechiguanas el área ocupada por agua disminuye significativamente un 15 % de julio a septiembre, a expensas del crecimiento de suelo firme. Esto puede explicarse por la inercia de los niveles hidrométricos entre Norte-Sur, siendo un ejemplo típico de transferencia lateral (Figura 5). En las zonas delta actual y antigua albufera no existe variación importante en el nivel de inundación porque no hay afectación de la crecida media ordinaria del río Paraná, siendo el factor más importante la influencia del río Uruguay.

## CONCLUSIONES

A partir del uso de la teledetección y de la metodología SIG, se pudo analizar el impacto de las crecidas medias ordinarias sobre el valle de inundación del río Paraná en el Delta entrerriano.

Se confirmó el fenómeno de transferencia hidráulica (existencia de flujos laterales) entre el curso principal y el valle, en ambos sentidos, en los períodos de crecidas y bajantes ordinarias. En el caso particular de la zona modal Sur del Enlace Vial Rosario-Victoria (Mixto Playas Sur) este proceso de transferencia se ve magnificado por el impacto antrópico de dicho corredor vial.

Las siete zonas modales tienen comportamientos diferentes, en algunos este proceso no impacta significativamente. En otros, el funcionamiento hidráulico genera mayores cambios modificando los valores relativos de las categorías analizadas.

Se han encontrado diferencias significativas de hasta 2,9 metros entre la margen derecha del río Paraná y la margen izquierda del valle de inundación durante el pico de la crecida.

A través de la observación remota, se pudo observar el avance del agua proveniente del río Paraná en el Delta de Entre Ríos, así como de los niveles de alerta en los diferentes puertos para las fechas analizadas. En éstos se observó que el nivel del río en los puertos de Paraná, Rosario y Diamante se aproximó a los niveles de alerta; mientras que en Villa Paranacito se verificó la capacidad de amortiguación del valle en condiciones de crecidas ordinarias.

La limpieza de los cursos interiores en el valle de inundación (sentido de escurrimiento hacia el río Paraná), permitirá una rápida evacuación del agua almacenada en dicho sistema. De esta forma, será posible mitigar los efectos de crecidas de baja recurrencia con el consiguiente beneficio socio-productivo, sin afectar la presencia de los humedales típicos que caracterizan el área.

Los resultados del presente trabajo aportan elementos para la comprensión del funcionamiento hidrológico del sistema, lo que permitirá una adecuada planificación y gestión del uso socio-productivo del Delta.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco de los Proyectos: PID UNER 2143 "Diagnóstico de las condiciones del sistema socio productivo y ambiental del Delta del río Paraná" el que se encuentra financiado por la Universidad Nacional de Entre Ríos y el PICTO 2009 N° 211 "Diagnóstico ambiental, social y productivo del Delta del río Paraná" financiado por la ANPCYT, la UNER, el INTA y la CAFESG.

A la Lic. Adriana N. Gigena por su desinteresada colaboración en la revisión.



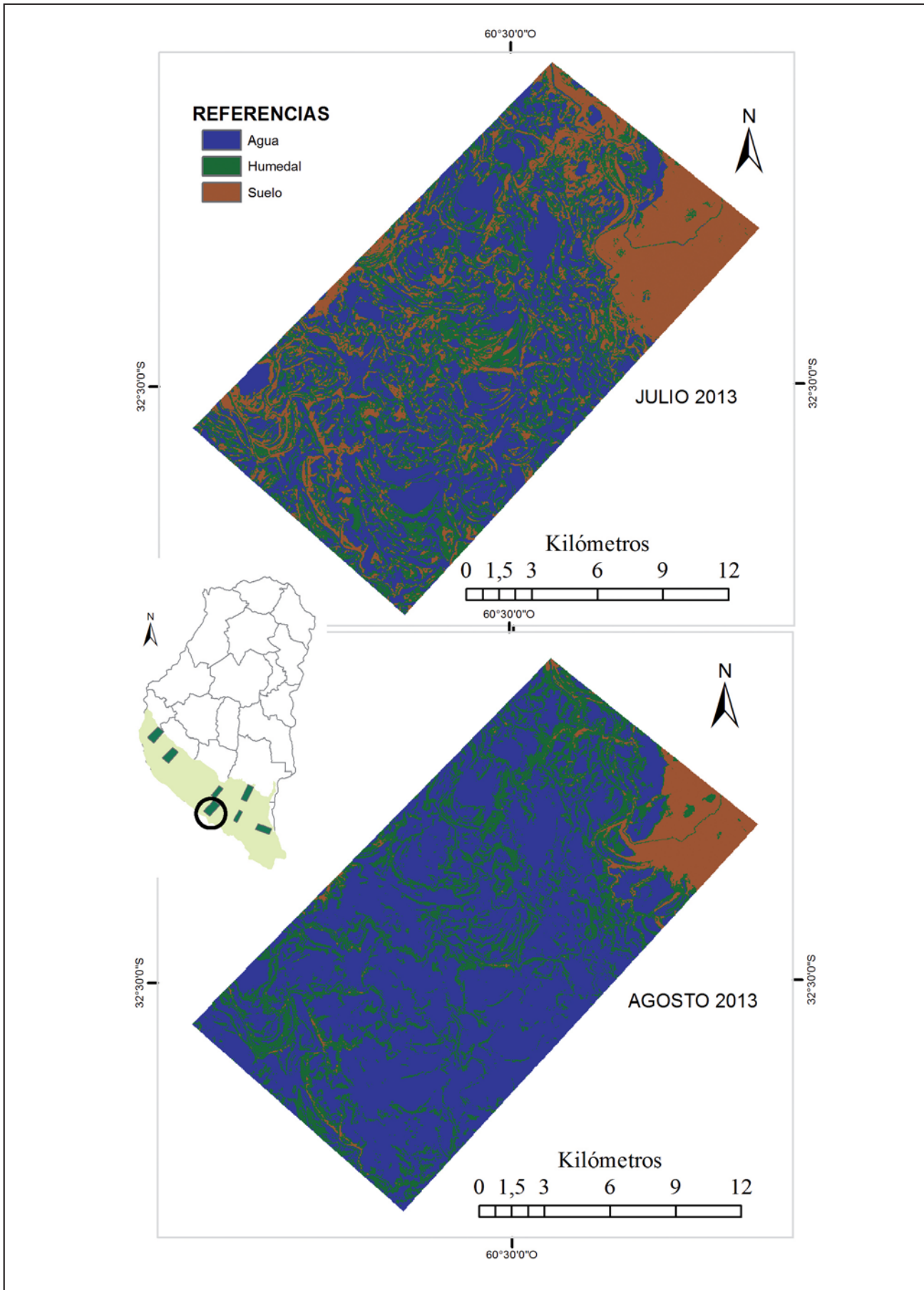


Figura 3. Variación temporal en la zona modal Predelta.

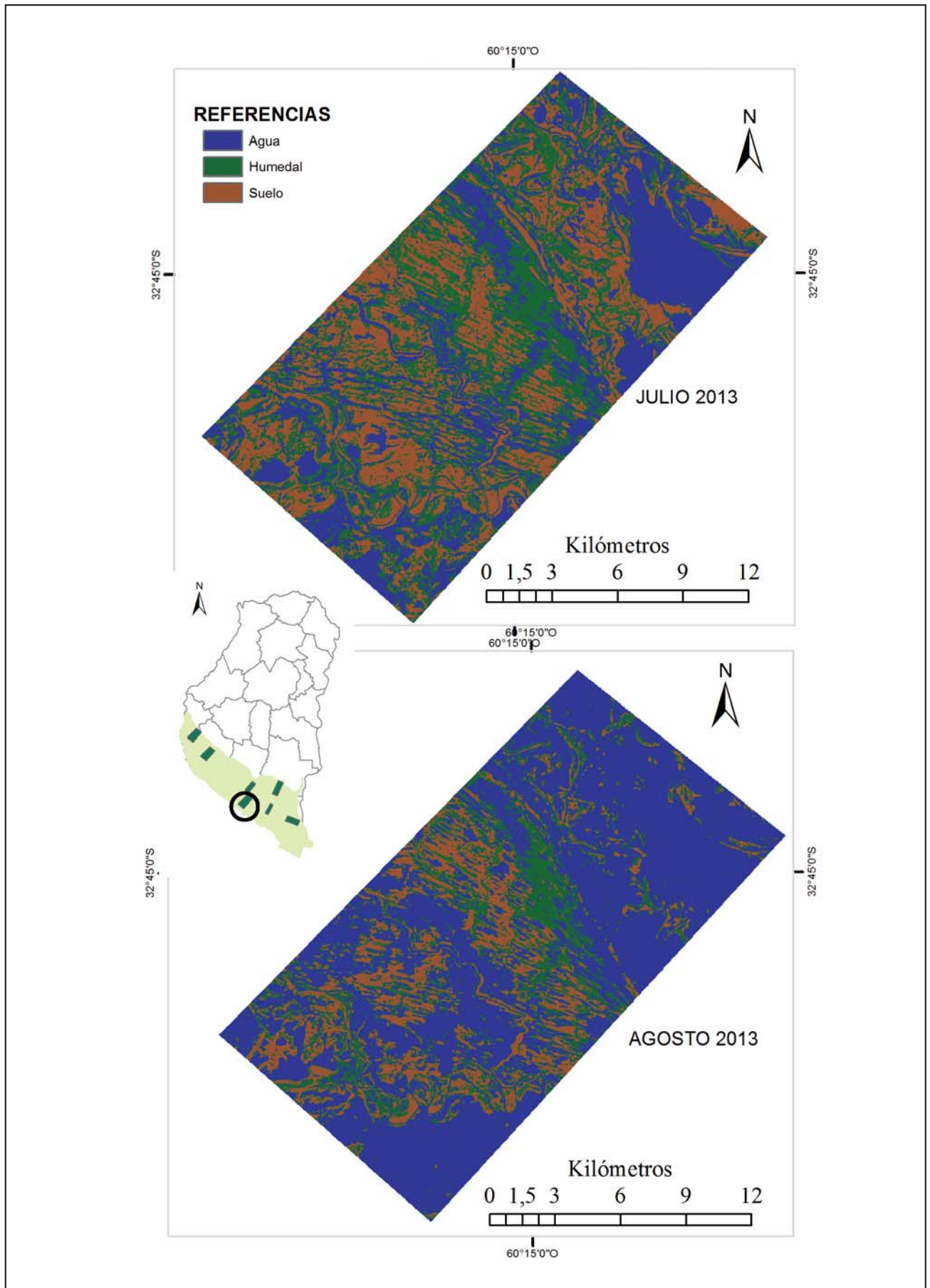


Figura 4. Variación temporal en la zona modal Sur del Enlace Vial Rosario- Victoria (Mixto Playas Sur).

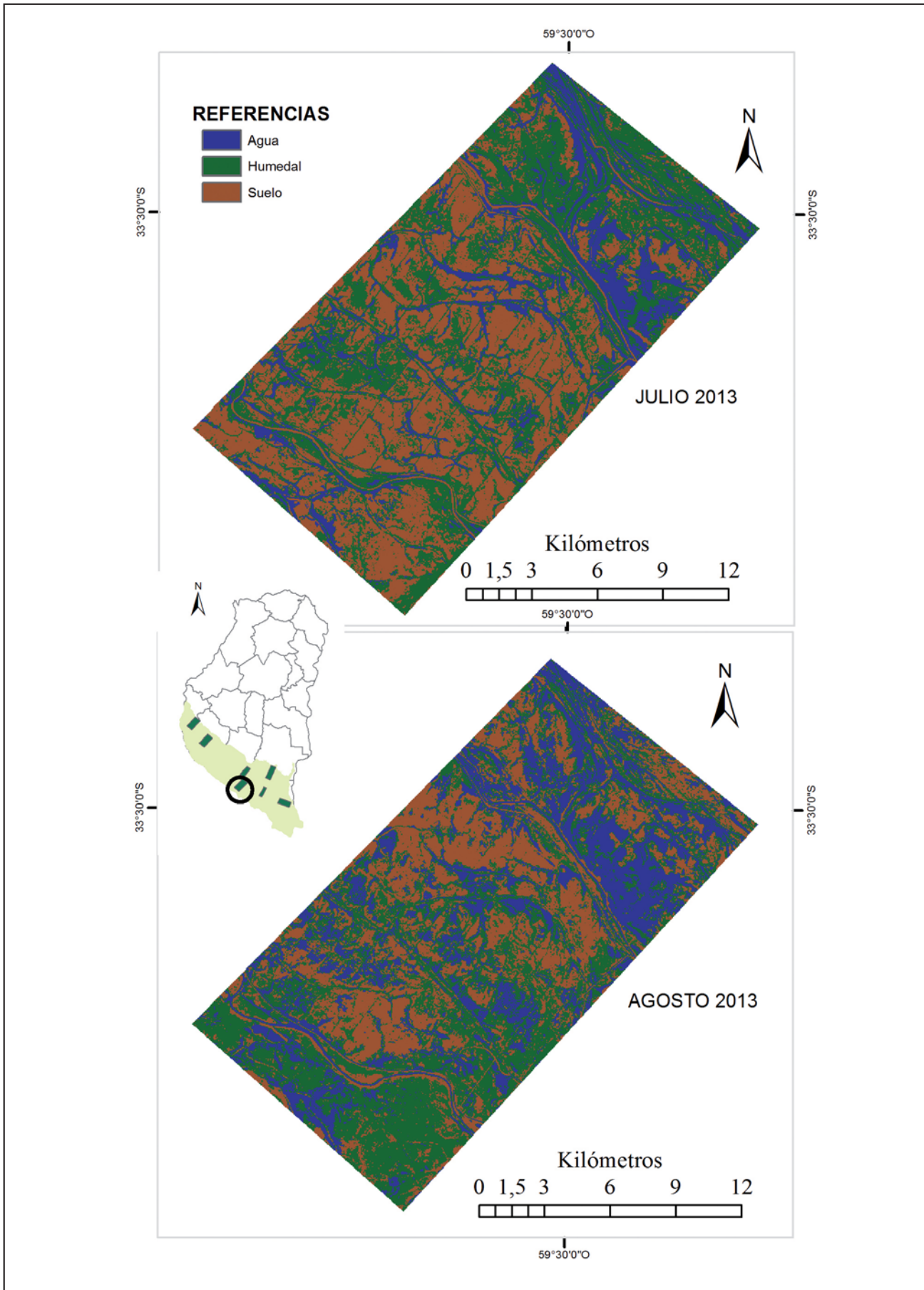


Figura 5. Variación temporal en la zona modal Isla lechiguanas.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ARIZA, A., 2013.  
 “Productos LDCM\_Landsat 8”. Instituto geográfico Agustín Codazzi pp 45. Bogotá, Colombia.  
 Disponible en <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>, último acceso 20 de noviembre de 2013.
- BOSCHETTI, N. G. Y G. E. CARÑEL, 2013.  
 “Identificación de ambientes, mediante SIG y teledetección, del Delta del río Paraná en diferentes condiciones hídricas”  
*Anales de GAEA en prensa.*
- BOSCHETTI N.; DÍAZ, E.; DUARTE O.; GARCÍA N. Y G. CARÑEL.  
 Análisis Hidrológico-Ambiental de los endicamientos en el Delta de Entre Ríos. Argentina.  
*XXIV Congreso Nacional del Agua. Comité Permanente de los Congresos Nacionales del Agua. San Juan. ISSN 1853-7685. Página 223. Extendido en CD. Octubre de 2013*
- CAVALLOTTO J.L, R.A. VIOLANTE Y F. COLOMBO (2005).  
 Evolución y cambios ambientales de la llanura costera de la cabecera del río de la Plata.  
*Revista de la Asociación Geológica Argentina (60) 2: 353-367.*
- CHUVIECO, E. 2002.  
 Teledetección ambiental.  
*La observación de la tierra desde el espacio. Ed Ariel. Barcelona*
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC. 2010.  
 ArcGis 10.0.®  
*Redsland, California, USA.*
- ERDAS INC., 19992.  
 “ERDAS MAGINE®”.  
*Atlanta. Georgia. USA*
- FRISTCHY, B. A., 2012.  
 “Impactos de las inundaciones extraordinarias, Santa Fe, Argentina”  
 en <http://hercules.cedex.es/general/documentacion.htm>
- LANGLE, R., LABORATORIO PACÍFICO SUR CIESAS,  
 “Sistema de Información Geográfica.”  
 Disponible en <http://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/>, último acceso Noviembre de 2013.
- KALESNIK F Y R. QUINTANA, 2006.  
 El Delta del río Paraná como un mosaico de humedales.  
*Caso de estudio: la reserva de biosfera MAB-UNESCO “Delta del Paraná” UnG – Revista Geociencias Vol. 5, N°1, pp 22-37). Disponible en http://revistas.ung.br/index.php/geociencias/article/viewFile/92/185, último acceso febrero de 2014.*
- MARIN, D.,  
 “Lanzamiento del Landsat 8”. 2013.  
 Disponible en <http://danielmarin.blogspot.com.ar/2013/02/lanzamiento-del-landsat-8-atlas-v-401.html>, último acceso, Agosto de 2013.
- RAMSAR  
 Convención sobre los Humedales de Importancia Internacional.  
*Artículos 1 y 2 de la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971). Disponible en http://www.ramsar.org/cda/es/ramsar-about-sites-classification-system/main/ramsar/, último acceso Marzo 2014.*
- SERVICIO GEOLÓGICO DE ESTADOS UNIDOS.  
 Disponible en <http://glvis.usgs.gov>, último acceso Agosto de 2013.
- SIB | ADMINISTRACIÓN DE PARQUES NACIONALES.  
 Sistema de Información de Biodiversidad.  
 Disponible en <http://www.sib.gov.ar/doc337.html>, último acceso Septiembre de 2013
- VAN LYNDEN, G.W., J. AND S MANTEL, 2001.  
 “The role of GIS and remote sensing in land degradation assessment and conservation mapping: some user experiences and expectations”.  
*International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 3(1): p.61-68.*
- ZAMANILLO, E.; TITO, M.J Y M. PEREZ, 2013.  
 “Análisis de Frecuencia de niveles máximos en el Delta del río Paraná”.  
*Anales del XXIV Congreso Nacional de Agua. CONAGUA 2013. San Juan. ISSN N° 1853-7685. Página 219. Extendido en CD.*





## El efecto de las estructuras de defensa costera en las localidades de Mar Chiquita y Mar de Cobo, provincia de Buenos Aires

### The effect of coastal protective structures in Mar Chiquita and Mar de Cobo, Buenos Aires province

San Martín, Laura<sup>1</sup> - Bunicontró, María P.<sup>2</sup> - Marcomini, Silvia C.<sup>2</sup> - López, Rubén A.<sup>2</sup>✉

Recibido: 1 de diciembre de 2014 • Aceptado: 11 de diciembre de 2014

#### Resumen

*La zona localizada entre Mar de Cobo y Mar Chiquita presenta las mayores tasas de erosión del litoral atlántico de la provincia de Buenos Aires.*

*Esta zona costera evidenció, a lo largo del tiempo, un significativo retroceso de la línea de costa, pero también más recientemente, las estructuras construidas con la finalidad de mitigar los fenómenos erosivos, han contribuido con importantes modificaciones al sector costero, sin una planificación regional.*

*Las causas del proceso erosivo tienen origen natural, pero se han potenciado por distintas actividades humanas, que afectaron a la deriva litoral, desde la localidad de Mar del Plata a Mar Chiquita.*

*El presente trabajo tiene como finalidad, en primer lugar, realizar un relevamiento y caracterización de las estructuras de defensa costera, la evaluación del ambiente afectado en cada caso y su clasificación por clase funcional. En segundo lugar se propone una metodología sencilla para cuantificar el área de influencia de los espigones, que representan la obra de defensa más abundante en la zona, calculada a partir de la longitud del espigón y la extensión de las zonas de acumulación y erosión.*

*Finalmente, se demuestra que existe una relación cuantitativa entre la longitud de los distintos tipos de espigones y sus áreas de influencia, tanto al sur como al norte, según la deriva litoral y su interacción con la dinámica local.*

***Palabras clave: Manejo costero, erosión costera, clases funcionales, espigón.***

1. Laboratorio de Ecología y Teledetección.  
Universidad Nacional de San Martín

2. IGEBAs. Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Universitaria, Pabellón II, C.P. 1428, Buenos Aires.

✉ rlopez@gl.fcen.uba.ar

## Abstract

The area located between Mar de Cobo and Mar Chiquita shows the highest rates of erosion from the Atlantic coast of Buenos Aires province.

This coastal zone showed over time a significant retreat of the coastline, but also more recently, the structures built to mitigate the erosive phenomenon, have contribute with important changes, without any regional planning.

The causes of the erosive process have natural origin, but have been enhanced by different human activities that affected the littoral drift, from Mar del Plata resort to Mar Chiquita.

The present work aims, on one hand, to perform the survey and characterization of all the coastal protection structures, the evaluation of the local environment affected and its classification by functional class.

Secondly, a simple methodology is proposed to quantify the influence area of the most conspicuous structure in the area, the groins, calculated from the length of the groin and the extent of the erosion and accumulation areas. Finally, a quantitative relation is demonstrated between the length of the different type of groins and its influence area, both south and north, according to the littoral drift and its interaction with the local dynamics.

**Keywords:** Coastal management, coastal erosion, functional classes, groin.

## INTRODUCCIÓN

El área de estudio comprende la zona costera de las localidades de Mar Chiquita y Mar de Cobo, ubicadas en la costa atlántica de la provincia de Buenos Aires, aproximadamente 40 km al norte de la ciudad de Mar del Plata, dentro del municipio de Mar Chiquita (Figura 1).

Los partidos costeros del este bonaerense han experimentado un importante crecimiento poblacional y del turismo desde la década de 1970 (Merlotto y Bértola, 2009). Particularmente, el partido de Mar Chiquita está económicamente dividido en dos sectores: el área mediterránea, basado principalmente en actividades agrícola-ganaderas, y la franja costera, basada en

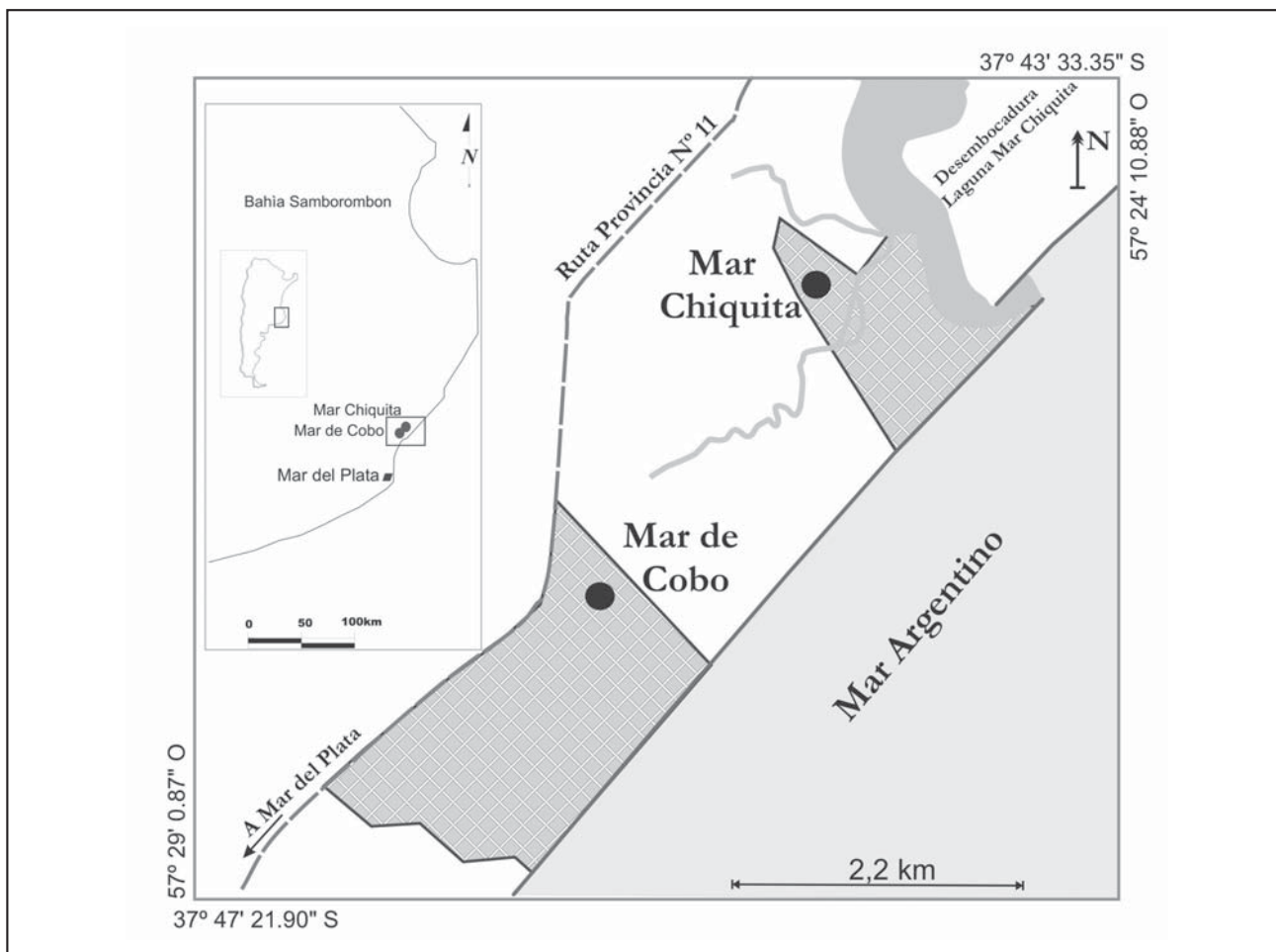


Figura 1. Localización del área de estudio.

el turismo. En este sentido, el Balneario Parque Mar Chiquita ha crecido notablemente desde la década de 1990 debido a las nuevas preferencias turísticas, por su gran diversidad natural y por haber sido asignada reserva de biósfera por la UNESCO en 1996 (Merlotto y Bértola, 2009). Uno de sus atractivos más significativos es la Albufera de Mar Chiquita, ubicada inmediatamente al norte de la localidad homónima. Posee una superficie de unos 45 km<sup>2</sup> y recibe el aporte de aguas dulces de la cuenca continental y de agua salada del mar, a través de sus canales de marea.

El clima de la región es templado a húmedo con precipitaciones abundantes todo el año y una amplitud térmica baja. Según el INTA (2008), la temperatura media anual es de 14,2° C con precipitaciones medias anuales de 930,6 mm. El régimen de mareas es micromareal mixto y semidiurno con amplitudes promedio de 0,91 m (SHN, 2011). La deriva litoral neta es de sur a norte con velocidades de entre 0,3 y 0,5 m/s, según Lanfredi et al. (1992). Los vientos más frecuentes son del N a 12 km/h y los más intensos son del SE, S y SO (NOAA, 2011).

La zona de estudio y sus alrededores se caracterizan por la presencia de sedimentos de edad plio-pleistocena y holocena. Las secuencias aflorantes en esta región del litoral bonaerense fueron agrupadas por Frenguelli (1945) en dos grandes series: Pampeano y Postpampeano. Los Sedimentos Pampeanos incluyen secuencias continentales y marinas consistentes en limos, areniscas y conglomerados con variable contenido de material carbonático. La unidad más relevante de esta secuencia es la Formación Santa Clara (Schnack et al., 1982), la cual está compuesta de limos arcillosos y arenosos y se encuentra bien representada en los acantilados de Santa Clara del Mar. En las localidades de Mar de Cobo y Mar Chiquita ha sido reconocida a través de perforaciones (Bunicontró, 2012). Los Sedimentos Postpampeanos han sido originalmente descriptos por Ameghino (1889) y suprayacen a los limos entoscados de los Sedimentos Pampeanos a través de una superficie de erosión. La unidad más relevante de esta secuencia es la Formación Mar Chiquita (Schnack et al., 1982) y sus depósitos corresponden a la transgresión marina holocena.

El paisaje ha sido modelado por procesos marinos, eólicos, fluviales y lacustres. Las morfologías costeras son diversas y en base a un estudio de detalle se pueden distinguir cinco Unidades Geomorfológicas: playa, campo de dunas, terraza de acreción marina, planicie de marea y ambientes asociados y planicie loésica, según San Martín (2012). Las playas están compuestas por arenas finas a medianas y presentan anchos variables entre 20 y 80 m en Mar de Cobo y entre 40 y 70 m en Mar Chiquita con pendientes menores a 1°. Se desarrolla, en las costas del sur de Mar de Cobo, una terraza de erosión marina de hasta 1,5 m de altura asociada a una plataforma de abrasión que puede alcanzar los 60 m de ancho. El campo de dunas presenta diversas morfologías eólicas y puede dividirse en activo e inactivo según la disponibilidad de arena, vegetación y desarrollo de suelos. A su vez, el desarrollo del campo de dunas costero, el cual presenta anchos de entre 5 y 80 m y alturas de hasta 6 m, está notablemente influenciado por el desarrollo de los sectores urbanos, en donde se encuentra particularmente más alterado y degradado. La planicie de marea en esta zona está representada por el canal de marea principal que conecta la laguna Mar Chiquita con el mar y por canales secundarios que atraviesan dicha localidad. La planicie loésica (ubicada a una cota de 5 m.s.n.m.) se desarrolla al oeste de la zona de estudio

y está separada del resto de las unidades costeras por la línea de paleocosta. En este sector, está atravesada por un único curso fluvial (Arroyo Los Cueros) que desemboca al sur de la localidad de Mar de Cobo (San Martín, 2012).

Uno de los principales problemas ambientales que se manifiestan en las áreas costeras urbanas y semiurbanas es la erosión costera, originada por la combinación de diversos factores naturales e incrementado principalmente por causas antrópicas. Entre las zonas más afectadas por la erosión costera se encuentra el Balneario Parque Mar Chiquita, con un retroceso promedio de la línea de costa de 299,01 m entre 1949 y 2007 según Merlotto (2007). De acuerdo a este autor, la magnitud del fenómeno erosivo se ha puesto en evidencia a lo largo de los años, por la pérdida de numerosos lotes y viviendas desde la fundación del balneario en 1949. El sector estudiado presenta altas tasas de retroceso costero que varían entre 5,16 m/año y 7 m/año en Mar Chiquita (Isla y Villar, 1992; Isla, 1997 y Merlotto y Bértola, 2007 y 2008), y entre 3,5 y 6 m/año en Mar de Cobo (Schnack et al., 1983; López y Marcomini, 2002). De esta manera, corresponden a esta zona los valores más altos de erosión de toda la costa atlántica de la provincia de Buenos Aires (Schnack et al., 1983). Numerosos trabajos han sido realizados en esta zona y localidades cercanas analizando la problemática de erosión costera, las medidas de defensa implementadas y sus efectos así como la dinámica litoral, tales como Tassara y García (2005), Isla (2006), Merlotto et al. (2008), Merlotto y Bértola (2009), Bunicontró et al. (2013), Bértola et al. (2013) y Verón y Bértola (2014), entre los más destacados.

Según Merlotto et al. (2008), las principales causas antrópicas asociadas al retroceso costero, que se adicionan a la característica erosiva natural de este sector, son:

- La disminución del aporte de material a la playa por deriva litoral debido a su interrupción por la instalación de obras de protección costera desde la ciudad de Mar del Plata hasta el área de estudio inclusive
- La extracción de arena de playa
- La alteración y degradación del campo de dunas por urbanización y fijación

Las dos primeras acciones alteran el balance de sedimentos afectando el suministro de arenas por deriva litoral a las playas, no sólo en el área donde son practicadas sino deriva abajo, constituyendo factores que actúan a una escala regional y de mediano a largo plazo (Merlotto y Bértola, 2008).

Las estructuras de defensa son abundantes en el área de estudio y llegan a dominar el paisaje costero, especialmente en los sectores urbanizados. Es por esto que el objetivo principal de este trabajo es realizar una descripción detallada de las diversas estructuras de defensa costera presentes en las localidades de Mar de Cobo y Mar Chiquita, y analizar luego específicamente la influencia sobre la dinámica costera de los espigones presentes, ya que constituyen el tipo de obra predominante. En este sentido, se intentará cuantificar el área de influencia en base a la longitud de los espigones y la extensión paralela a la línea de costa de las áreas de acumulación y erosión a su alrededor. Un antecedente de este tipo de análisis lo constituye el trabajo de Merlotto et al. (2008) quienes para determinar la influencia de los espigones en esta zona utilizaron la distancia entre la estructura y la primera línea de urbanización como un factor para categorizar el riesgo. En esta contribución, se analizará además la efectividad de dichos espigones en base a la extensión de las áreas antes mencionadas. Por otra



parte, se pretende establecer una serie de recomendaciones sobre el manejo de la zona litoral a fin de minimizar los efectos indeseados de las obras de defensa y hacer uso sustentable de los recursos naturales y turísticos costeros.

### METODOLOGÍA

El relevamiento de la zona se realizó durante una campaña en enero de 2009, en la cual se midieron perfiles de playa transversales a la línea de costa mediante una Estación Total durante períodos de baja marea. En ellos se identifican distintos subambientes de playa (playa distal y frontal), dunas costeras, acantilados activos y plataformas de abrasión marina, entre las morfología más relevantes. Los perfiles fueron ubicados equidistantes entre sí, cada 400 metros aproximadamente, a partir de los cuales se calcularon parámetros tales como ancho y pendiente de las playas. Además, se tomaron aproximadamente 400 gramos de muestras superficiales de sedimento de los distintos subambientes de la playa (distal y frontal) que luego fueron secados, cuarteados y tamizados durante 15 minutos mediante Ro-Tap para su análisis granulométrico. Los datos obtenidos fueron utilizados para realizar gráficos de frecuencia porcentual y frecuencia acumulada de las distintas clases granulométricas con el objetivo de obtener parámetros estadísticos de las distribuciones (como moda, mediana, media, asimetría y curtosis) y determinar poblaciones de transporte (tracción, saltación y suspensión), respectivamente. Este análisis permitió caracterizar la granulometría de las playas de la zona de estudio y la dinámica de transporte litoral a nivel local.

En este trabajo se propone analizar la influencia de los espigones a partir de la medición en imágenes satelitales del área de afectación costera que generan, midiendo el largo de los mismos y la longitud de las áreas adyacentes afectadas, tanto de depositación como de erosión. Para ello se utilizaron imágenes satelitales de Google Earth de los años 2003 y 2010, debido a las importantes diferencias encontradas durante este período. La observación de fotografías aéreas de diversos años (1935, 1958, 1965 y 1981 de la Base Aeronaval Punta Indio y del Departamento de Geodesia de la Provincia de Buenos Aires) permitió un análisis evolutivo sobre el desarrollo de la urbanización, sobre los cambios geomorfológicos costeros más relevantes y la instalación de las diferentes estructuras de defensa costera.

### MARCO TEÓRICO

Para analizar los tipos de estructuras presentes, se tomaron como base las cinco clases funcionales definidas por Pope (1997) para el manejo aplicado en Estados Unidos, que fueron adaptadas a la problemática costera presente en la provincia de Buenos Aires por López y Marcomini (2002). Según estos autores, las obras de defensa costera que se realizan en un determinado municipio dependen de las condiciones socioeconómicas del mismo y el acceso al asesoramiento idóneo con respecto a las condiciones naturales de la zona y las consecuencias ambientales de las obras. Las clases funcionales son: acorazamiento, moderación, restauración, abstención y adaptación. En el área de estudio se reconocieron principalmente obras correspondientes a dos clases funcionales de manejo costero: moderación y acorazamiento (Figura 2). Cabe aclarar que en la franja costera comprendida entre ambas localidades estudiadas, Mar de Cobo y Mar Chiquita (correspondiente a un tramo sin urbanización), no se observa ningún tipo de estructura u obra de defensa.

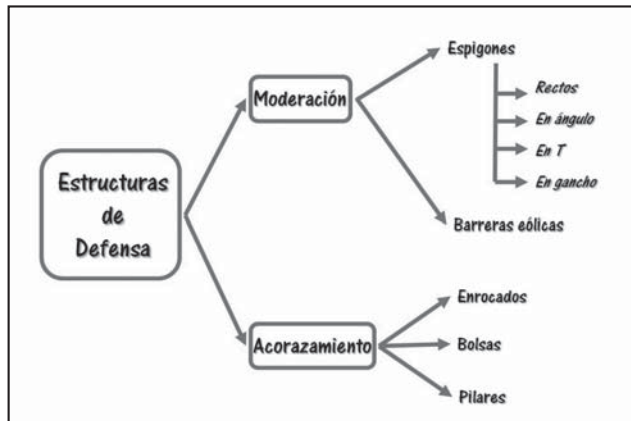


Figura 2. Tipos de estructuras de defensa presentes en las localidades de Mar Chiquita y Mar de Cobo en el relevamiento de 2009. Elaboración propia.

Las estructuras predominantes son de *moderación permanentes* y están presentes tanto en Mar de Cobo como en Mar Chiquita. Consisten en espigones rectos, en ángulo, en T y en gancho según su diseño y orden de abundancia (Figura 3). Cabe destacar que se encuentra en desarrollo, desde el año 2006, un plan de obras denominado “Protección y Estabilización del Frente Costero del Balneario Parque Mar Chiquita”, financiado por el Fondo Fiduciario Provincial, que contempla la construcción de cinco espigones con rompeolas (en T), de los cuales dos de ellos ya se encuentran finalizados. El objetivo de este tipo de estructuras es la recuperación de la playa en zonas de erosión crónica debido a la pérdida de disponibilidad de sedimentos. Los problemas asociados son:

- Subsistencia cuando se ubican sobre playas arenosas, debido al socavamiento y lavado de los bloques, generando una pérdida de altura y de la consecuente efectividad de la obra.
- Agravamiento de la subsistencia local, especialmente donde los sedimentos arenosos cubren planicies de marea arcillosas como en los sectores internos de la Laguna de Mar Chiquita.
- Subsaturación del flujo deriva abajo, generando erosión al norte de las estructuras.
- Colonización rápida de especies alóctonas adaptadas a fondos duros que compiten y condicionan el desarrollo de las especies de fondo blando.
- Cambios en los usos recreacionales de los subambientes de playa.

Por otro lado, se reconocieron estructuras de *moderación removibles* como barreras eólicas en dos sectores de la localidad de Mar Chiquita protegiendo construcciones particulares (Figura 3). Se utilizan para la reconstrucción de dunas costeras y playa y son temporarias.

En Mar Chiquita se han implementado también diversos tipos de *acorazamientos*, destacándose los enrocados (bloques y tetrápodos de hormigón), que se ubican generalmente entre espigones (Figura 3). Esta estructura, que se recomienda cuando el problema es por tormentas y no por erosión crónica, tiene como objetivo preservar el territorio por detrás de la línea del acorazamiento, sin considerar el efecto sobre la playa. Las consecuencias son:

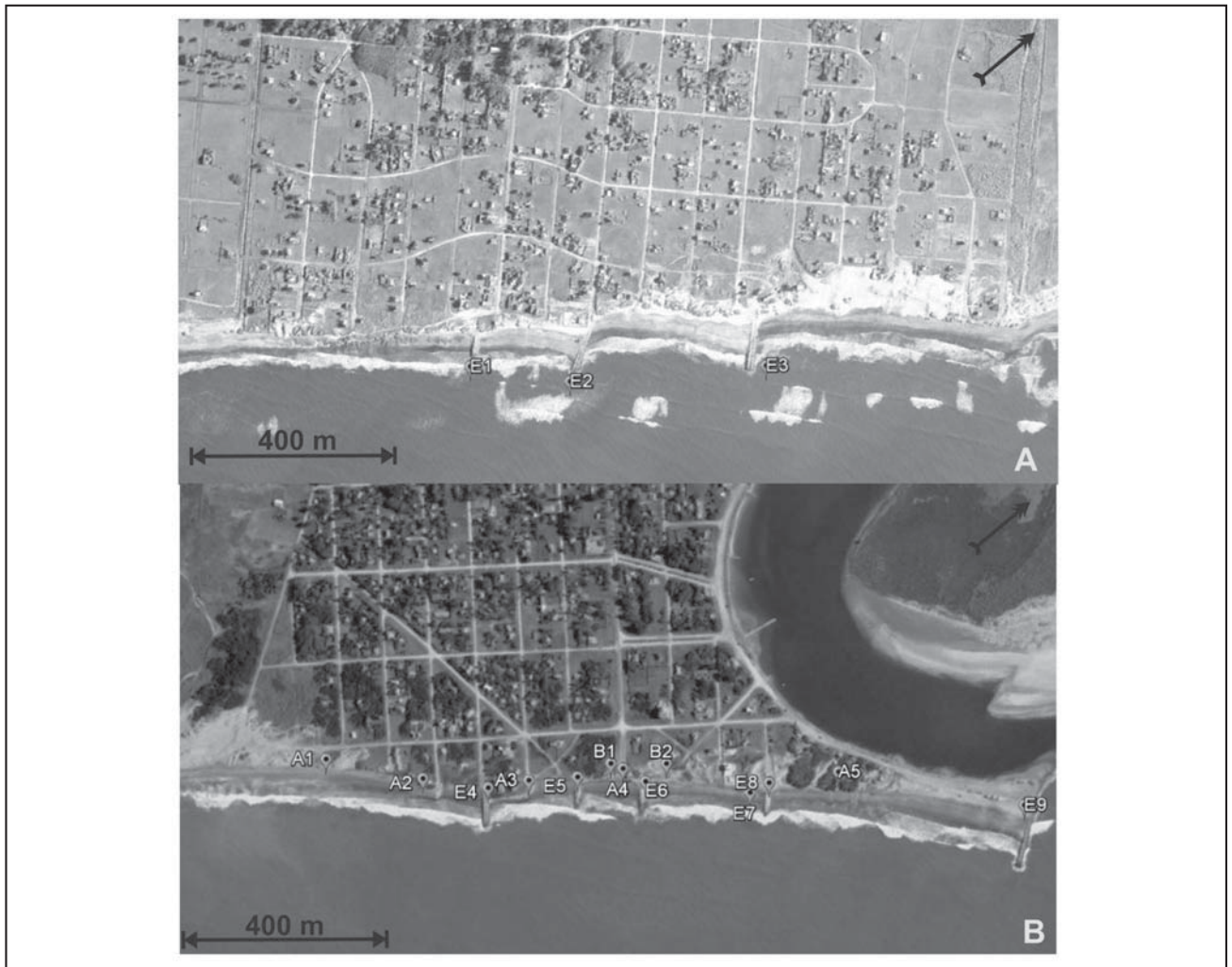


Figura 3. Mapa de ubicación de las estructuras de defensa costera en Mar de Cobo (3A) y Mar Chiquita (3B) según imagen satelital Google Earth de 2009. Espigones (E1 a E9), Acorazamientos (A1 a A5) y Barreras Eólicas (B1 y B2).

- Disminución del aporte de material de la duna o acantilado hacia la playa, con la consecuente subsaturación de sedimentos aguas abajo.
- Fenómenos de reflexión del oleaje que incrementan la altura de la ola y el perfil erosivo de la playa en la zona central.
- Socavamiento en los extremos de la estructura que generan pérdida de la estabilidad de la misma.
- Erosión diferencial entre sectores protegidos y no protegidos.

También se han tomado medidas de *adaptación (no estructurales)*. Entre ellas se pueden mencionar la sanción de la Ley N° 12.122 de la provincia de Buenos Aires en 1998 y a nivel municipal en 2004 de la Ordenanza N° 010/2004. La primera declara a las costas del litoral marítimo del partido de Mar Chiquita como zona de emergencia debido a la magnitud del fenómeno erosivo, mientras que la segunda suspendió por 180 días la aprobación de toda obra edilicia, la creación o modificación de una existente y la construcción de cercos en lotes para las parcelas aledañas a la costa atlántica en todo el partido (Merlotto et al., 2008).

## RESULTADOS

### Obras de manejo costero

En la Tabla 1 se presentan las estructuras observadas en la zona, de sur a norte, detallando: tipo, ubicación, longitud y medida en que afecta la dinámica costera. Se describe brevemente a continuación las principales características de las mismas.

*Espigón 1.* Con diseño recto, perpendicular a la línea de costa, posee una longitud de 46 metros. Debido a que no interactúa periódicamente con la rompiente (sólo en eventos extraordinarios o tormentas) no genera erosión ni acumulación en los sectores adyacentes (situación observada tanto en 2003 como en 2010). Presenta un área de afectación de 2,9 has en 2003 y 3,5 has en 2010. En este sector se ubica una terraza de abrasión marina descubierta y la duna está escarpada. No se desarrolla playa distal.

*Espigón 2.* Dispuesto en ángulo hacia el sur con respecto a la línea de costa, posee una longitud de 123 metros. En este sector, la duna costera se encuentra fijada por vegetación y está escarpada. Sobre la duna se localiza el Balneario La Baliza el cual se extiende sobre la playa distal y consiste en una

construcción totalmente apoyada sobre la arena (sin pilotes). Se distingue sobre la playa frontal una barra de lavado. Se evidencia el retroceso de la línea de costa por la comparación de una construcción que en 2003 se ubicaba sobre la duna costera y en 2010 se encuentra sobre la playa distal.

**Espigón 3.** Recto, posee 98 metros de longitud y afectaba un área de 2,2 has en 2003 y de 3,4 has en 2010. Aquí la duna costera presenta núcleos relícticos lo cual evidencia el retroceso de la línea de costa. Esta área presenta un límite septentrional de erosión definido por la presencia de una plataforma de abrasión que protege a la costa de este efecto.

**Acorazamiento 1.** Consiste en pilares, ubicados sobre la duna costera, colocados por un particular sobre el frente de una vivienda. Dichos pilares son alcanzados frecuentemente por la

marea durante las tormentas por lo que no cumple su función de protección de la línea de costa.

**Acorazamiento 2.** Está constituido por rocas y hexápodos de hormigón al pie de la duna, a lo largo de 50 metros en 2003 y extendido a 113 metros en 2010. Este tipo de acorazamiento sufre hundimiento y en aquellos sectores donde alcanza la zona de lavado es colonizado por organismos. La duna costera está parcialmente degradada y vegetada.

**Espigón 4.** Ubicado en una playa sin morfologías, la duna costera es relíctica y está vegetada. La longitud de la obra alcanza los 70 metros, con un área de afectación de 1,4 has en 2003. La zona de acumulación se mantiene en 2010 y la zona de erosión no puede medirse debido al acorazamiento 3.

**Tabla 1. Detalle de las estructuras presentes en el área de estudio. Se detalla el tipo de estructura, ubicación y medida en la que cada estructura afecta la zona costera. Datos tomados en 2003 y 2010. Fuentes: Imagen satelital Google Earth 2003 y 2010 y Relevamiento de campo del 2009.**

Localidad	Estructura	Tipo	Ubicación (calle)	2003				2009-2010			
				Extensión (m)	Longitud acumulación (m)	Longitud erosión (m)	Área total (ha)	Extensión (m)	Longitud acumulación (m)	Longitud erosión (m)	Área total (ha)
Mar de Cobo	Espigón 1	Recto	De las Torres y Cobo	46	No interactúa con la rompiente.			46	No interactúa con la rompiente.		
	Espigón 2	Ángulo	Cuyo	123	68	166	2,9	123	110	172	3,5
	Espigón 3	Recto	De la Baliza y De las Artes	98	142	87	2,2	98	169	173	3,4
Mar Chiquita	Acorazamiento 1	Pilares	B. Monteagudo	Sin datos				Ubicado en la duna costera.			
	Acorazamiento 2	enrocado	H. Vieytes y F. Ameghino	50				113	Se extendió hacia el sur		
	Espigón 4	Recto	D. Funes	70	67	140	1,4	70	67	No se puede medir	
	Acorazamiento 3	enrocado	D. Funes y A. Gallardo	176				92	Reducción por relleno		
	Espigón 5	Recto	A. Gallardo	54	No interactúa con la rompiente.			54	Desconectado		
	Acorazamiento 4	enrocado	A. Gallardo y Av. San Martín	Inexistente				66			
	Barrera 1	mediasombra	Av. San Martín	Sin datos				Sin mantenimiento			
	Desagüe		Av. San Martín	Sin datos				Cubierto por arena			
	Espigón 6	Recto	Av. San Martín y J. B. Alberdi	64	42	45	0,6	64	Desconectado		
	Barrera 2	Arpillera	J. B. Alberdi y E. Echeverría	Sin datos				En funcionamiento			
	Espigón 7	T	E. Echeverría	Inexistente				160	545	423	15,5
Espigón 8	Recto	E. Carriego	46	No interactúa con la rompiente.			46	Removido			
Acorazamiento 5	Bolsas	M. Moreno	Sin datos				25	Influido por Espigón 9			
Espigón 9	gancho - T	Desembocadura laguna	242	270		6,5	242	154		3,7	



**Figura 4. Acorazamiento 3, compuesto por rocas y hexápodos de hormigón. Tomada durante el relevamiento de enero de 2009.**



**Figura 5. Barreras eólicas 1 y 2 (5A y 5B, respectivamente): la primera en estado de abandono, la segunda en funcionamiento. Tomada durante el relevamiento de enero de 2009.**

**Acorazamiento 3.** Cubre el espacio entre los espigones 4 y 5. Está constituido por rocas y hexápodos de hormigón que se encuentran parcialmente hundidos y colonizados por organismos de fondos duros (Figura 4). En 2003 alcanzaba los 176 metros de longitud, con un sector recto y otro irregular debido a la erosión generada por el espigón 4 (zona acorazada posteriormente). En el 2010, debido al efecto de estructuras ubicadas hacia el norte (Espigón T), la parte norte de este acorazamiento fue cubierto por arena, quedando en funcionamiento una longitud de 92 metros aproximadamente. La duna costera está escarpada y seccionada, ya que se observan cimientos de construcciones. La pleamar diaria alcanza el enrocado mientras que la marea extraordinaria alcanza la escarpa de duna.

**Espigón 5.** Con diseño recto, posee 54 metros de largo y no interactúa con la rompiente. Por esta razón no generó zonas de acumulación ni de erosión. Se encuentra desconectado de la duna en el año 2010. La playa no presenta morfologías y duna costera está estabilizada y escarpada.

**Acorazamiento 4.** Ausente en 2003, alcanza unos 66 metros de longitud en 2010. Se encuentra protegiendo construcciones que han sido alcanzadas por la línea de costa en su retroceso.

**Barrera 1.** Ubicada entre el espigón 5 y el 6 consiste en una media sombra que constituye una barrera eólica provisoria delante de una construcción parcialmente derrumbada. Se encuentra fuera de funcionamiento desde 2009 (Figura 5A).

**Desagüe.** Ubicado en la intersección de la Av. San Martín (único acceso asfaltado) y la playa. Se encuentra cubierto por arena, sin rasgos de erosión asociados en la playa, por lo que se asume que está fuera de funcionamiento o bien que funciona sólo durante las tormentas.

**Espigón 6.** Con diseño recto, de 64 metros de longitud, presenta un área de afectación de 0,6 has en 2003. En 2010 se encuentra desconectado de la duna y sin interacción con la rompiente. En este sector la playa no presenta morfologías y duna posee núcleos reliicticos vegetados.

**Barrera 2.** Sobre la duna costera, con disposición oblicua y fabricada con media sombra, presenta una funcionalidad provisoria (Figura 5B).

**Espigón 7.** Con diseño en T, el espigón 7 posee 160 metros de longitud y 150 metros de ancho, afectando un área de 15,5 has en 2010. Este espigón constituye el primero dentro del Plan de Protección y Estabilización del Frente Costero del Balneario parque Mar Chiquita (Figura 6). En este sector la actividad antrópica es muy intensa. La duna costera se encuentra modificada parcialmente para el desarrollo de estacionamientos y ha sido arrasada y urbanizada frente al Hotel Mar Chiquita. Allí se ubican también carpas sobre la playa para turismo, alrededor de las cuales se acumula arena durante el día y es removida manualmente durante el atardecer hacia otro sector de la playa. Hacia el norte hay una cantidad importante de escombros que generan zonas de acumulación

**Espigón 8.** Con diseño recto, presenta 45,7 metros de longitud en 2003. Según Merlotto y Bértola (2007) fue descrito hasta 2007 y no interactuaba con la rompiente. Actualmente no existe y se estima constituyó una fuente de escombros para la zona.

**Acorazamiento 5.** El quinto y último acorazamiento consiste en bolsas de arena y rocas ubicadas en el pie de duna. Se extiende por 25,4 metros. En este sector la duna se encuentra escarpada y vegetada con desarrollo de suelos. La playa no

presenta morfologías naturales y actualmente se ubica en la zona de acumulación del espigón 9.

**Espigón 9.** Ubicado en el extremo norte de la urbanización presenta un diseño en gancho y originalmente poseía 242 metros de longitud que afectaba 6,5 has como zona de acumulación (Figura 6). No presenta zona de erosión por ubicarse en la desembocadura del canal de la Laguna Mar Chiquita. En 2009 y como parte del Plan de Protección y Estabilización del Frente Costero del Balneario Parque Mar Chiquita, fue convertido en un espigón en T, con una extensión paralela a la playa de 100 metros, que alcanza las 3,7 has de afectación en 2010. El otro extremo del espigón, que correspondería al "gancho", ha sufrido destrucción parcial con respecto a la imagen de 2003. La disminución en el área de acumulación se debe a que la misma se encuentra ahora afectada por el área de erosión del Espigón 7 (en T). En este sector se ubica un paredón perpendicular al espigón a lo largo de la punta, que separa la costa de la playa de la costa del canal de la albufera. Hacia el océano, la playa no presenta morfologías naturales y la duna costera está constituida por la presencia de dunas incipientes en la playa distal.

### Análisis de la influencia de los espigones

Con la intención de realizar un análisis comparativo entre estructuras, se utilizaron los datos de la imagen de 2003, debido a que la configuración actual como consecuencia de las obras realizadas hasta el 2010 sólo permite la comparación de dos estructuras en funcionamiento.

En primer lugar, se proponen tres categorías según la longitud de los espigones: menor de 60 metros, entre 60 y 90 metros y mayor a 90 metros. La frecuencia de los mismos se presenta en la Figura 7. En base a esto se observa que los espigones menores a 60 metros de longitud no presentan interacción con la rompiente, por lo cual no alcanzan a cumplir su función de acumular sedimentos y su área de influencia se reduce a la estructura en sí misma, al menos en momentos de marea normal.

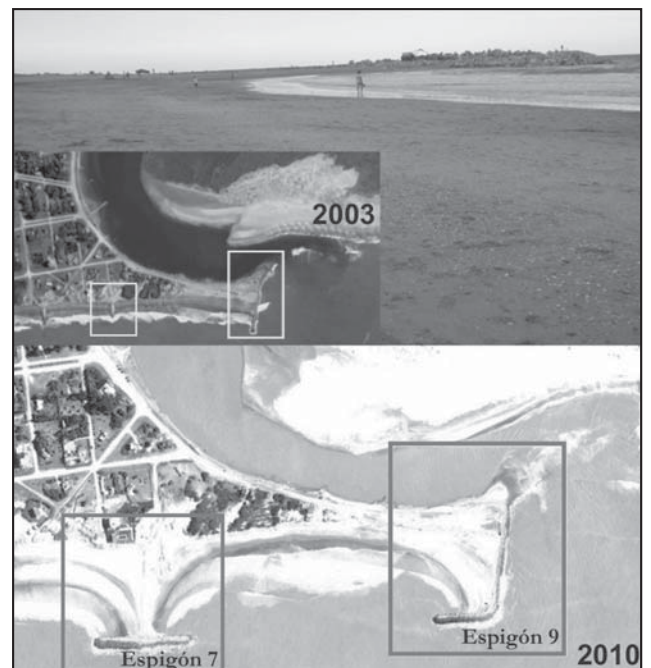


Figura 6. Espigón 7 y 9 en T. Comparación en imágenes satelitales Google Earth 2003 y 2010 junto a fotografía de campo tomada en la campaña de 2009 sobre el espigón 9. Se puede ver una importante modificación de las estructuras a lo largo de estos años.

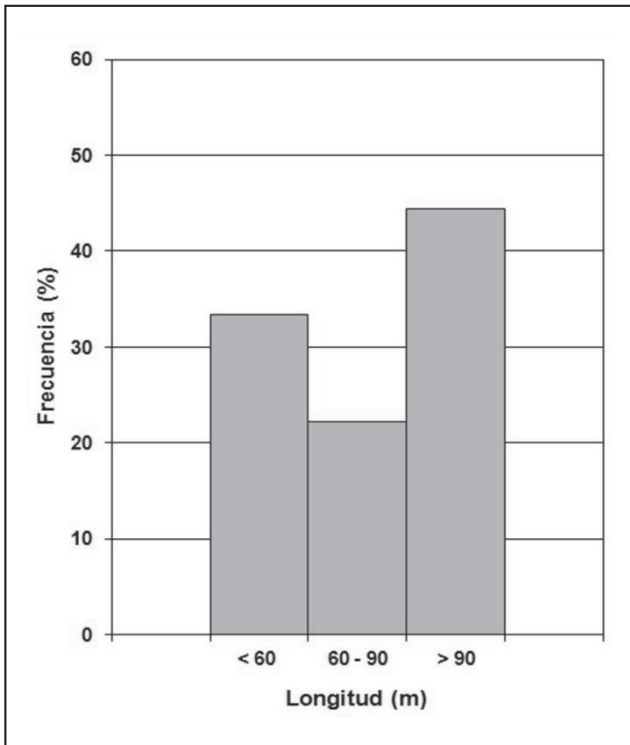


Figura 7. Frecuencia de espigones según su longitud en las localidades de Mar de Cobo y Mar Chiquita.

Luego, al analizar la relación entre la longitud de los espigones y la zona de influencia total (combinando la zona de acumulación y la de erosión) se observan diversos datos (Figura 8). Cabe aclarar que el valor del área de influencia del Espigón 7 corresponde a los valores tomados en 2010 mientras que el resto corresponden al 2003; debido a que para ese año el Espigón 7 no había sido construido. A priori los dos valores

más altos corresponden al Espigón 7 (en T) y al Espigón 9 ubicado en la punta (sólo área de acumulación). Su análisis permite establecer, en primer lugar, que el área de influencia del Espigón 9 no corresponde a la misma relación proporcional debido a que sólo tiene en cuenta la zona de acumulación y no la de erosión por su ubicación particular en la boca de la laguna. En segundo lugar, se observa claramente que el efecto del espigón en T es mucho mayor que uno recto u oblicuo de la misma longitud.

Posteriormente, descartando estos factores particulares (espigones en T) se analizaron el resto de los espigones a través de una regresión lineal. En este gráfico (Figura 9) se observa una proporcionalidad entre la longitud y el área de influencia total, que además permite dividir los espigones en tres grupos, según la pendiente de la curva. El primer grupo son los espigones que no interactúan con la rompiente y se ubican sobre el cero de área de influencia. Un segundo grupo presenta una pendiente alta, ubicándose el quiebre entre ambas en 61 metros. Finalmente, el tercer grupo posee una pendiente más tendida que el anterior, cuyo quiebre se ubica en los 70 metros. Esto indica que la variación de longitud de un espigón menor a 70 metros modifica el área de influencia en mayor medida que la variación de longitud de un espigón mayor a 70 metros.

Para determinar la efectividad de estas obras, se comparó la extensión del área de acumulación y de erosión de cada estructura en relación a su extensión (Figura 10). En la mayoría de los casos, la zona de erosión es mayor que la de acumulación, lo cual puede deberse a la poca cantidad de sedimentos transportados por la deriva litoral que es de 0 a 25.000 m<sup>3</sup>/año entre Santa Clara y Mar Chiquita (Merlotto *et al.*, 2008). Las excepciones son el Espigón 7, debido a su configuración en T y el Espigón 3, debido a su ubicación en una zona de duna costera ancha con afloramientos y con una plataforma de abrasión en forma de cabo hacia el norte, el cual genera acumulación de sedimentos.

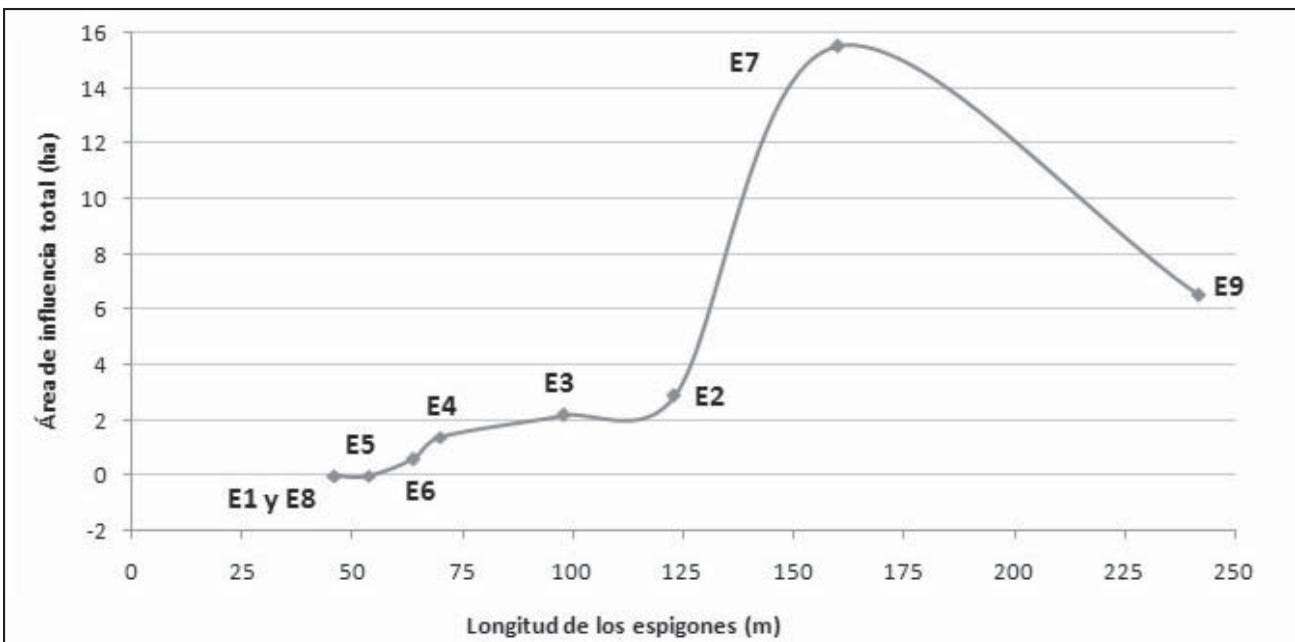


Figura 8. Relación entre la longitud y el área de influencia total (área de acumulación más área de erosión) de cada espigón para el año 2003, con excepción del Espigón 7, para el cual se muestran los valores del 2010.

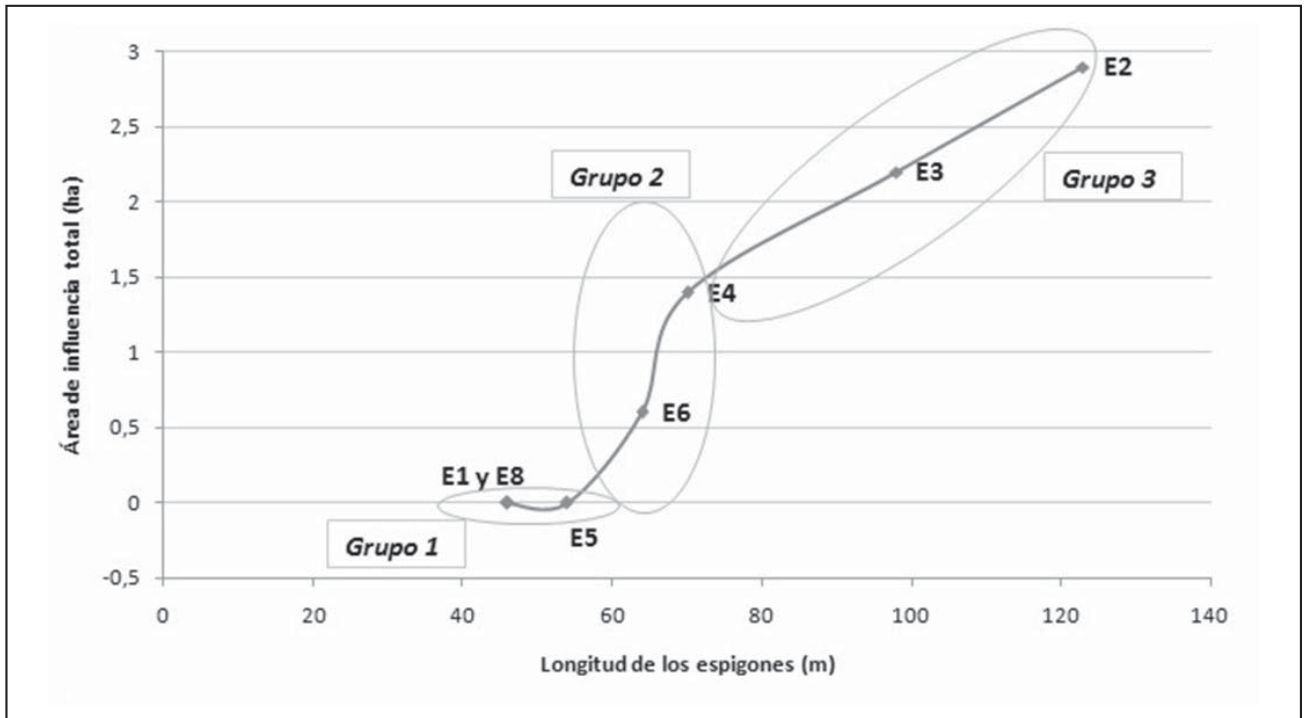


Figura 9. Relación entre la longitud de los espigones rectos y oblicuos y su área de influencia total en el 2003, sin considerar aquellos en T (Espigón 7 y 9). Se observa la tendencia creciente y se diferencian tres grupos según la pendiente de la curva.

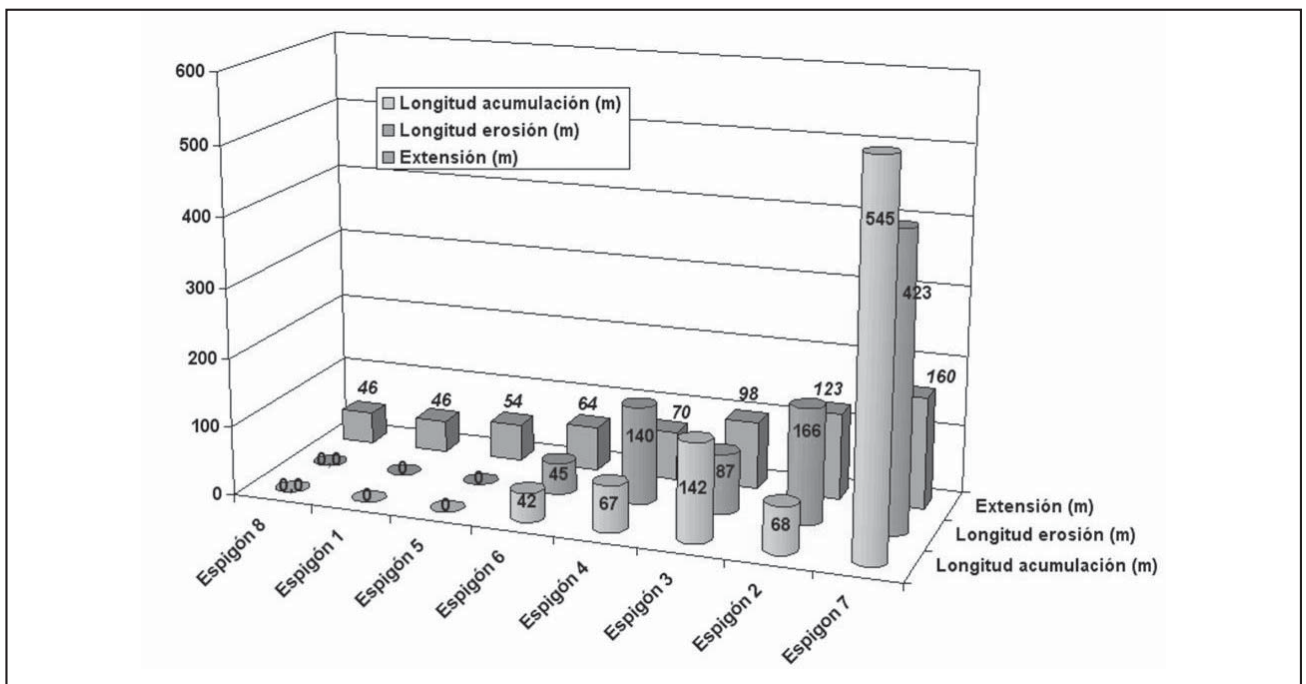


Figura 10. Relación entre la longitud el sector de acumulación y de erosión de cada espigón y la longitud de los mismos.

### CONCLUSIONES

Debido a la gran demanda turística de las localidades de Mar de Cobo y Mar Chiquita es que se vuelve indispensable la implementación de medidas tendientes a minimizar la erosión costera que afecta la zona. Originalmente natural, la erosión costera y el retroceso de la línea de costa son actualmente potenciados por el avance de las urbanizaciones y estructuras de defensa

de las localidades ubicadas al sur del área de estudio. Tras un detallado análisis de las estructuras de defensa instaladas en la costa estudiada se logró demostrar una relación cuantitativa entre la longitud de los diversos espigones y las áreas de influencia adyacentes, tanto de depositación hacia el sur como de erosión hacia el norte, según la dirección y sentido de deriva litoral y su interacción con la dinámica local. Se observa que existe una

tendencia creciente respecto a la longitud y al área de influencia. Sin embargo, debe considerarse que debido a las diferencias de diseño de los espigones varía su capacidad de acumular sedimentos. Por lo tanto, se puede establecer que la longitud de los espigones es un buen parámetro para cuantificar su influencia, siempre que sean del mismo tipo. Los espigones en T, deben ser considerados en forma particular y separadamente debido a su mayor efecto respecto de los demás y a su doble carácter acumulativo; por interrupción de la deriva litoral y por la difracción de los trenes de ola en los extremos de la T.

Por otra parte, se observa que pese a que el área de influencia se incrementa con el aumento de la longitud de los espigones, la efectividad de depositación no es proporcional al aumento de la longitud. Esto se debe a que el área de influencia de cada espigón está afectada por la zona erosiva deriva abajo generada por él inmediatamente al norte, lo cual permite interpretar una disminución de la eficiencia de cada una de las obras consecutivas.

En base a lo expuesto y a la intensa modificación del paisaje observada a lo largo de los últimos años, es que se proponen recomendaciones tendientes a alcanzar un plan de manejo costero en la zona que permita el uso sustentable de los recursos. Por un lado, es importante considerar que la instalación de espigones tiene un impacto positivo muy localizado, al sur de

la estructura, mientras que hacia el norte el proceso erosivo continúa y se incrementa.

Las medidas de acorazamiento, como enrocados, no son efectivas si los mismos están dispuestos al pie de duna o sobre la playa, sin presencia en superficie de un sustrato consolidado. Deberían implementarse sólo al pie de acantilados con alto retroceso pero teniendo en cuenta que obstruye el aporte de sedimentos a la deriva litoral, provenientes de los acantilados activos. Por otro lado, es de suma importancia el mantenimiento de las estructuras ya instaladas, sobre todo aquellas más susceptibles de ser deterioradas como las barreras eólicas transitorias o removibles.

Finalmente, resulta fundamental considerar la implementación de medidas no estructurales tales como de adaptación o de abstención en zonas donde la problemática de erosión es severa y no es factible la instalación de estructuras duras. Es importante la comunicación con la población, la concientización sobre dicha problemática y la posibilidad de establecer un plan de ordenamiento territorial a nivel municipal que restrinja nuevos asentamientos sobre los primeros metros del frente costero y ordene la relocalización de aquellas viviendas con mayor riesgo. Es necesario, entonces, el desarrollo de un plan de manejo costero integrado que incluya toda la franja costera del sudeste bonaerense y contemple la continuidad de dichas medidas en el tiempo con una planificación a largo plazo.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BÉRTOLA, G., 2006.

Morfodinámica de playas del sudeste de la Provincia de Buenos Aires (1983 a 2004).  
*Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología* 13 (1): 31-57.

BÉRTOLA, G., MERLOTTO, A., CORTIZO, L. E ISLA, F., 2013.

Playas de bolsillo en Mar Chiquita, provincia de Buenos Aires.  
*Revista de la Asociación Geológica Argentina. Buenos Aires.* 70 (2): 267-278.

BUNICONTRO, M. P., 2012.

Geología, dinámica costera y ordenamiento territorial en Santa Clara del Mar, Municipio de Mar Chiquita, provincia de Buenos Aires.  
*Tesis Final de Licenciatura. Universidad de Buenos Aires.* 158 p. *Inédito.*

BUNICONTRO, M. P., MARCOMINI, S. C. Y LÓPEZ, R. A., 2013.

Zonificación de la erosión costera en la localidad de Santa Clara del Mar, provincia de Buenos Aires.  
*Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente.* N° 31. pp. 1-15.

FRENGUELLI, J., 1945.

Las diatomeas del Platense.  
*Revista del Museo de La Plata, 3 Paleontología* 16: 77-221.

INSTITUTO DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA), 2008.

Proyecto SIG Suelos de la República Argentina y Estadísticas Agroclimáticas.  
*Serie 1971-2000.* [www.geointa.inta.gov.ar](http://www.geointa.inta.gov.ar) Último acceso diciembre de 2011.

ISLA, F., 1997.

Seasonal behaviour of Mar Chiquita tidal inlet in relation to adjacent beaches, Argentina.  
*Journal of Coastal Research*, 13(4): 1221-1232.

ISLA, F. Y VILLAR, M., 1992.

Ambiente Costero. Pacto ecológico.  
*Universidad Nacional de Mar del Plata - Senado de la Provincia de Buenos Aires, La Plata.*

ISLA, F. I., 2006.

Erosión y defensas costeras.  
*En: Isla F. I. y Lasta C. A. (eds.), Manual de Manejo Costero para la Provincia de Buenos Aires. EUDEM, Mar del Plata, pp. 125-147*

- LANDREDI, N. W., POUSA, J. L., D'ONOFRIO, E. E., 1992.  
Wave-power potential along the coast of the Province of Buenos Aires, Argentina.  
*Energy* 17 (11): 997-1006.
- LÓPEZ, R. Y MARCOMINI, S., 2002.  
Pautas para el manejo en costas acantiladas y de dunas, Provincia de Buenos Aires.  
*Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 18: 59-68.
- NOAA (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERICS ADMINISTRATION), 2011.  
Previsiones Climáticas.  
*Modelos WAVEWATCH III. Disponible online en www.windnguru.cz.*
- MERLOTTO, A. Y BÉRTOLA, G., 2007.  
Consecuencias socio-económicas asociadas a la erosión costera en el Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina.  
*Investigaciones Geográficas (Esp)*, Núm. 43, sin mes, 2007, pp. 143-160. *Universidad de Alicante, España.*
- MERLOTTO, A. Y BÉRTOLA, G., 2008.  
Evolución urbana y su influencia en la erosión costera en el balneario parque Mar Chiquita, Argentina  
*Papeles de Geografía*, Núm. 47-48, enero-diciembre, 2008, pp. 143-158 *Universidad de Murcia, España.*
- MERLOTTO, A., VERÓN, E., SABULA, F., 2008.  
Riesgo de erosión costera en el Balneario Parque de Mar Chiquita.  
*Párrafos Geográficos* (7)1: 103-121.
- MERLOTTO, A. Y BÉRTOLA, G., 2009.  
Evolución de la línea de costa en el Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina.  
*Ciencias Marinas*. 35 (3): 271-286.
- POPE J., 1997.  
Responding to coastal erosion and flooding damage.  
*Journal of Coastal Research*, 13(3), 704 – 710.
- SAN MARTÍN, L., 2012.  
Erosión y manejo costero en Mar Chiquita y Mar de Cobo, provincia de Buenos Aires, Argentina.  
*Tesis Final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires. 320 p. Inédito.*
- SERVICIO DE HIDROGRAFÍA NAVAL (SHN), 2011.  
Centro Argentino de Datos Oceanográficos (CEADO).  
<http://www.hidro.gov.ar/ceado/EfMdp.asp> Último acceso diciembre de 2011.
- SCHNACK, E., FASANO, J. E ISLA, F., 1982.  
The evolution of Mar Chiquita lagoon coast, Buenos Aires province, Argentina.  
*In: Holocene Sea Level Fluctuations, Magnitude and Causes (Colquhoun, D. J., ed) IGCP – INQUA, 143-155.*
- SCHNACK, E., ÁLVAREZ, J. Y CIONCHI, J., 1983.  
El carácter erosivo de la línea de costa entre Mar Chiquita y Miramar, Provincia de Buenos Aires.  
*Simposio Oscilaciones del nivel del mar durante el último hemisiciclo deglaciar en la Argentina, INQUA, Mar del Plata. Actas pp. 118-130.*
- TASSARA, D. Y GARCÍA, M., 2005.  
Erosión marina, vulnerabilidad e impactos antrópicos en el sudeste bonaerense (Municipio de Mar Chiquita, provincia de Buenos Aires, Argentina).  
*Revista Tiempo y Espacio. Universidad del Bio-Bio. Chile. Año 12, N° 5.*
- VERÓN, M. Y BÉRTOLA, G., 2014.  
Transporte Potencial Litoral Marino de sedimentos en las costas de la provincia de Buenos Aires, Argentina.  
*Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología. Buenos Aires (en prensa).*







## Protección invisible de un edificio sobre la duna frontal en la playa de Pehuen-co, provincia de Buenos Aires

### Hidden building protection into the frontal dune in Pehuen-có beach, province of Buenos Aires

Caló, Jorge <sup>1</sup> - Caputo, Ricardo <sup>2</sup> - Di Martino, Claudina <sup>1,3</sup> - Marcos, Angel <sup>1</sup>

Recibido: 08 de julio de 2014 • Aceptado: 15 de diciembre de 2014

#### Resumen

*El edificio de la confitería la Barraca fue construido en Pehuen Có por el Municipio de Coronel Rosales. El mismo se levantó sobre la duna costera a pesar de algunas críticas hacia ello. Estudios anteriores habían llamado la atención sobre una erosión generalizada de la duna frontal siendo la zona más afectada la bajada de la Calle Azopardo.*

*La construcción comenzó a sentir los efectos de la erosión por aumento de la pendiente de la duna, perdiendo progresivamente la plataforma del edificio construida hacia el mar, y que servía de terraza al aire libre, quedando expuestos los cimientos del edificio en el año 2004.*

*El objetivo de este trabajo es presentar el desempeño de una defensa costera oculta, buscando una solución intensiva en trabajo en lugar de una intensiva en capital. Se utilizaron bolsas de polipropileno rellenas de arena, una membrana para protección de las mismas y finalmente una cobertura de arena vegetada con uña de gato (*Carpobrotus edulis*). La obra terminada ha resistido a las tormentas posteriores y es de fácil mantenimiento y de bajos costos.*

**Palabras Clave:** *Duna Costera - Erosión Costera - Defensa Costera Oculta - Pehuen Có*

#### Abstract

*The La Barraca building is a public house (pub) built in Pehuen Có by the Municipality of Coronel Rosales. The same was built on the coastal dune despite some criticism of it.*

*Previous studies had drawn attention about a general erosion of the frontal dune, being the most affected area the beach access at Azopardo Street.*

*In 2004 the construction began to feel the effects of erosion by the increment of the slope of the dune, gradually losing the seaward platform that served as an outdoor terrace, exposing the building's foundation.*

1. Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geología.

2. Museo de Ciencias Naturales Carlos Darwin, Punta Alta.

3. Universidad Tecnológica Nacional, FRBB

*The aim of this paper is to present the performance of a hidden coastal defense, seeking a labor intensive solution rather than a capital intensive one. Polypropylene bags filled with sand, a membrane to protect them and finally a sand coverage vegetated with "uña de gato" (*Carpobrotus edulis*) were used. The finished work has resisted subsequent storms and has an easy maintenance and a low cost.*

**Keywords: Coastal Dune - Coastal Erosion - Hidden Coastal Defense - Pehuen C6.**

## INTRODUCCIÓN

En el año 1998 el Municipio de Coronel de Marina Leonardo Rosales construyó en la localidad balnearia de Pehuen-C6 una infraestructura destinada a eventos sociales y recreación denominada La Barraca. Este edificio de una planta se levant6 sobre el duna costera a pesar de algunas cr6ticas hacia ello. Estudios realizados por Cal6 *et al* (1987) hab6an llamado la atenci6n sobre una erosi6n generalizada de la duna frontal siendo la zona m6s afectada la bajada de la Calle Azopardo. Hacia el a6o 2002 la construcci6n comenz6 a sentir los efectos de la erosi6n perdiendo progresivamente la plataforma del edificio construida hacia el mar, que se utilizaba c6mo confiter6a al aire libre y en el a6o 2004 ya quedaban expuestos los cimientos del edificio (Figura 1).

El objetivo de este trabajo es mostrar la decisi6n del Municipio de Coronel Rosales de proteger el edificio por medio de una defensa costera oculta a la vista, hecha con tecnolog6a adecuada o apropiada (Schumacher, 1999), es decir, buscando una soluci6n intensiva en trabajo en lugar de una intensiva en capital. Se utiliz6 el nivel de tecnolog6a m6s sencillo que pueda alcanzar con eficacia el prop6sito buscado en una localizaci6n concreta, dise6ada teniendo en cuenta la facilidad de

mantenimiento y los aspectos medioambientales y econ6micos de la comunidad a la que est6 dirigida.

### Ubicaci6n y caracter6sticas f6sicas del sitio

Pehuen-C6 es una localidad tur6stica balnearia, ubicada en la costa del partido de Coronel Rosales, en el sur de la provincia de Buenos Aires, a 80 km de la ciudad de Punta Alta y a 30km de la ciudad de Monte Hermoso por la costa. Las coordenadas geogr6ficas del sitio son: 39°00'13,92"S y 61°32'53,90", con una altitud de 0 msnm (Figura 2). La poblaci6n de Pehuen-C6 es de 681 habitantes (INDEC, 2010).

El sistema costero est6 compuesto por un campo de dunas, que respalda a la playa de orientaci6n este-oeste. Est6n caracterizadas por arenas cuarzosas de colores amarillentos, de granulometr6a media a fina, que forman el cord6n arenoso costanero y faja medanosa de la provincia de Buenos Aires. Se extiende a lo largo de 600 Km de costa Atl6ntica con un ancho variable de 3 Km promedio. Estas dunas alcanzan alturas m6ximas del orden de 25 msnm y medias entre 5 y 10 msnm y representan el relicto arenoso generado por la acci6n del mar sobre los sedimentos pampeanos y sometidos posteriormente a la acci6n del viento (Auge, 2004). El campo de dunas se interrumpe entre Santa Clara del Mar y Chapadmalal debido a la existencia de barrancas formadas en los sedimentos pampeanos.



Figura 1. Estado de la duna y construcci6n al comienzo de las obras de defensa.

La playa con un ancho de 200 a 300 m, es arenosa de granulometría media entre fina a mediana, con una morfología de barras y canales, pero que posee algunos afloramientos de limos consolidados correspondientes a una antigua plataforma de erosión (Figura 3).

El régimen de mareas es semidiurno con una amplitud máxima de 3,30 m (mareas de sicigias equinocciales de perigeo) y una mínima de 1,34 m (mareas de cuadraturas equinocciales de perigeo). Tabla de mareas del *Servicio Hidrografía Naval* (1986, 1987)

Es estudio de dinámica costera de dos años de duración (Caló *et al.*, 1986, 1987), con observaciones diarias de meteorología y oceanografía costera y muestreo y perfilaje de playa quincenales, permitió contar con una base estadística de la que se extrajeron los datos que figuran a continuación.

La ubicación relativa de centros ciclónicos y anticiclones da lugar a los distintos vientos de la región. Los vientos predominantes son netamente terrestres, de los sectores N, NE y NO que en conjunto constituyen el 43,9 % de la frecuencia, los marinos del S, SO y SE suman el 28,2 % del total, el resto



Figura 2. Ubicación del área de estudio.



Figura 3. Perfil de playa con afloramientos rocosos.

se reparte entre aquellos paralelos la costa, sectores E (11,7%) y O (16,0). Los vientos provenientes del arco E al SW, pasando por el S, son los que caracterizan el mal clima del balneario con fuertes vientos y grandes olas.

La caracterización ambiental modal de esta playa, está dada por olas provenientes del sur (75,8 %), con alturas entre 0,3 y 0,6 m (60,5 %). Los rompientes son tipo derrame (83,3 %). Con respecto a las corrientes litorales, predominan la del este (56,6 %) generada por el oleaje que se aproxima desde el sudoeste y oeste, contra la del oeste (31,4 %) producida por el oleaje que se acerca desde el sudeste y este.

Esta playa, típicamente de barras y canales, tiene un perfil cambiante que depende de las condiciones oceanográficas. Así, durante tormentas, la playa está sujeta a grandes olas, su perfil se transforma en cóncavo sin ningún rasgo morfológico distintivo, salvo el canal y barras submarinas que suelen adquirir tamaños considerables. Puede haber incluso erosión de la parte frontal de la duna. Durante períodos de olas normales, la playa se reconstruye mediante la migración de barras hacia la costa. Estas barras migran hacia la zona de playa posterior hasta agregarse como bermas, dando así por resultado un perfil convexo con algunos canales y barras en la playa anterior ("near shore").

A partir del análisis temporal de perfiles de playa se determinó el balance sedimentario de la misma, observándose que el sector al oeste de la localidad presenta una dificultad mayor para recuperar el material perdido que el sector este, en que la restauración fue más rápida (Caló et al, 1987, Marcomini et al. 2009).

Las características del oleaje y tipo de sedimento generan una playa modal de tipo disipativo (Wright et al., 1979; Bowman y Goldsmith, 1893; Wright y Short, 1984; Short, 1991; Short, 1992), con barras y canales y con formación de corrientes de resaca, tipo que puede variar hacia una playa de transición a reflectiva con berma muy desarrollada y alto gradiente del frente de playa. Las playas de tipo disipativo presentan movilidad de las barras de acuerdo a las circunstancias oceanográficas. Si bien hay generación de vientos locales, tales como la brisa marina, principalmente en los meses cálidos, la mayor influencia de estos es la reducción o aumento de la energía de las olas de mar de leva por aquellos provenientes de tierra y del mar respectivamente.

La vegetación al fijar los dunas puede convertirse en un factor negativo al impedir que los vientos del continente suministren arena a la playa. Esto también sucede cuando se construye muy cerca de la línea de costa. La construcción de obras civiles marítimas deberán adecuarse al régimen de olas y morfología de playa, teniendo en cuenta los fenómenos cíclicos y cuasi cíclicos que hacen necesario un largo período de recolección de datos para obtener información valedera, dado que varias construcciones en el límite interior de la playa sufrieron daños en ciertas épocas.

Deberán tomarse en cuenta las corrientes litorales para aquellas obras, tales como espigones, que puedan alterar las mismas y producir erosión corriente abajo y que originan cambios importantes en el balance sedimentario de la playa, al obstaculizar el normal tránsito de los sedimentos, debido a la alteración que producen en las corrientes longitudinales, y lo que es peor, desviándolos a aguas profundas donde quedan fuera de la acción de las olas y las corrientes (Lanfredi, 1989,)

El conocimiento de los procesos atmosféricos y oceanográficos, junto con los caracteres texturales sirven para clasificar ambientalmente una playa y diagnosticar sus cambios

morfológicos y su dinámica, factores que son de utilidad para el manejo costero y la evaluación de impactos.

En base a los datos oceanográficos costeros y a la morfología litoral coleccionados anteriormente (Caló et al., 1986) y mediante un modelado utilizando el programa ACES del Centro de Investigación de Ingeniería Costera del Cuerpo de Ejército de los EE.UU., se pudo establecer que las olas de tormenta no rompían contra el duna sino que la erosión era producida por la embestida y retroceso del remonte de la ola sobre la ladera de la duna y que llevándose la arena excavaba el pie de la misma produciendo una erosión retrocedente del talud por deslizamiento.

El objetivo del trabajo es seleccionar una metodología de remediación del caso planteado a través de la comparación de las distintas alternativas disponibles.

### Resultados y Discusión

La situación planteada tiene dos alternativas normales en la gestión costera, que son dejar la edificación abandonada a su suerte o demolerla, o tomar medidas de protección contra la erosión y defenderla. El Municipio hizo consultas en cuanto a la defensa de la duna y los proyectos presentados contemplaban la utilización de gaviones o de geobolones (construidos éstos con geotextiles) para levantar un muro a la vista al estilo malecón que revistiera el talud y protegerlo de la erosión. Los costos incurridos en estos proyectos eran demasiado altos para el presupuesto municipal.

Se propone entonces la utilización de una tecnología apropiada utilizando bolsas de rafia de polipropileno rellenas de arena. Estas defensas, bien conocidas para mitigar los efectos producidos por inundaciones, donde los albardones artificiales construidos con las mismas no eran de una altura significativa y las fuerzas puestas en juego eran principalmente tangenciales producto del flujo del agua a lo largo de los mismos. También fueron utilizadas para proteger costas de lagos, donde la energía puesta en juego por las olas era de bajo orden. Se desaconsejaba su uso en la defensa de costas marítimas. La utilización de geosistemas (colchones, tubos, contenedores construidos con material geotextil) sugerida por Pilarczyk (2000) quien sentó bases para su optimización y su uso en defensas costeras flexibles en contraposición a las defensas costeras "rígidas" (malecones, escolleras, etc.).

Para el caso de La Barraca la tecnología propuesta utilizando bolsas rellenas de arena presentaba para el Municipio la ventaja de una baja inversión, dado el económico costo de las unidades y de que su llenado y el manipuleo podían efectuarse con mano de obra municipal (Figura 4). La desventaja del tipo de material con que se construían las bolsas era su vulnerabilidad a los rayos ultravioletas del sol, que lo degradaban relativamente rápido. Por esta razón se decidió una reconstrucción de la duna utilizando las bolsas en forma apilada (Figura 5) y apoyadas en el talud remanente en forma de revestimiento, recubriéndolas con una membrana geotextil para impedir el desplazamiento frente a la acción directa de la ola (Figura 6) y luego con arena para finalmente implantar vegetación "uña de gato" (*Carpobrotus edulis*) que se adapta al ambiente dunícola costero (Figura 7). Para proteger de la erosión el pie de la "duna reconstruida" se preparó, antes de apilar las bolsas, una defensa hecha con rezagos existentes en el corralón municipal (rieles y guardarailes) y con los escombros de la plataforma desbarrancada por la erosión. Esta protección permitió la reconstrucción de la misma para su utilización como confitería al aire libre.

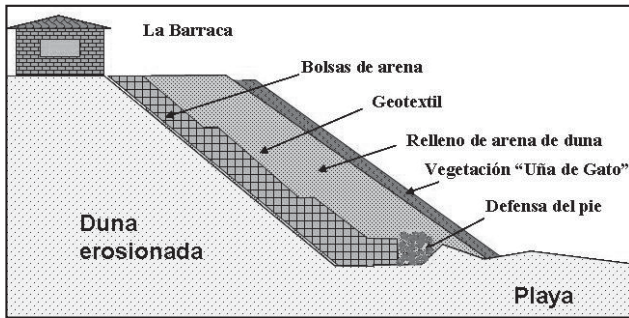


Figura 4. Esquema de la protección proyectada.

Esta disposición de una defensa liviana incorporada dentro de una duna reconstruida (artificial) tiene la ventaja de proteger a las bolsas de la acción de los rayos ultravioletas del sol, de vandalismo y de no afectar el paisaje ya que tiene una convivencia sostenible con las formas naturales costeras, con lo que pasan desapercibidas. *Pope, 1997 y Lopez y Marcomini, 2005.* No se han observado efectos erosivos en la playa como consecuencia de la obra desde su construcción.

Si el revestimiento se descubre después de una tormenta, la parte artificial de la duna debe ser reconstruida y si hubo daños al revestimiento éstos deben ser reparados antes de la restauración final. La estructura realizada presenta en cada extremo un ala inclinada hacia el continente para evitar el flanqueo de una posible erosión por la acción del remonte de la ola.

En total se utilizaron 4000 bolsas para proteger el frente de la construcción. Desde que se realizó la protección, hasta la actualidad se mantiene efectiva y ha requerido un bajo mantenimiento posterior a las distintas tormentas que se fueron sucediendo (Figura 8).

### Conclusiones

De acuerdo a los estudios oceanográficos y litorales realizados, el área de estudio está sometida a una erosión generalizada de la duna frontal. La zona más afectada es la bajada de la Calle Azopardo donde se localiza la Barraca.

La defensa costera fue llevada a cabo utilizando el nivel de tecnología más sencillo que pueda alcanzar con eficacia el propósito buscado.

El proyecto se ejecutó priorizando las posibilidades económicas del municipio y las capacidades operativas de su personal y maquinarias.

La misma fue diseñada para ser preservada con un bajo costo de mantenimiento fundamentalmente con posterioridad a las tormentas costeras.

Se tuvieron en cuenta los aspectos medioambientales quedando la obra culminada totalmente mimetizada con el paisaje del lugar. En la actualidad, la obra se mantiene efectiva.

Se recomienda realizar mantenimientos periódicos de fácil y económica solución, y no ejecutarlos solamente durante las tormentas erosivas.



Figura 5. Colocación de las bolsas rellenas con arena.



Figura 6. Colocación de membrana geotextil.



Figura 7. Obra cubierta con arena con sembrado de *Carpobrotus edulis*, "uña de gato".

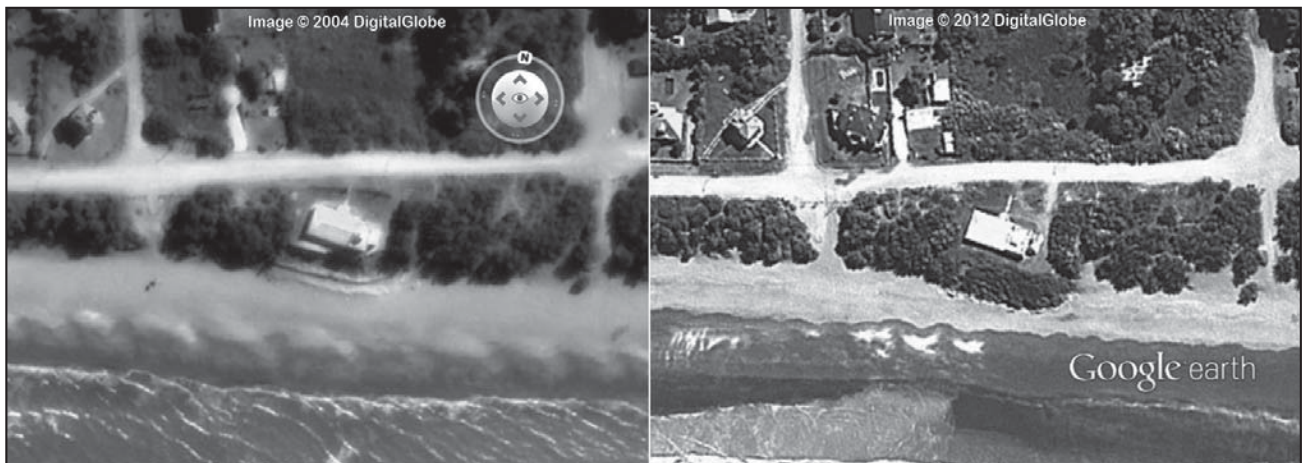


Figura 8. Estado de la obra entre 2004 y 2012.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AUGE, MIGUEL, 2004.  
Regiones Hidrogeológicas. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fé.  
*La Plata. 104 p. En: www.alhsud.com/public/ebooks/reghidroarg.pdf*
- BOWMAN, D. Y V.GOLDSMITH, 1983.  
Bar morphology of dissipative beaches: an empirical model.  
*Marine Geology, 51:15-33.*
- CALÓ, J.E., G. ESPÓSITO, W. LIZASOAIN Y R.CAPUTO, 1986.  
Estudio Litoral Geológico Ambiental (Dinámica Sedimentaria) de la Playa de la Localidad de Pehuen-Có.  
*Primer Informe. Municipalidad de Coronel Rosales e Instituto Argentino de Oceanografía. Bahía Blanca, 51 pp.*
- CALÓ, J.E., G. ESPÓSITO, R. CAPUTO Y W. LIZASOAIN, 1987.  
Estudio Litoral Geológico Ambiental (Dinámica Sedimentaria) de la Playa de la Localidad de Pehuen-Có.  
*Segundo Informe. Municipalidad de Coronel Rosales e Instituto Argentino de Oceanografía. Bahía Blanca, 65 pp.*
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS (INDEC), 2010.  
Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010.  
*Censo 2001; "Provincia de Buenos Aires, población censada en 1991 y 2001, variación absoluta y relativa", disponible en: <www.indec.gov.ar>.*
- LANFREDI, N.W., 1989.  
La Erosión Costera.  
*Boletín informativo Techint N258, 36p.*
- LÓPEZ R. Y S. MARCOMINI 2005.  
Eficiencia de las obras de defensa en costas de dunas, Municipio de La Costa.  
*Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. 21, 157-165.*
- MARCOMINI S., LÓPEZ R. Y F. UHEARA, 2009.  
Manejo Costero en la costa de dunas de Pehuen-Có, Buenos Aires.  
*Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, 23: 75-83.*
- PILARCZYK, K.W., 2000.  
Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering, A.A. Balkema, Rotterdam.
- POPE J., 1997.  
Responding to coastal erosion and flooding damage.  
*Journal of Coastal Research, 13(3), 704-710.*
- SCHUMACHER, E. F., 1999.  
Small Is Beautiful: Economics As If People Mattered : 25 Years Later... With Commentaries.  
*Hartley & Marks Publishers ISBN 0-88179-169-5.*
- SERVICIO DE HIDROGRAFÍA NAVAL.  
Tabla de mareas 1986,1987.
- SHORT A.D., 1992.  
Beach system of the Central Netherlands coast: processes, morphology and structural impacts in a storm driven multi-bar system.  
*Marine Geology, 107: 103-137.*



SHORT A.D., 1991.

Macro-meso tidal beach morphodynamics- an overview.  
*J. Coast. Res.*, 7(2): 417-436.

WRIGHT L.D. Y A.D.SHORT, 1984.

Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis,  
*Marine Geology*, 56: 93-118.

WRIGHT L.D., J CHAPPELL, B.J. THOM, M.P. BRADSHAW Y P. COWELL, 1979.

Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia.  
*Marine Geology*, 32: 105-140.



## Implementación de un modelo matemático distribuido de escurrimiento superficial en la cuenca del Río Tercero - Carcarañá

### Implementation of a distributed mathematical model of surface runoff in the Tercero - Carcarañá river basin

Stenta, Hernán<sup>1,2</sup> ✉ - Riccardi, Gerardo<sup>1,2,3</sup> - Basile, Pedro<sup>1,2</sup> - Trivisonno, Franco<sup>1,4</sup>

Recibido: 10 de diciembre de 2014 • Aceptado: 26 de diciembre de 2014

#### Resumen

*Se presenta la implementación y calibración preliminar de un modelo matemático distribuido, hidrológico-hidráulico físicamente basado en la cuenca del río Tercero-Carcarañá (provincias de Córdoba y Santa Fe). La cuenca tiene una superficie de aproximadamente 61.454 km<sup>2</sup> y su principal curso es el río Tercero - Carcarañá, con descarga al río Coronda a la altura de Puerto Gaboto. Se utilizó como modelo digital del terreno la información proveniente de la misión SRTM, con agregamiento en celdas de 900 m x 900 m. Adicionalmente se contó con información de red de cursos desde cartas topográficas del IGN, imágenes Google Earth ©; recorridas de campo y proyectos existentes. El modelo quedó constituido con 75.870 celdas y una red de cursos de 1.705 km y fue calibrado preliminarmente con información hidrológica e hidráulica de tres eventos extraordinarios. Para avanzar en el conocimiento de la mecánica de propagación del escurrimiento una primer aplicación consistió en la determinación de la incidencia de los aportes superficiales provenientes de unidades areales elementales en 17 puntos característicos de la red de cursos principales. Si bien se evidencia un severo déficit de información, los primeros resultados obtenidos en la transformación lluvia caudal y propagación de escurrimiento superficial son aceptables.*

**Palabras Clave:** grandes cuencas de llanura, modelación matemática distribuida, río Carcarañá-Tercero.

1. Departamento de Hidráulica - Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA- Universidad Nacional de Rosario). Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina.

✉ hstenta@fceia.unr.edu.ar

2. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA - Universidad Nacional de Rosario) Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina.
3. Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina.
4. Becario Doctoral Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas Riobamba 245 bis. (2000) Rosario.

#### Abstract

*The implementation and calibration of a physically-based and spatially-distributed quasi-2D mathematical model in the basin of Tercero - Carcarañá river (Córdoba and Santa Fe Provinces) is presented. The basin area is approximately 61454 km<sup>2</sup> and its main stream is the Tercero - Carcarañá*

river, whose outlet is in the Coronda River, near Puerto Gaboto. The information from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) was used as digital terrain model (DTM) with cells of 900 m x 900 m. Additional information about river network was obtained through the IGN topographic maps, Google Earth®, local topographic data and existing projects. The mathematical model was implemented with 75870 cells and a river network of 1705 km (1895 cells) and was preliminarily calibrated with hydrological and hydraulic data from three extraordinary events. To advance the understanding of the mechanics of runoff propagation one first application was to determine the incidence of surface contributions from elemental areal units in 17 characteristic points of the network of main courses. While evidence of a severe lack of information, the first results obtained in the rainfall - runoff transformation and propagation of surface runoff are acceptable.

**Keywords:** flatland basins, distributed mathematical modeling, Tercero - Carcarañá river.

## INTRODUCCIÓN

En la cuenca hidrográfica de los ríos Tercero-Carcarañá se han realizado diferentes estudios y trabajos orientados a la descripción general de sus características más relevantes desde el punto de vista de los recursos hídricos, aspectos ambientales y socio-políticos.

Paoli *et al.* (2000) realizan una descripción general del área perteneciente a la cuenca del río Carcarañá, pero con el detalle descriptivo de la cuenca del Plata y subcuencas de los ríos Paraguay y Paraná. Los autores realizan una descripción general de las características físicas, geológicas, geomorfológicas y climatológicas de las cuencas de aporte al tramo medio del río Paraná, entre las cuales se encuentra la cuenca del sistema Tercero-Carcarañá.

Giacosa *et al.* (2000) realizan una caracterización hidrológica a nivel general del tramo medio del río Paraná donde se incluye a la cuenca del río Carcarañá como área de aportes. Asimismo realizan una caracterización hidrométrica del río Carcarañá, realizando un trabajo estadístico sobre caudales anuales y mensuales a partir de la información existente de la estación Pueblo Andino.

La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRHN, 2014) presenta un reporte descriptivo de las cuencas hídricas de la República Argentina, entre la que se encuentra la cuenca del río Carcarañá. En dicho trabajo se realiza la descripción general de aspectos físicos-naturales, hidrológicos y socio-económicos de dicha cuenca; remarcando que resultan aspectos descriptivos.

Venencio (2007) realizó una detallada caracterización física regional de la cuenca del río Carcarañá en la provincia de Santa Fe con el principal objetivo de investigar la vinculación regional entre la variabilidad climática y la respuesta del acuífero libre y para estimar cuantitativamente la recarga natural al acuífero libre debido a la lluvia a través de aplicación de diferentes metodologías. Se abordan aspectos de la geología e hidrogeología, geomorfología, dinámica hídrica superficial, características de suelos y cobertura vegetal, hidroquímica y caracterización de la precipitación.

FCEIA (2011); Riccardi *et al.* (2013 a y 2013 b) y Basile *et al.* (2013) llevaron a cabo estudios de prefactibilidad para el aprovechamiento del río Tercero-Carcarañá como ruta fluvial navegable. Se realizó una amplia recopilación de antecedentes y se llevaron a cabo estudios básicos incluyendo la caracterización del área en estudio, la caracterización climática, los estudios de niveles hidrométricos y de caudales, las características generales de la traza actual del río Carcarañá y obras de arte principales.

Barchiesi *et al.* (2013) reportan los resultados obtenidos durante las campañas de monitoreo del río Carcarañá (hasta su desembocadura en el río Coronda) y sus principales tributarios (ríos Tercero y Saladillo), que incluyen la determinación de caudales y parámetros hidráulicos como profundidad y velocidades media, pendiente de la superficie libre, entre otras en distintas secciones.

La revisión del estado del arte indica que no se ha avanzado en profundidad respecto a modelación matemática distribuida del escurrimiento superficial en todo el ambiente hidrográfico de la cuenca de los ríos Tercero-Carcarañá. En este trabajo se comienza a implementar un modelo matemático de escurrimiento superficial, de parámetros distribuidos en toda la cuenca. Se ha avanzado en la constitución del área de modelación construyendo el MDT, la definición de la red de cursos de mayor importancia y la definición de las obras de arte de mayor importancia en la zona de la cuenca baja. El modelo fue calibrado preliminarmente y aplicado a los efectos de analizar áreas de incidencias sobre caudales máximos en una serie de puntos sobre la red de drenaje principal.

## DESCRIPCION DE LOS TRABAJOS

El trabajo se compone de una breve descripción del modelo matemático utilizado; se describe la constitución del modelo matemático distribuido en la cuenca del río Tercero-Carcarañá y se presenta un proceso de pre-calibración o calibración preliminar en función del avance logrado hasta la fecha respecto a la disponibilidad de datos existentes para tres eventos extraordinarios. Por último se describe una aplicación donde se analiza la incidencia sobre caudales máximos aportados desde una serie de áreas elementales en que fue sectorizada la cuenca.

Debido a la extensión superficial del sistema físico a modelar, a la dificultad de acceder a datos tales como registros de niveles, caudales, lluvias y dimensiones de obras de arte, se remarca que aquí se presenta un primer avance.

Posteriores artículos estarán orientados a mejorar la información y características del sistema hídrico en estudio (definición de puentes carreteros y ferroviarios, diferentes tipos de suelos para extracción de lluvia neta; etc.) y a simular una serie de eventos y crecidas observadas que permitan realizar la calibración y validación del modelo implementado. Se proyecta a mediano plazo desarrollar una herramienta tecnológica de simulación aplicada al sistema Tercero-Carcarañá orientado a aportar a la solución de las diversas problemáticas que actualmente producen los excedentes hídricos superficiales de la cuenca, como así también aportar soporte tecnológico de simulación de escurrimiento para futuros estudios de factibilidad de navegabilidad y posibles miniaprovechamientos hidroeléctricos entre otros posibles usos del río.

### Descripción del Modelo Matemático

El modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-bidimensional empleado es el VMMHH 1.0 (Riccardi *et al.*, 2013 *c*). Esta herramienta tecnológica es la última actualización de la fusión entre el modelo matemático hidrológico-hidráulico CTSS8 (Riccardi, 2000) y la plataforma en sistema de ventanas para pre y post procesamiento de información y resultados SIMULACIONES (Stenta *et al.*, 2005). El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). El sistema permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos. En cada unidad de la capa superficial es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. Para la información necesaria de lluvia neta en cada celda se plantea la utilización de las metodologías reconocidas de Green y Ampt o del Servicio de Conservación del Suelo de EEUU (Chow *et al.*, 1994). El escurrimiento resultante puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemáticas a difusivas de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación. Para contemplar alternativas puntuales de flujo se incorporaron leyes de descarga para puentes, vertederos y alcantarillas. Las ecuaciones gobernantes consideradas son la de continuidad y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento transformadas en formulaciones de descarga entre celdas. La distribución espacial de los parámetros y variables hidrológicas se realiza mediante la subdivisión de la cuenca en celdas de igual tamaño (cuadrangulares) interconectadas entre sí que definen el dominio del sistema hídrico a modelar. Las celdas pueden ser tipo valle o río, que representan el flujo superficial y en canal respectivamente. De esta forma las celdas tipo río representan cursos de agua permanente y/o transitorios de importancia y las celdas tipo valle representan las áreas tributarias a estos.

### Descripción de la Cuenca del río Tercero-Carcaraña

La cuenca del río Tercero-Carcaraña se encuentra limitada entre los paralelos 31° 32' S y 34° 09' S y los meridianos 64° 58' O y 60° 44' O (Figura 1). Abarca a las provincias de Córdoba y Santa Fe (República Argentina).

Entre las localidades de mayor importancia se encuentran: Río Tercero, Río Cuarto, Villa María, Bell Ville, Laboulaye, Marcos Juárez, Cruz Alta y Corral de Bustos (Prov. de Córdoba) y Armstrong, Cañada de Gómez, Pueblo Andino, Carcaraña, Las Parejas y Puerto Gaboto (Prov. de Santa Fe).

Los cursos de agua de mayor importancia dentro de la provincia de Córdoba son el río Tercero (o Ctlamochita); río Cuarto (o Chocancarava) y río Saladillo; además existen numerosos arroyos, cañadas, bañados y lagunas. (A° Cabral, A° Carnerillo, A° de Tegua, A° Chato, Laguna La Salada, bañado del Saladillo, Cañada Santa Lucía).

El río Carcaraña nace en la confluencia de los ríos Tercero y Saladillo en la Pampa Norte cordobesa. El río Tercero, o Ctlamochita, es el principal de los dos, con varios afluentes caudalosos de las Sierras Grandes y Comechingones que resultan en caudales medios de cerca de 27 m<sup>3</sup>/s. Al entrar en la llanura, el caudal disminuye considerablemente por infiltración, llegando a 17 m<sup>3</sup>/s en Bell Ville y 72 m<sup>3</sup>/s en Andino. La creciente ocurre en marzo con 111 m<sup>3</sup>/s, y la bajante en agosto con 46,1 m<sup>3</sup>/s (Giacosa *et al.*, 2000).

En la provincia de Santa Fe ingresa el río Carcaraña a la altura de Cruz Alta y recibe los aportes de diferentes cursos de agua: A° Tortugas; A° Leones; Cañada de Gómez; entre otros. Finalmente el río Carcaraña desemboca en el riacho Coronda, brazo del río Paraná a la altura de Puerto Gaboto.

La cuenca tiene su parte elevada (límite oeste) en la provincia de Córdoba en el límite con la provincia de San Luis en la sierra de Comechingones (cota máxima aproximada de 2884 m IGN) y una cota mínima en la desembocadura en el río

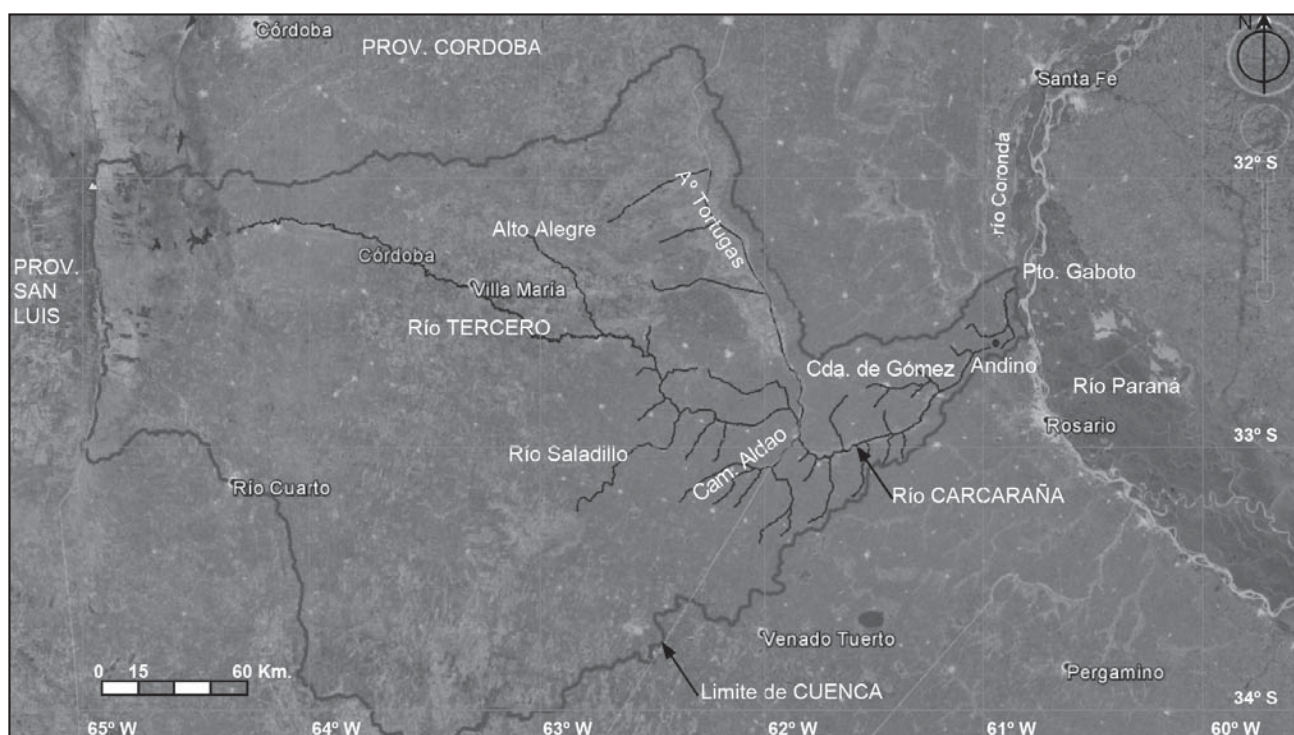


Figura 1. Cuenca del río Carcaraña - Tercero o Ctlamochita. Imagen de fondo Google Earth ©.

Coronda de 11,3 m IGN. La cuenca de aportes superficiales tiene un área estimada de aproximadamente 61.454 km<sup>2</sup>.

En la cuenca se presenta un régimen térmico templado. La isoterma media anual de los 16,5°C pasa dentro de la misma. Las isohietas en el área de estudio tienen cierta disposición N-S, con disminución de E a W, entre las de 1.000 mm y 700 mm aproximadamente (FCEIA, 2011).

Los suelos son resultado de la sedimentación continua cuyos sedimentos superficiales son continentales y de procesamiento eólico. Son muy ricos para la actividad agropecuaria (SSRH, 2014).

La disponibilidad y existencia de datos de precipitación y niveles de agua resulta escasa. Las estaciones activas de registro de niveles operadas por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación son: río Carcarañá - Pueblo Andino, río Chocancharava - Tincunaco, río El Durazno - La Florida, río Grande - Ume Pay y río Coronda - Puerto Gaboto. En función de los objetivos generales de este trabajo de modelación hidrológica-hidráulica resultan de mayor utilidad las estaciones de río Carcarañá - Pueblo Andino (01/04/1980 a 31/12/2013) y del río Coronda - Puerto Gaboto (01/06/1984 al 31/01/2010). En el primer sitio para poder realizar procesos de calibración validación y en el segundo sitio para definir condiciones de borde de aguas abajo del modelo.

Las estaciones de precipitaciones que opera la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación se encuentran en la parte elevada de la cuenca, en el río Grande (Cerro Blanco, El Manzano, La Puente, Lutti, Pampichuela, Yacanto) y El Durazno (La Florida). En tanto que las estaciones de registros de precipitaciones que opera el Servicio Meteorológico Nacional en el área de influencia de la cuenca se sitúan en la provincia de Córdoba: Córdoba Observatorio, Río Cuarto, Laboulaye y Marcos Juárez y en la provincia de Santa Fe: El Trébol, Venado Tuerto y Rosario.

Respecto al régimen de caudales se verifican máximos superiores a 1.200 m<sup>3</sup>/s en crecidas extraordinarias. No obstante, la curva de duración de caudales medios diarios corresponde a un régimen de crecidas de corta duración y esporádicas, con caudales superiores a los 200 m<sup>3</sup>/s en no más del 5% de los días del año; también indica caudales superiores a 100 m<sup>3</sup>/s en no más del 20% de los días del año (FCEIA, 2011). Esta característica observada del régimen de caudales hace factible la simulación por eventos en la cuenca.

## IMPLEMENTACIÓN, CALIBRACIÓN Y EXPLOTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

### Implementación del modelo matemático en la cuenca del río Tercero-Carcarañá

#### Generación del modelo digital del terreno

El modelo digital del terreno (MDT) se constituyó en base a la utilización de los datos correspondientes a la misión SRTM (Nasa, 2006) con cotas de terreno equiespaciadas cada 90 m.

En función de la capacidad de información a ser manejada que permita operar computacionalmente al modelo matemático se adoptó un nivel de discretización espacial de celdas de 900 m x 900 m. Los datos originales del SRTM fueron procesados con un software específico que permitió recortar los datos dentro del límite de la cuenca; realizar la unificación de los mismos; realizar la proyección plana a Gauss-Krüger (GK)

- faja 4 Argentina Posgar 94, Datum WGS 84 y finalmente realizar el agrupamiento en valores equidistantes de 900 m x 900 m.

Para la delimitación de la cuenca se utilizaron las curvas de nivel obtenidas del MDT agregado de 900 m x 900 m y se realizó el trazado considerando la divisoria de aguas topográfica. Se complementó el trazado utilizando las herramientas específicas del software *ILWIS (2005)* tales como la determinación de las direcciones de escurrimiento, la determinación de la red de drenaje, la determinación de las áreas de aportes correspondiente y, finalmente, la delimitación de la cuenca completa. Estas operaciones se utilizaron para complementar, corroborar o modificar la divisoria de aguas obtenida mediante el trazado sobre las curvas de nivel.

Se consideró como sección de control de la cuenca la desembocadura del río Carcarañá en el río Coronda a la altura de Puerto Gaboto.

### Modelación de la red hídrica y puentes.

Para la incorporación de la red de cursos se utilizaron diferentes fuentes de información con la finalidad de obtener tanto la definición de la traza como las características hidráulicas y geométricas más representativas de los diferentes tramos de los cursos. Dichas fuentes fueron: Google Earth ©, relevamientos y estudios previos existentes en el DH-CURIHAM (FCEIA, UNR). En esta primer etapa se realizó la incorporación de los principales cursos. A la fecha no ha sido incorporado a la constitución del modelo la red lagunar del río Cuarto o Chocancharava por no contar aún con la información; sin embargo debe dejarse en claro que a los efectos de estas primeras aplicaciones, donde se focaliza la descripción de crecidas extremas en la cuenca baja del sistema hídrico, la evidencia empírica indica que la respuesta hidrológica en términos de caudales producida por la red del río Cuarto, o Chocancharava, no está directamente en fase con la generación de ondas de crecidas de relevancia en la cuenca baja. Tampoco se constituyó aún el grupo de embalses y presas ubicado en la cuenca alta.

Se realizó el trazado de los cursos en el software Google Earth© y desde allí se exportaron y se realizó el tratamiento correspondiente para obtener la red de cursos georreferenciada en formato DXF. Luego se importaron en la plataforma visual SIMULACIONES 2.0 y se definieron las celdas ríos y sus características en el modelo matemático.

Cada celda río posee las siguientes características: base de fondo, talud, profundidad, coeficiente de rugosidad de Manning en río y en valle y cota de fondo. Estas características debieron ser ingresadas al modelo para cada celda. Se cargaron un total de 1.895 elementos río, generando una extensión de 1.705 km de cursos. En esta primera etapa se incorporó solamente el puente vial de la ruta provincial 10 y el puente ferroviario ubicado aguas abajo de dicha ruta que se encuentran en correspondencia con la sección de registro de niveles y caudales en la cercanía de la localidad de Pueblo Andino.

El modelo se constituyó con un tamaño de grilla (TG) cuadrangular de 900 m de lado (Figura 2), conformado por 75.870 celdas (73.975 celdas tipo valle y 1.895 celdas tipo río) y 150.688 vinculaciones entre celdas.

### Calibración preliminar

Una primera calibración del modelo se llevó a cabo a partir de la simulación de 3 eventos extraordinarios ocurridos en

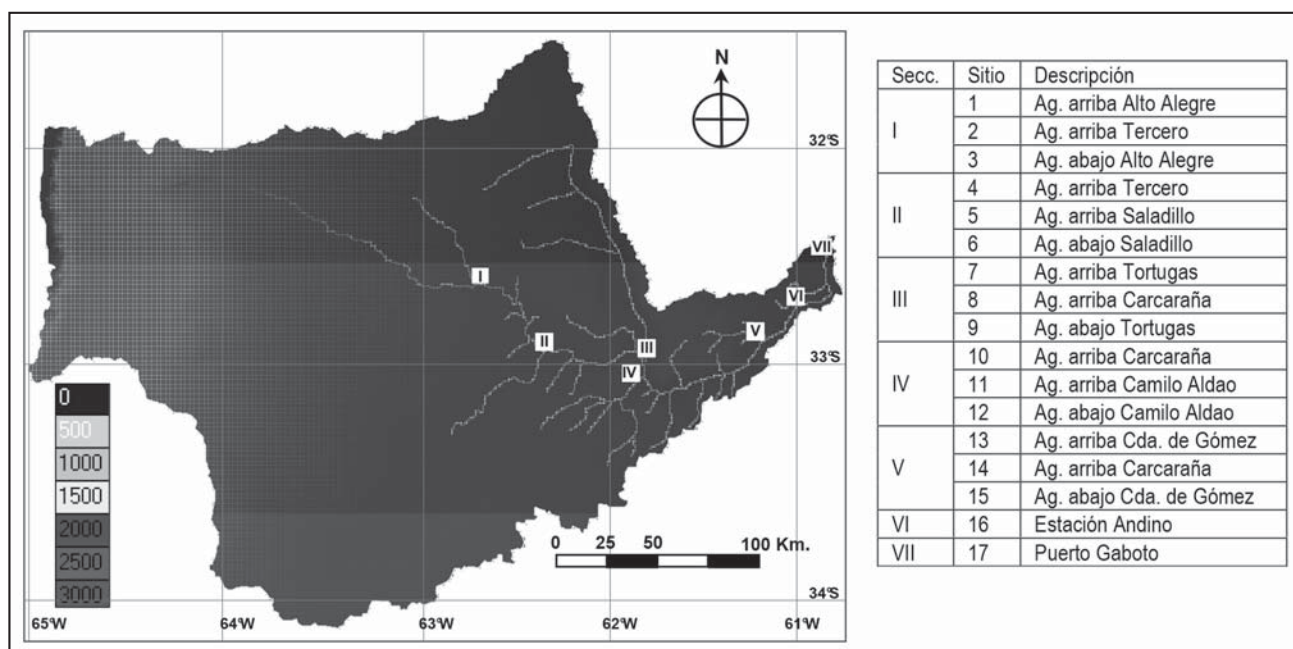


Figura 2. MDT y constitución del modelo matemático. Cuenca del río Tercero o Ctlamochita-Carcaraña.

diciembre de 2000, marzo de 2007 y diciembre de 2013. En todos los casos se partió de la lluvia diaria total registrada en las estaciones del SMN, se determinó la lluvia neta a partir de la técnica del número de curva y luego se corrió el modelo de simulación de escurrimiento. En el borde aguas abajo se consideró la cota de agua respectiva del río Coronda. Se contrastaron volúmenes de escurrimiento, caudales máximos e hidrogramas y limnigramas calculados en la estación Pueblo Andino. En la calificación del ajuste se utilizó la diferencia porcentual en el caso de valores puntuales, en tanto que BIAS, PBIAS y coeficiente de correlación de Pearson R y R2 en el caso de comparación de curvas observadas con calculadas. Esta primer etapa de calibración se focalizó en determinar el rango de rugosidades en el escurrimiento por valle y encausado, como así también en la proposición de la sección transversal de conducción y almacenamiento en las celdas valle.

La distribución espacial de la lluvia se realizó mediante la técnica de los polígonos de Thiessen para las estaciones del SMN. Dado que la información es diaria se hipotetizó una distribución temporal en barros concentrados de 6 h, con el 70 % las primeras 6 h, el 30 % las segundas 6 h. La determinación de la lluvia neta se realizó mediante el método del número de curva CN del SCS (Chow et al., 1994). La definición de CN en condición media se hizo de acuerdo a la clasificación de los mismos a partir de los mapas de suelos del INTA. La determinación de los hietogramas netos para cada tormenta se realizó

fijando el CN en el inicio de cada tormenta, considerando una condición antecedente de acuerdo a la lluvia verificada en días previos.

A partir de contar con los valores observados de alturas de agua y de la curva H-Q; lo que permitió obtener los hidrogramas observados en la sección de Pueblo Andino (SSRHN, 2013) se realizaron las diferentes corridas para los tres eventos analizados con la finalidad de obtener los parámetros de resistencia en este proceso de calibración preliminar. Los valores resultantes del coeficiente de rugosidad de Manning en cursos se valorizaron en el rango 0,03 - 0,04 s/m<sup>1/3</sup>. La rugosidad en valle se ajustó en el rango entre 0,06 - 0,08 s/m<sup>1/3</sup> y las características geométricas de la sección transversal de conducción y almacenamiento dentro de cada resultó en sección triangular, inclinación: 0,02 V: 1 H. Una síntesis de la comparación de las variables en la calibración se presenta en la Tabla 1 y Figura 3. En la Tabla 1 corresponde PBIAS: error porcentual del sesgo (BIAS), EP: error porcentual. Los caudales son inferidos a partir de relación H-Q determinada desde datos de SSRH (2014).

Adicionalmente, en el sitio de la estación Andino, se llevó cabo una comparación entre la curva H-Q observada y la curva inferida desde el modelo en los 3 eventos de calibración. Se determinó un valor del coeficiente R<sup>2</sup> igual a 0,99 entre la curva H-Q observada y calculada.

Tabla 1. Comparación de variables en sitio Pueblo Andino.

Evento	Hmax	Qmax	Vol	PBIAS	PBIAS	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	EP en	EP en	EP
	(m)	(m <sup>3</sup> /s)	(hm <sup>3</sup> )	H (%)	Q(m <sup>3</sup> /s)	H	Q	Hmax	Qmax	vol
Dic. 2000	7,55	692	165	15,72	-21,36	0,67	0,66	-19,64	-26,8	-21,88
Marzo 2007	10,74	974	645	34,51	40,89	0,78	0,77	-2,08	7,92	59,79
Dic. 2013	11,75	1088	763	8,56	8,09	0,81	0,83	-10,66	0,55	8,25

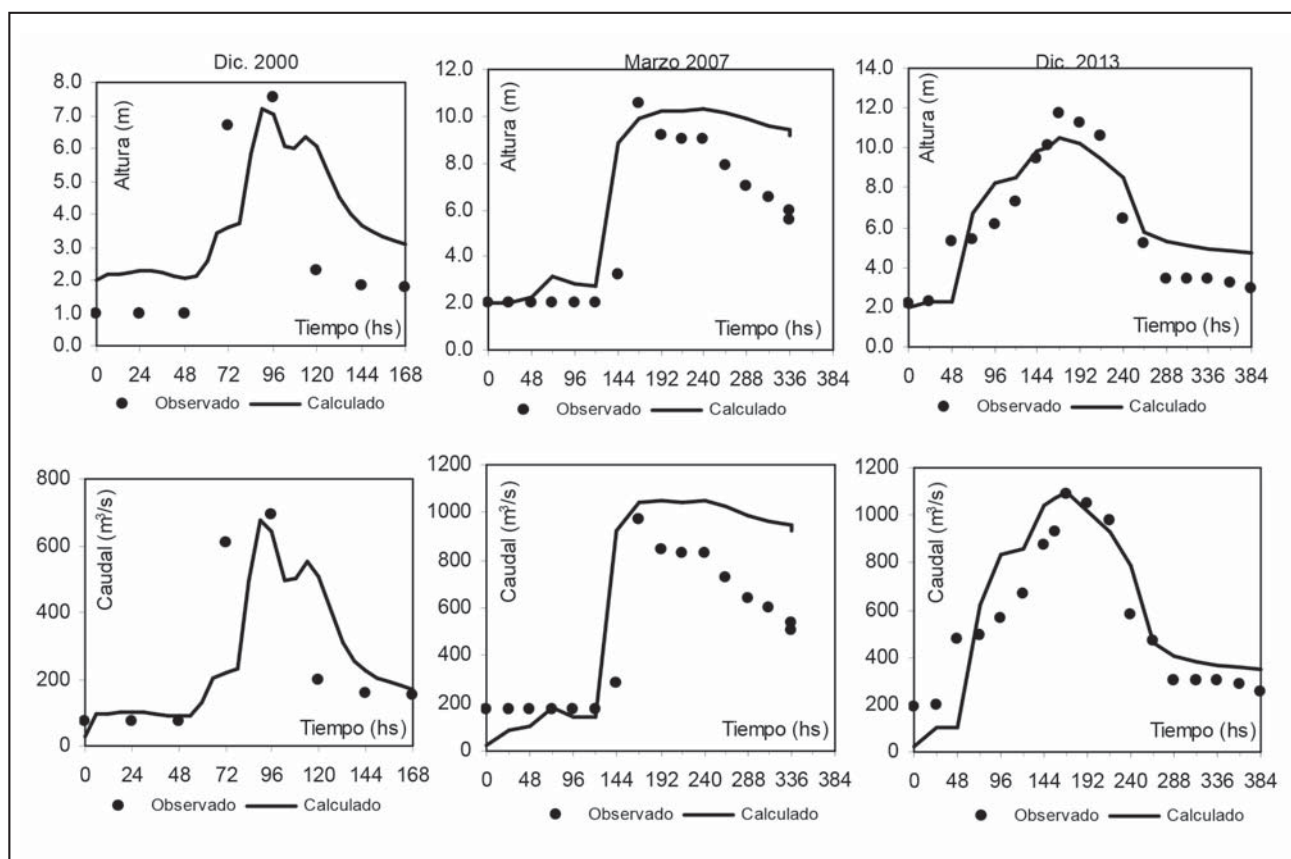


Figura 3. Limingramas e Hidrogramas resultantes en calibración preliminar en Estación Andino.

#### Aplicación del modelo para análisis de incidencia

Una primer aplicación del modelo fue llevada a cabo para la determinación de la incidencia de los aportes superficiales provenientes de cada una de unidades areales elementales (UAE) en que fue subdividida la cuenca. En diversos problemas asociados con mitigación de inundaciones, en particular, y con el control y aprovechamiento de los recursos hídricos, en general, resulta de interés establecer la incidencia sobre los caudales máximos generados en un determinado punto de un sistema hidrográfico, de cada uno de los aportes tributarios provenientes de los distintos sectores espaciales elementales en que se puede desagregar una cuenca de aportes.

Es claro que la incidencia en cada evento dependerá de la variabilidad espacial y temporal de los múltiples procesos hidrológicos predominantes: lluvia, interceptión, infiltración almacenamiento superficial, dinámica de escurrimiento superficial como así también del estado de humedad antecedente, estado de la cobertura y estado inicial del perfil de humedad de los suelos y de los niveles de los cursos de agua y almacenamientos existentes en el sistema. Este trabajo se focaliza en la determinación de la incidencia sobre caudales máximos de los aportes provenientes desde áreas elementales a partir del único análisis de la dinámica de escurrimiento superficial. Se trata de captar, mediante la simulación de escurrimiento, la esencia de los mecanismos predominantes en la dinámica propagatoria sobre las distintas superficies por donde transita la onda de crecida.

La metodología consistió en subdividir la cuenca en 328 UAE de 160 km<sup>2</sup> cada una y analizar el aporte de cada área

tributaria sobre los hidrogramas generados por escurrimiento directo en 17 puntos características de la red de cursos principales. La extensión superficial de cada UAE se corresponde con el área media en que se han presentado ciertas tormentas convectivas de elevadas intensidades y láminas en la cuenca (Cañada de Gómez en año 2000, Serodino, 2002 entre otras), especialmente dentro del territorio de Santa Fe. La influencia de cada área tributaria elemental se determinó mediante el análisis de los hidrogramas generados a partir de cada UAE. Los sitios donde se ha analizado la incidencia de aportes se muestran en la Figura 1.

Primeramente se determinó el área máxima tributaria en cada uno de los sitios característicos, cargando el modelo con una lluvia extremadamente larga de modo de alcanzar un estado cercano al equilibrio. Posteriormente se realizaron 328 simulaciones (cantidad de UAE) de escurrimiento con una lluvia de 48 horas de duración que produce 110 mm de lluvia neta precipitando en cada una de las UAE. Se obtuvieron 17 grupos de 328 hidrogramas, los cuales fueron analizados en la búsqueda de la incidencia de cada UAE en la formación de los caudales máximos en cada uno de los sitios. La metodología permite cuantificar las cantidades de UAE con aportes relevantes y su ubicación territorial. En la Tabla 2 se sintetizan áreas totales tributarias a cada sitio de acuerdo a la constitución del modelo y la fracción porcentual de cada área que inciden sobre la formación de los caudales máximos en una serie de sitios sobre el curso principal. A modo ilustrativo en la Figura 4 se muestran los mapas correspondientes a las áreas con incidencia en los caudales máximos en los sitios 9 y 17.

Tabla 2. Áreas tributarias totales y porción que aporta a caudales máximos en cada sitio.

Sitio	Descripción	Área Máxima Tributaria (km <sup>2</sup> )	% de Area tributaria con aporte sobre caudales máximos (km <sup>2</sup> )
6	Ag. abajo Saladillo	31.509	21,9
9	Ag. abajo A°. Tortugas	50.766	18,8
15	Ag. abajo Cañada de Gómez	59.065	21,3
16	Estación Andino	59.826	21,9
17	Puerto Gaboto	61.455	21,7

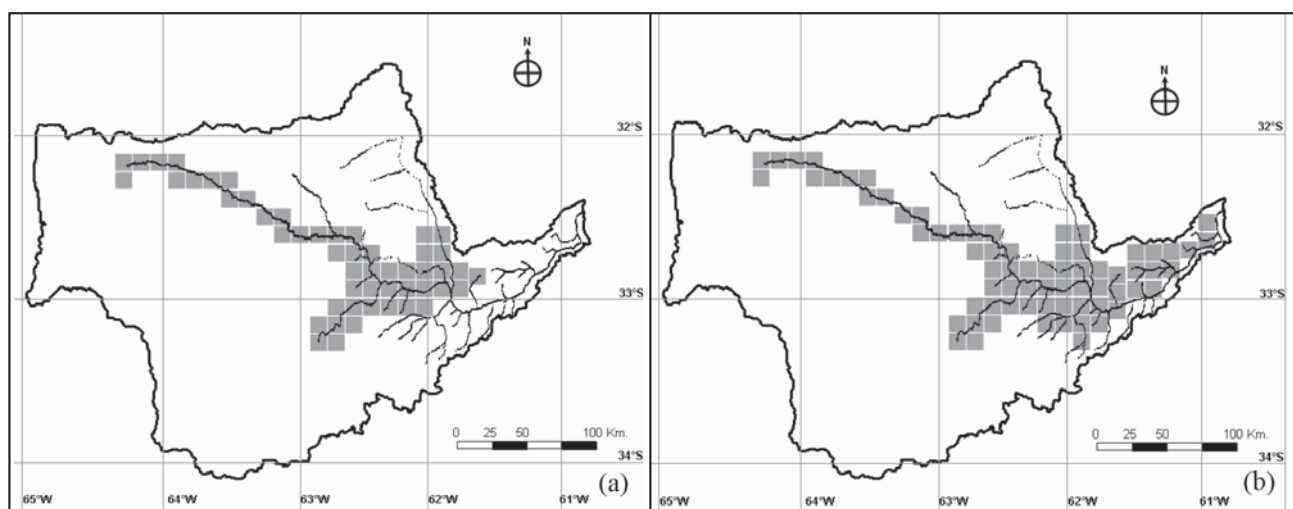


Figura 4. Áreas tributarias al caudal máximo caudal en sitios 9 (a) y 17 (b).

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las simulaciones en esta primera etapa de calibración muestran un aceptable nivel de reproducción de hidrogramas y limnigramas en el sitio de contrastación, Estación Andino. Desagregando en las diferentes tormentas puede afirmarse que en la reproducción de las tormentas de diciembre de 2000 y 2013 los resultados alcanzados son aceptables en su conjunto (valores reproducidos de caudales y alturas máximos y forma del hidrograma y limnigrama). En tanto que para la tormenta de marzo de 2007 solo existe una buena aproximación en los máximos (caudal y altura), siendo pobre el ajuste en forma de hidrogramas; limnigramas y volumen (valores de PBIAS H; PBIAS Q y EP Vol).

La comparación entre la relación H-Q deducida a partir de datos de *SSRH* (2013) y la que genera el modelo es muy buena.

Asimismo debe destacarse que para considerar el modelo calibrado, al menos en términos de parámetros de escurrimiento, debe contarse con información de puntos internos donde sea posible llevar a cabo la contrastación entre limnigramas, hidrogramas y volúmenes escurridos.

La reproducción de la crecida de marzo de 2007 marca un importante incertidumbre respecto a volúmenes generados en la transformación lluvia total  $\rightarrow$  lluvia neta. Si bien los

datos de las estaciones pluviométricas indican importantes precipitaciones en toda la cuenca, el hidrograma inferido desde mediciones de alturas en Estación Andino evidencia una rápida curva de subida y el comienzo inmediato de la curva de recesión, esta característica de la onda de crecida no ha podido ser reproducida bajo ninguna hipótesis de pérdida de escurrimiento si se parte del supuesto que precipita en gran parte de la cuenca por encima de los umbrales de pérdida inicial. Al no haberse registrado limnigramas en ningún tributario del curso principal durante el evento no es posible precisar los volúmenes aportados desde cada subcuenca.

Es claro que los resultados de la modelación alcanzados están en correspondencia con la red de cursos implementada. La posible incorporación de cursos de agua se traducirá en modificaciones en la forma del hidrograma, ya que existen cursos de agua que aportan directamente a la generación del caudal máximo y otros cursos que aportan los caudales en forma desfasada por su diferencia de respuesta hidrodinámica. A la fecha no se ha definido la red de cursos, cañadas y bajos del sistema del río Cuarto (o Chocancharava), esta red tiene una respuesta retardada ya que corresponden a paisajes de pendientes extremadamente reducidas, conjuntamente con la existencia de bajos, cañadas y lagunas.

En lo que respecta al análisis de incidencia, una primer característica que se evidencia es que la fracción de área tributaria



con incidencia de importancia sobre los caudales máximos se valoriza entre un 19% al 22% del área total de aporte. La metodología de analizar los escurrimientos generados a partir de lluvias en las diferentes UAE permite desagregar los aportes tributarios permitiendo establecer su cuantificación como su lugar de origen. Si bien se presentaron resultados respecto a la incidencia sobre las ordenadas temporales de presentación de caudales máximos, igual análisis puede llevarse a cabo para analizar incidencia en otras ordenadas temporales. Esta aplicación ha resultado de utilidad para desagregar los mecanismos de la dinámica propagatoria de cada onda de crecida elemental en referencia a cada uno de los sitios considerados.

## CONCLUSIONES

Se ha presentado un primer avance de trabajos de implementación de un modelo matemático distribuido, cuasi bidimensional, de escurrimiento superficial en la cuenca del río Tercero-Caracañá.

En función del estado del arte en la temática se evidencia la inexistencia de trabajos de esta índole donde se intenten reproducir los procesos dominantes de transformación lluvia-caudal en la cuenca mediante modelación matemática distribuida.

Hasta la fecha se ha realizado la implementación del modelo matemático incorporando el MDT, la red principal de cursos (con la definición de las características hidráulicas y geométricas) y la definición de puentes carretero y ferroviario en la sección de aforo (Pueblo Andino).

La calibración mostró aceptables resultados, logrando una reproducción muy buena en las crecidas de 2000 y 2013 y pobre en la de 2007. Considerando la extensión territorial de

la cuenca para asegurar una aceptable calidad de simulación deberá contarse con contrastaciones de limnigramas e hidrogramas en localizaciones internas de la cuenca.

La curva H-Q que resulta de la modelación presenta un aceptable grado de ajuste en comparación con la curva H-Q observada.

Los parámetros de resistencia obtenidos en el proceso de calibración se encuentran dentro de los valores usuales reportados en la bibliografía.

La aplicación en el análisis de incidencia del aporte generado en las diferentes UAE en que se sectorizó la cuenca permite discriminar las zonas con aporte de escurrimiento dominante en cualquier sitio. La discriminación resulta posible tanto para caudales máximos como medios o mínimos. La aplicación permitió conocer la dinámica propagatoria de las ondas de crecidas provenientes desde las UAE.

Se observa una importante escasez de datos tales como lluvias y niveles o caudales dentro de la cuenca. La única estación activa con registro sistemático de niveles y de aforos es la estación de Pueblo Andino (río Caracañá). Esta situación implica la imposibilidad a la fecha de completar un proceso de calibración-validación con representatividad en toda la cuenca.

Los próximos trabajos estarán orientados a la incorporación de puentes carreteros y ferroviarios que afectan al escurrimiento, la definición e incorporación de otras líneas de escurrimiento como el río Cuarto, o Chocancharava, y sus correspondientes sistema lagunar de bajos y bañados, a los efectos de incorporar mejoras tendientes a lograr una adecuada representación de la dinámica hídrica superficial.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BARCHIESI, G., DÍAZ LOZADA, J.M., CAMINAL, F., HERRERO, H., GARCÍA, M., COSSAVELLA, A., CASTELLO, E., ROMAGNOLI, M., PORTAPILA, M., 2013.  
Cuantificación y Caracterización del Escurrimiento en la Cuenca del río Caracañá.  
*Sexto Simposio Regional Sobre Hidráulica de Ríos, Santa Fe, Argentina.*
- BASILE, P., RICCARDI, G., ZIMMERMANN, E., STENTA, H., BUSSI, P., MANGIAMELI, P., 2013.  
Aprovechamiento del río Caracañá-Tercero como vía fluvial navegable. Parte I: Diseño del sistema de transporte y de la vía fluvial.  
*Revista Cuadernos del CURHAM, vol.19, año 2013. pp. 51-69. En prensa.*
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. Y MAYS, L., 1994.  
Hidrología Aplicada,  
*McGraw-Hill.*
- CUNGE, J., 1975.  
Two Dimensional Modelling of Flood Plains  
*Cap. 17 Unsteady flow in open channels (Ed. Mahmood K. and Yevjevich V.) Water Resources Publications, Fort Collins.*
- FCEIA 2011.  
Estudio de Prefactibilidad para el Aprovechamiento del río Caracañá como Ruta Fluvial Navegable.  
*Informe de Avance N° 1 y 2. Rosario, Septiembre 2011.*
- GIACOSA, R., PAOLI, C. Y CACIK, P. (2000).  
Conocimiento del regimen hidrológico. Cap. 2.  
*En: El río Paraná en su tramo medio. Paoli, C. y Schreider, M (eds). Tomo 1. ISBN Tomo 1. pp. 69-104. 987-508-121-3. Centro de Publicaciones Universidad Nacional del Litoral.*
- ILWIS (2005).  
Integrated Land and Water Information System.  
*ILWIS 3.3 Academic. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente.*

- NASA, 2006.  
Shuttle Radar Topography Mission.  
<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- PAOLI, C., IRIONDO, M. Y GARCÍA, N., 2000.  
Características de las cuencas de aporte. Cap. 1.  
*En: El río Paraná en su tramo medio. Paoli, C. y Schreider, M. (eds). Tomo 1. ISBN Tomo 1. 987-508-121-3. Centro de Publicaciones Universidad Nacional del Litoral.*
- RICCARDI, G. 2000.  
Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica Cuasi-2D Multicapa para Ambientes Rurales y Urbanos.  
*XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba, Argentina. Vol. II, pp. 159-168.*
- RICCARDI, G., BASILE, P., ZIMMERMANN, E., STENTA, H., BUSSI, P., MANGIAMELI, P., PESCI, M., 2013.a.  
Diseño de presas de navegación en el estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento del río Carcarañá como vía fluvial navegable.  
*Sexto Simposio Regional Sobre Hidráulica de Ríos, Santa Fe, Argentina.*
- RICCARDI, G., BASILE, P., ZIMMERMANN, E., STENTA, H., BUSSI, P., MANGIAMELI, P., PESCI, M., 2013.b.  
Aprovechamiento del río Carcarañá-Tercero como vía fluvial navegable. Parte II: Diseño hidráulico de presas de navegación.  
*Revista Cuadernos del CURIHAM, vol 19, año 2013. pp. 71-85.*
- RICCARDI, G., STENTA, H., SCUDERI, C., BASILE, P., ZIMMERMANN, E., TRIVISONNO, F., 2013.c.  
Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real.  
*Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IV, núm. 1, pp. 83-105*
- SSRHN, 2013.  
Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, Base de Datos Hidrológica Integrada  
<http://www.hidricosargentina.gov.ar>
- SSRHN, 2014.  
Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación,  
[http://www.hidricosargentina.gov.ar/documentos/referencias\\_i8/31.pdf](http://www.hidricosargentina.gov.ar/documentos/referencias_i8/31.pdf) (acceso 15/04/2014).  
*Elaborado por Santiago Javier Martínez. 10 pag.*
- STENTA, H., RENTERÍA, J. P. Y RICCARDI, G., 2005.  
Plataforma Computacional para Gestión de Información en la Simulación Hidrológica-Hidráulica del Escurrimiento Superficial.  
*XXº Congreso Nacional del Agua y IIIº Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Mendoza. ISBN 987-22143-0-1. CD-ROM Cap. Hidrología. T 74. pp. 1-13.*
- VENENCIO, M. DEL V., 2007.  
La Recarga Natural Al Acuífero Libre Y Su Vinculación Con La Variabilidad Climática Regional.  
*Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional De Córdoba. 211 págs.*





## El acuífero libre costero de Monte Hermoso, Argentina. Generalidad. Recurso y reserva

## The unconfined coastal aquifer of Monte Hermoso, Argentina. Generality. Resource and reserve

Di Martino, Claudina <sup>1,2</sup> ✉ - Albouy, René <sup>2</sup> - Cifuentes, Olga <sup>1</sup> - Marcos, Angel <sup>2</sup>

Recibido: 11 de noviembre de 2014 • Aceptado: 26 de diciembre de 2014

### Resumen

*El recurso hídrico subterráneo de la localidad de Monte Hermoso se encuentra emplazado en el cordón costero medanoso característico del litoral bonaerense que constituye la única fuente para el abastecimiento de agua potable de dicha localidad.*

*El objetivo general de este trabajo es la estimación de la recarga del acuífero freático, homologable al recurso hídrico potencial subterráneo, es decir, la cantidad de agua disponible anualmente en términos de un régimen de explotación racional y sustentable del recurso.*

*Para estimar la recarga debido a las lluvias se utilizaron dos métodos: el balance de masas de agua a nivel de suelo y el balance de masas del ión cloruro entre el agua de la precipitación y de la capa freática. Los valores de recarga obtenidos se contrastaron con los hallados por otros autores en áreas medanosas similares.*

*Los resultados indican, que la recarga media al acuífero en condiciones naturales, representa un 35% de la lámina de agua precipitada lo que equivale un volumen de 0,234 hm<sup>3</sup> por cada km<sup>2</sup>. Considerando un área de recarga de 12 km<sup>2</sup>, puede calcularse un recurso hídrico potencial en el orden a los 2,8 hm<sup>3</sup> al año. La extracción anual de agua no debería superar este volumen en el marco de una gestión racional del acuífero.*

*Teniendo en cuenta un área de distribución de pozos de bombeo de aproximadamente 6 km<sup>2</sup>, las reservas de agua subterránea pueden estimarse en el orden de 21 hm<sup>3</sup> considerando un espesor de acuífero de 17,5 m y una porosidad efectiva del 20%.*

**Palabras Claves.** *Recurso hídrico subterráneo - Acuífero libre costero - Monte Hermoso - Argentina.*

### Abstract

*Groundwater resources in Monte Hermoso coastal city is located in the sand dunes of the Buenos Aires province coastline which is the only source for the water supply of the city. The aim of this work is the estimation of the recharge of the*

✉ claudinadimartino@hotmail.com

1. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca. 11 de abril 461, (8000) Bahía Blanca, Argentina.
2. Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur. San Juan 670, (8000) Bahía Blanca, Argentina.

*unconfined aquifer which is the potential groundwater resources, i.e., the amount of water available annually in terms of a rational and sustainable exploitation of the resource.*

*Two methods were used to estimate the recharge from rain: daily water soil balance and balance of masses of ion chloride. Recharge values obtained were compared with those found by other authors in similar dune areas.*

*The results indicate that the average recharge under natural conditions, represents 35% of the rainfall (0,234 hm<sup>3</sup> per km<sup>2</sup>). Considering a recharge area of 12 km<sup>2</sup>, a groundwater potential resource in the order to 2.8 hm<sup>3</sup>/year can be calculated. The annual extraction of water should not exceed this volume as part of a rational groundwater management.*

*Taking into account a pumping wells area of 6 km<sup>2</sup>, 20% effective porosity and an aquifer thickness of 17.5 m, a groundwater reserves in the order of 21 hm<sup>3</sup> can be estimated.*

**Keywords.** *Groundwater resources - Coastal unconfined aquifer - Monte Hermoso - Argentine.*

## INTRODUCCIÓN

Monte Hermoso es una localidad turística ubicada sobre la costa Atlántica, en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires (República Argentina), que presenta una marcada estacionalidad turística y en consecuencia una mayor demanda de agua durante la temporada estival. Los últimos cuatro censos muestran una tendencia creciente de su población estable y turística, siendo esta última aproximadamente diez veces la primera. El recurso hídrico subterráneo es actualmente su única fuente de abastecimiento de agua para consumo humano y otros usos, por lo que surge la necesidad de cuantificar el volumen de agua disponible anualmente, en términos de una explotación racional, para contribuir a una gestión sustentable del recurso o lo que es lo mismo, una situación en que el consumo esté en equilibrio con los ingresos de agua.

La localidad de Monte Hermoso está situada en la Subregión Hidrogeológica Médanos Costeros (*Santa Cruz y Silva Busso, 1999*) también denominada Región Costera (*Auge, 2004; González, 2005*). Estos autores diferencian y describen distintas Regiones Hidrogeológicas haciendo referencia a ambientes que presentan características o comportamientos distintos en relación a las aguas subterráneas.

En Monte Hermoso el acuífero libre está alojado, en los sedimentos arenosos de la Formación Punta Médanos y en la porción superior de los "sedimentos pampeanos" subyacentes. El acuífero forma parte de la denominada Sección Hidroestratigráfica Epiparaneana (*DYMAS, 1974*). El objetivo de este trabajo es cuantificar el ingreso de agua al acuífero (recarga), cuestión básica para analizar la sustentabilidad de la explotación del recurso hídrico subterráneo del lugar.

## UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Monte Hermoso es una localidad turística al sur de la Provincia de Buenos Aires, ubicada geográficamente a los 38° 59' 33" de latitud Sur y a 61° 15' 55" longitud Oeste. Limita al Sur con el Océano Atlántico, al Norte y al Este con el Partido de Coronel Dorrego y al Oeste con el Partido de Coronel de Marina Leonardo Rosales, siendo ciudad cabecera del Partido de Monte Hermoso (Figura 1). Según el *INDEC (2010)* cuenta con 6.494 habitantes y los registros de los tres últimos censos indican una tendencia creciente en la población estable; en temporada estival, se estima que pernoctan en Monte Hermoso unas 70.000 personas (*Caruso et al., 2010*).

Desde un punto de vista geomorfológico, se observan dos ambientes bien diferenciados: al Norte del río Sauce Grande se desarrolla una amplia llanura, con suave declive hacia el Sur que se encuentra surcada por cursos de agua permanentes, comúnmente asociados a zonas anegadizas. Al Sur del río Sauce Grande, y hasta el mar, se desarrolla un importante cordón costero litoral, constituido por dunas de arena, con un ancho promedio de 5 km y alturas que no superan los 25 m sobre el cual se halla emplazada la localidad de Monte Hermoso.

La temperatura media anual es de unos 15,2°C (período enero 2008-agosto 2011); el valor medio durante los meses de verano es de 21,4°C y en el invierno de 8,5°C, siendo de 16,7°C en otoño y 14,2°C en primavera. Estos valores confirman la variada diferenciación térmica estacional del área de estudio, característica de los climas templados (*Huamantínco, 2012*); las máximas extremas pueden alcanzar los 49°C en días que no sopla la brisa marina. La zona se caracteriza por la presencia de vientos cuya dirección dominante es del sector N, NO y NE. Los que provienen del mar (S, SE y SO) son menos frecuentes, sin embargo son los de mayor intensidad. Menos habituales aún son los de dirección E-O (*Fernández et al., 2003, 2006*).

En referencia a la precipitación, no existe para Monte Hermoso un registro que abarque un período largo de tiempo. La referencia de interés más adecuada puede encontrarse en *Paoloni y González Uriarte (2005)* que para la serie centenaria 1893-2003 y para la localidad de Coronel Dorrego, ubicada a unos 30 km al NNE de Monte Hermoso, indican una precipitación media anual de 669 mm. *Caruso et al. (2010)* mencionan una media de lluvias de 656,8 mm señalando que se verifican principalmente en el otoño y primavera. En este trabajo se procesaron datos diarios de lluvia de Monte Hermoso correspondientes a dos intervalos cortos (1998-2001 y 2006-2008) suministrados por la Cátedra de Geología Ingenieril del Departamento de Geología (UNS) y por el Municipio de Monte Hermoso. El valor obtenido arroja un promedio anual de 637 mm.

## GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

En el subsuelo del área se reconocen los denominados genéricamente "sedimentos pampeanos" de edad correspondiente al Plioceno medio a superior (*Fidalgo et al., 1975*). Se trata de sedimentos de naturaleza loésica, castaños con tonalidades amarillentas a rojizas, que tienen amplia distribución regional y un considerable espesor, que puede llegar en el ambiente de la llanura pampeana hasta 200 m. Están compuestos principalmente por limos arenosos con cemento de carbonato

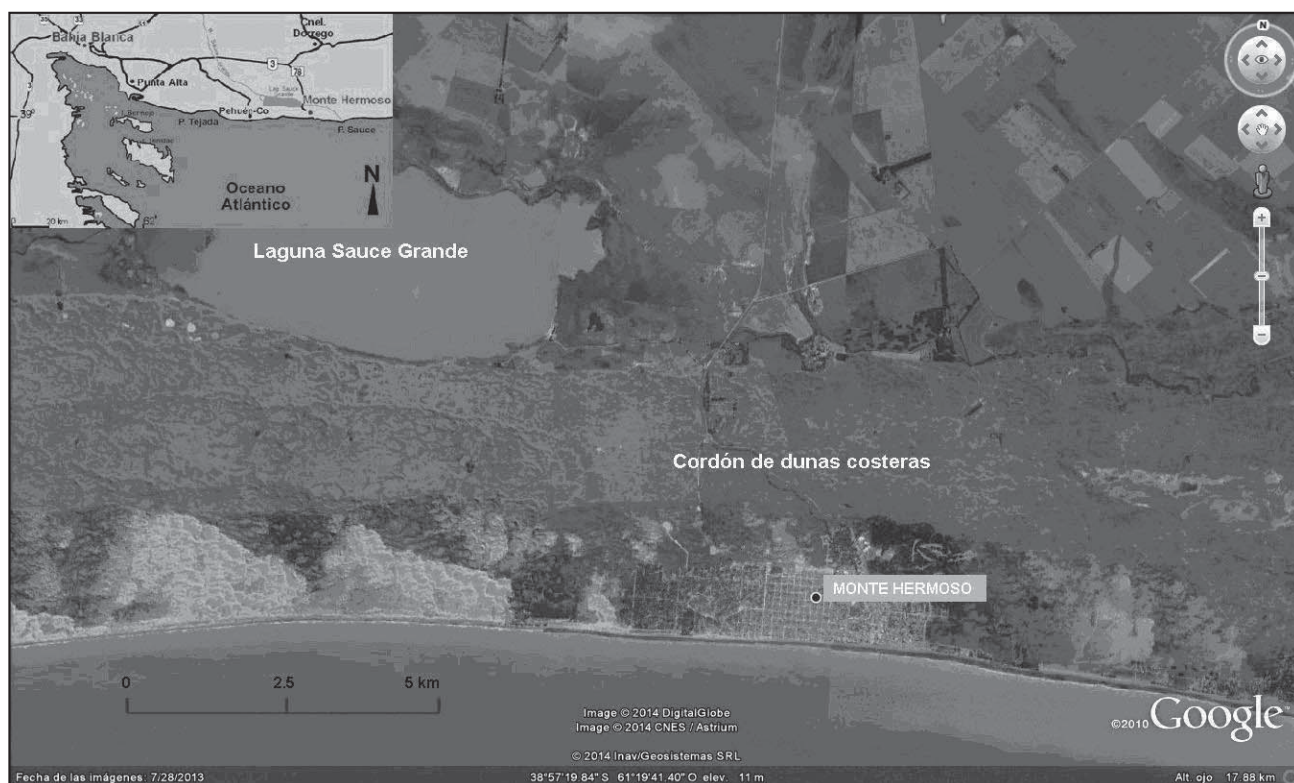


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

de calcio, el cual se presenta como concreciones calcáreas o formas mantiformes (tosca). Hacia el Norte del área de estudio esta unidad geológica aflora o está cubierta por sedimentos eólicos “pospampeanos” sobre los que han evolucionado los suelos actuales. Hacia la costa, y dentro del área de estudio, están cubiertos por dunas y médanos correspondientes a la Formación Punta Médanos (Santa Cruz y Silva Busso, 1999). La misma está integrada por arenas cuarzosas amarillentas, de granulometría media a fina, y conforman el cordón arenoso costanero o faja medanosa de la provincia de Buenos Aires que alcanza una extensión de alrededor de 600 km de costa atlántica y tiene un ancho variable que promedia los 3 km. Estas dunas, representan el relicto arenoso generado por la acción del mar sobre los sedimentos pampeanos y sometidos posteriormente a la acción del viento (Auge, 2004).

Desde un punto de vista hidrogeológico el sector de estudio forma parte de la denominada Subregión Médanos Costeros (Santa Cruz y Silva Busso, 1999) o Región Costera (Auge, 2004; González, 2005). Estos autores diferencian y describen distintas Regiones Hidrogeológicas haciendo referencia a ambientes que presentan características o comportamientos distintivos en relación a sus aguas subterráneas. La Región Costera se extiende como una delgada faja, de unos 2600 km<sup>2</sup>, coincidentes con los alineamientos de dunas costeras que se desarrollan desde la Punta Norte del Cabo San Antonio hasta Santa Clara del Mar y desde Chapadmalal hasta Punta Alta. Las características hidrogeológicas de este ambiente, dentro de la provincia de Buenos Aires, han sido estudiadas, entre otros, por Di Martino (2014), Rodríguez et al. (2013), Carretero et al. (2013) y Carretero (2011). En Monte Hermoso el acuífero libre está alojado, en los sedimentos arenosos de la Formación Punta Médanos y en la porción superior de los sedimentos pampeanos

subyacentes. El acuífero forma parte de la denominada Sección Hidroestratigráfica Epiparaneana (DYMAS, 1974).

Las dunas y unidades arenosas, poseen altas permeabilidad y porosidad efectiva, debido a la arena suelta y bien seleccionada que las componen (Auge, 2004). Son frecuentes en este tipo de materiales conductividades hidráulicas promedio entre 1 m/d (arena fina) hasta 10 m/d (mezcla de arena fina-gruesa) y porosidad eficaz media en el orden del 20 % (Custodio y Llamas, 1983). Di Martino et al. (2012) mediante la interpretación de ensayos de bombeo a caudal constante, obtuvieron conductividades hidráulicas entre 2,3 y 9,5 m/d (valores típicos de mezcla de arena o arena fina) y un coeficiente de almacenamiento o porosidad efectiva en torno a 0,2.

Estas características hidráulicas otorgan a las dunas gran capacidad de absorción frente a la lluvia, aún en aquellos sitios donde han sido fijadas por vegetación artificial (San Bernardo, Pinamar, Villa Gesell, Monte Hermoso). En efecto, la presencia de estos médanos costeros favorecen la rápida infiltración del agua y su incorporación a la zona saturada (recarga) por lo que constituyen excelentes almacenes de agua.

Desde un punto de vista hidrodinámico, el escurrimiento subterráneo manifiesta una tendencia de circulación general en dirección N-S hacia el mar, que constituye el nivel de base o de descarga final de los escurrimientos superficial y subterráneo regional (Sala, 1975). El estudio de la hidrodinámica subterránea del partido de Coronel Dorrego (Paoloni, 2005) permite confirmar, próximo al área de este estudio, un escurrimiento general con una orientación dominante NNO-SSE en dirección a la costa marítima. En los médanos y dunas puede originarse un sistema de flujo local superpuesto al regional, producto de la recarga por agua de lluvia y su circulación a los sectores de descarga locales. Dentro de este esquema hidrodinámico

pueden originarse “domos” con flujos subterráneos divergentes (hacia el continente y hacia el mar). *González Arzac et al. (1990)* elabora un modelo hidrodinámico del acuífero freático o libre costero entre Punta Rasa y Punta Médanos y describe a las dunas como la zona de recarga principal donde luego de un corto tramo de conducción se produce la descarga en dos direcciones opuestas, una hacia el mar y la otra hacia el oeste. Asimismo identifica una divisoria de aguas subterráneas, con orientación N-S en coincidencia con las mayores alturas del cordón costero.

### ESTIMACIÓN DE LA RECARGA

La recarga es el agua que se incorpora a un acuífero procedente del exterior de su contorno (*Carrica, 2005*). Recientemente ha sido definida como “el proceso natural o artificial por el cual se produce la entrada de agua a un acuífero” (*FCIHS, 2009*).

En muchas regiones del mundo, como es el caso del área de estudio, los acuíferos constituyen la principal o única fuente de suministro de agua, por lo cual el estudio de la recarga tiene gran interés. Su evaluación es de fundamental importancia para determinar la posibilidad de desarrollo económico-social de estas regiones, dado que su cuantificación constituye uno de los aspectos técnicos esenciales de la gestión de un acuífero (*Carrica, 2005*). La recarga del acuífero en el área de estudio, ocurre en forma natural, a partir principalmente de la infiltración de agua de lluvia en el suelo.

La estimación de la recarga, presenta ciertas dificultades asociadas a su variabilidad espacial y temporal. Las fluctuaciones en el tiempo se verifican especialmente en regiones áridas y semiáridas debido a la variación de las precipitaciones y de la evapotranspiración. Las diferenciaciones en el espacio se vinculan especialmente con cambios en la topografía, litología superficial, suelos, cubierta vegetal, etc.

La recarga media anual de un acuífero equivale al recurso potencial, es decir, el agua factible de ser extraída del sistema en el marco de una explotación racional. Así, la estimación de la recarga del acuífero que abastece la localidad de Monte Hermoso, es una cuestión básica para analizar la sustentabilidad de la explotación del recurso hídrico subterráneo del lugar.

Para estimar la recarga del acuífero libre debido a las lluvias se utilizaron y contrastaron los resultados de dos métodos: el balance de masas de agua (balance hídrico a nivel de suelo) y el balance de masas del ión cloruro entre el agua de lluvia y la capa freática. Los valores de recarga obtenidos se compararon con los hallados por otros autores en áreas medanosas similares.

### CÁLCULO DE LA RECARGA MEDIANTE EL BALANCE HÍDRICO DEL SUELO

El balance hidrológico, tanto a nivel de cuenca o del suelo, es el método más difundido y utilizado para el cálculo de la

recarga. No obstante, hay que tener en cuenta que los balances modulares anuales o mensuales en zonas áridas-semiáridas tienen poco sentido real ya que resultan siempre deficitarios, esto es porque la evaporación y evapotranspiración real (ETR) promedio siempre superan al valor de la precipitación (P) y no existirían posibilidades de recarga directa. Debido a ello el balance hidrológico del suelo en zonas áridas y semiáridas puede ser un método apropiado solo si se realiza a paso diario, ya que muchas veces la precipitación diaria supera el valor de ETR diaria, por lo tanto existe un exceso de agua factible de recargar por infiltración de la lluvia. Además, vale recordar que las condiciones atmosféricas en los días de lluvia dan lugar a valores de ETR bajos y que en muchas de las zonas áridas y semiáridas las precipitaciones, si bien ocasionales, suelen ser de corta duración pero intensas, lo que favorece la recarga.

Para llevar a cabo el balance de aguas a nivel del suelo se utilizó el programa de balance hidrológico diario Balshort (*Carrica, 1993*). El mismo utiliza datos de precipitación (P) diaria y calcula la evapotranspiración real diaria en función de la evapotranspiración potencial (ETP), la humedad del suelo y la textura del mismo. La última versión del programa Balshort, incluye la posibilidad de estimar la interceptación vegetal (I) basándose en el modelo o método de *Horton (1919)* para cuatro cultivos básicos limitando su valor a un máximo de 5mm diarios, en base al concepto de que I alcanza un valor final independiente de la precipitación. Para llevar a cabo la estimación de recarga mediante este programa se utilizaron datos de precipitación diarios de Monte Hermoso de dos intervalos de tiempo; el primero correspondiente al período 1998-2001 y el segundo al lapso 2006-2008. Los datos pluviométricos de carácter diarios, condición excluyente para poder aplicar el programa, fueron suministrados por la Cátedra de Geología Ingenieril del Departamento de Geología (UNS) y por el Municipio de Monte Hermoso.

La ETP se calculó aplicando el método empírico de *Thornthwaite (1948)*. El mismo utiliza como variable primaria para la estimación de la evapotranspiración, la temperatura media de cada mes. Los datos termométricos fueron extraídos de los registros de Huamantín Cisneros 2012 (Tabla 1).

Se impuso un tipo de textura de suelo arenosa con una capacidad de campo de 24mm en base a una profundidad radicular media de 30 cm y a una retención específica de la arena de 8% (*U.S. Geological Survey Water Supply, 1967*); una cobertura vegetal tipo pastos con capacidad de interceptación vegetal de la lluvia limitada a 5mm diarios y una reserva inicial de 10 mm. Los resultados del programa Balshort se resumen a continuación (Tabla 2).

Con los datos indicados puede calcularse un valor medio de P de los dos intervalos analizados de 637 mm y una recarga media del orden al 33 % en relación a la lluvia. Si bien se trata de una serie corta de años, queda muy bien reflejada la variabilidad temporal de la lluvia y su influencia en la magnitud de la recarga.

Tabla 1. Valores de ETP medios mensuales (en mm).

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic
T Media (°C)	22,9	23,5	19,8	15,9	11,7	8,5	7,8	9,3	10,6	14,6	17,4	19,2
ETP (mm)	111,1	110,1	75,8	56	43,1	37,0	37,2	42,9	49,4	62,4	76,3	87,2

Tabla 2. Excesos Anuales (Recarga).

Período 1 (1998-2001)				Período 2 (2006-2008)			
Año	P total (mm)	Recarga (% de P)	Recarga (mm)	Año	P total (mm)	Recarga (% de P)	Recarga (mm)
1998	609	27,4	167	2006	577	44,1	254
1999	562	30,1	169	2007	701	45,8	321
2000	640	32,0	205	2008	266	2,0	5
2001	1109	51,9	575				
<b>Promedio</b>	730	35,3	279	<b>Promedio</b>	514,6	30,6	193

Extrapolando espacialmente la media anual de la serie centenaria 1893/2003 para Coronel Dorrego (669 mm, *Paoloni y González Uriarte, 2005*) puede apreciarse que los años 2000 (640 mm) y 2007 (701 mm) de la serie de años analizada, son los que más se aproximan al módulo histórico de precipitación promediando 670,5 mm y una recarga de casi el 40%.

#### CÁLCULO DE LA RECARGA MEDIANTE EL BALANCE DE MASAS DEL IÓN CLORURO

El método, basado en el transporte de masa y energía, es alternativo a los hidrodinámicos y en gran medida independiente de ellos, ya que considera las propiedades asociadas al agua y no el agua propiamente dicha, por lo que resultan de interés para contrastar resultados. Los cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) presentes en el agua de lluvia ( $\text{Cl}^-_p$ ) sufren un aumento de concentración en el suelo por evapotranspiración de tal modo que el agua de recarga presenta un factor de enriquecimiento en  $\text{Cl}^-$  (FEC) tal que:

$$\text{FEC} = [\text{Cl}^-_p] / [\text{Cl}^-_r] \quad (1)$$

Donde  $\text{Cl}^-_p$  y  $\text{Cl}^-_r$  son concentraciones de cloruros en agua de lluvia y recarga respectivamente.

En el caso de Monte Hermoso, sobre los médanos, donde no existe escurrimiento superficial, el balance de masas se simplifica y la recarga media anual en mm es:

$$\text{R} = \text{P} \times \text{FEC} \quad (2)$$

Donde P es la precipitación media anual.

Debido a la inexistencia de datos analíticos de concentración del ión cloruro para el agua de lluvia en Monte Hermoso, se tuvieron en cuenta valores registrados en las lluvias de Bahía Blanca, ciudad costera, ubicada a unos 100 km al oeste. Los datos analíticos fueron suministrados por la Cátedra de Hidrogeología de la Universidad Nacional del Sur y corresponden al muestreo de 72 tormentas registradas entre el 30/04/1987 y el 03/08/1989. Estos datos fueron procesados e interpretados por Bonorino (1994). En Bahía Blanca, los vientos del sector

marino, sur y este son poco frecuentes y con escasa influencia, lo cual se refleja en las bajas concentraciones de cloruros y sulfatos de las lluvias, que en general provienen del aerosol marino transportado en masas húmedas o nubes. La costa de Monte Hermoso presenta vientos predominantes del cuadrante Norte provenientes del continente y brisas marinas provenientes del sector ESE y SE (*Fernández et al., 2006; Huamantínco Cisneros, 2012*) que provocan el descenso de la temperatura y el aumento de la humedad del aire. Estos aerosoles marinos contribuyen al enriquecimiento en  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  en las aguas de lluvia de Monte Hermoso, respecto a las que se verifican en Bahía Blanca (*Bonorino, 1994*). Por la proximidad al mar de la localidad balnearia, y en base a la serie de datos disponibles, se promediaron los máximos valores de cloruros medidos en las lluvias de Bahía Blanca, lo que arroja un valor de 0,536 mEq/L.

La concentración de cloruros en el agua de recarga también es muy variable por lo que se consideraron dos hipótesis:

(a) el contenido promedio de las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  del agua de los pozos que conforman el sistema de abastecimiento de agua registrado en varios muestreos espaciados temporalmente. Los pozos de bombeo tienen una penetración en el acuífero de modo que la muestra que se extrae durante el bombeo sería una mezcla del agua proveniente del espesor saturado.

(b) el contenido promedio de las concentraciones mínimas registradas en el tiempo asumiendo que es más representativo del agua de la recarga, menos mineralizada, localizada en la parte superior del acuífero.

En base a la información hidroquímica del agua subterránea (Tabla 3) se calcularon valores medios de 2,2 mEq/L para la hipótesis (a) y 0,94 mEq/L para la hipótesis (b) de donde se obtienen, aplicando la ecuación (2) valores de recarga en el orden al 24% y el 57% de la precipitación respectivamente.

De los métodos aplicados para la valoración de la recarga, el balance de masas del ión cloruro presenta una mayor incertidumbre asociada al tipo de variables que intervienen en los cálculos (contenido de  $\text{Cl}^-$  en lluvia y agua de recarga), lo que impone ciertas precauciones a la hora de valorar los resultados. En cualquier caso, los valores de recarga obtenidos en esta investigación con la aplicación de los métodos precedentes, son consistentes y similares con los indicados por otros autores para ambientes medanosos, condiciones climáticas similares y con el uso también de otras metodologías de estimación de la recarga (*Torrente et al., 1989; Bonorino y Torrente, 1992; Carrero y Kruse, 2010; Carrica y Lexow, 2012*).



**Tabla 3. Concentraciones de Cl- expresados en mg/L del agua de los pozos que conforman el sistema de abastecimiento de la localidad de Monte Hermoso. Cada valor corresponde a muestreos periódicos llevados a cabo entre 1995 y 2011 en diferentes perforaciones.**

Concentraciones de cloruros (mg/L)														
2	24	64	34	62	84	76	69,4	158	77	220	60	46	56	42
32	26	44	40	48	62	52	164	71	149	157	79,6	133	55,1	65,3
24	30	26	26	22	36	40	47	52	192	188	200	81	133	40
24	26	22	24	34	24	130	48	219	143	125	76	42	38	24
30	30	56	32	30	38	32	61,2	29	30	30	34,7	54	32	90
40	36	48	39	42	51	62	40	36	48	87	76	216	72	282
40	40	50	54	56	49	32	43	40	40	174	69	79	119	135
36	42	46	45	56	44	36	42	46	80	172	58	171	152	136
44	56	248	47	40	228,5	60	64	80	44	104	32	90	60	52
112	110	203	32	244	374	66	112	110	203	167	432	412	206	34
48	100	82	92	58	60	68	24	53	71	80	200	59	270	34
208	254	222	252	54	208	254	222	58	72	34	245	48	79	34
108	76	102	84	48	124	50	52	206	66	61	32	132	58	66
32	132	58												

### RECURSOS Y RESERVAS HÍDRICAS SUBTERRÁNEAS

El concepto de reserva hídrica subterránea se refiere al volumen de agua que contiene un acuífero o, en este caso, una porción de acuífero explotable en un instante determinado. Las reservas permiten cubrir la oferta de agua en aquellos años con escasa lluvia en donde el recurso generado por la recarga es inferior a la media anual. O sea la reserva puede asociarse o sumarse al recurso solo ocasionalmente y para cubrir una demanda estacional. El recurso hídrico subterráneo es el volumen de agua disponible anualmente y equivale a la recarga. De las estimaciones efectuadas se asumió un valor de recarga medio anual en el orden al 35% de la lámina de agua precipitada. Considerando un módulo pluviométrico anual de 669 mm la lámina de recarga es de 234 mm lo que equivale a un volumen de agua de 0,234 hm<sup>3</sup> por cada km<sup>2</sup>. Este valor de la recarga se estimó para el área de dunas, en condiciones naturales.

Hay que considerar que el área de captura de la explotación es mayor que la zona de influencia del bombeo y está acotada por los límites hidrológicos naturales del acuífero. Hacia el norte de la ciudad, el desarrollo de los médanos abarca una superficie aproximada de 12 km<sup>2</sup>. Este sector, a diferencia de la zona urbana, conserva sus condiciones naturales constituyendo una efectiva zona de recarga. El recurso disponible rondaría los 2,8 hm<sup>3</sup> anuales.

La recarga en el área urbana está afectada por los cambios en el uso de la tierra que modifican la relación entre los diferentes componentes del ciclo hidrológico. El desarrollo turístico es acompañado por un incremento en la infraestructura y

por la expansión de áreas con superficies impermeables. El proceso de urbanización, en distintos grados, trae aparejada la disminución de las posibilidades de infiltración de los excesos de agua, restringiendo las áreas de recarga natural y por consiguiente, las reservas de agua dulce disponibles. La disminución en la recarga es superior al 10% de lo que ocurre en el medio natural (Carretero y Kruse, 2010).

### CONCLUSIONES

La recarga media al acuífero en condiciones naturales, se estimó en un 35% de la lámina de agua precipitada que equivale a un recurso hídrico subterráneo potencial en el orden de los 2,8 hm<sup>3</sup>. La extracción anual de agua, no debería superar este volumen en el marco de una gestión racional del acuífero. En este sentido se sigue en esta presentación el concepto tradicional de igualar el rendimiento sostenible con el 100% de la recarga natural. Actualmente, desde un punto de vista más conservacionista y en función de las condiciones hidrogeológicas locales, la tendencia es hacer equivalente el recurso disponible con una fracción de la recarga. Al respecto, hay muy poca experiencia, pero se sugieren valores medios en alrededor del 40%, valores menos conservadores en torno al 70% y los más conservadores alrededor del 10% (Ponce, 2007). La reserva subterránea estimada es de 21 hm<sup>3</sup>. La misma permite cubrir la oferta de agua en aquellos años con escasa lluvia en donde el recurso generado por la recarga es inferior a la media anual. Es decir, la reserva debería poder asociarse o sumarse al recurso solo ocasionalmente y para cubrir una demanda estacional.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AUGE, M., 2004.  
Regiones Hidrogeológicas.  
*República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fé. La Plata.*
- BONORINO A. Y R. TORRENTE, 1992.  
Balance iónico aplicado al cálculo de la infiltración eficaz en áreas de relieve medanoso.  
*Terceras Jornadas Geológicas Bonaerenses. Actas: 189-194.*
- BONORINO, G., 1994.  
Geohidroquímica de la lluvia en la región del suroeste bonaerense.  
*Revista de la Asociación Geológica Argentina. RAGA 49 (1-2): 93-98.*
- CARRETERO S. 2011.  
Comportamiento hidrológico de las dunas costeras en el sector nororiental de la provincia de Buenos Aires.  
*Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Buenos Aires, Argentina. 436p. Disponible en SEDICI, Repositorio Institucional de la UNLP.*
- CARRETERO, S, F. BRAGA, E. KRUSE Y L. TOSI. 2013.  
Análisis temporal de las modificaciones en los médanos del Partido de la Costa y su relación con los recursos hídricos.  
*Temas Actuales en Hidrología Subterránea, 37-44. La Plata.*
- CARRETERO, S. Y E. KRUSE, 2010.  
Modificaciones en las áreas de recarga del acuífero freático en los médanos costeros de San Clemente del Tuyú, provincia de Buenos Aires.  
*Revista de la Asociación Geológica Argentina 66 (4):466-474.*
- CARRICA, J., 1993.  
Balshort: un programa de balance hidrológico diario del suelo aplicado a la región sudoccidental pampeana.  
*XII Congreso Geológico Argentino, Actas VI: 243-248.*
- CARRICA, J., 2005.  
Apuntes del curso: Recarga de acuíferos y modelo de balance hidrológico.  
*Maestría en Recursos Hídricos, Universidad Nacional de La Pampa. Santa Rosa (inédito).*
- CARRICA, J. Y C. LEXOW, 2012.  
La recarga a través de cordones medanosos en zonas semiáridas. Estudio de caso: Médanos, provincia de Buenos Aires, Argentina.  
*XI Congreso Hidrogeológico Latinoamericano. Cartagena de Indias, Colombia. Memorias. Soporte CD.*
- CARUSO, M., O. CIFUENTES Y M. VAQUERO, 2010.  
Impacto del Turismo sobre los Servicios de Agua Corriente y Desagües Domiciliarios. Estudio de caso: Monte Hermoso, Provincia de Buenos Aires.  
*En IV Congreso Latinoamericano de Investigación Turística. Eje Temático: Espacio Turístico y Medio Ambiente. Universidad de la República. Montevideo. Uruguay.*
- CUSTODIO, E.Y R. LLAMAS, 1983.  
Hidrología subterránea.  
*Segunda Edición Corregida. Tomo I. Ediciones Omega, S. A. Barcelona. 1166 pp.*
- DI MARTINO, CLAUDINA, 2014.  
Sustentabilidad del recurso hídrico subterráneo de Monte Hermoso, provincia de Buenos Aires, República Argentina.  
*Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. 208 pp. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional FRBB.*  
*En: <http://www.edutecne.utn.edu.ar>*
- DI MARTINO, C., R. ALBOUY, O. CIFUENTES Y A. MARCOS, 2012.  
Evaluación preliminar del funcionamiento de la batería de pozos de abastecimiento en Monte Hermoso, Argentina.  
*Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. ASAGAI: No 29:73-81.*
- DYMAS, 1974.  
Contribución al mapa geohidrológico de la provincia de Buenos Aires.  
*Escala 1: 500.000. DYMAS (CFI-PBA), La Plata, Inédito.*
- FERNÁNDEZ E., J. CALÓ, A. MARCOS Y H. ALDACOUR, 2003.  
Interrelación de los ambientes eólico y marino a través del análisis textural y mineralógico de las arenas de la playa de Monte Hermoso, Argentina.  
*AAS Revista, 10(2):151-162.*
- FERNÁNDEZ, E., A. MARCOS, J. CALO Y H. ALDACOUR, 2006.  
Balance Sedimentario, Parámetros Meteorológicos y Oceanográficos en un Sector de la Playa de Monte Hermoso, Provincia de Buenos Aires.  
*Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. GEOACTA 31, 11-22. ISSN 0326-7237. Argentina.*

- FIDALGO, F., F. DE FRANCESCO Y R. PASCUAL, 1975.  
Geología superficial de la llanura bonaerense.  
VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 103-138. Bahía Blanca, Argentina.
- FCIHS, 2009.  
Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea.  
*Hidrogeología*.
- GONZALEZ, N., 2005.  
Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires.  
*En Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, AGA, XXII: 359-374. La Plata.*
- GONZALEZ ARZAC, R., A. VIZCAINO, F. ALFONSO Y L. PATROUILLEAU, 1990.  
Los acuíferos del Litoral Atlántico entre Punta Rasa y Punta Médanos. Provincia de Buenos Aires, República Argentina.  
*6º Congreso Brasileiro de Aguas Subterráneas. Porto Alegre. Brasil.*
- HORTON, R. E., 1919.  
Rainfall interception. *Monthly Weather Rev.* 47: 603-623.
- HUAMANTINCO CISNEROS, M. A. 2012.  
Efecto de la Variabilidad Climática del Balneario Monte Hermoso Sobre su Geomorfología Costera y el Confort Climático.  
*Tesis Doctoral en Geografía. Universidad Nacional del Sur. Argentina.*
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS (INDEC), 2010.  
Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Censo 2001; Provincia de Buenos Aires, población censada en 1991 y 2001, variación absoluta y relativa, disponible en: <[www.indec.gov.ar](http://www.indec.gov.ar)>.
- PAOLONI, J. D., 2005.  
Los recursos hídricos subterráneos: hidrodinámica, salinidad, contaminantes naturales y nutrientes.  
*En: Geoambiente y evaluación de las aguas freáticas del Partido de Coronel Dorrego (Provincia de Buenos Aires). Paoloni y González Uriarte Editores. Editorial de la Universidad Nacional del Sur (EdiUNS). 108 pp.*
- PAOLONI, J.D. Y GONZÁLEZ URIARTE, M., 2005.  
Geoambiente y evaluación de las aguas freáticas del Partido de Coronel Dorrego (Provincia de Buenos Aires).  
*Paoloni y G. Uriarte Editores. EdiUNS. 108 pp.*
- PONCE, V. M., 2007.  
Rendimiento sostenible del agua subterránea.  
*Disponible en: <www.rendimiento.sdsu.edu>.*
- RODRIGUES CAPÍTULO L., E. KRUSE Y P. DE BERNARDI. 2013.  
Fluctuaciones de niveles hidráulicos en un sector costero de la provincia de Buenos Aires.  
*Caso de estudio: Pinamar. Temas Actuales en Hidrología Subterránea 2013. La Plata; Año 2013, p. 51-56.*
- SALA, J. M., 1975.  
Recursos hídricos (Especial mención de las aguas subterráneas).  
*VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio Geología de la provincia de Buenos Aires: 169-193. Buenos Aires, Argentina.*
- SANTA CRUZ, J. Y A. SILVA BUSSO, 1999.  
Escenario Hidrogeológico General de los Principales Acuíferos de la Llanura Pampeana y Mesopotamia Septentrional, Argentina.  
*II Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano Argentino sobre Temas Actuales en Hidrología Subterránea. San Miguel de Tucumán, Tucumán. Pag. 461-471*
- THORNTHWAITE C. W., 1948.  
An Approach toward a Rational Classification of Climate.  
*Geographical Review, Vol. 38, No. 1. pp. 55-94.*
- TORRENTE, R., G. BONORINO, E. RUGGIERO, 1989.  
Dinámica freática en áreas de relieve medanoso.  
*Seminario Internacional Hidrología de Grandes Llanuras, UNESCO-CONAPHI. Buenos Aires, 1989. HILL- III/38/TRA. 18 pp.*
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY WATER-SUPPLY, 1967.  
Professional Paper 1839-D: Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey. 39pp.



# Análisis de riesgo de inundación mediante modelación de escurrimiento en zona urbana de la ciudad de Oberá, Misiones

## Flood risk analysis by runoff modeling in urban area of Oberá (Misiones) city

Rodriguez, Tomás <sup>1</sup> ✉ - Riccardi, Gerardo <sup>2,3</sup> - Ruberto, Alejandro <sup>4</sup>

Recibido: 16 de diciembre de 2014 • Aceptado: 29 de diciembre de 2014

### Resumen

*Las ciudades de la zona centro de Misiones presentan un gran número de áreas verdes dentro de las zonas urbanas. Las características topográficas, de cobertura vegetal y textura de los suelos que poseen han contribuido a reducir los inconvenientes por inundación. Sin embargo, dichas ciudades comienzan a evidenciar el aumento de niveles hidrométricos y velocidades máximas en las calles, debido al avance de la urbanización sobre dichas áreas verdes. A los efectos de determinar el riesgo de inundación en calles para distintas recurrencias en un escenario actual de la cuenca en la ciudad de Oberá se ha constituido, calibrado y actualmente se explota un modelo hidrológico-hidráulico de la cuenca del arroyo Mbotaby, la cual posee 976 ha de área de aporte y 24 % de impermeabilidad. Se persigue como objetivo valorar dicho riesgo por inundación ante un posible escenario futuro, donde se alcancen los máximos valores de impermeabilidad impuestos por el actual Código de Edificación Municipal dentro del área de captación de la cuenca en estudio. Como resultado se obtuvieron mapas de niveles hidrométricos y velocidades máximas para 2, 5 y 100 años de recurrencia para un posible escenario futuro, donde se asume alcanzar un 45 % de superficies impermeables. Los escenarios futuros indican un leve aumento del caudal máximo en el punto de control de la cuenca y un significativo aumento, tanto del volumen total erogado por la cuenca, como de los niveles máximos en las distintas calles respecto al escenario actual.*

1. Becario Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Juan Manuel de Rosas 325, (3360) Oberá, Misiones, Argentina.

✉ rodriguezdt@fio.unam.edu.ar

2. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario (UNR), Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina.

3. Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario.

4. Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Las Heras 727, (3500) Resistencia, Chaco.

**Palabras clave:** cuencas urbanas; precipitaciones intensas; altas pendientes; modelación hidrológica-hidráulica; mapas de inundación.

## Abstract

Cities located in the central region of the Misiones province (Argentina) still display a significant amount of green spaces within their urban areas. Topographical features, vegetation covers and soil textures of such green areas have always contributed to mitigate risks due to flooding. However, these cities are beginning to show increases in water levels and flow velocities over the streets during rainfall events. Such increases are yielded by the replacement of green areas with impervious areas (e.g. streets, buildings, parking lots). Particularly for the city of Oberá, a hydrological-hydraulic model of the Mbotaby Stream basin (with 976 ha of total contribution area and 24 % of impervious areas) has been calibrated, and is currently being exploited. The model has been used to determine the risk of flooding over the streets for a number of recurrences considering the current conditions of the basin. This work aims to assess the risk of flooding for a possible future scenario, setting the maximum values of impervious areas in accordance with the current Municipal Building Code. As a result, a number of maps for water levels and maximum flow velocities were obtained, with recurrences of 2, 5 and 100 years as possible future scenarios, in which a maximum of 45 % of impervious areas were assumed. Comparing to current conditions of the basin, future scenarios indicate a slight increase in maximum discharge at the control point of the basin, and a significant increase in both the total volume discharged by the basin and the maximum water levels over different streets.

**Keywords:** urban watersheds; intense rainfall events; high slope; hydrological-hydraulic modelling; inundation maps.

## INTRODUCCIÓN

La provincia de Misiones se encuentra situada en una región subtropical sin estación seca, exhibiendo algunos de las mayores precipitaciones anuales del país (Mezher *et al.*, 2008). Según la calificación climática de Papadakis (1962) citado por Olinuk (1998) la zona de estudio corresponde a un régimen isohigro, donde las estaciones hídricas están poco definidas y en cualquier estación, o mes, pueden presentarse sequías o abundantes lluvias. Región azotada por tormentas intensas con grandes volúmenes de precipitación ocurrentes en cortos periodos de tiempo, generalmente asociadas a frentes fríos provenientes del Sudoeste (Litwin y Franco, 1987), como lo evidencian por ejemplo los eventos registrados en la ciudad de Oberá el día 1 de diciembre de 2012, donde 276 mm se precipitaron en tan solo 12 horas y el del 19 del mismo mes en la ciudad de Posadas, con 206 mm caídos en 6 h.

Geográficamente, Misiones está situada fuera de la gran llanura chaco-pampeana que domina la Mesopotamia. La meseta central de la provincia es un ramal de sistema orográfico Serra Geral, con descendencia geológica y orográfica de la región montañosa del Brasil meridional (Hausen, 1919). El territorio provincial es una meseta rocosa, cuyo relieve es considerado una transición entre la orografía brasileña y las planicies

argentinas. Hacia el Sur de la provincia el paisaje se torna paulatinamente llano y el terreno va descendiendo lentamente hasta volverse una zona de llanura.

Misiones presenta la característica de pertenecer a dos grandes sistemas de ríos, ya que la Sierra Central de Misiones es el parteaguas que divide las cuencas del Paraná y Uruguay. Dado los niveles del terreno y las profundidades de los suelos residuales, la erosión ha creado formas topográficas muy accidentadas donde los ríos y arroyos han cavado su cauce en el suelo, conformando lechos profundos.

La ciudad de Oberá se encuentra ubicada en la zona centro de la provincia de Misiones, en la intersección de las Rutas Nacional 14 y Provincial 103 a los 27°29' de latitud Sur y 55°08' de longitud Oeste (Figura 1). Dentro de los límites del municipio se determinó, mediante la utilización de un modelo digital de terreno (SRTM, 2009), que el 47 % de la superficie presenta pendientes topográficas mayores a 5 %, con valores máximos que superan el 20 %. Posee un módulo pluviométrico anual de 1.925 mm (CELO, 2013) y al tratarse de una ciudad joven, fundada en 1927, presenta grandes áreas verdes dentro del ejido urbano, con lotes residenciales y espacios públicos que conservan áreas permeables con pastos y árboles de mediana magnitud.

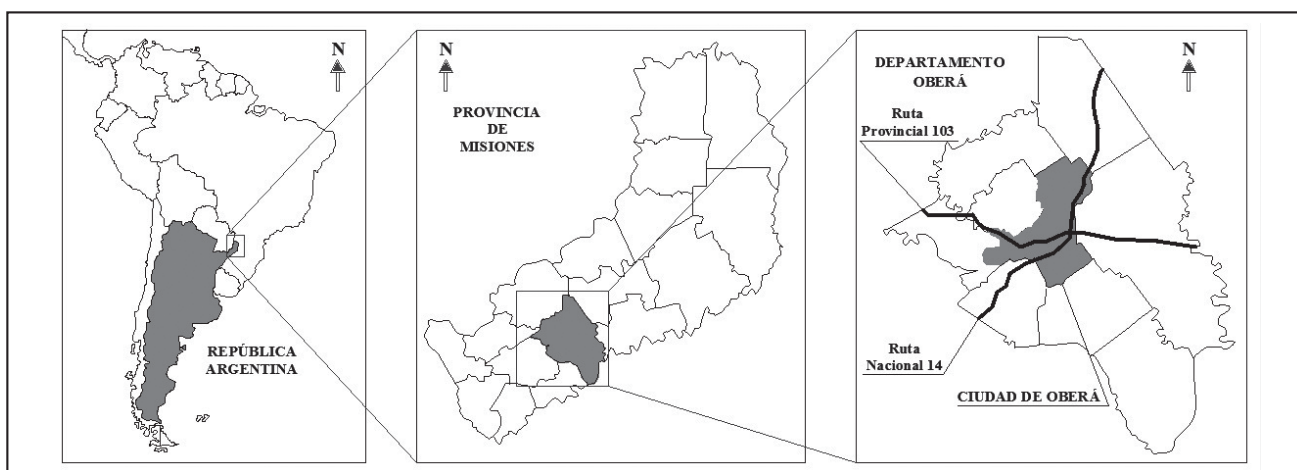


Figura 1. Ubicación geográfica de la ciudad de Oberá.

Sin embargo, la dinámica que plantean las urbanizaciones ha contribuido a incrementar las afectaciones como aumento del riesgo de inundación, decrecimiento de la calidad del agua superficial y subterránea e incremento de los procesos de erosión y sedimentación. El aumento de caudales máximos y volúmenes de escurrimiento directo, conjuntamente con la disminución del tiempo de concentración de las cuencas debido a la impermeabilización de los suelos y los cambios en su ocupación, han aumentado el riesgo por inundación dentro y fuera de la zona urbanas de las ciudades (Rodríguez et al., 2013a).

El 95 % de la zona urbanizada del municipio vierte sus aguas en subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Paraná, mientras que el 5 % restante lo hace hacia el río Uruguay. Producto de investigaciones precedentes se cuenta en la ciudad de Oberá con un modelo hidrológico-hidráulico de una de las principales subcuencas del sistema de desagües pluviales, la cuenca del arroyo Mbotaby, la cual recibe 40 % de los excedentes hídricos superficiales urbanos de la ciudad. Mediante la utilización de registros de hietogramas de precipitación y los limnigramas generados en el punto de control de la cuenca se logró una aceptable calibración del mismo, desarrollándose así una herramienta capaz de describir la dinámica del escurrimiento superficial en una región urbana con gran cantidad de áreas verdes (24 % de impermeabilidad total) y elevadas pendientes topográficas (pendiente media de la cuenca 5.5 %).

El modelo implementado en el entorno del SWMM 5.0ve (GMMF, 2005), ha sido utilizado anteriormente para evaluar el actual riesgo por inundación en las calles dentro de la cuenca. Mapas de niveles y velocidades máximas en cunetas de calles fueron confeccionados con el fin de detectar las zonas más comprometidas por alcanzar niveles de desborde y velocidades capaces de arrastrar objetos.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el riesgo por inundación en las calles de la cuenca Mbotaby ante un posible escenario futuro, donde se alcance el máximo de superficies construidas impuestos por el actual Código de Edificación Municipal (CEM) de la ciudad de Oberá. El trabajo se enmarca en estudios de doctorado orientados a la descripción de la dinámica del escurrimiento hídrico superficial en dicha región misionera y es continuación de una sucesión de diferentes artículos

anteriores (Rodríguez y Riccardi, 2014a; Rodríguez y Riccardi, 2014b; Rodríguez et al., 2014).

Para la evaluación del riesgo de inundación se confeccionaron mapas de niveles y velocidades máximas desarrollados para una tormenta de duración crítica de 12 horas, con hietogramas determinados por el método de los bloques alternos, para 2, 5 y 100 años de recurrencias. De la comparación de mapas de riesgo del escenario actual y futuro posible surge el análisis del impacto hidrológico esperable debido a la dinámica de la urbanización en caso de mantenerse el actual código de edificación.

## LA CUENCA DEL ARROYO MBOTABY

### Área de aporte

La cuenca en estudio comprende el área de aporte del arroyo Mbotaby. El brazo más largo de este arroyo nace al Este de la ciudad, en la divisoria de aguas de las cuencas del río Paraná y Uruguay como se observa en la Figura 2.

El arroyo Mbotaby recibe, aproximadamente, 40 % de los excedentes hídricos superficiales del casco urbano de la ciudad de Oberá. Recorre el ejido urbano hacia el Oeste hasta, finalmente unirse al arroyo Tuichá para formar el arroyo Yabebiry, el cual desemboca en el río Paraná. Hasta el punto de control definido, la cuenca posee 976,41 ha de superficie.

### Ocupación y usos del suelo actual

Para la clasificación de los usos del suelo se utilizaron simultáneamente cuatro procedimientos: revisión de la carta orgánica de la ciudad, evaluación por imagen satelital, comparación con investigaciones precedentes (Rodríguez et al., 2013b) y relevamiento in-situ de puntos particulares.

En base a los procedimientos citados se llevó a cabo la zonificación de la ocupación y usos del suelo, caracterizando cada clase mediante el conocido número de curva o CN (US-SCS, 1975). Los valores determinados de CN en condición II se presentan en la Tabla 1. El valor de cada zona corresponde únicamente al área permeable de las mismas, en condiciones medias de humedad.

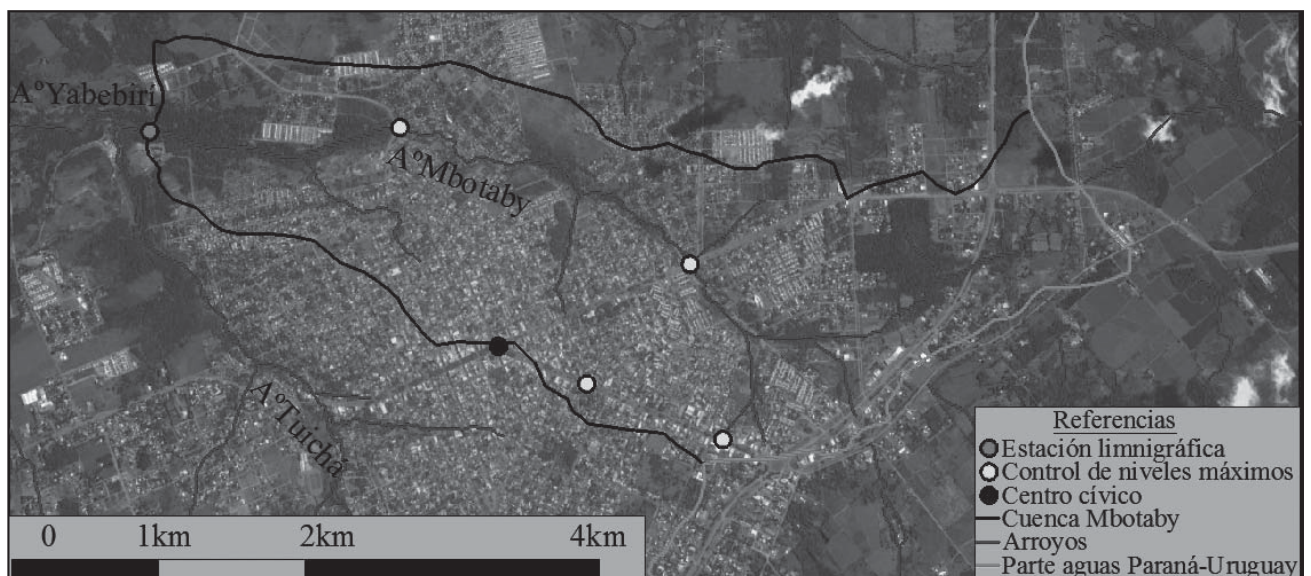


Figura 2. Cuenca del arroyo Mbotaby, adaptado de Google Earth® (2013).

Puede alegarse que al año 2010 el grado de impermeabilización de la cuenca se valorizaba en 24 % y al año 2013 el 60 % de las calles de la cuenca Mbotaby cuentan con cordón cuneta de hormigón, con calles materializadas en pavimento flexible o empedrado tipo brasilero. El restante de las calzadas son de tierra y las cunetas son excavadas en el mismo suelo.

#### Escenario futuro hipotético

Para establecer un posible escenario futuro, donde la presión urbanística avance sobre los actuales espacios permeables dentro de la cuenca, se estableció en los lotes particulares una superficie impermeable igual al máximo de superficie construida permitido por el CEM vigente, según las distintas zonificaciones.

Es de hacer notar que el CEM no limita las superficies impermeables que puede haber dentro de los lotes, sino que impone restricciones a las superficies cubiertas mediante el Factor de Ocupación del Suelo (FOS). Según este código el FOS está determinado por la suma de superficies cubierta; las cuales son consideradas como aquella que posee cubierta de techo y cerramientos verticales en al menos tres direcciones, mientras que si posee cerramiento en dos o menos direcciones es una superficie semicubierta y su incidencia en el FOS será multiplicado por 0,5. Por lo que es esperable que las superficies impermeables totales sean superiores al FOS establecido como máximo en el código, tanto por las superficies semicubiertas, como por los pisos impermeables que no poseen limitación.

Asimismo, dada la manera en que está constituido el modelo hidrológico, es necesario contemplar en cada subcuenca el porcentaje de impermeabilización que corresponde a la media calle, es decir a su media calzada y vereda correspondientes. Si consideramos a las calzadas como impermeables en un 98 % y a las veredas impermeabilizadas en un porcentaje igual al FOS, según la zonificación en la que se encuentre, en promedio tenemos un incremento del 5 % en la impermeabilidad de las subcuencas.

Para este posible escenario futuro las superficies impermeables de las zonas del distrito central, residenciales, nuevos loteos e industrias fueron supuestas igual a los FOS máximos más un 5 % debido a la incidencia de las calles, las actuales rutas de tierra consideradas como asfaltadas con 45 % de impermeabilidad y las actuales rutas asfaltadas, parques y reservas ecológicas conservan su actuales porcentajes de impermeabilidad. Para este escenario la totalidad de las superficies impermeables fueron consideradas como directamente conectadas y el CN de las superficies permeables son iguales a las condiciones actuales salvo para los actuales caminos de tierra (Tabla 1).

En este posible escenario futuro se consideraron que las actuales calzadas de tierra alcanzaron a ser materializadas en pavimento tipo empedrado brasilero, con cordones cunetas de hormigón y las actuales calzadas de pavimento brasilero recibieron un tratamiento superficial bituminoso, comportándose como calzadas de pavimento flexible.

#### CONSTITUCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO

##### Implementación del SWMM

La modelación hidrológica-hidráulica, para reproducir la dinámica de los procesos de generación y propagación de escurrimiento superficial, se llevó a cabo con la versión 5.0vE del software SWMM (Storm Water Management Model), desarrollada por la National Risk Management Research Laboratory de Estados Unidos, traducida al español por Grupo Multidisciplinar de Modelación de Flujo de la Universidad Politécnica de Valencia y de uso gratuito (*GMMF, 2005*).

Este software, básicamente, está constituido por un módulo hidrológico que permite llevar a cabo la transformación lluvia-caudal y un módulo hidrodinámico que permite propagar las crecidas generadas por los distintos elementos constitutivos de los sistemas de drenajes pluviales urbanos.

Tabla 1. Zonificación, área impermeable y CN adoptados para el escenario actual y el posible escenario futuro.

Zonificación	Escenario actual			Escenario futuro		
	% sup. imp.	% sup. imp. DC	CN II	% sup. imp.	% sup. imp. DC	CN II
Distrito central	85	90	74	85	100	74
Residencial de densidad alta	65	70	74	75	100	74
Residencial de densidad media	45	50	74	65	100	74
Residencial de densidad baja	25	30	74	55	100	74
Loteos nuevos y zonas de intrusión	5	10	74	50	100	74
Industrias	25	30	74	60	100	74
Parques y canchas	2,5	5	70	2,5	100	70
Reservas ecológicas	0	0	66	0	100	66
Rutas asfaltadas	45	50	74	45	100	74
Ruta de tierra	25	30	70	45	100	74

### Constitución y discretización de elementos componentes del sistema

Con la intención de constituir y poner en funcionamiento operativo un modelo detallado, que permita calcular los tirantes de agua y velocidades desarrolladas en cada esquina, cordón cuneta, conductos y arroyos dentro de la cuenca, se llevó a cabo la constitución topológica con, al menos, 4 nodos en cada bocacalle (Figura 3a). Se desarrolló este nivel de detalle para poder establecer tanto los caudales que circulan a cada lado de las calles, como así también los niveles de agua en cada una de las cuatro esquinas de las bocacalles.

En general, cada manzana está representada por una subcuenca tributaria que descarga en el nodo más alto de su perímetro. En los casos necesarios de ser representados por otra condición, se subdividieron las manzanas en dos o más subcuencas tributarias. Las pendientes de todas las subcuencas se unificaron en un valor de 5,5 %, la cual resulta como la pendiente promedio de la cuenca determinada a través del MDT.

Los nodos están conectados entre sí de diferentes formas. El conducto entre dos esquinas de una misma manzana está caracterizado por una media calle, con su respectiva vereda, cordón cuneta y media calzada; cada uno de estos con su rugosidad característica en función del material que lo compone y las obstrucciones esperables.

En las cuatro esquinas de cada bocacalle los excedentes superficiales pueden ser conducidos hacia otro nodo por un cordón cuneta, atravesar la calle, ya sea por un badén o por desborde hacia las otras esquinas de la bocacalle donde el umbral de desborde está determinado por el gálibo de la calle, o bien pueden ser conducidos hacia un conducto cerrado por vertido o mediante una boca de tormenta o sumidero.

Si bien el software permite evaluar el funcionamiento de los sumideros a través de diferentes coeficientes de descarga y características recomendadas por el mismo, cada boca de tormenta fue cargada con su respectiva curva de descarga utilizando ecuaciones desarrolladas en la bibliografía especializada, en función a sus verdaderas dimensiones y características (Riccardi, 2004).

### Áreas directa e indirectamente conectadas

En Oberá, dada las prestaciones hidráulicas de la topografía y el suelo con cobertura vegetal, muchas viviendas descargan el flujo de los pisos y techos a los patios con césped de las casas. Techos que, en gran número, no cuentan con canaletas, descargando directamente sobre los pisos y áreas verdes de los lotes. En función de este mecanismo interno de drenaje de los lotes, se estructuró cada unidad de aporte de la siguiente manera: (i) un determinado porcentaje del área impermeable total se consideró directamente conectado (AIDC) al sistema de desagües pluviales (Tabla 1), (ii) la superficie impermeable restante o no conectada (AINC) se consideró con descarga en las zonas permeables de los lotes y (iii) los excedentes de las zonas permeables (AP), una vez descontadas las pérdidas, son conducidos al sistema. La Figura 3b muestra un ejemplo donde el 50 % de la superficie impermeable esta directamente conectada.

El ambiente de modelación resultó de una extensión superficial de 976,41 ha, correspondiendo 24,5 % a áreas impermeables totales, de las cuales 12,9 % del total están directamente conectadas, y 75,5 % de áreas permeables.

En resumen, el modelo quedó constituido por 972 subcuencas tributarias, 2.967 nodos y 3.742 elementos conductores de los excedentes hídricos (calles, cunetas, sumideros, zanjas, canales, conductos y arroyos).

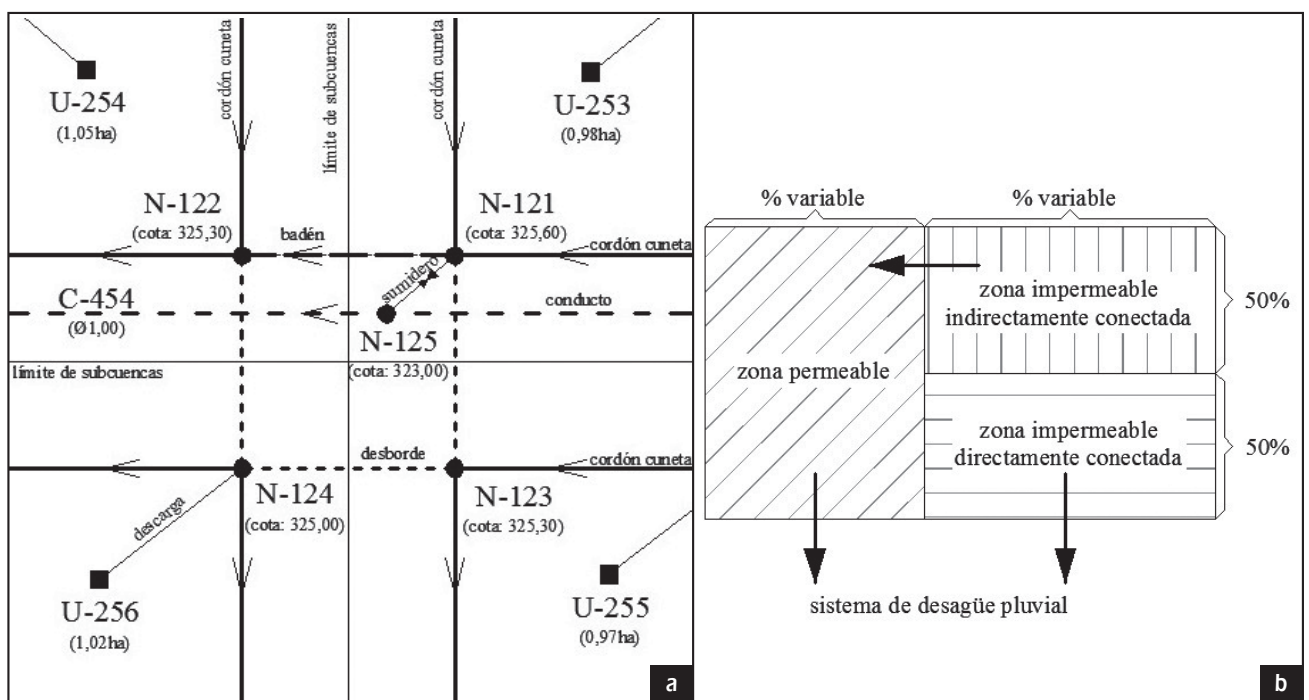


Figura 3. a: Esquema del modelo en bocacalle. b: Ejemplo de interacción entre las zonas permeables e impermeables.



### Bocas de tormenta y vertederos

Para la evaluación del flujo captado por las bocas de tormentas horizontales se utilizó el diagrama de gastos específicos en función del tirante de agua, desarrollado por *UDFCD (1984)* adaptado por *Riccardi (2004)* (Figura 4). Para las bocas de tormenta verticales se utilizaron las ecuaciones 1 y 2 presentadas por *Bertoni et al. (1995)* citado por *Riccardi (2004)*.

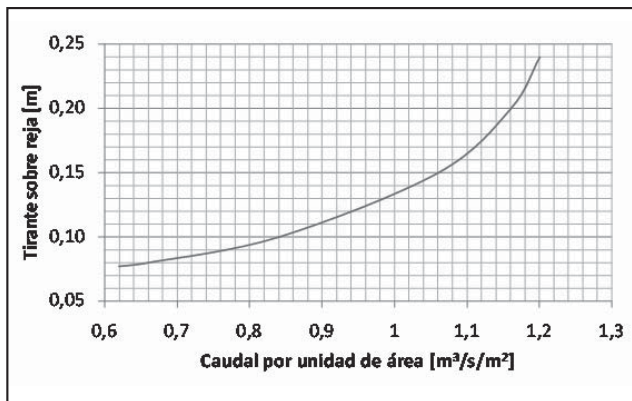


Figura 4. Capacidad específica de una boca de tormenta horizontal (UDFCD, 1984; adaptado por Riccardi, 2004).

$$Q = 1,656L \cdot y_0^{1,5} \rightarrow y_0 \leq 1,5h \quad (1)$$

$$Q = 0,67L \cdot h \left[ 2g \left( y_0 - \frac{h}{2} \right) \right] \rightarrow y_0 > 1,5h \quad (2)$$

Con:  $Q$  caudal [ $m^3/s$ ],  $L$  longitud [ $m$ ],  $y_0$  tirante de agua [ $m$ ] y  $h$  abertura [ $m$ ] de la boca de tormenta.

En tanto que para las bocas de tormenta combinadas con aberturas verticales y horizontales, los valores teóricos fueron afectados por un coeficiente de reducción de 65 % (*UDFCD, 1984*; citado por *Riccardi, 2004*).

Los vertederos detectados en el sistema, fueron incorporados en el modelo como canales de hormigón de 0,15 m de longitud (espesor del cordón cuneta), con sus respectivos desniveles de entrada y salida. Se decidió confeccionarlos de esta manera debido a que se comportaban correctamente durante el flujo normal, desde las calles hacia los cursos de agua, y durante el desbordamiento de los arroyos, donde el flujo se produce desde estos hacia las cunetas de calles.

### Calibración del modelo

Para la calibración del modelo se utilizaron los registros de cuatro eventos pluviográficos. Los parámetros a calibrar fueron los coeficientes de resistencia empleados en las distintas superficies y elementos de conducción, como así también se verificó el número de curva para la determinación del escurrimiento neto.

Los datos de precipitación fueron obtenidos por la estación meteorológica instalada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones (*FIO, 2013*), situada cercana al baricentro de la cuenca en estudio. Dicha estación cuenta con un pluviógrafo digital a canchales, con una resolución en intervalos de hasta 1 minuto y 0,2 mm. Para la determinación del caudal erogado registrado se utilizó el limnigrama registrado y una relación H-Q determinada previamente en el punto de control de la cuenca (Figura 2). Los niveles se obtuvieron por observación directa de las reglas limnimétricas instalada en el punto de control de la cuenca, obteniéndose lecturas cada 5 minutos. La condición de humedad antecedente en todos los eventos evaluados en la calibración fue considerada como media, empleándose el CN medio (Tabla 1).

Seguidamente, en la Tabla 2, se exhiben los coeficientes de rugosidad resultantes de la calibración para las distintas superficies de escurrimiento.

A partir de los resultados de los eventos pluviográficos modelados en la calibración se logró una aceptable reproducción de los niveles de agua en la sección de control de la cuenca y otros cuatro puntos característicos del interior de la misma (Figura 2), donde fueron contrastados niveles máximos observados, arrojando valores aceptables con una diferencia inferior al 15 %.

Tabla 2. Coeficiente de Manning utilizados en las distintas superficies de escurrimiento.

Coeficientes de Manning utilizados [adm]					
Subcuencas	Áreas permeable	0,100	Calles de tierra	Calzada	0,040
	Áreas impermeable	0,018		Cuneta	0,030
Calles de pavimento flexible	Calzada	0,020		Conductos de hormigón	Veredas
	Cuneta	0,018			
	Veredas	0,025	Zanjas de tierra	Lecho	0,030
Calles de empedrado tipo brasilero	Calzada	0,025		Arroyos	Valle
	Cuneta	0,018	Lecho		0,035
	Veredas	0,025	Valle		0,075

### ELABORACIÓN DE MAPAS DE NIVELES Y VELOCIDADES MÁXIMAS MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA

Una vez calibrado el modelo de simulación, se procedió a su explotación enfocada a la elaboración de mapas de velocidades y niveles máximos alcanzados en las calles de todo el ambiente en estudio para tormentas de 2, 5 y 100 años de recurrencia.

#### Tormenta crítica

Primeramente se determinó la duración de la tormenta crítica. Para este tipo de análisis la tormenta crítica se define como aquella que genera caudales máximos lo suficientemente cercanos al máximo invariante y poseen una duración esperable en la región de estudio. Se seleccionaron dos elementos críticos del sistema para ser evaluados, la salida propiamente dicha de la cuenca Mbotaby y el tramo más comprometido de la calle Salta, donde suelen presentarse inundaciones menores pero las aguas superficiales alcanzan altas velocidades. Se decidió así trabajar con tormentas críticas de 12 h de duración, ya que las mismas producen caudales y tirantes cercanos a los máximos esperables (variación del orden del 2 %) y una duración mayor de la tormenta agregaría un tiempo de cálculo innecesario a la modelación y no aportará una apreciable precisión al cálculo.

Con la duración de la tormenta establecida se confeccionaron tres hietogramas para 2, 5 y 100 años de recurrencia, utilizando el método de los bloques alternos (Riccardi, 2004) y las curvas I-D-R de la localidad de Cerro Azul (Litwin y Franco, 1987) distante 36 km de la ciudad de Oberá.

Para 2 años de recurrencia son esperables 99,9 mm de precipitación total, con una intensidad media de 8,3 mm/h y

una intensidad máxima durante 5 minutos de 91 mm/h. Para 5 años de recurrencia, el total precipitado esperable es de 125,8 mm, con una intensidad media de 10,5 mm/h y una intensidad máxima de 101,8 mm/h. En tanto que para 100 de recurrencia, obtenemos 201,2 mm totales precipitados, con una intensidad media de 16,8 mm/h y 140,7 mm/h durante los 5 minutos de mayor intensidad.

Posteriormente se llevaron a cabo las respectivas corridas del modelo de simulación para determinar los niveles y velocidades en cada uno de los elementos del desagüe pluvial en los que se constituyó el modelo.

#### Resultados obtenidos

Todas las corridas arrojaron errores de continuidad hidrológica e hidráulica menores al 1 %. El modelo permitió generar valores de tirante de agua, velocidad y caudal en todos los elementos del sistema de drenaje pluvial constituido. El paso de tiempo de cálculo que ha permitido verificar el menor error en continuidad fue de un segundo.

Para un adecuado seguimiento de los resultados obtenidos, una vez culminadas las simulaciones, los valores de tirantes, velocidades y caudales fueron impresos en archivos cada 1 min. Considerando los 2.967 nodos y 3.742 elementos con que se constituyó el ambiente modelado, el tiempo de cálculo aproximado de cada tormenta fue de 26 min. En la Tabla 3 se presenta un resumen con los resultados de las corridas con datos del balance hidrológico, valores de caudales y niveles máximos en el punto de control de la cuenca, como así también el tiempo que permanece desbordado el arroyo en dicho punto, teniendo presente que el mismo se produce para un nivel de agua de 1,80 m.

Tabla 3. Síntesis de resultados obtenidos para los dos escenarios y distintas recurrencias.

Recurrencia	Parámetro	Unidades	Escenario actual	Escenario futuro	Variación
2 años	Caudal máximo	[l/s]	69,057	72,679	5,2 %
	Nivel máximo	[m]	2,48	2,51	1,2 %
	Tiempo al pico	[h:mm]	6:45	6:50	0:05
	Tiempo de desborde	[h:mm]	1:40	1:50	0:10
	Precipitación total	[mm]	99,87	99,87	0,0 %
	Infiltración	[mm]	40,43	29,11	-28,0 %
	Precipitación en exceso	[mm]	54,45	68,85	26,4 %
	Almacenamiento	[mm]	5,05	1,95	-61,4 %
	5 años	Caudal máximo	[l/s]	75,595	78,417
Nivel máximo		[m]	2,54	2,57	1,2 %
Tiempo al pico		[h:mm]	7:00	7:05	0:05
Tiempo de desborde		[h:mm]	2:20	2:40	0:20
Precipitación total		[mm]	125,8	125,8	0,0 %
Infiltración		[mm]	44,58	32,18	-27,8 %
Precipitación en exceso		[mm]	76,22	91,74	20,4 %
Almacenamiento		[mm]	5,06	1,96	-61,3 %
100 años		Caudal máximo	[l/s]	103573	104464
	Nivel máximo	[m]	2,79	2,8	0,4 %
	Tiempo al pico	[h:mm]	7:30	7:35	0:05
	Tiempo de desborde	[h:mm]	4:30	5:00	0:30
	Precipitación total	[mm]	201,27	201,27	0,0 %
	Infiltración	[mm]	52,42	37,79	-27,9 %
	Precipitación en exceso	[mm]	143,86	161,36	12,2 %
	Almacenamiento	[mm]	5,07	2,14	-57,8 %

A partir de las simulaciones realizadas y con el fin de representar la espacialidad de las modificaciones se construyeron, para cada recurrencia y escenario, dos tipos de mapas. El primer tipo de mapa corresponde a los niveles máximos alcanzados en tanto que el segundo tipo de mapa corresponde a las velocidades máximas desarrolladas en las cunetas. Las respuestas de la cuenca corresponden a una precipitación extrema determinada a partir de las relaciones IDR existentes de 12 horas de duración, con 2, 5 y 100 años de recurrencia. Para una mejor interpretación de los resultados, los mismos fueron discretizados en rangos para ser visualizados en los mapas.

En los mapas de niveles máximos, el primer rango de valores, menos de 0,15 m, corresponde a cunetas que no presentan desborde por poseer tirantes de agua menores al nivel máximo de la cuneta. El segundo rango, entre 0,15 y 0,25 m, corresponde

a aquellas calles cuyos niveles máximos presentan desborde de las cunetas e inundación parcial de las veredas. El rango siguiente, entre 0,25 y 0,50 m, corresponde a las calles donde el agua ha inundado las calzadas, la totalidad de las veredas e ingresado a los lotes de viviendas y comercios. Los próximos rangos de valores son para evaluar la severidad de la inundación en zonas más afectadas.

En la Tabla 4 se presentan los porcentajes de cunetas de calle alcanzadas por cada rango de niveles para los dos escenarios analizados y las distintas recurrencias. A modo ilustrativo en la Figura 5 se presenta el mapa de niveles máximos para el posible escenario futuro en las cunetas de la cuenca en estudio para 100 años de recurrencia. De dichas figuras y tabla puede concluirse que son significativas las cunetas que desbordan afectando veredas y lotes con viviendas y comercios.

Tabla 4. Porcentajes de niveles máximos en cunetas para los dos escenarios y distintas recurrencias.

Niveles máximos	2 años de recurrencia			5 años de recurrencia			100 años de recurrencia		
	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación
menos de 15 cm	74,3 %	66,0 %	-8,3 %	66,7 %	61,3 %	-5,4 %	50,7 %	46,9 %	-3,9 %
de 15 a 25 cm	17,8 %	20,0 %	2,1 %	20,0 %	20,5 %	0,5 %	24,6 %	26,2 %	1,5 %
de 25 a 50 cm	7,0 %	11,4 %	4,3 %	11,5 %	14,4 %	3,0 %	18,7 %	20,2 %	1,5 %
de 50 a 100 cm	0,8 %	2,7 %	1,9 %	1,8 %	3,6 %	1,8 %	5,7 %	6,4 %	0,7 %
más de 100 cm	0 %	0 %	0 %	0 %	0,1 %	0,1 %	0,2 %	0,3 %	0,1 %

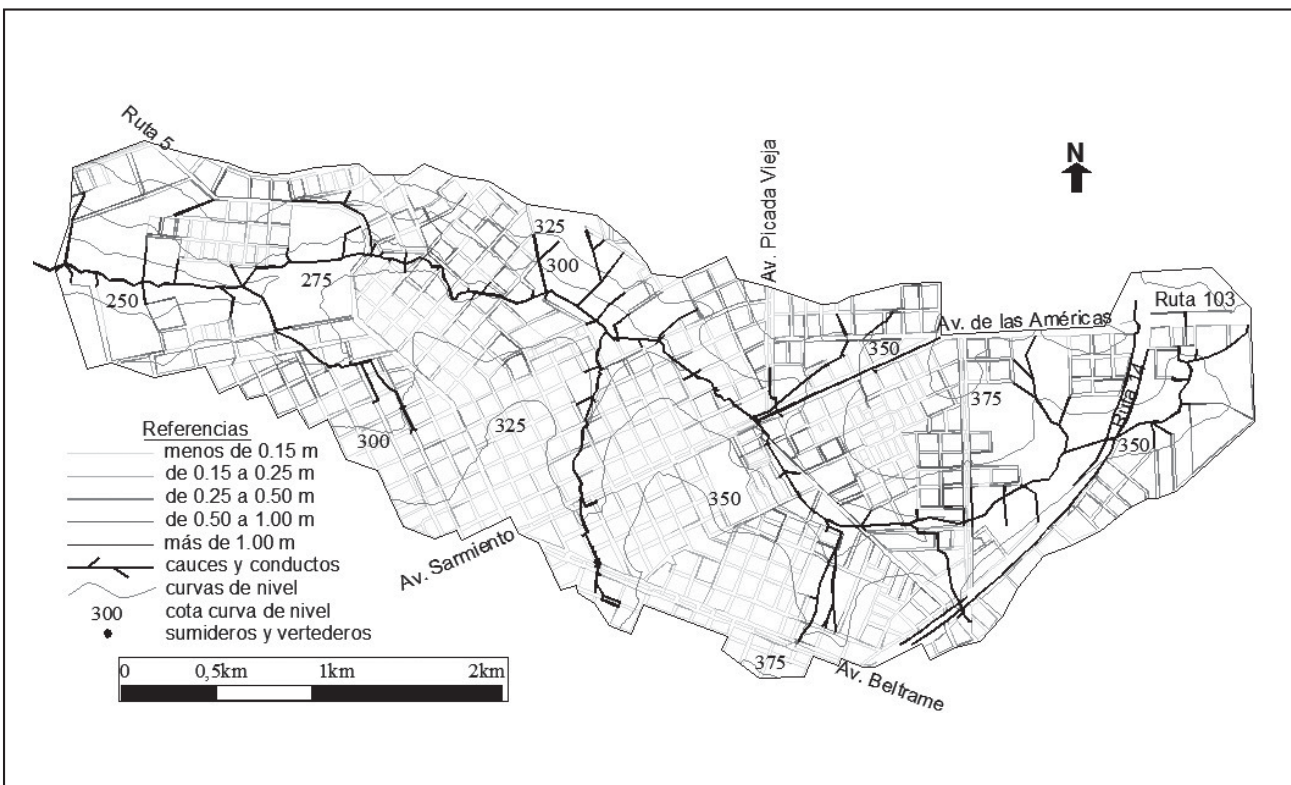


Figura 5. Niveles máximos en cunetas de calles para el posible escenario futuro con 100 años de recurrencia.

En los mapas de velocidades máximas, el rango menor representa las cunetas que alcanzan velocidades menores a 1 m/s y los rangos siguientes presentan valores que se incrementan en 1 m/s cada uno. El mayor de los rangos representa las cunetas donde se alcanza velocidades mayores a los 4 m/s.

En la Tabla 5 se presentan los porcentajes de velocidades máximas alcanzadas dentro de cada rango de valores. Puede visualizarse las importantes velocidades alcanzadas en las

cunetas de la cuenca, velocidades que se desarrollan en toda la cuenca. Aún para una reducida recurrencia las cunetas con velocidades mayores a 1 m/s casi alcanzan el 40 % del total de cunetas de la cuenca. Para 100 años de recurrencias las velocidades máximas alcanzadas superan los 4 m/s. En la Figura 6 se presenta el mapa de velocidades máximas para el posible escenario futuro en las cunetas de la cuenca Mbotaby para 100 años de recurrencia.

Tabla 5. Porcentajes de velocidades máximas en cunetas para los dos escenarios y distintas recurrencias.

Velocidades máximas	2 años de recurrencia			5 años de recurrencia			100 años de recurrencia		
	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación	actual	futuro	variación
menos de 1 m/s	63,7 %	59,8 %	-3,9 %	59,4 %	57,6 %	-1,8 %	53,4 %	48,7 %	-4,7 %
de 1 a 2 m/s	31,5 %	33,5 %	2,0 %	34,4 %	34,3 %	-0,1 %	35,7 %	38,4 %	2,7 %
de 2 a 3 m/s	4,3 %	5,9 %	1,6 %	5,5 %	7,1 %	1,6 %	9,6 %	11,2 %	1,6 %
de 3 a 4 m/s	0,5 %	0,7 %	0,1 %	0,6 %	0,7 %	0,2 %	1,2 %	1,3 %	0,2 %
más de 4 m/s	0 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,4 %	0,2 %

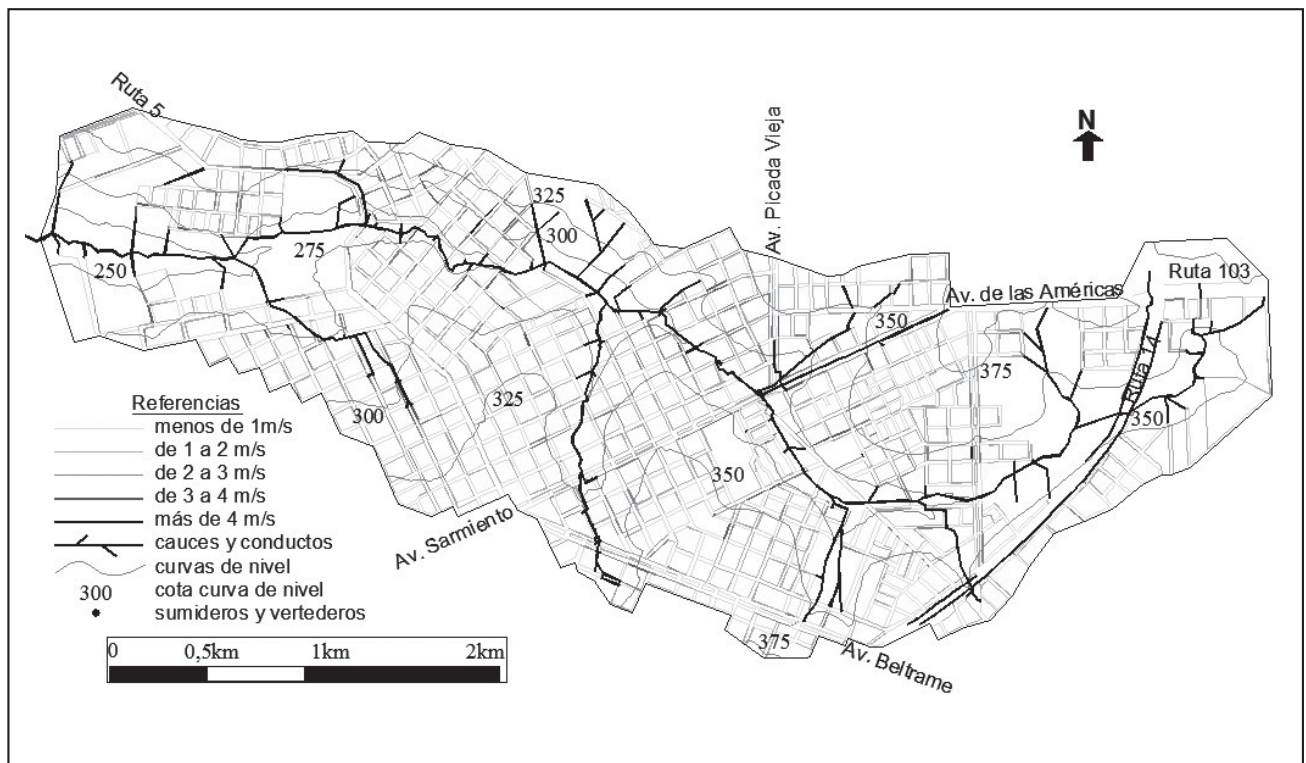


Figura 6. Velocidades máximas en cunetas de calles para el posible escenario futuro y 100 años de recurrencia.

## CONCLUSIONES

El modelo SWMM 5.0vE utilizado para la modelación ha mostrado poseer un interfaz sencilla para la modificación de los parámetros que rigen la respuesta de la cuenca ante distintos escenarios.

Referente a la comparación de los balances hidrológicos de los dos escenarios planteados; la mayor variación se verifica en el almacenamiento de agua dentro de la cuenca, seguido por la modificación en el volumen infiltrado, en tanto que la menor modificación se verifica en el exceso de precipitación.

Todas las modificaciones se originan en el aumento de la impermeabilidad de la cuenca, observándose las mayores variaciones porcentuales de los procesos hidrológicos para menores recurrencias.

El escenario actual de la cuenca Mbotaby presenta 24 % de impermeabilidad, índice relativamente bajo para un área urbana. Para el posible escenario futuro, donde las superficies impermeables sean iguales a las máximas superficies cubiertas permitidas por CEM vigente, la impermeabilidad de la cuenca alcanzaría 45 %, con subcuencas que llegarían al 90 % en el centro de la ciudad.

Aún para el posible escenario futuro el porcentaje total de áreas permeables se presenta como significativo, representando el 55 % de las superficies. Esto se debe en gran medida a las áreas verdes que posee la ciudad, como plaza y reservas ecológicas, situación que realza la importancia de conservar dichas áreas zonas impidiendo el loteo y urbanización de las mismas frente a la presión urbanística.

Respecto a los niveles máximos calculados en las cunetas de las calles puede concluirse que para una recurrencia de 2 años el porcentaje de cunetas desbordadas pasa de 26 % en el escenario actual a 34 % en el posible escenario futuro, representando una alta frecuencia de ocurrencia para esta recurrencia de lluvia. Para 5 años de recurrencia las cunetas desbordadas pasan de 33 % a 39 %. Y para una recurrencia de 100 años las cunetas desbordadas pasan de 48 % a 53 %.

En lo que concierne a velocidades máximas, para una recurrencia de 2 años, las cunetas con las que desarrollan velocidades mayores a 1 m/s pasan de 36 % en el escenario actual a 40 % en el posible escenario futuro. Para una recurrencia de 5 años las cunetas con velocidades máximas mayores a 1 m/s

pasan de 41 % a 42 %. Y para una recurrencia de 100 años los porcentajes varían de 47 % a 51 %.

Dado que en cuencas como la de estudio, con elevadas pendientes, la evaluación de riesgo por inundación en calles se rige por la combinación de niveles de desborde y altas velocidades alcanzados simultáneamente, se observa un aumento del riesgo por inundación ante un posible escenario futuro.

Se observa un sostenido aumento tanto de los niveles máximos como de las velocidades máximas para todas las recurrencias. Variación que es mayor para eventos más frecuentes con menores recurrencias. Se visualiza además que los niveles máximos aumentan en mayor proporción que las velocidades máximas, debido al almacenamiento temporario del agua dentro de la cuenca por colmatación de la capacidad de evacuación del actual sistema de desagües pluviales.

Es menester recordar que, en el posible escenario futuro planteado, las superficies impermeables alcanzan los índices máximos de FOS especificados para cada zonificación, sin embargo el actual CEM no restringe las superficies impermeables de los lotes, por lo que puede ser factible un escenario de mayor impermeabilidad total.

Puede concluirse que los resultados obtenidos en términos de niveles y velocidades máximas y el correspondiente mapeo de esas variables hidráulicas constituyen una importante herramienta a la hora de la planificación integral de la problemática del escurrimiento pluvial urbano actual y futuro de la ciudad de Oberá.

En una futura etapa de los trabajos se prevé determinar tensiones de corte de fondo producidas por el flujo sobre las vías de escurrimiento principales, en vista a lograr en conjunto con la identificación de los tipos de suelos y su resistencia la correspondiente zonificación de vulnerabilidad a erosión.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BERTONI, J., PEDRAZA, R., COLLINS, J., MACOR, J., PUSINERI, G., OCAMPO, C., MAZA, J. Y SECCHI, A., 1995.  
Apuntes de Curso: Sistemas de Drenaje Urbano,  
*FI-UNL. Santa Fe. 300p.*
- CELO, 2013. COOPERATIVA ELÉCTRICA LIMITADA OBERÁ.  
Comunicación interna.  
*Google Earth*, 2013. *Imagen de 3 de mayo de 2010. www.googleearth.com.*
- FIO, 2013.  
Facultad de Ingeniería de Oberá,  
*Universidad Nacional de Misiones. Datos de la estación meteorológica.*
- GMME, 2005.  
Grupo Multidisciplinar de Modelación de Flujo,  
*Manual del usuario del SWMM 5.0 vE. Universidad Politécnica de Valencia. 244p.*
- HAUSEN, J., 1919.  
Contribución al estudio de la petrografía del territorio nacional de Misiones.  
Ministerio de agricultura de la nación, Dirección general de minas, geología e hidrografía.  
Boletín N° 21, Serie B (geología). Buenos Aires. 39p.
- LITWIN, C. Y FRANCO, P., 1987.  
Estudio Hidrológico e Hidráulico de Tributarios del Río Paraná en el Tramo Comprendido entre el Río Iguazú y la Sección Encarnación-Posadas.  
*Informe para la Comisión mixta argentino – paraguaya (COMIP). CABA, 245p.*
- MEZHER, R., MERCURI, P. Y PIZARRO, M., 2008.  
Mapa de precipitación anual en la República Argentina, Serie 1971-2000.  
*INTA CABA, Argentina.*

- OLINUK, J., 1998.  
El clima en la localidad de Cerro Azul, período 1967–1996.  
*Estación experimental agropecuaria INTA Cerro Azul. Informe técnico N° 68, ISSN 0326-0135. Posadas, Misiones. 73p.*
- PAPADAKIS, J., 1962.  
Avances recientes en el estudio hídrico de los climas.  
*Publicación. N°81. Instituto de Suelos y Agrotécnica, INTA. Buenos Aires. 62 p.*
- RICCARDI, G., 2004.  
Hidrología en medios antropizados.  
*Libro electrónico. CURIHAM, FCEIA-UNR. <http://c-virtual.fceia.unr.edu.ar>; último acceso 20 de diciembre de 2013.*
- RODRIGUEZ, T. Y RICCARDI, G., 2014a.  
Dinámica del escurrimiento superficial en calles de una cuenca urbana sometida a intensas precipitaciones en la provincia de Misiones.  
*2º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Santa Fe. 10p.*
- RODRIGUEZ, T. Y RICCARDI, G., 2014b.  
Evaluación del riesgo por inundación en calles de una cuenca urbana de alta pendiente del centro de Misiones.  
*Cuadernos del CURIHAM (en prensa), UNR Editora. Rosario. 23pp.*
- RODRIGUEZ, T., RICCARDI, G. Y RUBERTO, A., 2014.  
Análisis de una tormenta extrema registrada en la ciudad de Oberá, Misiones.  
*IV Taller de regionalización de precipitaciones máximas. San Miguel de Tucumán. Mayo de 2014. 14p.*
- RODRIGUEZ, T., REINERT, H., RUBERTO, A., GOMEZ, M. Y BERGER, E., 2013a.  
Urbanización e impacto hidrológico en una cuenca de alta pendiente del centro de Misiones.  
*CD actas CONAGUA 2013. San Juan. 12p.*
- RODRIGUEZ, T., REINERT, H., RUBERTO, A., GOMEZ, M., AGUIRRE, M. Y AGUIRRE, A., 2013b.  
Instrumentación y modelación hidrológica superficial de una cuenca urbana de alta pendiente del centro de Misiones.  
*CD actas CONAGUA 2013. San Juan. 12p.*
- SRTM, 2009.  
The Shuttle Radar Topography Mission,  
NASA.
- UDFCD (URBAN DRAINAGE AND FLOOD CONTROL DISTRICT), 1984.  
Drainage Criteria Manual, Vol. 1,2 y 3.  
*Denver, Colorado. 750p.*
- US-SCS (SOIL CONSERVATION SERVICE), 1975.  
Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release No. 55, SCS-USDA.  
*Washington, D.C.*





# Las obras de intervención sobre la planicie de inundación del Paraná y el desarrollo urbano del área de Santa Fe

## The public works on the floodplain of the Paraná river and the urban development in the area of Santa Fe

Sato, Rodolfo <sup>1, 2, 5</sup> ✉ - Mihura, Enrique <sup>1</sup> - García, María Daniela <sup>1</sup> - Birri, María Laura <sup>3</sup> - Mines, Patricia <sup>4</sup>

Recibido: 16 de diciembre de 2014 • Aceptado: 29 de diciembre de 2014

### Resumen

*La zona metropolitana de la ciudad de Santa Fe se ve sometida a un proceso de expansión territorial que ha incluido un sector del valle de inundación del río Paraná.*

*El área de estudio se encuentra comprendida entre la Laguna Setúbal, el Arroyo Leyes, el río Colastiné y el Canal de acceso al Puerto. Las obras de intervención que se ejecutaron en esta porción del territorio, como las vías de comunicación y los terraplenes de defensa construidos alrededor de los incipientes grupos poblacionales desarrollados, actuaron como catalizadores en la urbanización de áreas vulnerables sometidas a riesgo de inundación con características propias, tales como la disponibilidad de terrenos amplios, la vinculación con los ríos y el contexto insular que dificulta las conexiones fuera y dentro del sector.*

*Estas características propias del área hacen necesario contar con una política de ordenamiento territorial particular que articule un desarrollo sustentable y asegure la preservación de los recursos naturales que la caracterizan. La convergencia dentro del área de distintas jurisdicciones administrativas, nacional, provincial y de varios municipios, potencia la fragmentación de las políticas de desarrollo del área y dificultan la implementación de una gestión integrada de los recursos, en las cuales la cuestión hídrica es relevante.*

**Palabras clave:** áreas vulnerables, obras de intervención, urbanización, riesgo de inundación, ordenamiento territorial.

### Abstract

*The metropolitan area of Santa Fe city is subject to a process of territorial expansion who has included a section of the floodplain of the Paraná River.*

*The study area is between Setúbal Lagoon, Leyes Stream, Colastiné River and the Acces Channel to the Port. The public works executed in this portion of the territory are mainly*

1. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral (UNL), Ciudad Universitaria. Ruta Nacional N° 168 - Km 472,4. (3000) Santa Fe, Argentina.

2. Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Av. Almafuerde 1033 - (3100) Paraná, Entre Ríos, Argentina.

3. Facultad de Humanidades y Ciencias; Universidad Nacional del Litoral (UNL), Ciudad Universitaria. Ruta Nacional N° 168 - Km 472,4. (3000) Santa Fe, Argentina.

4. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional del Litoral (UNL), Ciudad Universitaria, Ruta Nacional N° 168 - Km 472,4. (3000) Santa Fe, Argentina.

✉ sato.rodolfo@gmail.com



communication roads and defense embankments built around the emerging population groups developed. These works were catalysts for a development of vulnerable areas, subject to flood risk, with their features own, such as availability of spacious grounds, linking the town with the river and the island context which make difficult connections within and outside the sector.

These characteristics abovementioned demands the development of a particular land policy that articulates sustainable development and ensure the preservation of their natural resources. Also, the convergence in the area of different administrative jurisdictions, national, provincial and various municipalities, enhance the fragmentation of development policies of this area and make difficult implementation of an integrated management of natural resources, in which the water issue is the most relevant.

**Keywords:** vulnerable areas, intervention works, urbanization, flood risk, land policy.

### INTRODUCCIÓN

La Región Litoral de la cuenca del Río de la Plata cuenta con numerosos centros urbanos asentados en la ribera de los grandes ríos. Muchas de estas ciudades se encuentran con parte de su territorio sujeto a inundaciones periódicas, debido a un proceso de urbanización creciente que en muchas ocasiones no reconoce reglas ni frenos (Bertoni et al., 2004).

Los objetivos de este trabajo son estudiar la relación que han tenido las obras de intervención realizadas en la zona del valle de inundación del río Paraná cercana a la ciudad de Santa Fe, como vías de comunicación y terraplenes de defensa, con el acelerado proceso de ocupación de este territorio, sometido a inundaciones periódicas, y analizar sus consecuencias en esta zona.

#### Características generales del área de estudio

El área de estudio se encuentra delimitada al NO por la Laguna Setúbal, al N por el Arroyo Leyes, al SE por el Río Colastiné y al SO por el Canal de Acceso al Puerto (Figura 1). Con una superficie de 243 km<sup>2</sup> forma parte del denominado Albardón de la Costa, una dorsal elevada dentro del valle de inundación del río Paraná que la separa del sistema Saladillos-Setúbal.

Esta área funciona hidráulicamente como una divisoria parcial del río Paraná y del sistema local Saladillos-Setúbal, ya

que existen conexiones permanentes como el complejo Arroyo Leyes – Arroyo Potrero que los conecta aguas arriba, y el Canal de Acceso al Puerto que junto con el río Coronda constituyen la vinculación de aguas abajo, más los puentes aliviaderos de la Ruta Nacional N° 168 que constituyen vinculaciones temporarias en situaciones de crecida. En crecientes importantes del río Paraná dicho sistema queda totalmente vinculado al río (Figura 2), integrándose a su valle de inundación (Barbagelata et al., 2007). Esta dorsal está constituida principalmente por suelo arenoso, cuyo origen geológico se relaciona con campos de dunas longitudinales que se desarrollan entre Helvecia y Colastiné. Sus características son prácticamente únicas en el tramo medio del río Paraná, constituyendo los terrenos más elevados que se encuentran dentro de su valle de inundación. Junto a esta zona particular se encuentran ambientes aluviales típicos del valle de inundación del Paraná medio, conformados por una red muy dinámica de cauces complejos, junto con islas, bañados y lagunas, donde la sedimentación de finos, que transporta el Paraná en gran medida, tienen una importancia fundamental en su formación (Ramonell et al., 2011).

Podemos clasificar el área de estudio en distintas zonas características, vinculadas con los niveles del terreno (Tabla 1), dentro de las cuales los cuerpos de agua y las áreas anegadizas (cota menor a 13 m de IGN) cubren un 77,4% de la misma. Las zonas más altas, que solo son alcanzadas por crecientes

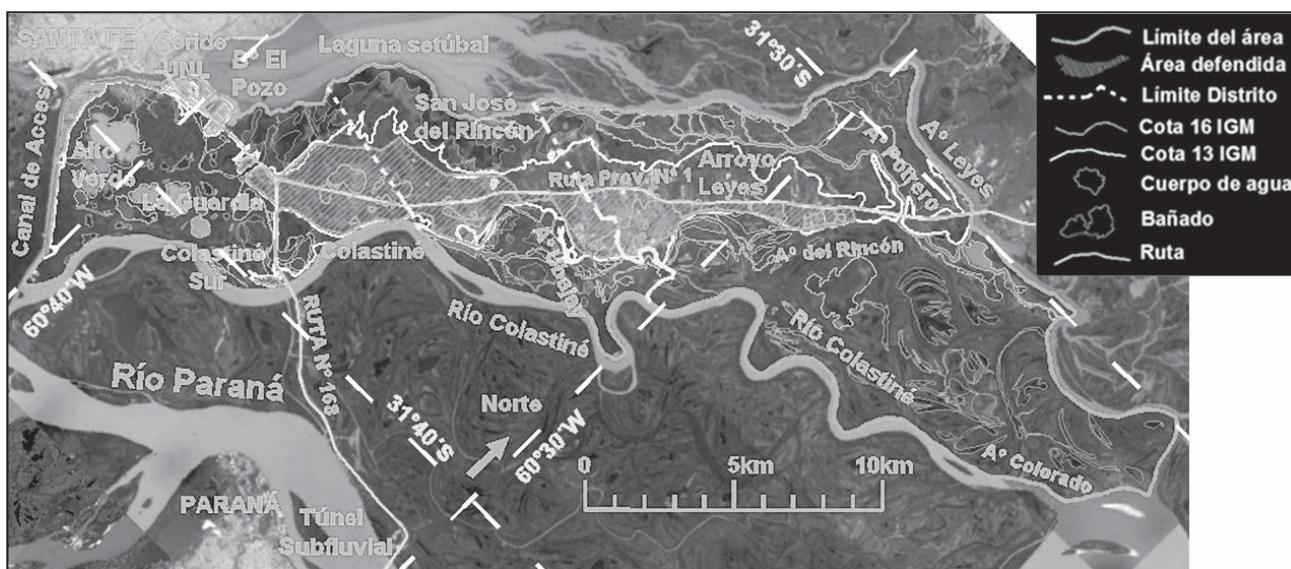


Figura 1. Ubicación y mapa del área de estudio.

excepcionales, llegan solo a 4,5% de la superficie. El resto, un 18,1% del área, se encuentra entre niveles alcanzados por crecientes de mediana y mayor importancia. La ejecución de terraplenes de defensa y rellenos con material refulado protegen de las inundaciones a una porción importante del territorio, unas 3.125 ha, que conforman un 12,9% del área de estudio. En mayor medida se trata de terrenos comprendidos entre cota 13 y 16 de IGN, y en menor medida se encuentran terrenos más altos (cota mayor a 16 m IGN). Las zonas más bajas dentro del área defendida solo cubren una superficie mínima, poco más del 2%, lo cual constituye también un déficit importante en el funcionamiento del sistema de defensas para evitar inundaciones, donde estas funcionan como almacenamientos temporarios del agua de lluvia.

**Tabla 1. Distribución de superficie del área de estudio.**

Zonas	Superficie ha	%	Zonas defendidas ha	%
Cuerpo de Agua < 10 m	5.599	23,0%		
Zona anegadiza entre 10 y 13m	13.215	54,4%	71	2,3%
Área entre 13 y 16m	4.395	18,1%	2.238	71,6%
Área > 16 m	1.094	4,5%	817	26,1%
Área total	24.302		3.125	12,9%

En cuanto a la división política, en el área se encuentran tres distritos, la zona sur corresponde a la ciudad de Santa Fe (hasta el km 4,5 de la RP N° 1). Luego se encuentra la localidad de San José del Rincón (del km 4,5 al km 10,6 de la RP N° 1), declarada ciudad en mayo de 2013 y al norte la comuna de Arroyo Leyes. También existen obras de jurisdicción provincial como las de la Ruta Provincial N° 1 y nacional como la Ruta Nacional N° 168. Los terraplenes de defensa construidos por el Gobierno de la Provincia forman recintos que no

reconocen los límites de los distritos, como el terraplén oeste entre Colastiné y Rincón y el este entre Colastiné y Ayo. Leyes.

### Las inundaciones y las obras de intervención

El área de estudio se encuentra dentro del valle de inundación del río Paraná, por lo cual ha sufrido regularmente el problema de las crecidas del río y especialmente de las grandes crecientes como las de 1905, 1982/3, 1992 y 1998 (Figura 2). Los procesos de ocupación del valle de inundación, naturalmente limitados por dichas crecidas, están fuertemente vinculados a las obras de intervención que se han realizado en la zona, tanto para garantizar las comunicaciones como para protección de las inundaciones (Paoli *et. al.*, 2000).

En 1936 se construyó el camino Santa Fe-Colastiné sobrelevando la cota del terreno natural de las islas (actual trazado de la Ruta Nacional N° 168) y en 1942 se realizó la Ruta Provincial N° 1, desde La Guardia hacia el NE siguiendo el albardón costero. Pronto se notó que estas obras interferían el normal escurrimiento de las aguas, aún en crecientes que no eran excepcionales, como las de 1959 y 1961, en las cuales se produjo el corte de los terraplenes de la Ruta Prov. N° 1 en varios puntos, por la que luego fue alteada en 1963, construyéndose defensas laterales.

En el año 1966 hubo que “volar” parte del terraplén de la Ruta Nac. N° 168 para salvar el puente Colgante, y los incipientes asentamientos de La Guardia y Alto Verde fueron totalmente inundados.

En 1969 se inaugura el Túnel Subfluvial que vincula las ciudades de Santa Fe y Paraná junto con la Ruta Nac. N° 168, la cual fue sobrelevada entre Santa Fe y La Guardia entre 1976 y 1978 con la habilitación de nuevos puentes aliviaderos, pero que tenían luces escasas. La crecida de 1977 provocó también el sobrepaso y cortes en la RP N° 1, que luego fueron reforzadas, y afectaciones en la RN N° 168, y también en Alto Verde y La Guardia se inundaron en numerosos sectores.



**Figura 2. La crecida de 1992. Imagen LANDSAT 27 de junio de 1992 (bandas 3-5-7).**

Luego en la década del 80, con el relleno del predio de la UNL, del Parque Tecnológico y el barrio El Pozo, se fue complicando la salida del agua del complejo lacustre en situaciones críticas durante las crecidas (Paoli et al., 2000). En la gran creciente de los años 1982 y 1983, con un máximo de 61.000 m<sup>3</sup>/s, la RP N° 1 y sus defensas actuaron como dique de contención, embalsando aguas al este de la misma que sólo podían cruzar hacia el oeste por los puentes de los arroyos Leyes, Potrero y Santa Rita, por donde pasaron más de 13.000 m<sup>3</sup>/s hacia la laguna Setúbal. La salida de todo este Subsistema a través de la RN N° 168 entre Santa Fe y La Guardia solo disponía de 300 m de puente en la sección de la laguna Setúbal y 340 m distribuidos en 6 puentes aliviadores, en 5km de longitud. Esto ocasionó un efecto de embalse, incremento de desnivel y velocidades que produjo la caída del puente Colgante y de los puentes aliviadores N° 4 y 6. Las defensas de los barrios Alto Verde, La Guardia, Colastiné y Rincón también fueron superadas.

En 1992 se produce una nueva gran crecida, pero de corta duración, por lo que pudo defenderse la Ruta Provincial N° 1, pero algunos tramos de defensas de Alto Verde, La Guardia, Colastiné y Rincón fueron sobrepasados. Posteriormente se construyeron numerosas defensas de los barrios a cotas definitivas, por lo que en la creciente de 1998 estas resistieron.

De acuerdo a los registros de altura del río Paraná en el Puerto de Santa Fe (Figura 3) puede observarse la ocurrencia de un período muy húmedo entre 1977 y 1998, en el que se produjeron 4 de los 6 registros mayores. Se observa una modificación muy importante en el régimen del río, principalmente con un incremento de los niveles mínimos de 1,50 m en los últimos 50 años.

Con la puesta en funcionamiento de las grandes represas de Itaipú, en 1984, y de Yaciretá, en 1998, y las más de 30 grandes represas construidas en la cuenca superior, se puede decir que el régimen del río se encuentra semiregulado ya que en la cuenca del Paraguay y el Paraná medio no existen estas obras de control. Algunas crecientes como las de 1992 y 1998 se debieron en gran medida a lluvias producidas principalmente en su tramo medio.

Si bien la construcción de terraplenes de defensa ha alzado el peligro de inundación fluvial en estas áreas urbanas defendida, el riesgo de rotura de estas presas de tierra conlleva la posibilidad de ocurrencia de un riesgo mayor en caso de falla (Wollansky y Pardini, 2010). Otro problema que produjeron los terraplenes es el incremento del riesgo de inundación causado por lluvias importantes, debido a que en su ejecución, urgida por las inundaciones fluviales, no se consideró un diseño integral de las mismas. Estos se construyeron sin conductos de salidas a gravedad y con estaciones de bombeo escasas, solo para evacuar el agua que filtra por el subsuelo arenoso, por lo tanto insuficientes para evacuar el agua de lluvia. Tampoco se cuenta con la cantidad y volúmenes suficientes de reservorios que permitan retener los excedentes de precipitación a evacuar en mayor tiempo.

Dicho problema puede ser crítico en caso de precipitaciones extraordinarias como la acaecida a fines de marzo de 2007, cuando ocurrió un precipitación de 369 mm entre el 26 y el 30 de marzo, encontrándose el río en niveles altos de alrededor de los 5,50 - 6,0 m de altura en la escala de Santa Fe (cota 13,70 - cota 14,20 m IGN). Ello dificultaba la infiltración del agua precipitada dentro del recinto, por lo que esta se acumuló en los sitios más bajos al superar en gran medida la capacidad de evacuación de las estaciones de bombeo. Según los relevamientos realizados por el Instituto Nacional del Agua (INA) el nivel del agua acumulada dentro del recinto se encontraba entre los 14,50m y 15,00m IGN, cotas que representan una afectación del 42% al 65%, respectivamente, del área defendida de La Guardia-Colastiné y Rincón (Bianchi, 2010). Luego de este evento se construyeron más estaciones de bombeo, aunque no en la medida necesaria.

## METODOLOGÍA

### El crecimiento demográfico

El crecimiento demográfico del área se estudió en base a información desagregada por radios censales, correspondiente al censo de población y vivienda del año 2010 (Figura 4), e información a nivel de distritos de los censos de los años 2001 y 1991 suministrada por el INDEC.

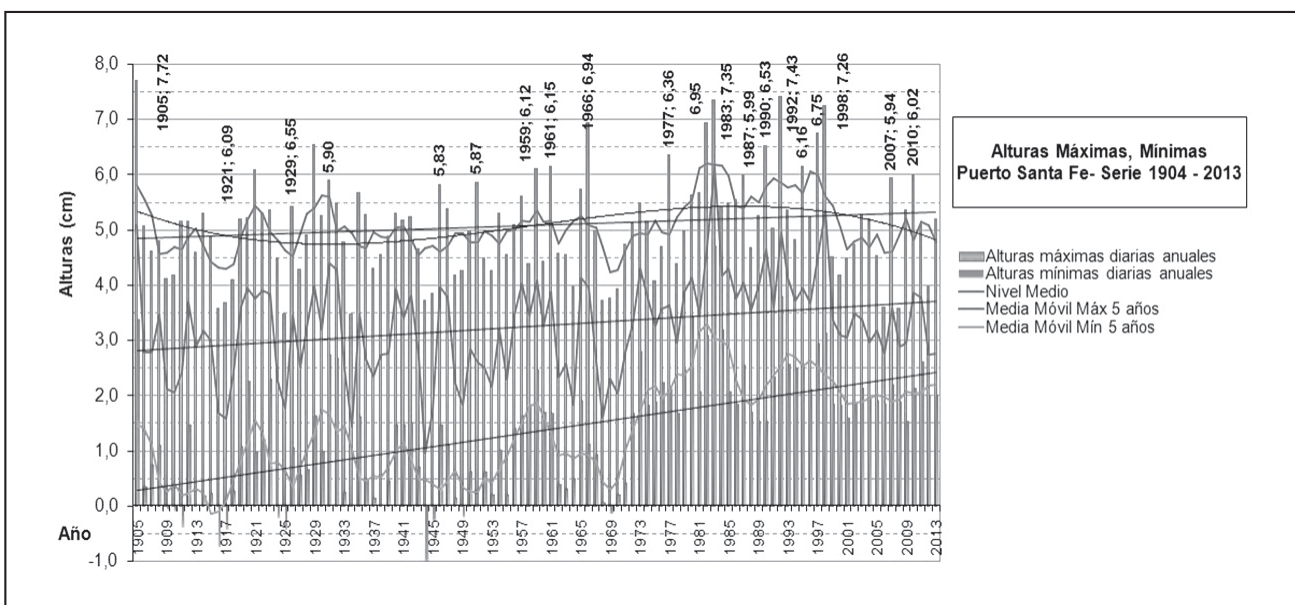


Figura 3. Alturas del río Paraná en Puerto de Santa Fe – Período 1905-2013. Datos CIM-UNL.

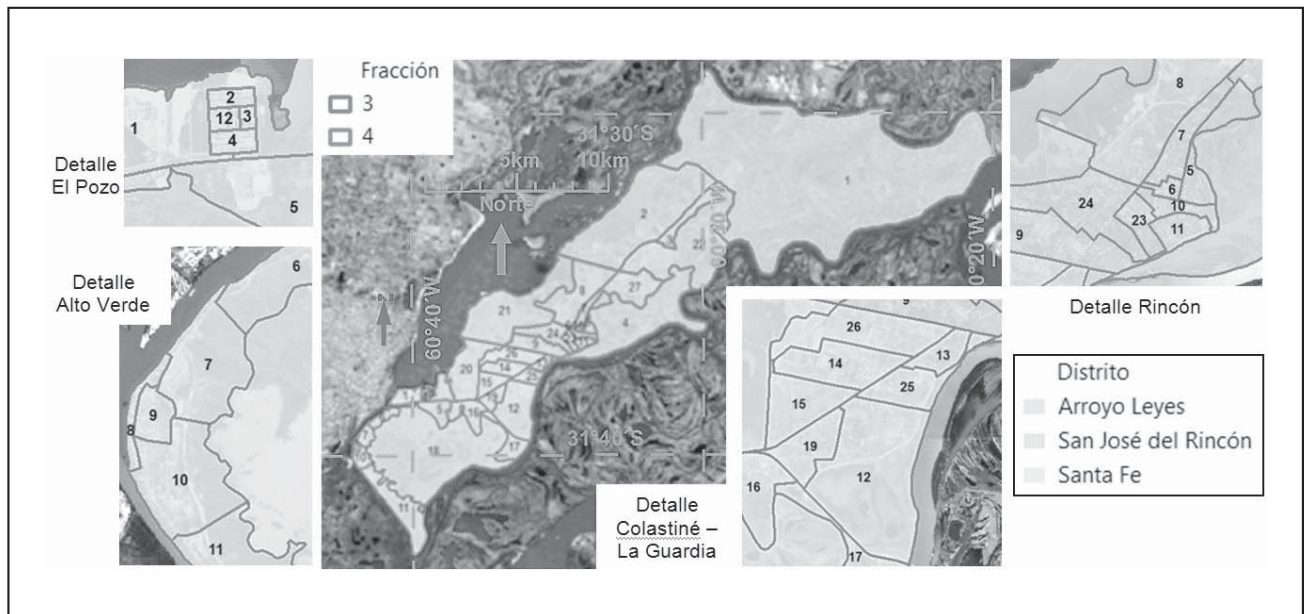


Figura 4. Distritos, fracciones y radios censales (números), censo 2010 INDEC.

Los datos demográficos a nivel de distritos de los últimos 50 años se completaron en algunos casos con tasas de descuento correspondiente a los incrementos de los períodos censales más recientes, y se dividió el área correspondiente al Distrito Santa Fe en tres sectores:

- Alto Verde - Vuelta del Paraguay (Radios 6 a 12 de la fracción 4 y 18 de la 3).
- El Pozo y zonas aledañas (Radios 1 al 4 y 12 de la fracción 4).
- Colastiné - La Guardia (Radios 12 al 17, 19, 20 y 25 de la fracción 3).

También se calculó la población del área de estudio correspondiente a los distintos censos desde 1960 a 2010, así como la del Departamento La Capital y la ciudad de Santa Fe (Tabla 2).

Las tasas de crecimiento intercensales se calcularon en base a datos de población de cada sector (Tabla 3) con la siguiente fórmula:

$$\text{Tasa de crecimiento} = \frac{(\text{Población al final del periodo} - \text{Población al inicio del periodo})}{\text{Población al inicio del periodo}} \quad (1)$$

Tabla 2. Evolución de la población por sectores, total del área y del entorno. Datos INDEC.

	Censos					
	1960	1970	1980	1991	2001	2010
Alto Verde -Vta del Par.	2.898*	4.038*	4.899**	6.059**	7.351*	10.850
El Pozo y aledaños	250**	293**	370**	4.750**	5.026**	5.320
Colastiné-La Guardia	2.911*	3.514**	4.242**	5.218*	8.047*	10.787
San José de Rincón	1.310*	2.367*	3.193*	5.355	8.503	10.178
Arroyo Leyes	581**	81**	1.141**	1.599	2.241	3.012
<b>Total del Área</b>	<b>7.950</b>	<b>11.027</b>	<b>13.844</b>	<b>22.981</b>	<b>31.168</b>	<b>40.147</b>
Dpto. La Capital	264.334	312.427	381.449	441.982	489.505	525.093
Santa Fe ciudad	208.350	244.256	307.788	349.323	369.589	391.231
Prov.de Santa Fe	1.884.918	2.135.583	2.465.546	2.798.422	3.000.701	3.194.537
Argentina	20.013.793	23.364.431	27.947.446	32.615.528	36.260.130	40.117.096

\* Elaborado en base a Información censal proporcionada por el INDEC.

\*\* Calculado en base a tasas de crecimiento intercensales del sector

\*\* Calculado en base a tasas de crecimiento intercensales de la ciudad de Santa Fe

Tabla 3. Comparación de tasas de crecimiento intercensales. Datos INDEC.

	Tasa de crecimiento intercensal				
	60-70	70-80	80-91	91-01	01-10
<b>Total del Área</b>	38,7%	25,6%	66,0%	35,6%	28,8%
Dto. La Capital	18,2%	22,1%	15,9%	10,8%	7,3%
Santa Fe ciudad	17,2%	26,0%	13,5%	5,8%	5,9%
Provincia de Santa Fe	13,3%	15,5%	13,5%	7,2%	6,5%
Argentina	16,7%	19,6%	16,7%	11,2%	10,6%

Se analizaron también datos de ocupación de viviendas y número de habitantes por viviendas suministrados por el INDEC en el Censo de Población y Vivienda de 2010 (Tabla 4). Existe un gran número de viviendas que no son de ocupación permanente, principalmente en Colastiné, Rincón y Arroyo Leyes, donde la cantidad de viviendas con población permanente varía entre el 75 y menos del 50%. La cantidad de habitantes por vivienda es mayor a 4 en Alto Verde, es de 3,5 en el Pozo, menos de 3 en Colastiné y Rincón y menos de 2 en Arroyo Leyes. Para toda el área se tienen 2,9 hab./viv., menos de los 3,4 de la ciudad de Santa Fe y del Departamento La Capital.

Se dividió cada radio censal que tenía zonas anegadizas en dos zonas, una correspondiente a los sitios más altos del

terreno, cota mayor 13 de IGN, o defendidos, y otra zona anegadiza considerada no urbanizable. En base a esta división se determinó dentro de un Sistema de Información Geográfica la densidad de población para el año 2010 de cada radio censal.

**Regulación del uso del suelo**

En el año 2006 se actualizó el estudio de Áreas de Delimitación de Riesgo Hídrico en la ciudad de Santa Fe del año 1992 (Paoli et. al, 2006). En este estudio se delimitaron curvas teóricas de inundación para crecientes combinadas del río Paraná y el río Salado para distintas recurrencias, y también curvas potenciales que no consideran la existencia de defensas (Figura 5).

Tabla 4. Cantidad de viviendas, hogares y población del área (Censo de pobl. y viv. 2010). Datos INDEC.

	Población 2010	Nro. Hogares	Nro. Viviendas	Nro. Viviendas ocupadas	% de Viv. con pobl. permanente	Habit. por vivienda Ocupada	% Viv.con servicios insuficte
Alto Verde - Vta. del Par.	10.850	3.039	2.515	2.274	90,4%	4,3	82,5%
El Pozo y aledaños	5.320	1.563	1.516	1.423	93,9%	3,5	4,9%
Colastiné-La Guardia	10.787	3.184	3.766	2.809	74,6%	2,9	95,0%
San José de Rincón	10.178	3.087	4.180	2.917	69,8%	2,4	83,4%
Arroyo Leyes	3.012	899	1.868	876	46,9%	1,6	99,2%
<b>Total del Área</b>	40.147	11.772	13.845	10.299	74,4%	2,9	76,9%

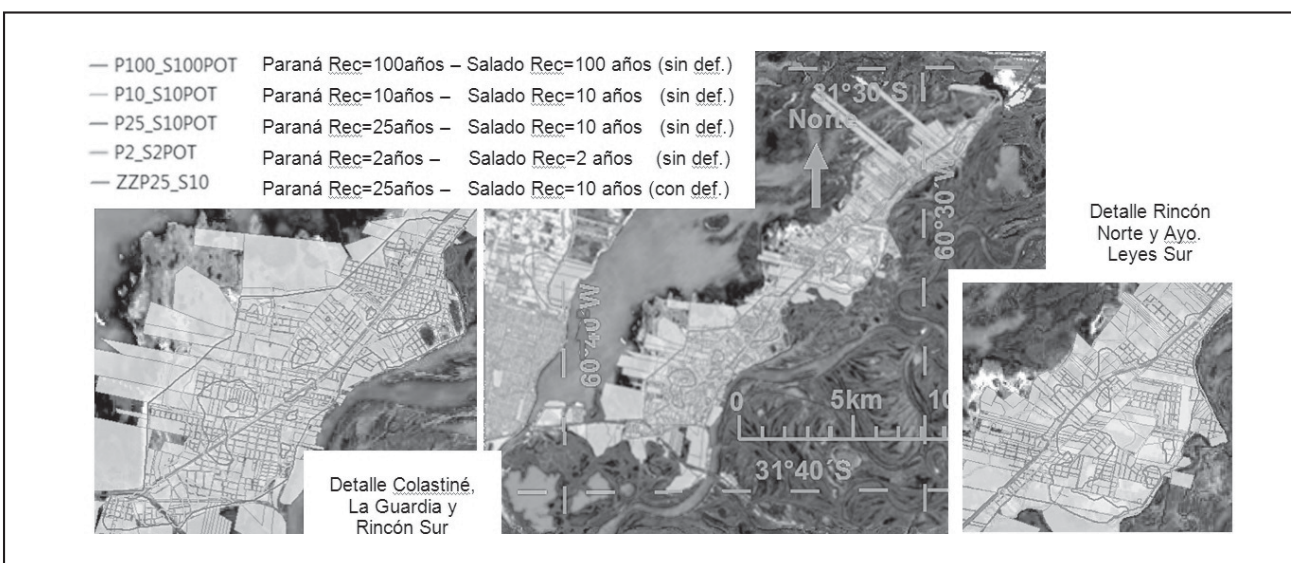


Figura 5. Curvas de Riesgo Hídrico con defensas y potenciales sin defensas (Paoli, 2006).

Hasta la actualidad solo existen restricciones municipales o comunales en cuanto a la superficie mínima de los lotes, de 400 m<sup>2</sup> en Santa Fe y Rincón, y en el caso de la comuna de Arroyo Leyes esta es de 300 m<sup>2</sup>. Suponiendo que el área con nivel superior a dos años de recurrencia se lotea, se calculó con

esta superficie una estimación de posibilidades de expansión urbana, cuyos resultados se pueden observar en la Tabla 5. En esta se consideró un 65% de la superficie como área privada, salvo la zona de El Pozo donde se tomó un 32%. Calculando con 3 habitantes/viv. y un 75% de ocupación de estas.

**Tabla 5. Estimación posibilidades de expansión urbana sin regulación por área de riesgo.**

	Poblac. 2010	Nro. Viviendas 2010	Sup. Área T > 2 años (ha)	Sup. Lote (m <sup>2</sup> )	Nro Lotes (65% sup.)	Nro Habit. 3,0 Hab/lote 75% ocup.
Alto Verde - Vta. del Par.	10.850	2.515	108,0	200	3.511	7.901
El Pozo y alrededores	5.320	1.516	152,8	200	2.444	5.499
Colastiné-La Guardia	10.787	3.766	1.070,2	400	17.390	39.129
San José de Rincón	10.178	4.180	1.377,9	400	22.391	50.379
Arroyo Leyes	3.012	1.868	1.544,3	300	33.459	75.283
<b>Total del Área</b>	<b>40.147</b>	<b>13.845</b>	<b>4.253,1</b>		<b>79.196</b>	<b>178.191</b>

Los valores de los niveles hidrométricos máximos determinados para el hidrómetro del Puerto de Santa Fe se muestran en la Tabla 6 (*Barbagelata et.al, 2007*). Estos valores solo son válidos en las cercanías del puerto, como sucede en Alto Verde, y se incrementan hacia aguas arriba llegando el incremento de nivel en alrededor de un metro para la zona del Arroyo Leyes.

**Tabla 6. Alturas y niveles máximos. Puerto de Santa Fe (1964/65 -2004/05).**

T (años)	2	5	10	20	50	100
H hidrom. (m)	5,18	6,16	6,74	7,26	7,87	8,28
Nivel IGN (m)	13,38	14,36	14,94	15,46	16,07	16,48

En la propuesta de usos y restricciones para implementación de la ley 11.730 (*Barbagelata et.al, 2013*) se establecen usos para el Área II-A de restricciones severas al dominio y recurrencias, entre 2 y 10 años, con superficie mínima de lote de 5.000 m<sup>2</sup>. Para el Área II-B de restricciones parciales y recurrencias entre 10 y 25 años la superficie mínima de lote propuesta es de 1.500 m<sup>2</sup>. Y en el Área III con recurrencias entre 25 y 100 años se proponen lotes con superficie mínima de

1.000 m<sup>2</sup>. En todos los casos se propone un nivel de edificaciones superior a los de la inundación de 100 años de recurrencia (para el área de estudio, de acuerdo a la curva de inundación, corresponde aproximadamente a cota 17,0m de IGN en el km 0 de la RP N°1, y 5cm más por cada km de la ruta). Estas restricciones a la subdivisión del terreno no involucran la zona defendida, en la que solo se proponen niveles de edificación que no sean menores a 1,20 m respecto de los de la creciente de 100 años de recurrencia, previendo la posibilidad de roturas de los terraplenes de defensa, lo cual no conlleva riesgo de pérdidas de vidas para esta creciente.

Se realizó también una estimación de posibilidades de expansión considerando una regulación estricta de uso del suelo de acuerdo a la zona de área de riesgo para la zona no defendida con la propuesta de subdivisión mencionada, que se presenta en la Tabla 7.

En este caso, para el área defendida se consideró como mínimo una superficie de 400 m<sup>2</sup> para Colastiné - La Guardia, Rincón y también para Arroyo Leyes para niveles de creciente mayores a 25 años de recurrencia. Para niveles de creciente entre 10 y 25 años de recurrencia se consideró una superficie de lote de 600 m<sup>2</sup>, y para niveles de 2 a 10 años de recurrencia se consideró una superficie de lote de 800 m<sup>2</sup>, previendo que deben generarse sitios para reservorios.

**Tabla 7. Estimación posibilidades de expansión urbana con regulación por área de riesgo.**

	Sup. Área T > 2 años (ha)	Sup. zona defendida (ha)	Nro Lotes zona defendida	Sup. no defend. Áreas II y III (ha)	Nro Lotes zona defendida	Nro Habit. 3,0 Hab/lote 75% ocup.
Alto Verde - Vta. del Par.	108,0	108,0	3.511			7.901
El Pozo y alrededores	152,8	152,8	2.521			5.671
Colastiné-La Guardia	1.070,2	1.013,2	10.685	57,0	74	24.208
San José de Rincón	1.377,9	1.132,9	11.806	245,0	685	28.105
Arroyo Leyes	1.544,3	734,1	7.764	810,2	2.953	24.114
<b>Total del Área</b>	<b>4.253,1</b>	<b>3.141,0</b>	<b>36.287</b>	<b>1.112,1</b>	<b>3.712</b>	<b>89.999</b>

## RESULTADOS OBTENIDOS

### La urbanización del área y el crecimiento demográfico

El aislamiento del área y los problemas con las inundaciones fueron los principales motivos en el retraso de la ocupación del territorio. La construcción de rutas, y luego la consolidación de los terraplenes de defensa, alentaron la subdivisión de la tierra generando un acelerado desarrollo urbano, motivado por la disponibilidad de terrenos y el disfrute de amplios predios. Ello se debió también a que el área se ve afectada por el proceso de expansión territorial que ha experimentado la zona metropolitana de la ciudad de Santa Fe en las últimas décadas (Cardoso, 2008).

El cálculo realizado de la población del área de estudio, correspondiente a los distintos censos desde 1960 a 2010, se comparó con la población del Departamento La Capital y de la ciudad de Santa Fe, observándose tendencias de crecimiento mucho mayores para el área de estudio que para el departamento y más aún que las de la ciudad (Figura 6).

Las tasas de crecimiento intercensales calculadas para el área desde la década del 80 fueron tres a cuatro veces mayores que las del departamento, y de cinco a seis veces mayores que las de la ciudad de Santa Fe, período en el que se consolidaron los anillos de defensa. Se estima, con la última tasa calculada, que para el año 2014 la población del área llegaría a 45.100 habitantes. Se analizó el incremento de población en el área, que pasó de alrededor de unos 300 habitantes al año antes de 1980 a unos 830 habitantes anuales en la década del 80, se mantuvo en la década siguiente, y llegó a poco menos de 1.000 habitantes al año en la última década (Figura 7).

Aunque el área llegó en el último censo a contar con una población del 10% de la ciudad de Santa Fe y 8% de la del Departamento, el incremento de población representó un 40% del que se produjo en la ciudad y un 25% respecto del que ocurrió en el Departamento, en los dos últimos períodos intercensales, cuando en la década del 70 solo representaba menos del 5% respecto del crecimiento la ciudad y 4% respecto del Departamento.

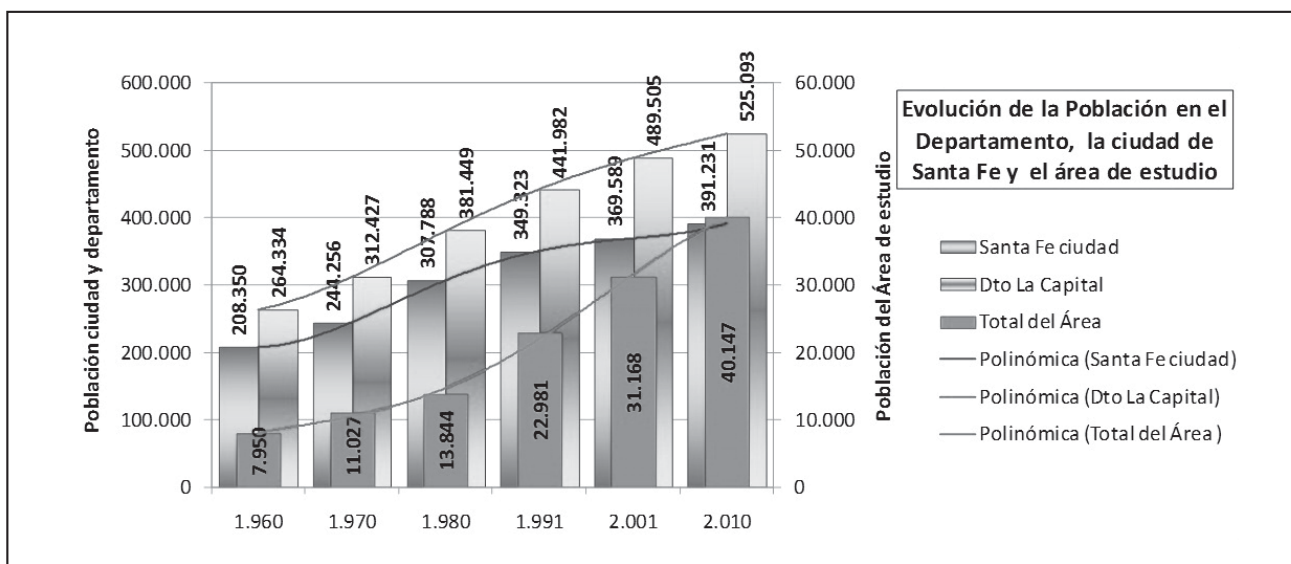


Figura 6. Evolución de la población del área y del área metropolitana. Datos INDEC.

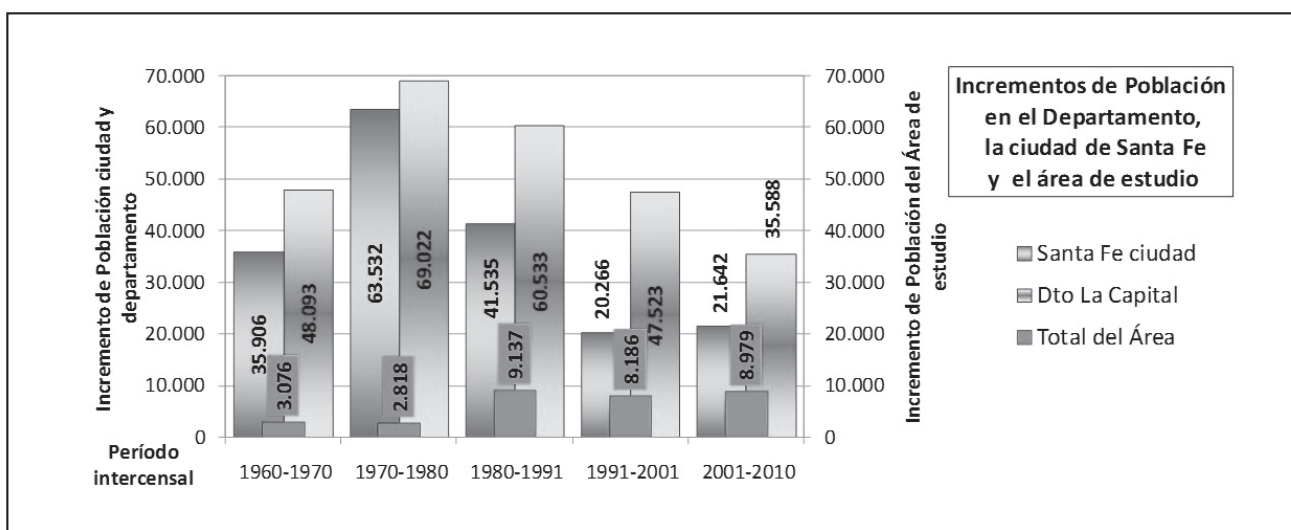


Figura 7. Incrementos de población del área y del área metropolitana. Datos INDEC.

Una de las características importantes del área es la existencia de un gran número de viviendas que no son de ocupación permanente, sino que se destinan a casas de fin de semana y alquiler con fines turístico, lo que se da principalmente en Colastiné, Rincón y Arroyo Leyes, donde la cantidad de viviendas con población permanente varía entre el 75 y menos del 50%. Esto lleva a que la población temporaria en fines de semana llegue duplicarse o hasta triplicarse en algunas zonas del área, con el consiguiente congestionamiento de las vías de comunicación e inconvenientes por incremento en el consumo de los servicios. Otra particularidad es la carencia en conexiones de servicios básicos que presentan las viviendas, principalmente en cuanto a la red de agua potable, más allá de la paradoja

de encontrarse la toma principal de agua potable de la ciudad de Santa Fe en el río Colastiné, y también respecto al gas natural. En este sentido sólo el barrio El Pozo cuenta con conexiones aceptables a las redes de servicios básicos.

Según el análisis de densidad de población que se realizó con información del INDEC del censo del 2010 dividiendo los radios censales entre zonas altas y anegadizas (Figura 8), las zonas con mayores posibilidades de expansión son las que tienen densidades bajas, entre 3 y 9 hab/ha, y muy bajas, menos de 3 hab/ha, y se encuentran en Colastiné y Rincón al oeste de Ruta 1, y principalmente en Arroyo Leyes, en gran medida son áreas no defendidas.

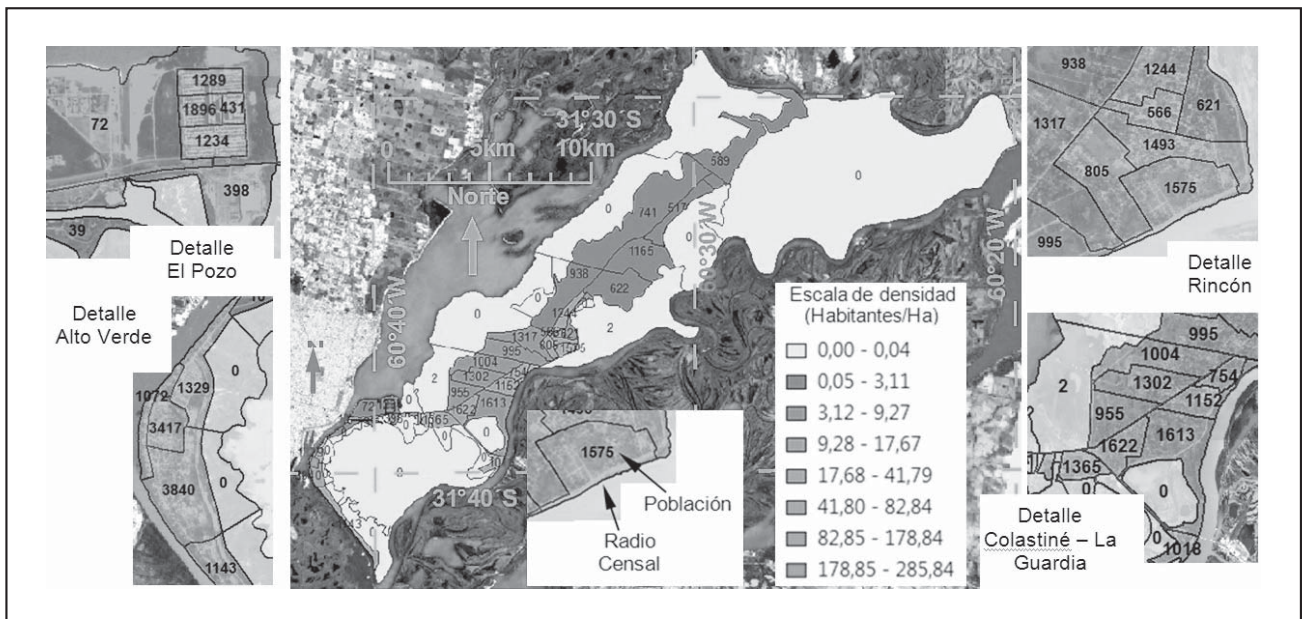


Figura 8. Habitantes y densidad de población por radio censal, zona alta y anegadiza. Datos INDEC 2010.

#### Regulación del uso del suelo y desarrollo del área

La presión demográfica que sufre la zona se enfrenta a la política de regulación de uso del suelo, la cual se ha venido desarrollando en base a lo establecido en la Ley Provincial 11.730, del año 2000, y a estudios de riesgo hídrico. Aunque muchas veces la ocupación ilegal no respeta ni considera las normativas, esta es el único freno al desarrollo inmobiliario de zonas inundables.

De acuerdo a los análisis realizados sobre posibilidades de ocupación del territorio, en el caso de continuarse sin un control de la subdivisión del terreno que tenga en cuenta las distintas zonas de riesgo hídrico puede llegarse a una población temporaria de poco menos de 180.000 habitantes. Las mayores posibilidades de expansión territorial del área urbana están en Arroyo Leyes, luego en Rincón y Colastiné, de acuerdo a la disponibilidad de tierra sin ocupar. Sin embargo con una política de regulación estricta podría llegarse a una población de cerca de 90.000 habitantes. Por lo cual la aplicación de una política de uso del suelo de acuerdo al área de riesgo hídrico produciría la disminución en un 50% de las posibilidades de subdivisión del terreno.

#### CONCLUSIONES

La zona metropolitana de la ciudad de Santa Fe se ve sometida a un proceso de expansión territorial que ha incluido un sector del valle de inundación del río Paraná. La construcción de rutas a partir de mediados del siglo XX, que terminaron con los problemas de aislamiento, y luego la consolidación del sistema de defensas han sido factores determinantes del crecimiento demográfico acelerado, disparando un proceso de intensa división de la tierra.

Las tasas de crecimiento desde 1980 a 2010 fueron tres a cuatro veces mayores que las del departamento, y cinco a seis veces superiores a las de la ciudad de Santa Fe. El incremento de población del área representa un 40% del incremento de población que se da en la ciudad, y un 25% del incremento del departamento La Capital. La disponibilidad de suelo no urbanizado en el área genera la posibilidad de mantener esta tendencia en el futuro por las siguientes décadas.

El crecimiento demográfico del área no ha sido acompañado por un desarrollo acorde de la infraestructura urbana, por el contrario toda la zona se ha visto relegada en los planes de desarrollo de la infraestructura de servicios básicos. Estos



procesos se producen sobre un territorio vulnerable, sometido a riesgo de inundaciones fluviales y por lluvia, generando al estado demandas de equipamientos e infraestructura cada vez más importantes. Si bien los terrenos pueden ser económicos la infraestructura necesaria es más costosa que en zonas no inundables.

Las características particulares del área hacen necesaria una política de ordenamiento territorial dentro del cual es de vital importancia la regulación del uso del suelo con la aplicación de la legislación provincial que establece la división en distintas áreas de riesgo hídrico. También es necesario que se

establezca un módulo mínimo residencial, coherente entre los distintos gobiernos comunales y municipales, que garantice el mantenimiento de condiciones ambientales y la capacidad de absorción del subsuelo ante las precipitaciones.

La convergencia dentro del área de distintas jurisdicciones administrativas potencia la fragmentación de las políticas de desarrollo del área y dificultan la implementación de una gestión integrada de los recursos, dentro de la cual la cuestión hídrica, que no respeta límites jurisdiccionales, es relevante.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BARBAGELATA E. Y ARADAS R., 2007.  
Estudio Integral del Río Paraná en su Tramo Medio y su Influencia en el Área de la Ciudad de Santa Fe.  
*Convenio entre Halcrow-Evars-Incociv y el Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la Prov. de Santa Fe. Centro de Documentación, MASP y MA.*
- BARBAGELATA E. Y PEDRAZA R., 2013.  
Implementación de la Ley Provincial N° 11.730. Cartografía Áreas Afectadas por Inundaciones.  
*Convenio entre INCOCIV S.R.L. y el Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la Provincia de Santa Fe. Centro de Documentación, MASP y MA de Santa Fe.*
- BERTONI J. C.; S. AMBROSINO; BARBEITO O.; DANIELE A.; MAZA J. A.; PAOLI C. U. Y SERRA J. J., 2004.  
Inundaciones urbanas en Argentina.  
*Univ. Nac. Córdoba, Córdoba, Argentina. Capítulo 10, pp. 235-239.*
- BIANCHI H., 2010.  
Plan Director de Drenajes Pluviales - Zona Interna Terraplén de la Costa Etapa I.  
*Convenio entre la Municipalidad de la Ciudad de Santa Fe y el Instituto Nacional del Agua. Centro de Documentación, MASP y MA de Santa Fe.*
- CARDOSO, M. M., 2008.  
La contraurbanización en el Área Metropolitana de Santa Fe, Argentina.  
*Propuestas para la ordenación y el desarrollo sustentable. Tesis doctoral. Univ. de Salamanca. Salamanca, España.*
- PAOLI C., SCHREIDER M. Y CEIRANO E., 2000.  
El río Paraná en su tramo medio.  
*Capítulo 11, Tomo 2. Centro de publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.*
- PAOLI C., COLLINS J. Y ZUCARELLI G., 2006.  
Estudio de delimitación de áreas de riesgo hídrico en Santa Fe (Actualización del Estudio de 1992).  
*Convenio entre el Consejo Federal de Inversiones y el Instituto Nacional del Agua. Centro de Documentación, MASP y MA de Santa Fe.*
- RAMONELL C., 2011.  
Procesos de formación del río Paraná medio. Nuevos paradigmas para su estudio.  
*Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Santiago del Estero, Argentina.*
- WOLLANSKY S. Y M. PARDINI, 2010.  
Seguridad de terraplenes de defensa contra inundaciones.  
*VI Congreso argentino de presas y aprovechamientos hidroeléctricos, Neuquén, Argentina.*



## Morfometría comparada de tres cuencas hídricas en la ladera occidental de la sierra de Comechingones. San Luis, Argentina

## Watershed morphometrical compared in the western slope of sierra de Comechingones. San Luis, Argentina

Sosa, Graciela <sup>1</sup> ✉ - Ojeda, Guillermo <sup>1</sup>

Recibido: 03 de septiembre de 2014 • Aceptado: 29 de diciembre de 2014

### Resumen

*Se comparan morfométricamente tres cuencas hídricas en la ladera occidental de la Sierra de Comechingones con la finalidad de conocer sus comportamientos hidrológicos, realizar estimaciones sobre su evolución en relación a la erosión, y generar información para el análisis de los riesgos geológicos de un territorio con desarrollo turístico y agrícola creciente. Se utilizaron Modelos Digitales de Elevación (MDE) del sensor ASTER (GDEM), los cuales fueron procesados mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la obtención de diferentes parámetros morfométricos. Para la delimitación de las cuencas y el trazado de la red de drenaje se emplearon imágenes satelitales Google Earth©. La Sierra de Comechingones, como parte integrante de las Sierras Pampeanas, se caracteriza por una composición ígneo-metamórfica, con una estructura interna dominante NNE-SSO y una fuerte asimetría topográfica de sus laderas. La ladera occidental, asociada al frente de fallamiento que elevó los bloques serranos y los basculó hacia el Este, es más abrupta que la oriental, con valores de pendientes entre 30 y 40 %. Las cuencas estudiadas son de pequeño tamaño (entre 11 y 18 km<sup>2</sup>) y su análisis morfométrico indica características similares entre ellas. En particular sus formas oval redonda a oval oblonga indican una tendencia moderada a las crecidas estacionales. Por otra parte, el análisis de las curvas hipsométricas y de los perfiles longitudinales, señalan que las cuencas se encuentran en una etapa juvenil de desarrollo, dominando los procesos de erosión sobre la sedimentación, principalmente en las zonas de cabeceras.*

**Palabras clave:** *Morfometría, Cuenca hídrica, Sierra de Comechingones, Erosión.*

### Abstract

*Three watersheds on the western slope of the Sierra de Comechingones are morphometrically compared in order to get their hydrological behavior and to estimate its erosion evolution and generate information about the geological risks of a territory with a growing tourism and agriculture development. ASTER Digital Elevation Models (GDEM) were processed by means of a Geographic Information System (GIS) to obtaining*

1. Departamento de Geología, Universidad Nacional de San Luis, Ejército de los Andes 950, San Luis (5700

✉ gdelrsosa@mail.com

different morphometric parameters. For the delineation of watersheds and the digitalization of the drainage network Google Earth © satellite images were used.

The Sierra de Comechingones, as part of the Sierras Pampeanas, is characterized by an igneous-metamorphic composition, NNE-SSW dominant internal structure and a strong topographic asymmetry of its slopes. The western slope, corresponding to the front of faulting which raised the mountain blocks and tilted eastward, is steeper than the east with slopes between 30-40%. The studied basins are small (between 11 and 18 km<sup>2</sup>) and its morphometrical analysis shows similar characteristics between them. In particular oval round to oblong oval shapes indicate a moderate tendency to seasonal floods. Moreover, analysis of the hypsometric curves and longitudinal profiles, indicate that the basins are in a juvenile stage of development, dominating erosion processes over sedimentation, mainly in the headwaters.

**Keywords:** Morphometry, Watershed, Sierra de Comechingones, Erosion.

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se analizan y comparan tres cuencas hídricas desarrolladas sobre la ladera occidental de la Sierra de Comechingones, en la provincia de San Luis. El objetivo principal de la investigación ha sido describir y comparar las características morfométricas de las cuencas de los ríos Seco, El Tala y Papagayos a partir de datos aportados por Modelos Digitales de Elevación (DEM) y procesamiento de estos mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG). La finalidad es conocer sus comportamientos hidrológicos y realizar estimaciones sobre su evolución en relación a los procesos de erosión, considerando que dicha información puede ser relevante para el análisis de los riesgos geológicos y la planificación de un territorio con un desarrollo urbano creciente en relación a emprendimientos turísticos y agrícolas.

### Características del área de estudio

El área de estudio se encuentra localizada entre los 32°33'42" y 32° 42'23" latitud sur y los 64° 57'34" y 64°53'42" longitud oeste (Figura 1). La localidad más importante del sector es Villa Larca (957 habitantes según Indec, 2013) y el acceso se puede realizar desde la ciudad de San Luis a través de la ruta provincial N° 20, luego por ruta nacional N° 148 y por último la ruta provincial N°1, la cual recorre de sur a norte el área de estudio. La zona ha tenido en los últimos años un importante crecimiento económico, ligado principalmente a la agricultura y el turismo. Así la población del departamento Chacabuco, donde se encuentra el área de estudio, ha incrementado su población desde el censo de 1991 en un 54% (Indec, 2013).

Peña Zubiarte et al. (2005), en la carta de suelos de la hoja Concarán, definen el clima de la región como subhúmedo-seco de montaña. En dicha carta para el área de montaña se indican registros pluviométricos con valores de precipitación entre 500 y 700 mm de media anual. También señalan que las isohietas han registrado en los últimos 30 años un desplazamiento hacia el oeste debido a un crecimiento de la cantidad de precipitaciones media anual. Es importante señalar que en la parte alta de la sierra de Comechingones se registran además nieblas en verano y nieve en el invierno.

Dentro del clima de montaña Peña Zubiarte et al. (2005) identifican subunidades que se expresan de acuerdo a la topografía como a) subclima o microclima de pampas altas; b) de pampas bajas; c) de fondo de valle; d) de las quebradas y e) de las cumbres. Estas diferencias se pueden inferir por los distintos tipos de vegetación y suelos, ya que no se encuentran registros meteorológicos para establecer en forma precisa tales diferencias microambientales. La vegetación es propia de sec-

tores montañosos. Según los autores mencionados y en base al reconocimiento de campo, se puede destacar que existe una marcada diferencia entre la vegetación de altura en la altiplanicie situada entre 1.000 y 1.500 msnm, en donde por las bajas temperaturas predominan herbáceas de pastos duros, mientras que por debajo de los 1.000 msnm predomina el monte xerófilo y en las quebradas que se encuentran al abrigo de los fuertes vientos encontramos bosques con abundante vegetación herbácea.

En la porción serrana de altura mayor a 1.200 msnm no existe vegetación arbórea, predominan pajonales. Desde la localidad de Villa del Carmen hacia el norte, se observan montes bajos con predominio de chañar y caldén. Los representantes herbáceos son en su mayoría pastizales degradados con predominio de stipa. A 5 km al norte de esta localidad aparecen ejemplares de *Trithrinax campestris* (palmera). El área pedemontana ha sido desmontada en variadas extensiones para su utilización en cultivos con praderas de verano y verdes de invierno. En Villa Larca desaparece el palmar que se extiende hasta la localidad de Papagayos, donde adquiere una mayor densidad, notándose un deterioro importante asociado a incendios durante la primavera.

La sierra de Comechingones es parte del sistema de Sierras Pampeanas a las cuales Caminos (1979) las caracterizó como una unidad compuesta por un zócalo o basamento formado por metamorfitas, granitos y rocas de mezcla, de edad precámbrica a paleozoica inferior y un estilo tectónico de montañas de bloques fallados limitados por fracturas de alto ángulo. Este autor concuerda con la explicación de Gonzalez Bonorino (1950) para el mecanismo de formación de bloques como un levantamiento por vuelco o ascenso vertical asociado a la presencia de fallas inversas. Este proceso morfogenético originó uno de los rasgos más notorios de esta unidad que es la asimetría topográfica transversal conformando un paisaje de bloques asimétricos que presentan la vertiente occidental escarpada y la oriental con pendiente más suave (Costa et al., 1998)

Las fracturas más importantes tienen dirección meridiana, en coincidencia con las principales estructuras internas del basamento y con la elongación en planta de la sierra. El sistema de fallas de Comechingones presenta un rumbo general NNO y constituye el frente de levantamiento andino de la sierra homónima. Este sistema de fallas de muy alto ángulo y caracterizado por diferentes secciones de fallas inversas presenta características geométricas difíciles de analizar debido a la abundante sedimentación de material aluvial que generalmente se pulpa su trazo (Costa et al., 1998).

En el área bajo análisis, la sierra alcanza su máxima altura en los 1.900 msnm, el cual también marca el límite geográfico entre las provincias de San Luis y Córdoba, desde allí desciende abruptamente hacia el oeste hasta aproximadamente los 1.100 msnm en el piedemonte, en solo 2,8 km. Esto origina laderas de fuerte pendiente con valores predominantes entre 33 y 40 %.

Si bien la Sierra de Comechingones se compone de un basamento ígneo-metamórfico, con una estructura interna con rumbo predominante NNE-SSO, las cuencas del río Seco y del arroyo El Tala se han desarrollado íntegramente sobre el plutón granítico denominado "El Talita", de composición

predominantemente monzogranítica (Pinotti, 1999), mientras que la cuenca del río Papagayos, presenta un sector desarrollado sobre el mencionado batolito, su parte más austral lo hace sobre el basamento metamórfico.

Los arroyos que drenan la ladera occidental de la Sierra de Comechingones forman parte de la cuenca del río Conlara. Son cursos cortos, de poco caudal, con carácter permanente en las zonas altas de las cuencas, pero que se transforman en temporarios cuando ingresan al piedemonte ya que infiltran sus aguas, por la presencia de fracturas y fallas de rumbo principalmente norte-sur, a solo 300 m del frente serrano.

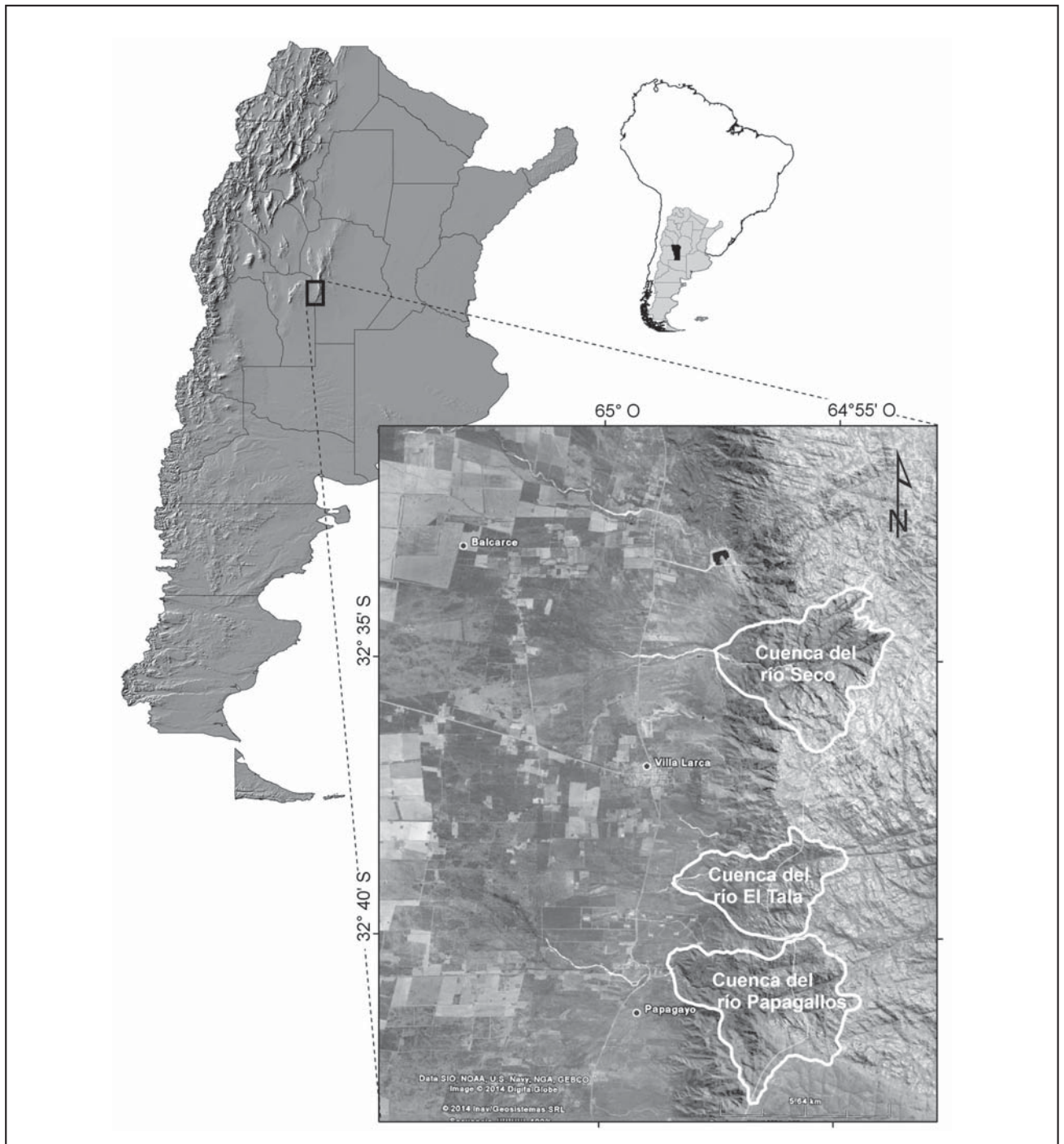


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

## METODOLOGÍA

Los datos utilizados para la caracterización morfométrica fueron generados a partir del procesamiento de Modelos Digitales de Elevación (DEM) obtenidos por el sensor ASTER (GDEM). Estos presentan una resolución espacial de 30 m y fueron procesados mediante SIG para la obtención de diferentes parámetros morfométricos. La delimitación de las cuencas y el trazado de la red de drenaje se realizó en base a fotointerpretación de imágenes satelitales brindadas por el sistema Google Earth© (GE), los cuales fueron posteriormente controladas en el terreno mediante Sistemas de Posicionamiento Global (GPS). Para el análisis de las características morfológicas se consideró como límite inferior de las cuencas su desembocadura en el piedemonte serrano. Las descripciones morfométricas de las cuencas hídricas seleccionadas se llevaron a cabo mediante la estimación de diecisiete variables que representan propiedades inherentes al sistema fluvial. Los parámetros considerados se agruparon en tres grupos principales: A) parámetros de forma, B) de relieve y C) de la red de drenaje. Seguidamente se describen los parámetros calculados y su utilidad en el estudio realizado:

### A) Parámetros de forma:

La forma de la cuenca ha sido comparada con diferentes formas geométricas (ideales). Representan la configuración geométrica tal y como está proyectada sobre un plano horizontal (Llamas, 1993), y la forma gobierna la tasa a la cual se suministra el agua al cauce principal, desde su nacimiento hasta su desembocadura (González de Matauco, 2004).

*Coficiente de Compacidad* o índice de Gravelius (Ic): representa la relación entre el perímetro de la cuenca y el de un círculo con igual superficie. Brinda información sobre la fuerza de las crecidas, al menos en la desembocadura del curso, y de la onda de crecida. Puede ser un indicador para prevenir inundaciones. Se calcula con la fórmula:

$$Ic = 0.28 P / \sqrt{S}$$

Donde: P= perímetro  
S= superficie

Este índice cuando más cerca esta de la unidad indica que la cuenca tiene forma circular, es más compacta y a medida que el índice aumenta la cuenca tiene forma más ovalada. Para analizar los resultados se utilizó la clasificación de Campos (1992).

*Razón de elongación (Re)*: es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma, y describe un aspecto de la organización de la red de drenaje. Puede dar indicios sobre el relieve y las pendientes y también puede ser determinante para hacer predicciones de posibles contingencias meteorológicas en la desembocadura.

La fórmula utilizada es la propuesta por Schumm (1956):

$$Re = (1.128 \sqrt{A}) / Lc$$

Donde: Lc= longitud del cauce principal de la cuenca  
 $\sqrt{A}$ = raíz del área de la cuenca

Esta fórmula es muy utilizada por que es la que mejor correlación guarda con la hidrología de la cuenca. Analiza la relación del área con el cauce principal que la drena. Valores próximos a la unidad indican formas redondeadas y cuanto menor sean a la unidad, la cuenca tendrá forma más alargada (lo cual influye en el tipo de descarga luego de las lluvias).

*Factor de forma (F)*: propuesto por Horton (1945) relaciona el área de la cuenca y la longitud de la misma. Da información de la relación entre la morfología de la cuenca y sus caudales tipo. Intenta evaluar la elongación de una cuenca de drenaje. Es un factor a dimensional.

Se expresa mediante la fórmula:

$$F = A / L^2$$

Donde: A= área

L= Longitud de la cuenca

Los valores inferiores a la unidad indican cuencas alargadas y aquellos cercanos a uno cuencas redondeadas. Del mismo modo que F y Lc influye en el caudal de la crecida.

*Tamaño de la cuenca*: tiene relación directa con el caudal de descarga. En este trabajo se utiliza la clasificación propuesta de Campos (1992) basada en la superficie de la misma.

### B) Parámetros de relieve:

La geología y la topografía determinan las características físicas de la cuenca. La topografía nos indica desniveles, orientaciones y pendientes que se obtienen a partir de mapas topográficos o de un modelo digital del terreno. La pendiente de la cuenca es una propiedad que nos da información de la velocidad de la escorrentía y sus hidrogramas, por lo tanto, aquellas de mayor pendiente tienden a responder más rápidamente a la precipitación incrementando los caudales de punta (Horton, 1945; Strabler, 1964).

Pendiente media de la cuenca (J): permite hacer comparaciones entre cuencas para analizar fenómenos erosivos que se expresan en la superficie.

Se expresa en porcentaje y su fórmula de cálculo:

$$J = 100 \{ [ (\sum Li) E ] / A \}$$

Donde

J: pendiente media de la cuenca (%)

$\sum Li$ : sumatoria de las longitudes de las curvas de nivel (km)

E: equidistancia entre curvas de nivel (km)

A: superficie de la cuenca (km<sup>2</sup>)

*Elevación media o análisis hipsométrico*: La curva hipsométrica permite estimar el estado de equilibrio dinámico potencial de la cuenca, bajo la hipótesis de que esta función relaciona altitud con área, por lo tanto, cambia con el tiempo a medida que la cuenca sufre erosión. No obstante otros autores atribuyen relevancia a la actividad diferencial entre los procesos de construcción tectónica y degradación por erosión, actividades no necesariamente relacionadas con la edad de la cuenca.

*Perfil longitudinal del río:* este parámetro permite analizar el estado de equilibrio de la cuenca en base a la capacidad erosiva del mismo en sus partes principales (superior, media e inferior) a través del estudio de la pendiente del propio río. Indica la relación entre la distancia recorrida por un río desde su nacimiento y la altura relativa de cada punto de dicho perfil. Se mide sobre la línea de vaguada (thalweg) de un río o valle, es decir, sobre la línea que recorre los puntos más bajos del cauce de ese río o del fondo del valle o cauces secos en el caso de arroyos.

#### C) Parámetros de la Red de Drenaje:

Se consideran parámetros que influyen en la formación y rapidez del drenado, aportan también idea sobre las condiciones físicas del suelo y de las superficies de las cuencas.

*Densidad de Drenaje (Dd):* se calcula como el cociente entre la longitud total de los cauces de una cuenca y el área total del drenaje, (Horton, 1945). La densidad del drenaje afecta a la escorrentía de modo tal que con mayor densidad, la escorrentía recorre la superficie rápidamente, disminuyendo el tiempo de concentración y aumentando el pico de crecida, al haber menor infiltración.

La fórmula de cálculo usada:

$$Dd = \Sigma L / A$$

Donde:

Dd (en km/km<sup>2</sup>)

$\Sigma L$ : sumatoria de Longitud total de los cauces, en km

A: área de la cuenca, en km<sup>2</sup>

*Pendiente media del cauce principal (i):* es un indicador importante del grado de respuesta de un cauce ante una tormenta. Como esta varía a lo largo del cauce se la obtiene como un valor medio ponderado por la distancia de la pendiente.

*Tiempo de concentración (Tc):* tiempo que tarda una gota de agua de lluvia en llegar desde el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca a la sección de salida. En una cuenca hidrográfica el comportamiento del hidrograma será similar al de un hidrograma de agua que escurre por un canal, sólo que en este caso parte del agua se infiltraría en el suelo y la escorrentía comenzaría tras la saturación del suelo: para una lluvia de intensidad constante el caudal en la salida irá aumentando a medida que vaya llegando el agua de escorrentía procedente de puntos hidrológicamente cada vez más alejados, manteniéndose constante a partir del momento en el que el punto más alejado ya esté aportando agua a la salida.

Este factor depende del tamaño, del relieve y la forma de la cuenca (a mayor tamaño mayor Tc, a mayor pendiente menor Tc) y las formas alargadas presentan menores Tc que las aplastadas (con menores diferencias de pendiente).

Fórmula de cálculo:

$$Tc = (4 \sqrt{S + 1,5 \cdot L}) / (0,8 \cdot \sqrt{H})$$

Donde

Tc: tiempo de concentración, en horas

S: área de la cuenca, en km

L: longitud del cauce principal, en km

H: elevación media de la cuenca, en km

*Orden de la corriente:* Para la jerarquización de la red de drenaje se utiliza el método de Strahler (1964) que se aplicó a partir de la jerarquización de los cauces. Esto permite establecer un orden jerárquico entre los cursos y establecer otros parámetros como la relación de bifurcación.

*Razón o coeficiente de bifurcación (Rb):* relaciona los números de cauce de un orden con el número de cauces del orden inmediatamente superior. Esta variable es importante para describir el comportamiento del sistema fluvial (Horton, 1945).

Los valores de Rb > 4 indican una torrencialidad moderadamente alta (Strahler, 1964). Un Rb alto produce un pico bajo pero extendido. Los valores de Rb bajo se asocian con cuencas muy bien drenadas que pueden generar a su vez crecidas más violentas,

Fórmula de cálculo:

$$Rb = Un / (Un + 1)$$

Donde: Un es el número de orden de cada cauce

#### Resultados

Por su tamaño y en función de la clasificación de Campos (1992), las cuencas estudiadas pueden ser clasificadas como "cuencas muy pequeñas" (<25 km<sup>2</sup>).

En todos los casos, las redes de drenaje muestran un fuerte control de las estructuras de deformación frágil asociadas a las rocas del basamento cristalino, particularmente al diaclasamiento y/o fracturas desarrolladas en los cuerpos graníticos, con direcciones predominantes NNO, NE-SO y E-O. Esto determina el predominio de patrones de drenaje subrectangulares, a veces hasta en enrejado y en menor proporción subdendrítico, con una densidad de drenaje bien drenadas (Figura 2).

Los valles fluviales principales se encuentran marcadamente encajados mientras que sus tributarios son poco profundos, a veces con fondo plano debido al relleno aluvial-coluvial y en algunos sectores de naturaleza loessoides. En su recorrido hacia el oeste, las aguas que descienden por la ladera se insumen en las proximidades al frente montañoso, solo durante las crecidas en épocas de lluvias se mantienen en superficie hasta infiltrarse unos 4 a 5 kilómetros al oeste.

En relación a los parámetros de forma se establece que los valores de Coeficiente de Compacidad obtenidos entre 1,32 y 1,40 (Tabla 1), indican según la clasificación de Campos (1992) cuencas de clase II, es decir de forma oval redonda a oval oblonga. Ello da cuenta de cuencas medianamente compactas. Estos valores, próximos a 1, señalan tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento y por esto el pico de la crecida será más acusado aunque demore más en llegar.

La Razón de Elongación muestra valores entre 0,59 y 0,62 (ver Tabla 1), lo cual indica cuencas medianamente alargadas, y según Senciales y Ferre (1992), relieves con pendientes pronunciadas.

Los valores obtenidos para el Factor de Forma varían entre 0,35 y 0,48 lo que también indica la forma alargada de las cuencas.

En suma, la comparación de las tres cuencas analizadas en relación con los parámetros de forma (Tabla 1) indica que las mismas presentan características similares. Analizados los coeficientes de compacidad, elongación, el factor de forma y su tamaño se las puede caracterizar como de forma ovalo-redonda a oval-oblongas, más bien ovaladas y de tamaño muy pequeñas, lo que indica una tendencia a la crecida que puede categorizarse en forma relativa como media (según clasificación de Campos, 1992).

Las pendientes muestran valores promedios de  $40 \pm 23\%$  para la cuenca del río Seco,  $38,5 \pm 22\%$  para la cuenca de Papagayos y de  $32,6 \pm 23\%$  para la cuenca de El Tala lo cual indica un relieve accidentado, que favorece la velocidad de la corriente.

El análisis de los perfiles longitudinales muestra pendientes diferenciadas y en general se reconocen resaltos que indican situaciones de desequilibrio en las cuencas, lo que permite una separación de los cursos en tres tramos principales asociados a sus sectores bajo, medio y alto (Figura 3).

Los perfiles de los ríos Papagayos y El Tala, cuyas cuencas se encuentran próximas entre sí, presentan un tramo inferior con suave pendiente (3% aproximadamente) a lo largo de unos 2000 m, hasta alcanzar un resalto de 40 m de altura en el caso del primero, y de aproximadamente 100 m en el segundo. El río El Tala muestra el perfil con mayores irregularidades.

En su tramo inferior y hasta el resalto de 40 m previamente mencionado, el río muestra una mayor incisión de su cauce que el río Papagayos. A partir de estos resaltos se alcanza un tramo medio en ambos cursos donde la pendiente es aproximadamente de 7%. La misma continúa por unos 1500 m aguas arriba en el caso del río Papagayos, hasta un resalto de aproximadamente 54 m, desde donde se inicia el tramo superior con una pendiente predominante de 19%. Esta última parte del perfil presenta en los 500 m finales una disminución de la pendiente, probablemente coincidente con remanentes de una antigua superficie de erosión. En el caso del río El Tala, su tramo medio, es más largo que el del río Papagayos, extendiéndose uno 1000 m más. Esto es consecuencia de una mayor incisión del río El Tala, que en algunos tramos presenta una diferencia de hasta 200 m de desnivel respecto al tramo superior del río Papagayos. A la altura del tercer resalto importante del río El Tala, este desnivel de la línea de vaguada (thalweg) disminuye unos 100 m, tomando prácticamente la misma pendiente característica del tramo final del río Papagayos.

El perfil longitudinal del río Seco es el más simple, con los tramos bajo y medio con pendientes aproximadamente similares, lo que impide una clara diferenciación entre ambos. En esta situación debemos considerar que todo el perfil longitudinal se encuentra desplazado más al Este en relación al de los ríos Papagayos y El Tala. El perfil es más suave, con dos resaltos de menor magnitud que la de los perfiles anteriores, lo que permite diferenciar igualmente tres tramos principales (bajo, medio y alto).

**Tabla 1. Análisis comparativo de parámetros de las Cuencas del río Seco, El Tala y Papagayos.**

Parámetro Evaluado/Cuenca	Río Seco	Papagayos	El Tala
Superficie	17,228 km <sup>2</sup>	18,986 km <sup>2</sup>	11,45 km <sup>2</sup>
Perímetro	19,661 km	21,873 km	15,978 km
Pendiente media de la cuenca	40,59 %	38,10 %	33,10 %
Pendiente media del curso principal	11,20 %	9,91 %	9,90%
Jerarquizado de cauces (Strahler)	5	5	5
Diseño de drenaje	subdendrítico	Subrectangular a subdendrítico	Subrectangular, en parte en enrejado
Longitud de la totalidad de los cauces	73,307 km	80,606 km	53,084 km
La frecuencia de los cauces (densidad)	128-1;42-2;23-3; 2-4; 1-5	182-1; 80-2;13-3; 2-4; 1-5	108-1; 19-2;6-3;2-4; 1-5
Coefficiente de bifurcación	4,595	4,232	3,462
Densidad de Drenaje	4.255 km <sup>-1</sup>	4.258 km <sup>-1</sup>	4.636 km <sup>-1</sup>
Longitud de la cuenca	5,946 km	6,386	5,731
Longitud del cauce ppal.	7,593 km	7,995 km	6,377 km
Coefficiente de Compacidad de Gravelius	1,33	1,40	1,32
Razón de Elongación	0,617	0,614	0,598
Factor de Forma (Horton)	0,487	0,465	0,348
Tiempo de concentración	8,571 h	8,666 h	7,727 h
Elevación Media	1,527 km	1,452 km	1,383km

El análisis de las curvas hipsométricas permite señalar que en general las cuencas se encuentran en un estado próximo a la madurez desde el punto de vista de su actividad morfogenética y en relación de equilibrio con los procesos de erosión. Se destaca, sin embargo, un mayor acercamiento a dicha condición en las partes bajas de las cuencas y por el contrario, un alejamiento en los tramos altos, donde se aproxima más a la juventud (Figura 4). En particular, la cuenca del río El Tala es la que presenta un comportamiento más anómalo, del tipo sinusoidal, con un acercamiento en la cuenca baja a la curva relativa de la vez y en la alta, a la juventud.

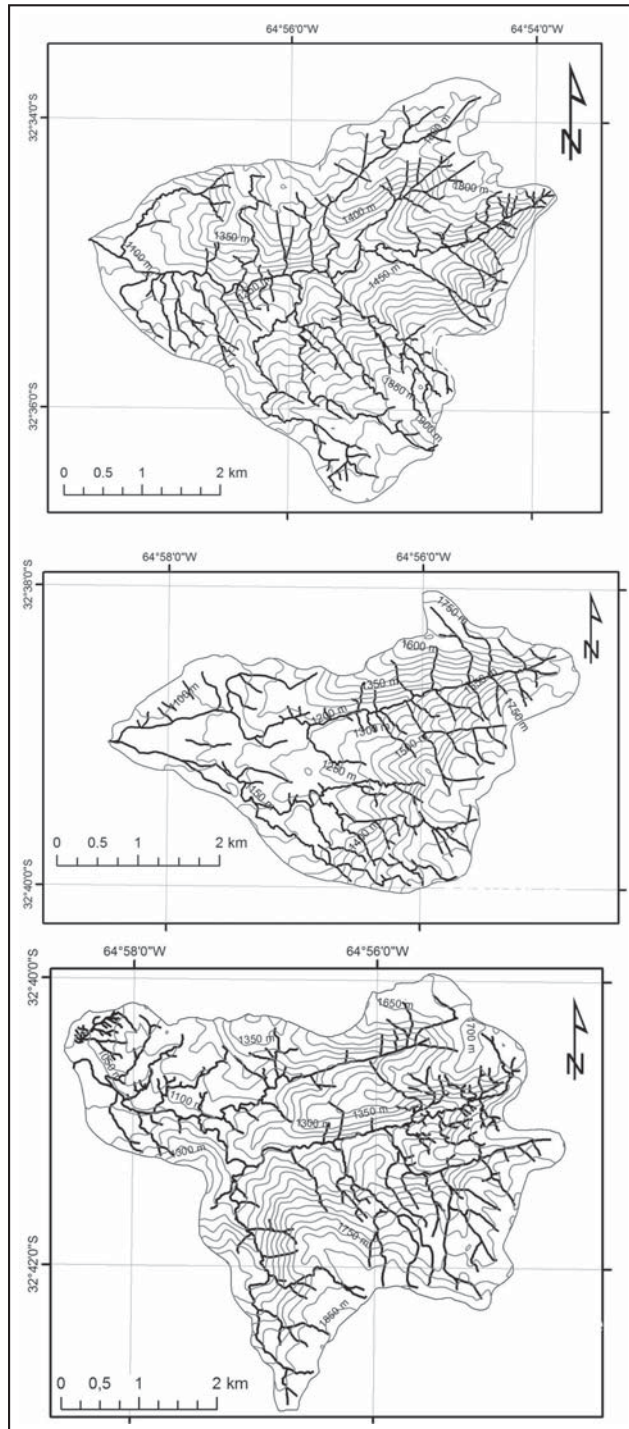


Figura 2. Red de drenaje y relieve. A) Cuenca río Seco, B) Cuenca río Papagayos y C) Cuenca río El Tala.

Se considera de esta manera que las cuencas se encuentran en la etapa juvenil de desarrollo según la clasificación de *Strahler (1952)*, dominando los procesos de erosión, particularmente aquellos asociados al desarrollo de las laderas (deslizamientos, reptación, erosión laminar y en surcos), principalmente en las zonas de cabeceras.

El análisis de las jerarquías de drenaje según la propuesta de *Strahler (1964)* indica que las tres cuencas son de orden 5. En igualdad de condiciones en relación al área, al clima y sustrato, cuanto más alto es el orden de la cuenca mayor es su grado de desarrollo fluvial (*Horton, 1945*). Por lo tanto en las cuencas medidas hay un desarrollo fluvial parecido aunque se debe aclarar que el sustrato de la cuenca del río Papagayos no es solamente ígneo-plutónico (monzogranítico) sino que presenta su sector sur labrado sobre rocas metamórficas.

La densidad del drenaje de las cuencas varía entre 4,25 a 4,65 km<sup>-1</sup> (tabla 1), lo cual indica una red de drenaje eficiente, con cuencas bien drenadas, sobresaliendo la del río El Tala. La densidad del drenaje afecta a la escorrentía, de esta manera en zonas con estos valores de densidad, esta recorre la superficie rápidamente, disminuyendo el tiempo de concentración y aumentando el pico de crecida, al haber menor infiltración.

La pendiente media del cauce principal en las cuencas estudiadas varía de 9,9 % a 11,2%, lo cual favorece el desarrollo de flujos encauzados en periodos de lluvia.

La razón de bifurcación más elevada corresponde a la cuenca del río Seco con 4,59 y la del río El Tala con 3,46. Estos valores indican que la torrencialidad de las cuencas es media (*Strahler, 1964*), siendo la de río Seco moderada a alta comparándola con las otras cuencas, todas de igual orden (5).

Los índices bajos a medios de torrencialidad como en este caso, suelen relacionarse con redes fuertemente ramificadas, lo que repercute directamente ante fuertes precipitaciones en ondas de crecidas rápidas.

El tiempo de concentración arrojó valores para las cuencas entre 7,73 y 8,57 horas. El menor valor de este parámetro fue para la cuenca de El Tala lo que indica que por el tiempo de tránsito tendrá una menor infiltración de agua y un mayor poder erosivo superficial.

### Conclusiones

La comparación de las tres cuencas en relación a los parámetros de forma que relacionan el movimiento del agua y la respuesta de la cuenca, muestra que las mismas presentan características similares. Son cuencas pequeñas de forma oval-redonda a oval-oblongas, más bien ovaladas, lo que muestran una tendencia a las crecidas media.

Los parámetros de relieve indican que las cuencas presentan pendientes medias con valores entre 33 y 40 % aproximadamente, lo que indica un relieve para la zona accidentado, que favorece la escorrentía y la velocidad de la corriente. Considerando el análisis de los perfiles longitudinales y las curvas hipsométricas (Figuras 2 y 3) se concluye que las cuencas se encuentran en la etapa juvenil de desarrollo según clasificación de *Strahler (1952)*, dominando los procesos de erosión, particularmente aquellos asociados al desarrollo de las laderas (deslizamientos, reptación, erosión laminar y en surcos), principalmente en las zonas de cabeceras. La cuenca del río Papagayos es la que muestra el mayor estado de desequilibrio, le sigue en este sentido la de El Tala, y luego la del río Seco.



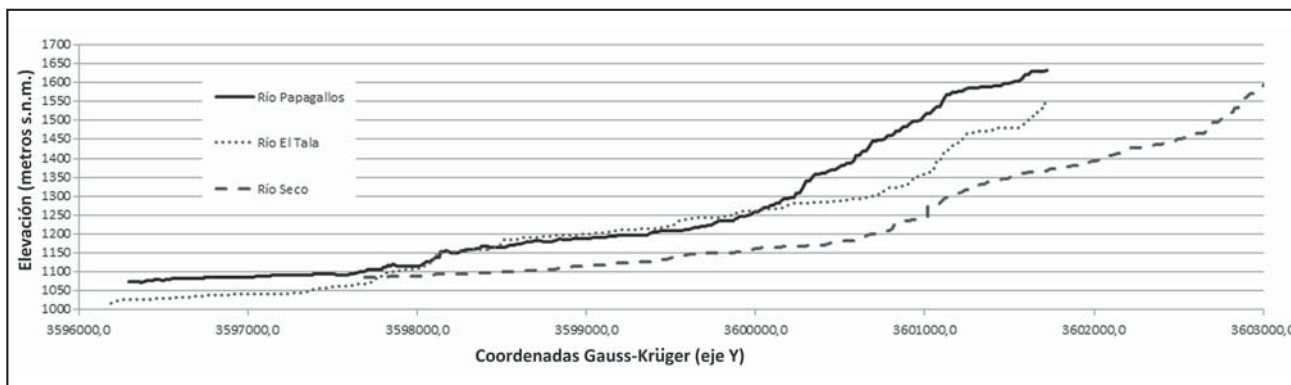


Figura 3. Perfiles longitudinales de los ríos Seco, El Tala y Papagallos (Escala vertical exagerada).

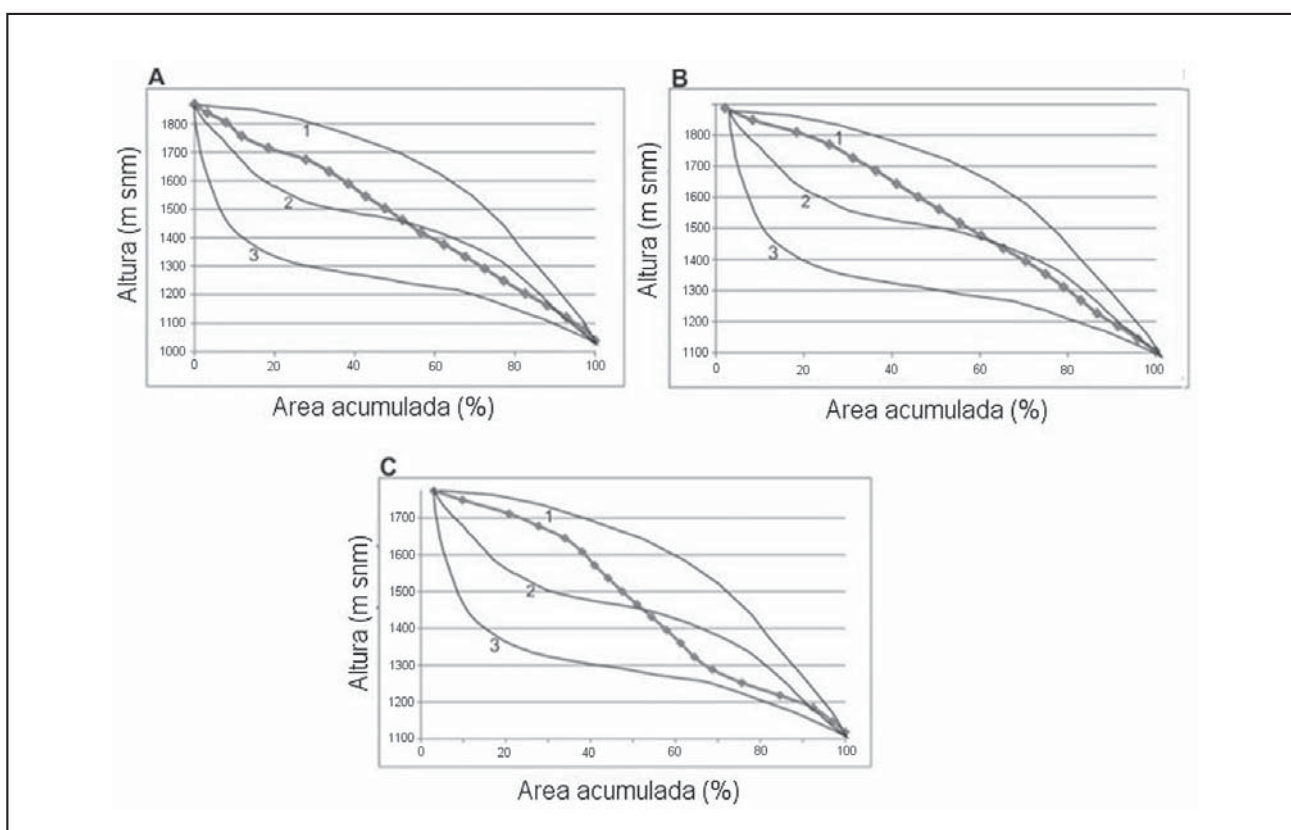


Figura 4. Curvas hipsométricas para las cuencas de: A) Papagallos, B) Río Seco y C) El Tala. Etapas de evolución de una cuenca: 1-juventud, 2- madurez, 3- vejez.

Del análisis de la red de drenaje se concluye que las cuencas son de orden 5, indicando un grado de desarrollo fluvial medio, muy parecidas entre sí, aunque se debe considerar que el sustrato para la cuenca del río Papagayo presenta en su sector sur rocas de origen metamórfico. Son cuencas eficientemente drenadas, lo que hace que la escorrentía recorra rápidamente la superficie, disminuyendo el tiempo de concentración y aumentando el pico de crecida por menor infiltración. Los coeficientes de bifurcación indican que la torrencialidad de las cuencas es media, y que coeficientes de bifurcación entre 3 y 5 corresponden a cuencas de montaña.

El análisis morfométrico de las cuencas y de la red de drenaje indica el carácter relativamente peligroso que presentan las

cuencas en función de la topografía, la litología y sus morfologías. Las pendientes elevadas y la poca permeabilidad dada por la litología ígnea-metamórfica se combinan para regular escasamente el funcionamiento hidrológico de las cuencas. La forma de las cuencas y sus características morfométricas indican una media a buena capacidad de drenaje en las cuencas frente a un evento pluviométrico destacado.

Si bien la interpretación de los índices morfométricos deben tomarse con cuidado ya que pueden simbolizar valores subjetivos, brindan un panorama general que ayuda a formar diversos contextos para prevenir riesgos y tomar medidas para preservar los recursos naturales de la zona.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CAMINOS, R. 1979.  
Sierras Pampeanas Noroccidentales Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan.  
*2º Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias 1, p. 255-291, Córdoba.*
- CAMPOS, A., 1992.  
Proceso de Ciclo Hidrológico.  
*Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 1era edición, México.: 22-23.*
- COSTA, C., ORTIZ SUÁREZ, A., GARDINI, C., CHIESA, J., OJEDA, G., STRASSER, E., ESCAYOLA, M., KRAEMER, P., ULACCO, H., MORLA, P., ALMANDOZ, G. Y CONIGLIO, J. 1998.  
Hoja Geológica 3366-II, Santa Rosa, provincias de San Luis y Córdoba, Escala 1:250.000.  
*Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 373, en Cd.*
- CUESTA, M.J., 2001.  
Dinámica erosiva en los paisajes de la cuenca del río Guadajoz (Córdoba y Jalén), Córdoba,  
*Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 226 p. España*
- GONZÁLEZ BONORINO, F. 1950.  
Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas.  
*Revista de la Asociación Geológica Argentina 5(3): 81-110. Buenos Aires.*
- GONZÁLEZ DE MATAUCO, S. I., 2004.  
Análisis Morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del Río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas.  
*Boletín de la A:G:E: N° 38, 311-329.*
- GORDILLO, C. Y LENCINAS, A. 1979.  
Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En Leanza, A.P. (ed.) Geología Regional Argentina.  
*Academia Nacional de Ciencias 1: 577-650, Córdoba.*
- HORTON, R. E., 1945.  
Erosional development of stream and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology.  
*Geological Society of America Bulletin, 56: 275-370.*
- INDEC., 2013.  
Estructura de la población provincia de San Luis.  
*Disponible en <http://www.estadistica.sanluis.gov.ar.../Contenido/.../InformeEstructuraPob.pdf>, último acceso 5 de agosto de 2014.*
- LLAMAS, J., 1993.  
Hidrografía General, Principios y Aplicaciones.  
*Servicio editorial de la Universidad del país Vasco. 402 p. Bilbao, España.*
- PEÑA ZUBIATE, CARLOS A. Y ALBERTO D'HIRIART (COORDINADORES), 2005.  
Carta de suelos de la República Argentina hoja Concarán provincia de San Luis escala 1:100000.  
*INTA, Gobierno de la Provincia de San Luis.*
- PINOTTI, L., 1999.  
El batolito Cerro Áspero, provincia de Córdoba, Modelo de intrusión y su relación con la evolución de las Sierras Pampeanas.  
*Informe final de Beca de Perfeccionamiento del CONICET. 203 p.*
- SCHUMM, S.A. (1956).  
Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth-Amboy.  
*New-Jersey. Geo. Soc. Am. Bull., :597-646.*
- SENCIALES, J.M. Y FERRE, E., 1992.  
Análisis morfométrico de la cuenca del río Benamargosa (provincia de Málaga), En López Bermúdez, F.; Conesa, C. y Romero, M.A. (Eds.): Estudios de Geomorfología en España.  
*Actas de la II Reunión Nacional de Geomorfología, Murcia, S.E.G., pp. 365-375.*
- SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL., 1980.  
Estadísticas climatológicas 1951-1960, 1961-1970, 1971-1980.  
*Buenos Aires.*
- SHUMM, S., 1956.  
The fluvial system. A Wiley-interscience Publication.  
*John Wiley and Sons, Inc. New York. 338 pp.*
- STRAHLER, A. N., 1952,  
Dynamic basis of geomorphology,  
*Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 63 : 923-938.*
- STRAHLER, A. N., 1964.  
Quantitative geomorphology drainage basins off networks.  
*En: Chow V (ed). Handbook of Applied Hydrology. Mac Graw Hill. New York – USA. Mac Graw Hill.*





# Predicción de inundaciones y sistemas de alerta: Avances usando datos a tiempo real en la cuenca del arroyo del Azul

## Flood forecasting and warning systems: Progress using real-time data in the Azul Creek watershed

Cazenave, Georgina ✉ - Vives, Luis

Recibido: 19 de diciembre de 2014 • Aceptado: 30 de diciembre de 2014

### Resumen

*La predicción de crecidas con modelos numéricos es un elemento vital en aquellas localidades que sufren inundaciones recurrentes. Además de las limitaciones propias de los modelos, se encuentran inconvenientes para obtener datos de precipitación confiables y con resoluciones espacio-temporales adecuadas para realizar el pronóstico. La ciudad de Azul (provincia de Buenos Aires) cuenta con un modelo de predicción hidrológica, calibrado y validado a partir de datos tomados de la red de monitoreo tradicional instalada por el Instituto de Hidrología de Llanuras, que permite realizar el pronóstico a partir de datos horarios de lluvia. Hasta el año 2005, cuando se instala la red de alerta de inundaciones, los pronósticos de crecidas se realizaban con datos provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y por establecimientos agropecuarios distribuidos en la cuenca (a los que se les asociaba una distribución de precipitación similar a la del SMN). En este trabajo se presenta la comparación de pronósticos calculados a partir de datos aislados con los calculados con hietogramas de la red de alerta temprana. También se describe la metodología de trabajo empleada en los eventos del 2012 que produjeron inundaciones del casco urbano de Azul, los primeros eventos de importancia registrados por la red.*

**Palabras Clave:** pronóstico, alerta, inundaciones.

### Abstract

*Flood forecasting using numerical models is invaluable for cities where flooding is a recurrent event. In addition to the inherent limitations of the models, the lack of reliable precipitation data available a fine spatial and temporal scales suitable for forecasting constitutes a roadblock. The city of Azul (Buenos Aires Province) is equipped with a hydrologic prediction model that has been calibrated and validated with precipitation data from a monitoring network setup by the Instituto de Hidrología de Llanuras, which allows flood*

1. Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (IHLLA). República de Italia 780, Azul, Argentina.

✉ cazenave@faa.unicen.edu.ar

forecasting using hourly rainfall. Until the year 2005, when the early warning network is put in place, flood forecasting was generated with observations provided by the Servicio Meteorológico Nacional (SMN) and by agriculture farms located in the basin (which adopted the same distribution than the SMN data). This study compares flood forecasts using precipitation from isolated rain gauges to the ones computed with hyetograph from the early warning network. The methods used to simulate the 2012 extreme events, the first ones registered by the network, that flooded the city of Azul are also presented.

**Keywords:** forecast, early warning, flooding.

## INTRODUCCIÓN

La información necesaria para suministrar predicciones y alertas puede ser muy similar a la requerida para evaluar los recursos hídricos (por ejemplo intensidad de la precipitación, niveles de agua, etc.), pero los requisitos específicos son muy diferentes. Para la predicción se requiere sobre todo que la información sea oportuna, fácil de comprender y exacta, de manera que se puedan tomar decisiones rápidas y con toda seguridad; en cambio para evaluar recursos hídricos tiene más importancia la constante recopilación de datos o la conformidad con métodos científicos de muestreo.

Las redes de monitoreo hidrológico responden a necesidades específicas del organismo que las instala. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) tiene estaciones de medición que registran en forma permanente, y si bien las actualizaciones de los datos de lluvia son cada tres horas, la representatividad espacial de la lectura no siempre es adecuada para la escala de trabajo requerida. Por ello el Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff" (IHLLA) ha instalado pluviógrafos y limnógrafos a fin de recolectar datos de lluvia y niveles que permitan ajustar modelos hidrológicos de predicción de crecidas.

Sin embargo, dependiendo de la heterogeneidad del evento la información recolectada era insuficiente. Por ello en 2005 se instala la red de alerta temprana de inundaciones que permitió tener la distribución y lluvia total en seis puntos distribuidos en la cuenca alta a tiempo real. Esta información sirvió para alimentar los modelos de pronóstico de crecidas con datos espacial y temporalmente mejor distribuidos y mejorar los hidrogramas calculados de predicción.

Además de la mejora en el pronóstico numérico, el registro de los niveles en distintas secciones de la cuenca permitió seguir y comprender la respuesta de la cuenca a medida que los escurrimientos superficiales se van encauzando y sumando hacia la salida de la cuenca.

Todo este conjunto de datos resulta valioso y acompaña a la información de pronóstico meteorológico, imágenes satelitales a tiempo real e imágenes radar actualizadas suministradas por el SMN. Todo esto es evaluado por un equipo donde se encuentran representados las autoridades, comunicadores y técnicos del gobierno municipal, técnicos del IHLLA y técnicos del SMN. Con la valoración del equipo técnico que interpreta la información real y el resultado de los pronósticos, meteorológico e hidrológico, se elaboran los informes de seguimiento del alerta que luego las autoridades y comunicadores transmiten a la población por los diferentes medios de comunicación a fin de establecer el alerta o cese de la misma.

## METODOLOGÍA

### Área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca superior del arroyo del Azul, ubicada en la región central de la provincia de Buenos Aires (Figura 1). La superficie de aporte es de 1150 km<sup>2</sup>, su pendiente media es de 1%, mientras que su altitud máxima es de 360 metros sobre el nivel del mar (msnm) y la mínima de 135 msnm. Sus principales tributarios son el arroyo Videla (136 km<sup>2</sup>) y el arroyo Santa Catalina (138 km<sup>2</sup>).

El límite de cuenca al sur, a 60 km de la ciudad de Azul, está definido por el extremo Oeste del sistema de Tandilia. El relieve de suaves sierras se transforma en un área de suaves ondulaciones en la parte media para luego transformarse en llanura en la parte baja. La subcuenca del arroyo Santa Catalina tiene características similares mientras que la del arroyo Videla es una cuenca típica de relieve con pendientes importantes.

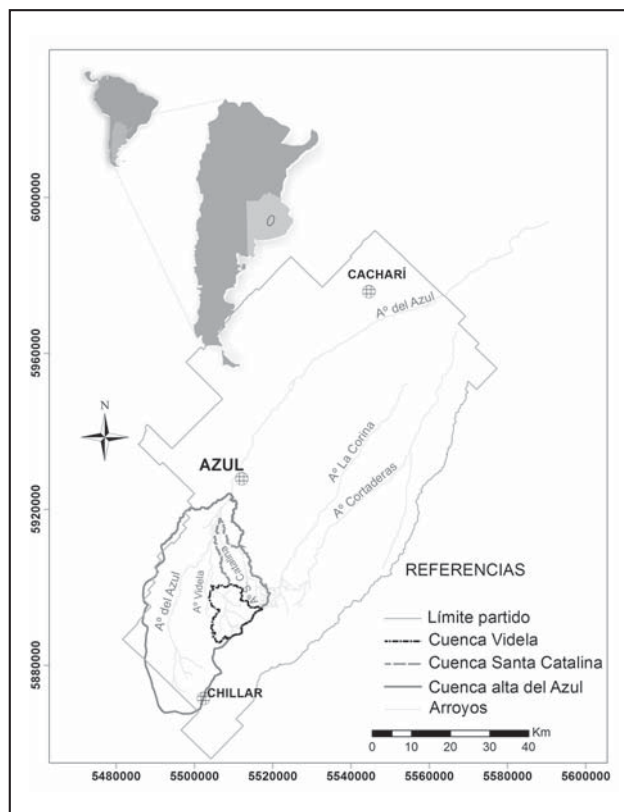


Figura 1. Ubicación de la cuenca del arroyo del Azul. Detalle de la cuenca superior con sus tributarios, subcuencas del arroyo Videla y arroyo Santa Catalina.

La alternancia de ciclos de excesos y déficits hídricos en la llanura Pampeana ya fue citado por *Ameghino (1884)* y se observan los problemas asociados a estas condiciones de manera recurrente en la zona. En los ciclos húmedos las frecuentes e intensas precipitaciones, saturan el suelo y ponen en riesgo de inundación a la población de la ciudad de Azul (45000 habitantes, censo 2011 del INDEC), cuyo ejido urbano tiene una gran superficie ocupando el valle de inundación del arroyo homónimo.

La actividad económica dominante en el área es la agronómica, con baja presencia de ganadería, debido al avance de la frontera agrícola que favorece las producciones extensivas de cultivos como soja, trigo, maíz y girasol.

La combinación de estos escenarios, agricultura y serranías cercanas, ponen a la ciudad de Azul en una situación de alto riesgo de inundación en caso de eventos de alta intensidad, si éstos se dan en épocas de excedentes hídricos y/o baja cobertura vegetal. El arroyo cuyo caudal medio es de alrededor 1 m<sup>3</sup>/s pasa en 24 a 48 horas a transportar más de 250 m<sup>3</sup>/s, ocupando grandes áreas a ambos lados de su traza.

**Red de monitoreo hidrometeorológico**

El IHLLA cuenta con una red de monitoreo de variables meteorológicas, de aguas superficiales y aguas subterráneas distribuidas en toda la cuenca del Azul. En la cuenca superior tiene limnímetros, pluviómetros, piezómetros y freatógrafos.

La sección de control, estación Seminario, a la salida de la cuenca (aguas arriba de la ciudad de Azul) cuenta con un limnógrafo de registro automático y una relación de altura caudal (h-Q) que permite medir los volúmenes escurridos. Además, hay instalados dos limnógrafos con sus correspondientes curvas h-Q en los arroyos tributarios Santa Catalina y Videla.

También se poseen registros de lluvias de establecimientos agropecuarios que miden la lluvia diaria o mensual, según el interés particular de cada caso. Esta información recolectada permitía tener una valoración espacial del total precipitado durante un evento, y con la información de los pluviógrafos y la

del SMN ponderar la distribución temporal de la lluvia. En caso de alerta de inundaciones estos establecimientos miden sólo durante el día y son comunicados telefónicamente.

La red de piezómetros consta de 42 puntos de muestreo someros (6-10 m), 20 piezómetros de 30 m y 2 profundos de 100 m y 150 m. Se encuentran distribuidos en toda la cuenca del Azul (Figura 2) y se muestrea semestralmente (para niveles altos y bajos del acuífero) calidad de agua y nivel piezométrico del acuífero a diferentes profundidades. En 7 de los piezómetros someros se colocaron freatógrafos de registro continuo (horario), 2 de los cuales se encuentran emplazados en la cuenca alta del arroyo del Azul. Conocer la variabilidad de los niveles freáticos permite valorar la capacidad de la cuenca para recibir agua desde la superficie y el riesgo de anegamiento asociado en caso de excesos hídricos.

**Red de alerta temprana de inundaciones**

Las inundaciones recurrentes de la ciudad de Azul, la falta de información de los eventos y su evolución temporal, junto a la presión de la población por encontrar una solución, permitió al IHLLA y a la Municipalidad de Azul buscar alternativas para la adquisición de una red de alerta temprana de inundaciones. El IHLLA participó técnicamente en la elaboración del proyecto y búsqueda de tecnología que cubran las necesidades de información meteorológica y limnográfica a fin de poder alertar a la población en caso de inundación.

Así se adquiere en 2005 una red telemétrica de 6 estaciones hidrometeorológicas (Figura 3), distribuidas en la cuenca superior del Azul. Ésta permite cuantificar los aportes de precipitación en las zonas de cabecera del Azul, Santa Catalina y Videla, y la evolución de niveles del arroyo del Azul y sus afluentes. La red cuenta con dos unidades centrales de control, una en el IHLLA y otra en la Municipalidad de Azul (Figura 4), que reciben la información cada 20 minutos a través de una repetidora ubicada en Cerro del Águila.

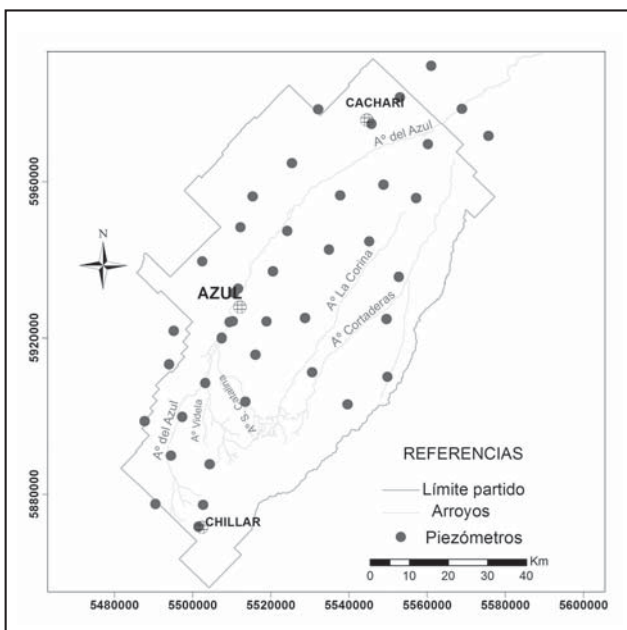


Figura 2. Red de piezómetros del IHLLA.

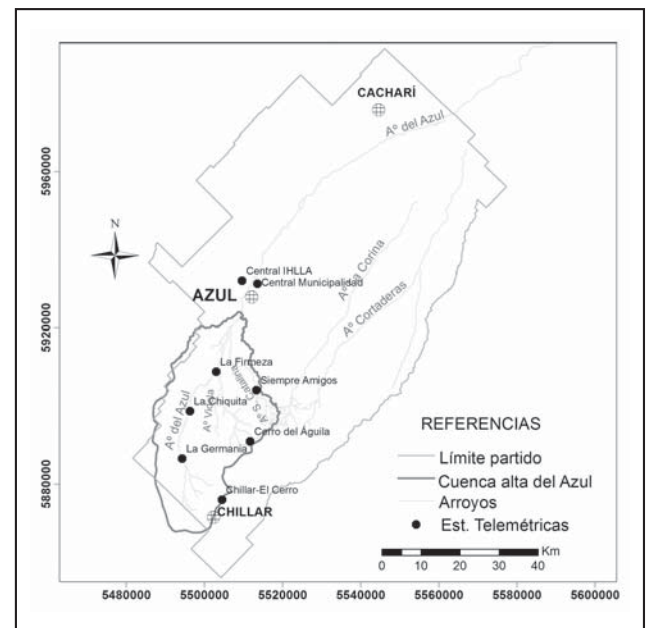


Figura 3. Cuenca superior del arroyo del Azul, ubicación de estaciones telemétricas y sus centrales, y las secciones limnográficas.



Figura 4. Estaciones telemétricas y unidad central de control de la red de alerta temprana de inundaciones de la ciudad de Azul.

La comunicación de las centrales con las estaciones es a través de un sistema de radio VHS propietario, que permite tener independencia de otros sistemas de comunicación que pueden fallar o colapsar en casos de emergencia.

La robustez de los equipos y el mantenimiento permanente tanto de las estaciones como de las centrales, permiten asegurar la recepción continua en el tiempo de datos altamente confiables.

#### Modelo de pronóstico de crecidas

Se utilizó el programa HEC-HMS (versión 3.0.1) del Hydrologic Engineering Center para la modelación matemática de la cuenca del arroyo del Azul. La modelación en áreas de llanura presenta inconvenientes cuando se trata de la aplicación de métodos tradicionales de traslado en cauce como onda cinemática o Muskingum-Cunge. Las hipótesis de aplicación no se cumplen cuando se traslada una onda de crecida por cauces que presentan una pendiente muy pequeña, como ocurre en la cuenca superior del arroyo del Azul. En este caso se implementa a partir de la información existente en distintas secciones de control el método de Puls modificado. Este método trabaja considerando al tramo de ruteo como una serie de reservorios en cascada en los cuales el agua pasa de una a otra.

El funcionamiento de los reservorios calcula el traslado de la onda de crecida a partir de la relación almacenamiento-caudal. Como se tienen las relaciones h-Q observadas en cada sección de control, se calibró un programa LDM (Villanueva, 1995) para un tramo de arroyo en el cual se verificara la h-Q observada. Calibrado el funcionamiento hidrodinámico del tramo se pudo relacionar para cada altura en la sección un volumen almacenado y un caudal estimado.

Las pérdidas por infiltración y abstracciones de lluvia se calculan mediante el método del Número de Curva (CN) del Service Conservation Soil del U.S.D.A. (1985).

A partir de la información registrada en la estación del SMN, los datos de lluvia total tomados en los establecimientos y mediciones de niveles, se obtiene una calibración aceptable del modelo (Figura 5) con el cual se representan los eventos en

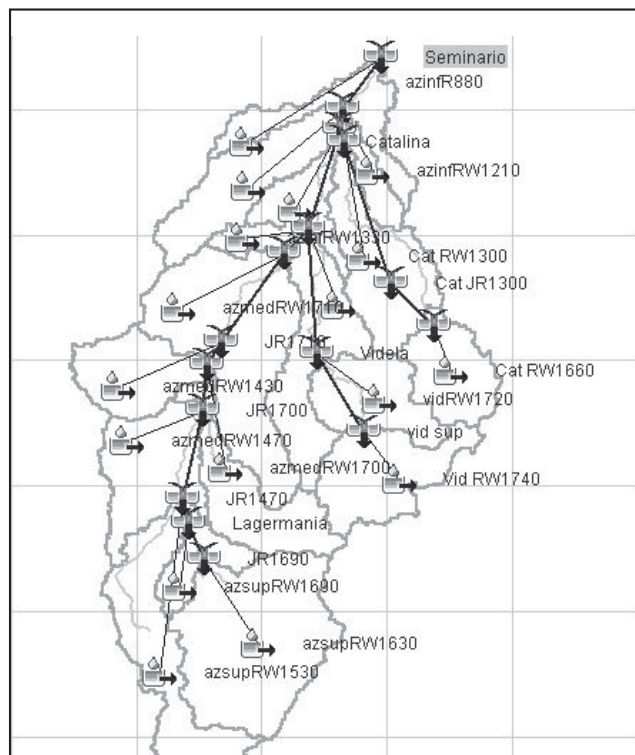


Figura 5. Modelo de la cuenca del arroyo del Azul superior con el programa Hec- HMS.

las secciones de los arroyos del Azul, Santa Catalina y Videla (Cazenave y Villanueva, 2007). Para el conjunto de eventos de validación y simulados posteriormente el modelo representa adecuadamente la respuesta de la cuenca ante eventos intensos y en condiciones de exceso. En estas condiciones desfavorables, desde un punto de vista hidrológico, se cuenta con una herramienta de predicción en la cual se calculan de forma ajustada los caudales y tiempos al pico.





PRON_AZUL_2012-AGO-22-00: Bloc de notas									
Archivo Edición Formato Ver Ayuda									
PRECIPITACION ACUMULADA EN 6HS - PARTIDO DE AZUL BASADO EN EL ANALISIS DEL 22/AGO/2012 00UTC									
PRONOSTICO	6	12	18	24	30	36	42	48	
-36.1/-60.4	0.0	0.0	0.0	9.3	22.8	28.9	22.7	11.2	
-36.1/-60.0	0.0	0.0	0.0	13.6	21.6	24.6	22.4	15.2	
-36.1/-59.7	0.0	0.0	0.0	13.0	13.9	12.3	13.0	17.7	
-36.1/-59.4	0.0	0.0	0.0	14.8	7.1	1.0	5.5	19.7	
-36.1/-59.0	0.0	0.0	0.0	13.1	3.5	1.0	1.0	12.1	
-36.4/-60.4	0.0	0.0	0.0	7.9	27.8	35.1	23.1	6.3	
-36.4/-60.0	0.0	0.0	0.0	10.3	24.0	32.2	25.5	9.4	
-36.4/-59.7	0.0	0.0	0.0	10.4	25.0	27.4	24.4	13.9	
-36.4/-59.4	0.0	0.0	0.0	12.8	19.4	17.0	15.4	17.6	
-36.4/-59.0	0.0	0.0	0.0	15.2	10.1	6.8	3.1	22.4	
-36.7/-60.4	0.0	0.0	0.0	5.8	23.6	34.4	14.0	3.4	
-36.7/-60.0	0.0	0.0	0.0	9.1	24.4	35.4	22.8	4.2	
-36.7/-59.7	0.0	0.0	0.0	10.4	28.0	34.4	27.2	5.9	
-36.7/-59.4	0.0	0.0	0.0	11.3	27.7	30.0	25.6	10.4	
-36.7/-59.0	0.0	0.0	0.0	13.6	21.8	23.4	19.2	14.8	
-37.1/-60.4	0.0	0.0	0.0	5.7	24.3	29.7	10.0	3.7	
-37.1/-60.0	0.0	0.0	0.0	7.3	27.0	34.4	11.6	1.5	
-37.1/-59.7	0.0	0.0	0.0	8.0	28.7	35.2	20.5	2.2	
-37.1/-59.4	0.0	0.0	0.0	8.5	29.8	35.4	26.9	3.5	
-37.1/-59.0	0.0	0.0	0.0	10.2	24.8	28.7	24.7	7.3	
-37.5/-60.4	0.0	0.0	0.0	4.4	21.9	23.2	9.8	4.0	
-37.5/-60.0	0.0	0.0	0.0	5.3	25.1	27.7	12.0	3.1	
-37.5/-59.7	0.0	0.0	0.0	5.7	27.0	31.9	13.2	1.1	
-37.5/-59.4	0.0	0.0	0.0	5.9	27.5	31.3	17.9	1.0	
-37.5/-59.0	0.0	0.0	0.0	4.9	23.7	28.2	21.1	0.9	

Información obtenida del modelo numérico ETA-SMN  
DEPARTAMENTO PROCESOS AUTOMATIZADOS (SMN)

Figura 7. Pronóstico del Modelo ETA-SMN, análisis del 20 de agosto de 2012 00UTC.

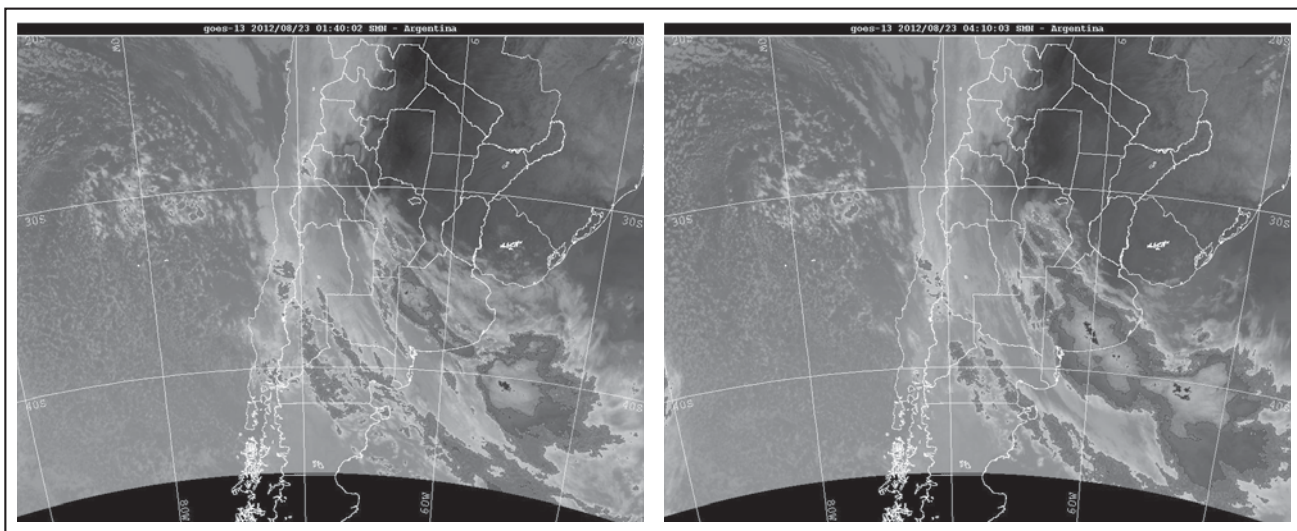


Figura 8. Imágenes satelitales GOES de temperatura de tope nuboso del 23/8/2012.

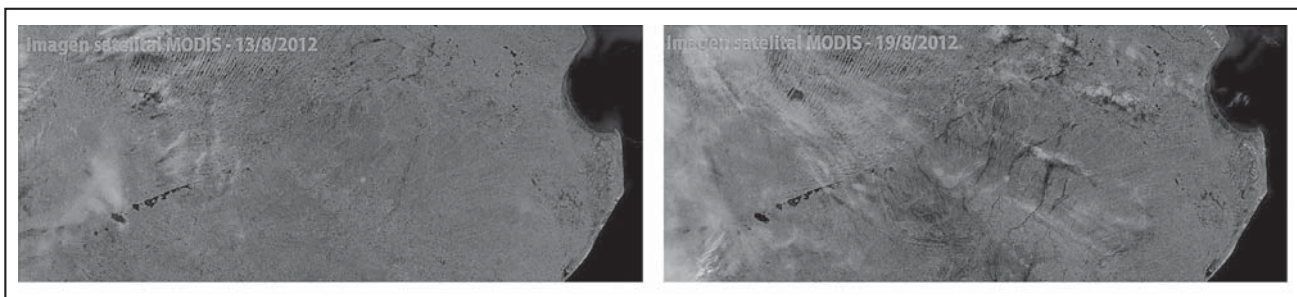


Figura 9. Imágenes satelitales MODIS del estado de humedad antecedente de la zona antes de los eventos del 17 y 23 de agosto de 2012.

Además se realizan mediciones continuas de alturas en Videla, Santa Catalina y Azul (Seminario), se miden caudales en diferentes secciones a fin de agregar puntos observados de altura caudal para la curva h-Q. También se mide el avance de la crecida en escalas hidrométricas ubicadas en el centro de la ciudad para el seguimiento de la crecida en su paso por el casco urbano.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Para el alerta de crecidas se dispone de tres fuentes de información de lluvia: la red de alerta temprana de inundaciones que da información distribuida temporal y espacialmente de la lluvia en la cuenca alta del Azul (Figura 10), la lluvia total medida en los establecimientos agropecuarios los cuales se contactan telefónicamente durante el día, y la información del SMN que realiza la medición de lluvia cada 3 horas.

Hasta 2005, año en que se instala la red telemétrica, los pronósticos de crecidas se realizaban con las lecturas tomadas en los establecimientos agropecuarios adoptando la distribución temporal de la lluvia en Azul que daba el SMN cada 3 horas. Como se ve en la Figura 10 y sucede muchas veces, la distribución temporal de una tormenta varía en pocos kilómetros. Esto produce una distorsión del fenómeno que se refleja en los resultados del modelo de predicción de crecidas. Para ejemplificar esta situación se muestran los resultados obtenidos a partir de los datos de los establecimientos con una única distribución

(Figura 11) y los resultados de la simulación con la información provista por la red de alerta (Figura 12). Se toman los eventos consecutivos del 17 y 23 agosto de 2012 como ejemplo.

Cuando las predicciones se hacen a partir de datos de establecimientos agropecuarios y distribución uniforme los hidrogramas calculados pueden ser sobre o sub-estimados (Figura 11.a y b). Y si bien las mediciones de la red de alerta son precisas y confiables, se observa que los pronósticos pueden tener diferencias con el observado y es necesario contar con las medidas a tiempo real para corroborar y ajustar el pronóstico. En algunos casos el caudal calculado puede estar desfasado en el tiempo (Figura 12.a) o ser muy preciso (Figura 12.b), pero siempre será necesario contrastar estos resultados con los niveles y/o caudales observados y su evolución temporal (Figura 13) a fin de ir ajustando la predicción de la crecida.

Durante el desarrollo del evento de lluvia como durante el traslado de la crecida es necesario controlar los niveles alcanzados y compararlos con los niveles de alerta. Las secciones en la cuenca media o de cierre de afluentes permiten evaluar la respuesta de sectores y cómo se combinan para formar el hidrograma final en la sección de salida. La comparación entre eventos de similares características puede ayudar a la interpretación de un fenómeno y apreciar la certeza de una predicción de crecida.

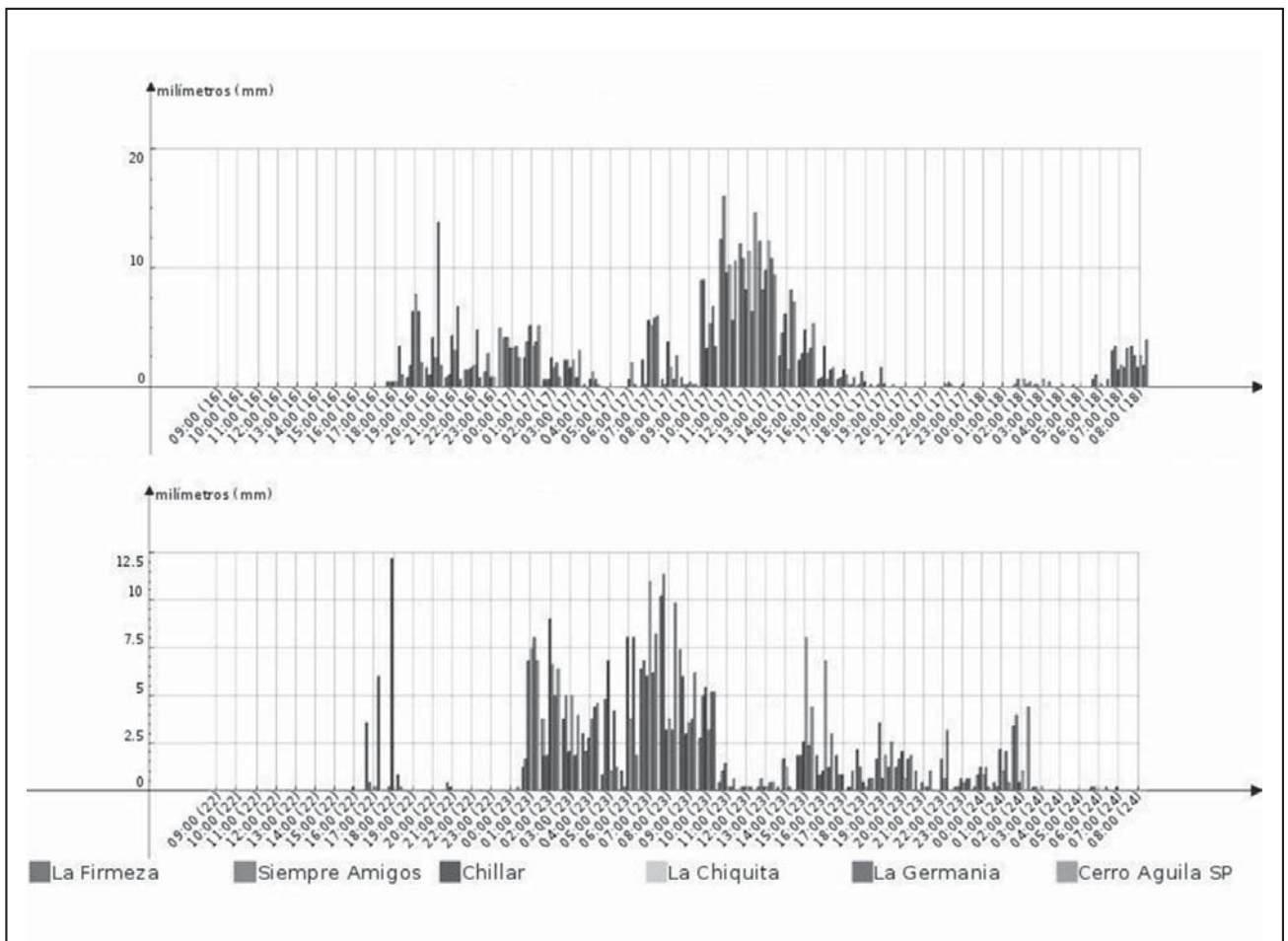


Figura 10. Distribución de precipitación en las estaciones de la red de alerta para los eventos del 17 y 23 de agosto de 2012..

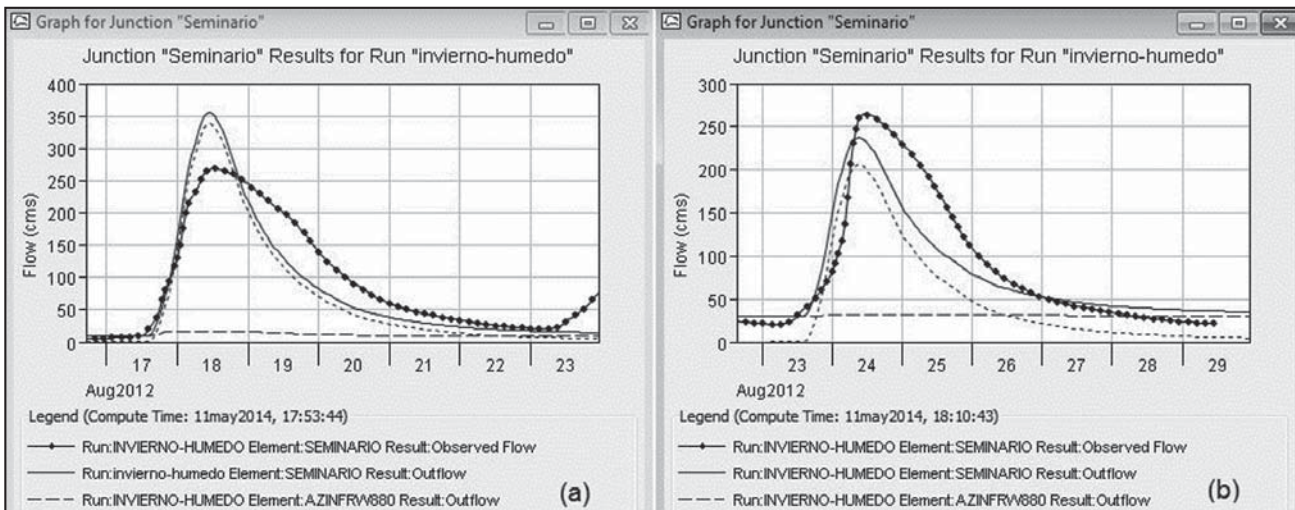


Figura 11. Predicción de crecida del arroyo Azul en Seminario para los eventos del: a) 17/08/2012, y b) 23/08/2012, con datos de lluvia de establecimientos agropecuarios. Modelo Hec- HMS.

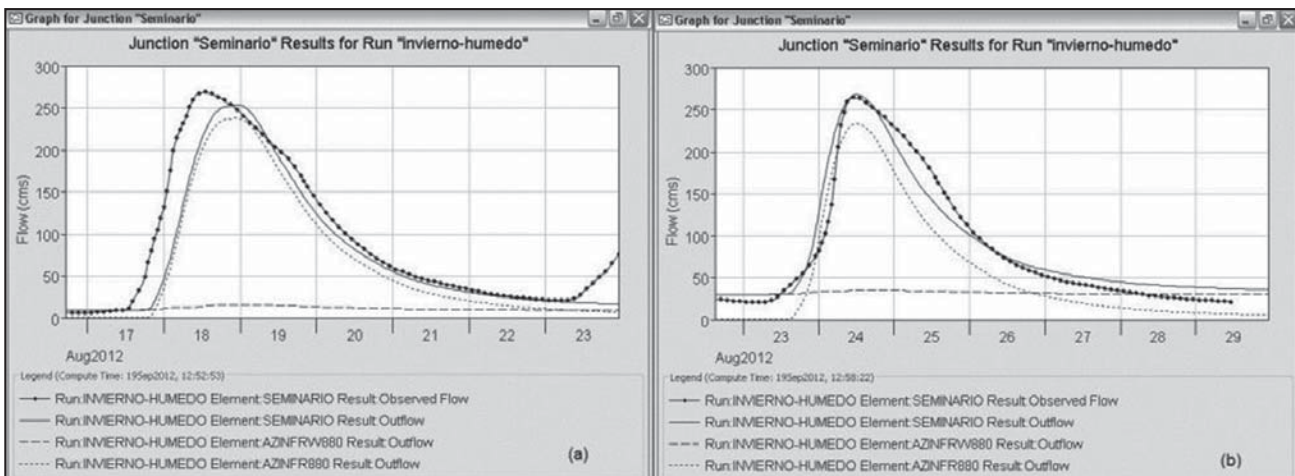


Figura 12. Predicción de crecida del arroyo Azul en Seminario para los eventos del a) 17/08/2012, y b) 23/08/2012, con datos de lluvia de la red de alerta. Modelo Hec- HMS.

## CONSIDERACIONES FINALES

La obtención de información consistente y precisa de las redes de monitoreo permite valorar y conocer el estado de la cuenca, su memoria hidrológica, lo que sirve de sustento para conseguir un adecuado proceso de calibración y validación de los modelos hidrológicos.

La presencia de una red de alerta garantiza la captura y minimiza la incertidumbre del dato, pero para que esta premisa sea duradera requiere de un mantenimiento continuo, tanto del equipamiento de campos como de las centrales de recepción. Los sensores instalados en las estaciones deben contrastarse con patrones para asegurar su correcto funcionamiento, los conectores han de limpiarse y mantenerse libres de deterioro, al igual que las condiciones del predio de la estación. En las centrales de control es necesario tener asegurada la protección ante descargas y sobretensiones eléctricas, así como contar con equipos de suministro eléctrico alternativos.

La red de monitoreo tradicional no es necesariamente invalidada por la red de alerta, sus datos sirven para cotejar los

datos de las estaciones telemétricas o, ante cualquier eventualidad, reemplazarlos. Todos los datos son válidos siempre que se tenga en cuenta en la interpretación de los resultados la procedencia y limitaciones asociadas.

Se debe tener en cuenta siempre que los modelos matemáticos de crecidas están sesgados por la información que se utilizó para su calibración, por ello cuanto mayor sea el número de eventos utilizados para su ajuste mejor será su representatividad posterior. Al igual que las curvas h-Q es necesaria su actualización permanente.

En la previsión de crecidas el trabajo conjunto de técnicos en hidráulica, hidrología y meteorología permite un mejor entendimiento del fenómeno y por ello una predicción más ajustada. Además es necesaria la participación política y de comunicadores que en diálogo permanente y trabajo conjunto hagan llegar a los estamentos involucrados en las inundaciones los resultados de la predicción numérica. De esta manera, se logra informar con adecuada rigurosidad, claridad e instrucciones precisas a los posibles afectados por las inundaciones.

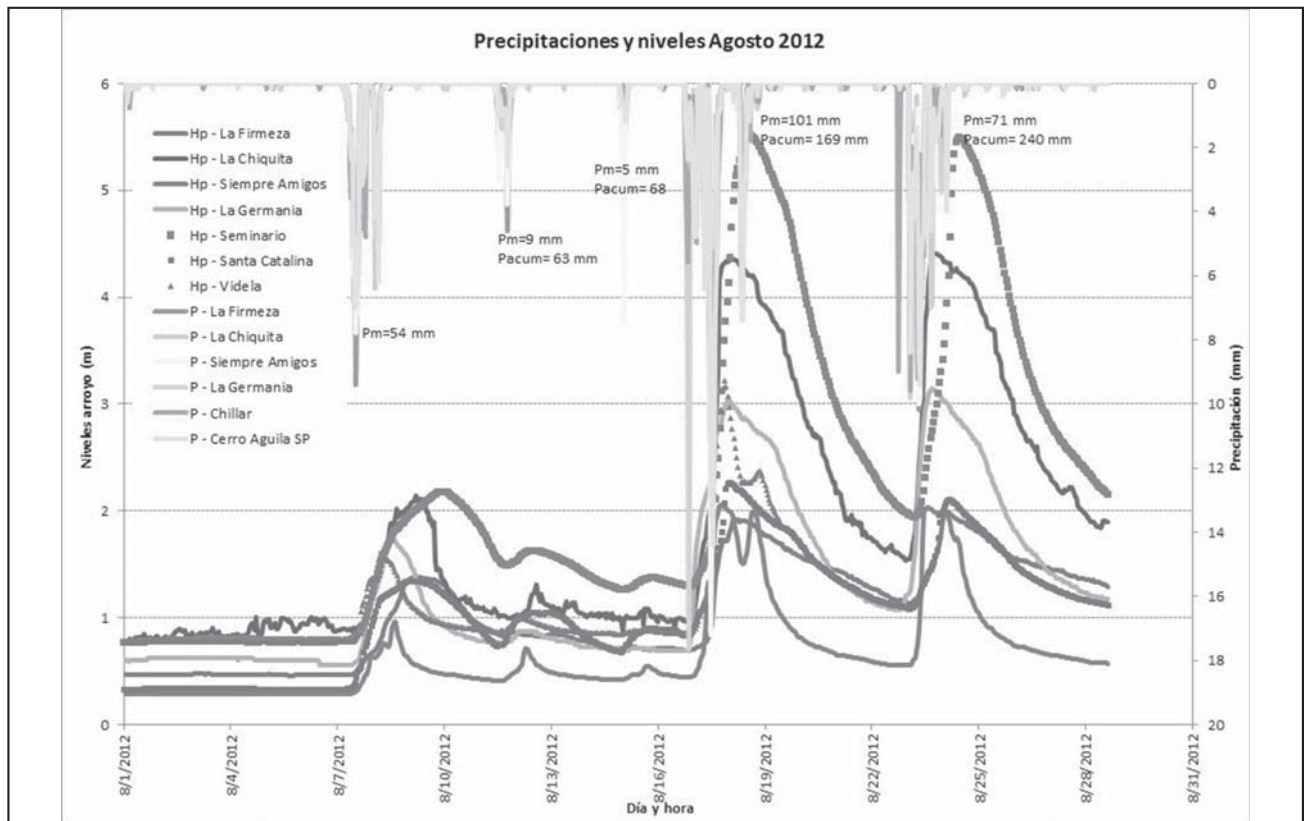


Figura 13. Hidrogramas y hietogramas registrados durante agosto de 2012 (línea continua estación telemétrica, puntos limnigráfico de registro continuo, barras precipitación)

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

AMEGHINO, F., 1884.

Las secas y las inundaciones en la provincia de Buenos Aires.  
*Ministerio de Asuntos Agrarios, Provincia de Buenos Aires.*

CAZENAVER, G. Y VILLANUEVA, A. O. N., 2007.

Modelación superficial en una cuenca de llanura con el Hec-HMS.  
*Caso de estudio: Cuenca del Azul Superior. XXI Congreso Nacional del Agua. Tucumán, Argentina.*

VILLANUEVA, A. O. N., 1995.

Mudanças de variável em um modelo de distribuição transversal de vazões.  
*Volumen 4, Anales XI Simposio brasileiro de recursos hidricos. ABRH, Recife, PE.*

U.S.D.A., 1985.

National Engineering Handbook. Sección 4.  
*Soil Conservation Service. United State Government Printing Office, Washington.*





## Evaluación del riesgo sísmico para Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina, aplicando el programa Selena

### Seismic risk evaluation for Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina, applying the Selena software

Abascal, Liliana del Valle ✉ - González Bonorino, Gustavo

Recibido: 19 de octubre de 2014 • Aceptado: 30 de diciembre de 2014

#### Resumen

*La población de Tolhuin (2.500 habitantes) está situada en la cabecera del lago Fagnano, a 1 km de la traza de la falla Magallanes-Fagnano (M-F), la principal fuente sismogénica en el sector argentino de Tierra del Fuego. La falla M-F ha generado varios eventos sísmicos de magnitud cercana a  $M=8$ , de los cuales el más reciente ocurrió en 1949, cuando la urbanización de Tolhuin era incipiente. Desde entonces, Tolhuin ha crecido rápidamente en población y en superficie edificada. Es objeto de este trabajo evaluar el efecto que hoy tendría un sismo de magnitud similar al de 1949. La simulación aplica el programa de computación SELENA (Seismic Loss Estimation using a logic tree Approach), en modos determinístico y probabilístico, postulando sendos epicentros localizados sobre la falla M-F, distantes 120 km y 30 km de Tolhuin. La ubicación de los epicentros intenta modelar el comportamiento del tramo curvo ('restraining bend') de la falla. La caracterización geotécnica del sustrato se basa en datos de la literatura y observaciones de campo, y se hace una evaluación expeditiva de la sismorresistencia de la tipología edilicia dominante. Los resultados de las simulaciones indican daños materiales leves para el sismo lejano, y daños severos para el caso de sismo cercano. La simulación probabilística dio resultados intermedios. La conclusión es que es conveniente tomar medidas preventivas, pausadas pero rigurosas, para mitigar las consecuencias de un posible sismo destructivo. Asimismo se concluye que la zonificación sísmica del INPRES para Tierra del Fuego debiera ser modificada.*

**Palabras clave:** falla Magallanes-Fagnano, sismicidad, sismorresistencia.

#### Abstract

*The town of Tolhuin (population 2500) is located at the head of Lake Fagnano, 1 km from the trace of the Magallanes-Fagnano (M-F) fault, the major seismogenic source in the Argentine sector of Tierra del Fuego. The M-F fault has generated several seismic events with magnitude around  $M=8$ , the most recent in 1949, when the urbanization of Tolhuin was incipient. Since then, Tolhuin has grown rapidly in*

Facultad Regional Río Grande, Universidad Tecnológica Nacional, Islas Malvinas 1650, Tierra del Fuego,

✉ liliana\_abascal@hotmail.com

Facultad Regional Río Grande, Universidad Tecnológica Nacional, Islas Malvinas 1650, Tierra del Fuego, y CONICET

population and in built surface. It is the object of this study to evaluate the effect a seismic event of magnitude similar to that of 1949 would have today. The simulation applies the SELENA (Seismic Loss Estimation using a logic tree Approach) computer program, in deterministic and probabilistic modes, postulating epicenters on the M-F fault, distant 120 and 30 km from Tolhuin. The position of the epicenters intends to model the behavior of the restraining bend on the M-F fault. A geotechnical characterization of the substrate is presented, based on data from the literature and field observations, and a cursory evaluation is made of the seismic resistance of the major building types. The results of the simulations indicate slight material damage for the distant earthquake, and extensive damage in the case of the nearby earthquake. The probabilistic simulation yielded intermediate results. The conclusion of this study is that it is convenient to implement preventive measures, calmly but rigorously, to mitigate the consequences of a possible destructive earthquake. It is additionally concluded that the seismic zoning by the INPRES for Tierra del Fuego should be modified.

**Keywords:** Magallanes-Fagnano fault, seismicity, seismic resistance.

## INTRODUCCIÓN

El riesgo sísmico describe la probabilidad de pérdidas personales y materiales como consecuencia de un terremoto (Reiter, 1990). Unas pocas décadas atrás, la noción de riesgo sísmico estaba apenas difundida y las normas sismorresistentes no habían sido incorporadas a los códigos de edificación. El terremoto de 1906 en California, Estados Unidos, marcó el inicio de una búsqueda sistemática de modos de garantizar la integridad de edificios sometidos a esfuerzos sísmicos, sobre todo evitando el colapso. En la Argentina, fue el terremoto de 1944 en San Juan el evento que motivó el inicio de esta práctica, con la creación del Consejo de Construcciones Antisísmicas y Reconstrucción de San Juan (CONCAR), que en 1972 derivó en el actual Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). El INPRES publicó el primer conjunto de normas de sismorresistencia en 1983, las cuales, actualizadas en 1991, tienen vigencia nacional (INPRES-CIRSOC 103, 2013). Las edificaciones anteriores a la entrada en vigencia de esas normas, claro está, conforman un conjunto sísmicamente vulnerable. Es cierto que la mayor parte de las urbanizaciones sujetas a amenaza sísmica aplican normas de construcción sismorresistente a las construcciones nuevas, pero aun en urbanizaciones jóvenes se puede dar que la premura en resolver la necesidad de vivienda derive en la omisión de una correcta adecuación a las normas existentes. Agrava esta situación que el control último en la aplicación de la normativa INPRES-CIRSOC reside en los municipios, los cuales suelen carecer de suficiente personal idóneo para esa tarea.

El riesgo sísmico resulta de la combinación de *amenaza + exposición + vulnerabilidad*. La amenaza resulta del fenómeno natural, el evento sísmico. Una evaluación de la amenaza requiere la cuantificación del movimiento de suelo en un sitio, o región, por efecto de un terremoto. La exposición está dada por la densidad de población, el tipo y valor de las construcciones, el lucro cesante potencial, y otros factores socio-económicos. La vulnerabilidad mide la susceptibilidad del inventario edilicio, y de la población, a sufrir daños durante un terremoto. La vulnerabilidad responde a la sismorresistencia de las construcciones, a la naturaleza geotécnica del sustrato, y también a la preparación en prevención sísmica de la población en general y de los cuadros de intervención post-desastre.

Reducir el riesgo implica disminuir el peso de uno o más de sus componentes. Ahora bien, ninguna acción humana puede limitar la amenaza natural, y restringir la exposición implicaría restringir el crecimiento integral de una ciudad, ya que la

exposición crece impulsada por la presión que ejercen el aumento de la población y la necesidad siempre presente de desarrollo económico. En cambio sí es factible limitar la vulnerabilidad. Para reducir la vulnerabilidad de una población se requieren dos acciones. Por un lado, cuantificar la distribución geográfica del riesgo sísmico tomando en consideración la adecuación sismorresistente de las construcciones y las propiedades geotécnicas del sustrato sobre el cual apoyan. Y por otro lado, elaborar un eficiente programa de acciones preventivas que incluyan la aplicación de normas de edificación sismorresistente, la concientización de la población acerca de la amenaza, y el diseño de un plan de contingencia post-terremoto en función del análisis previo de vulnerabilidad.

La isla de Tierra del Fuego está situada en el extremo austral del continente Sudamericano, en un entorno de elevada sismicidad dado por la interacción de las placas tectónicas Sudamericana, Scotia y Antártica (Figura 1A). Una fractura transforme separa las placas Scotia y Sudamericana, uniendo la dorsal centro-oceánica de las islas Sandwich del Sur con la zona de subducción frente a Chile (Figura 1A). El tramo continental de esta fractura, donde atraviesa la isla de Tierra del Fuego, se conoce como falla Magallanes-Fagnano, debido a que su traza sigue la cuenca del lago Fagnano y el abra occidental del estrecho de Magallanes. La falla Magallanes-Fagnano ha tenido una importante actividad sísmica en tiempos históricos, generando varios sismos con magnitudes entre 7 y 8. Tolhuin dista apenas 1 km de la traza principal de esta falla.

En el sector argentino de Tierra del Fuego, una población de 200 mil habitantes se agrupa mayormente en tres núcleos urbanos: Río Grande (100 mil habitantes), Ushuaia (90 mil habitantes) y Tolhuin (2.500 habitantes). Tolhuin, principal objeto de este estudio, se ubica en la cabecera del lago Fagnano (Figura 1B). El crecimiento reciente de Tolhuin ha sido acelerado; el número de viviendas pasó de 245 en 1991 a unas 1.240 en la actualidad, y la población aumentó en 42% en los últimos 10 años.

Lo expuesto indica que Tolhuin está bajo una amenaza sísmica cierta (Abascal y González Bonorino, 2008; González Bonorino et al., 2012; Abascal et al., 2012). Abascal y González Bonorino (2008) presentaron una evaluación expeditiva del riesgo sísmico para Tolhuin, aplicando un programa de computación apadrinado por las Naciones Unidas, denominado Risk Assessment tools for Diagnosis of Urban areas against Seismic disasters (RADIUS). RADIUS es una herramienta diseñada para

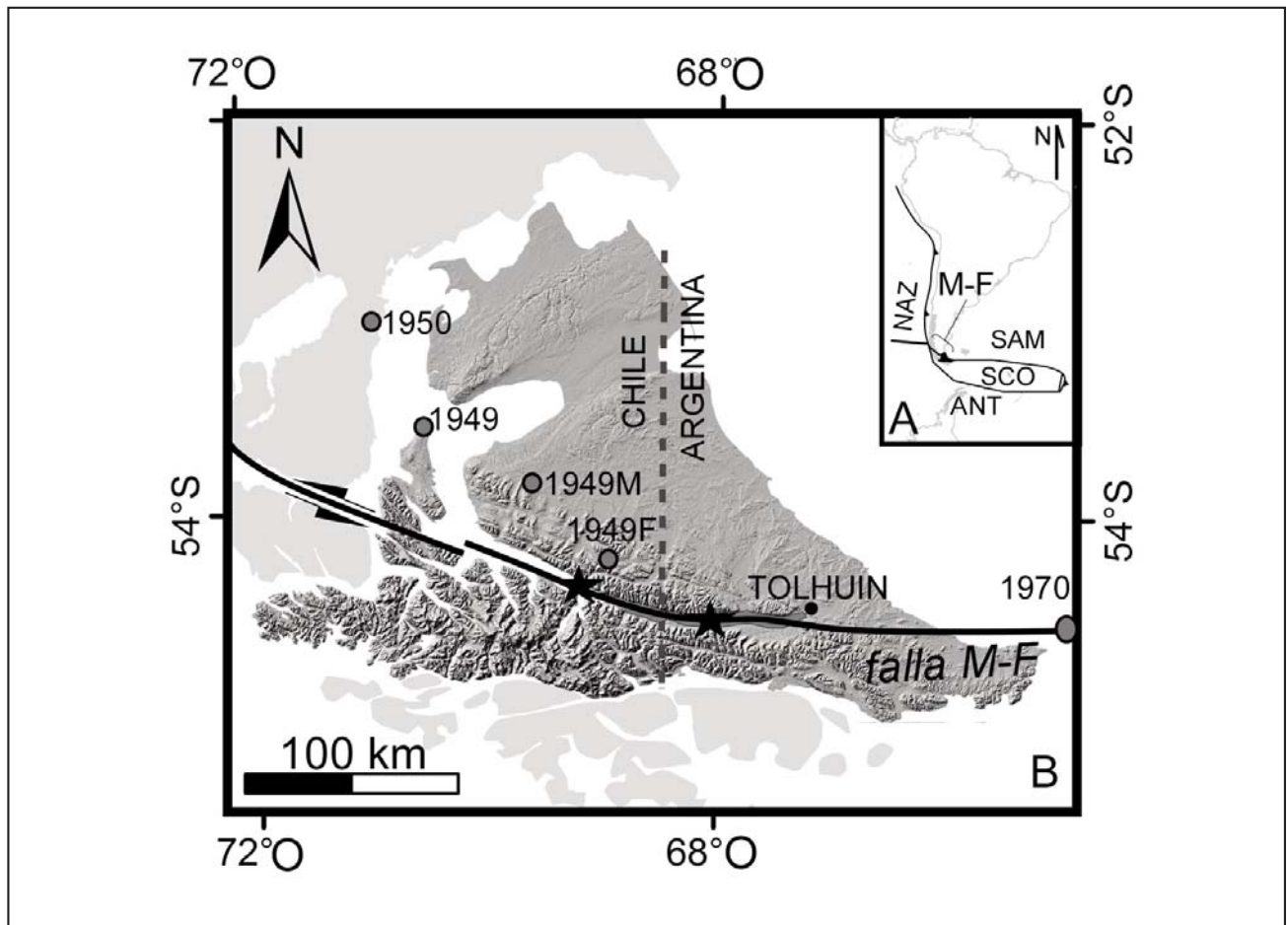


Figura 1. A. Ubicación de Tierra del Fuego en el contexto de Sudamérica. Las líneas negras representan los bordes de las placas tectónicas SCO - Scotia, SAM - Sudamericana, NAZ - Nazca, ANT - Antártica. Los triángulos negros dan la dirección de subducción. Se indica la traza de la falla Magallanes-Fagnano (M-F). B. Representación del relieve de Tierra del Fuego en base a un modelo digital de elevación ASTER GDEM 30 m. Se muestra la traza de la falla Magallanes-Fagnano; las flechas al oeste indican rechazo levógiro. Las estrellas dan la ubicación de los epicentros simulados. Los círculos corresponden a epicentros de los sismos mayores registrados y los años cuando ocurrieron. El lago Fagnano está indicado con rastra de puntos.

brindar una evaluación expeditiva, útil para ciudades con muy escasa información sobre la geología y la tipología edilicia. El análisis puso de manifiesto el potencial incremento de la amenaza por efecto del sustrato blando sobre el cual está construido Tolhuin, la condición de insuficiente sismorresistencia de muchas construcciones, y la conveniencia de una evaluación del riesgo más elaborada.

El presente trabajo actualiza y mejora el análisis con RADIIUS, incorporando información geotécnica y edilicia nueva y aplicando un moderno programa de cálculo del riesgo sísmico: Seismic Loss Estimation using a logic tree Approach (SELENA), versión 6.0 (Molina et al., 2010, 2014; descarga gratuita en <http://www.norsar.org>). SELENA estima el riesgo de daño a estructuras y personas en el caso de un evento sísmico, permitiendo anticipar las consecuencias de futuros terremotos y desarrollar estrategias para reducir el riesgo. Esta evaluación del riesgo sísmico para Tolhuin habrá de ser útil para la planificación de la expansión de la planta urbana, necesaria para acomodar el acelerado incremento poblacional. Adicionalmente, este estudio pone de manifiesto la conveniencia de revisar la zonificación sísmica para Tierra del Fuego, adecuándola a un modelo sismotectónico basado en la falla Magallanes-Fagnano.

#### MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

La isla de Tierra del Fuego alberga el extremo austral de la Cordillera de los Andes, cuyo núcleo ocupa el sector occidental y austral de la isla, dando una topografía abrupta con crestas que superan los 2500 msnm. Hacia el norte y este las alturas descienden rápidamente hacia una llanura disectada que alcanza la costa sobre el océano Atlántico (Figura 1B).

El orógeno está constituido por un basamento metamórfico de edad Paleozoico superior a Cretácico inferior, recubierto en discordancia rocas sedimentarias y volcánicas de edad entre Cretácico superior y Terciario inferior (Caminos, 1980). Este sustrato fue deformado por compresión norte-sur entre el Cretácico tardío y el Terciario temprano, dando lugar a una estructura de corrimientos imbricados con vergencia septentrional (Menichetti et al., 2008). La compresión montó el orógeno sobre el cratón Sudamericano, generando una cuenca de antepaís en la cual se acumularon sedimentos marinos y continentales del Terciario superior (Menichetti et al., 2008). Aproximadamente a partir del Oligoceno, una vez concluida la fase principal de orogénesis, la isla fue afectada por esfuerzos transcurrentes asociados con el desarrollo del arco de Scotia; este campo de



esfuerzos se tradujo en una serie de fallas levóginas de rumbo aproximadamente este-oeste (Diraison et al., 2000). Aparentemente el sitio de fracturación migró de sur (canal Beagle) a norte (lago Fagnano), localizándose en el Holoceno en la falla Magallanes-Fagnano (Klepeis, 1994).

### La falla Magallanes-Fagnano

La falla Magallanes-Fagnano es una fractura transcurrente, levógina, de unos 600 km de largo, cuya traza coincide parcialmente con la cuenca del lago Fagnano (Menichetti et al., 2008; Waldmann et al., 2011). Monitoreo con GPS indica que las placas Scotia y Sudamericana se desplazan relativamente a una velocidad de 0,67 a 0,96 cm/año (DeMets et al., 1990; Smalley et al., 2003). La falla es vertical, sellada a unos 15 km de profundidad, y genera sismos con focos mayormente entre 5 y 10 km de profundidad (Smalley et al., 2003; Buffoni et al., 2009). La corteza en Tierra del Fuego mide aproximadamente 28 a 34 km (Lawrence y Wiens, 2004), por lo cual los hipocentros son intracorticales. La actividad sísmica a lo largo de esta falla ha sido intensa en tiempos históricos. El 1 de febrero de 1879 ocurrió un sismo de magnitud cercana a M=8, estimada por el método de isosistas (Martinic, 2008). El 17 de diciembre de 1949, un sismo se manifestó con un 'foreshock' de M=7,8, la mayor magnitud registrada instrumentalmente en el sur de Sudamérica, seguido pocas horas después por un 'mainshock' de M=7,8; una réplica de M=7 ocurrió 40 días más tarde (Pelayo y Wiens, 1989; Jäschek et al., 1982). Otro evento sísmico de magnitud M=7 asociado a esta falla ocurrió el 15 de junio de 1970 (Pelayo y Wiens, 1989). Estrictamente la falla Magallanes-Fagnano constituye un conjunto de fallas escalonadas estrechamente agrupadas alrededor de una traza principal (Lodolo et al., 2003). La dispersión de las réplicas principales es de unos 130 km, de lo cual se puede inferir que éste es el largo aproximado de uno de los segmentos (cf., Kanamori y Allen, 1986). La marcada curvatura del tramo central de la falla define un segmento transpresivo ('restraining bend'), con mayor probabilidad de una ruptura sismogénica de magnitud elevada (cf., Gómez et al., 2007). En base a la tasa de deslizamiento ('slip rate'), Smalley et al. (2003) estimaron un período de recurrencia de 750 años para un sismo de M=7,5, equivalente a una probabilidad de ocurrencia de 7% en 50 años.

La falla Magallanes-Fagnano es la única fuente sismogénica que representa una amenaza seria para la población del sector argentino de Tierra del Fuego. Esto es así porque la zona de subducción entre las placas Antártica y Sudamericana, que bordea la isla por el oeste y sudoeste, es de baja sismicidad y está lejos (González Bonorino et al., 2012).

### Geotecnia

La urbanización de Tolhuin se extiende desde la ruta nacional N° 3, a unos 120 msnm, hasta la costa del lago Fagnano, a cotas de 22 msnm, apoyando mayormente sobre depósitos de origen glacial que cierran parcialmente por el este la cuenca del lago Fagnano (Coronato et al., 2009; Esteban et al., 2014). Un relevamiento geológico superficial distinguió diamictita proglacial, con clastos dispersos en una matriz arcillosa compacta y maciza, arenas y limos glaciafluviales con estructuras tractivas, y arcillas glacialacustres laminadas (Figura 2A). La estratigrafía local se estableció merced a una perforación hasta 120 m de profundidad, acompañada un sondeo eléctrico vertical, gestionada por el Consejo Federal de Inversiones (Figura 2B; CFI, 1996). El casco céntrico se desarrolla sobre capas arcillosas, glacialacustres, cubiertas por un delgado manto de derrubio de falda.

Ensayos CBR (California Bearing Ratio) relevados por la Dirección Nacional de Vialidad durante la construcción de la ruta nacional N° 3 (DNV, 2004), en pozos de hasta 7 m de profundidad, dieron un valor medio CBR = 20%, correspondiendo a una velocidad de corte  $V_s = 200$  m/seg, aproximadamente (Rosyidi et al., 2006). Esta velocidad corresponde a suelo blando de clase D en la clasificación NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program; FEMA, 2003). Por debajo

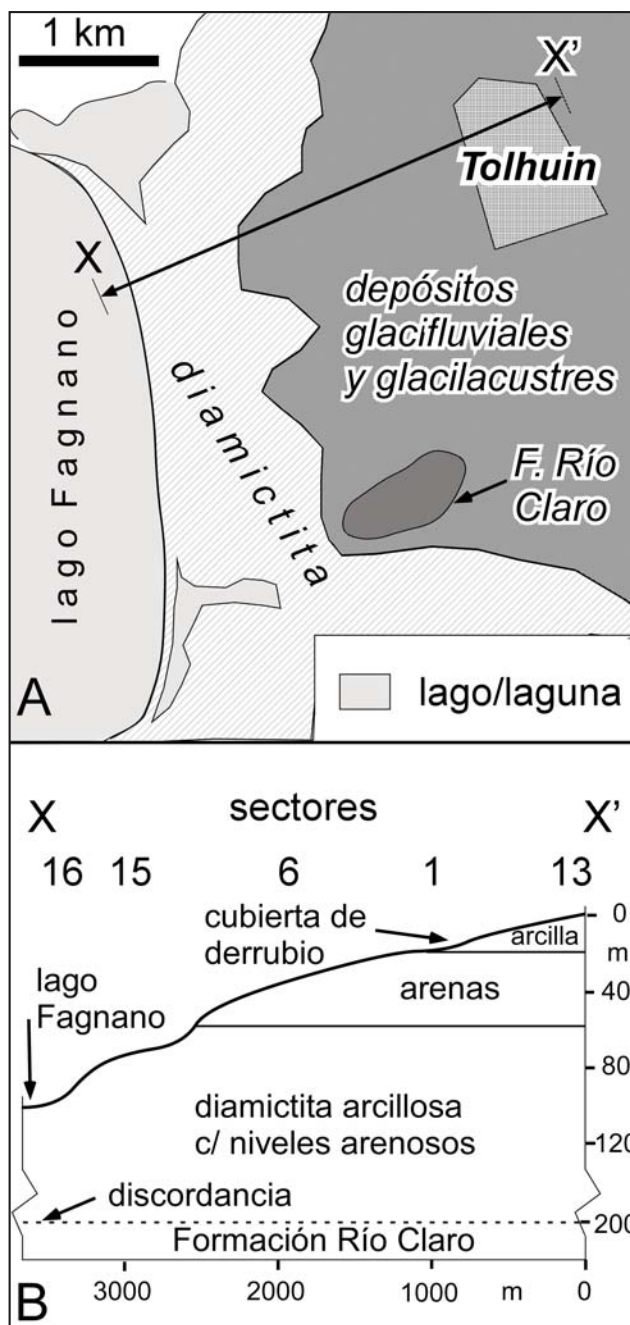


Figura 2. A. Geología simplificada entre Tolhuin y el lago Fagnano. El casco céntrico está representado por una rastra cuadrículada. Parcialmente basado en Lakefield Research (2000). B. Estratigrafía bajo la urbanización de Tolhuin. Se indica la posición de algunos de los sectores de la microzonificación. La ubicación del perfil estratigráfico se indica con X-X' en el panel A. Espesores y litologías dominantes parcialmente basados en CFI (1996).

predominan niveles arenosos, hasta una profundidad de aproximadamente 50 m. Más abajo sigue una diamictita glacial limo arcillosa, plástica y compacta, con abundantes rodados dispersos, alternando con intercalaciones de arena particularmente abundantes entre cotas de 60 y 20 msnm. Esta diamictita subyace el faldeo inferior y está cubierta por grava de playa moderna sobre la costa del lago Fagnano. Por datos de la literatura se atribuye a esta diamictita una velocidad de corte  $V_s = 400$  m/seg (e.g., Bradley et al., 1998). Esta velocidad corresponde a suelo firme clase C en la clasificación NEHRP (FEMA, 2003). El basamento consiste de estratos consolidados de arenisca y conglomerados de la Formación Río Claro (Terciario inferior; Caminos, 1980), con techo a 200 m de profundidad; esta roca no aflora en la zona urbana y no oficia de sustrato para las construcciones.

En el pasaje de roca a suelo firme o blando, la amplitud de una onda sísmica suele aumentar considerablemente. Un análisis del perfil estratigráfico de Tolhuin empleando el programa EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits; Bardet et al., 2000), indicó una posible amplificación por un factor de hasta 2 en la capa arcillosa superior (Figura 3).

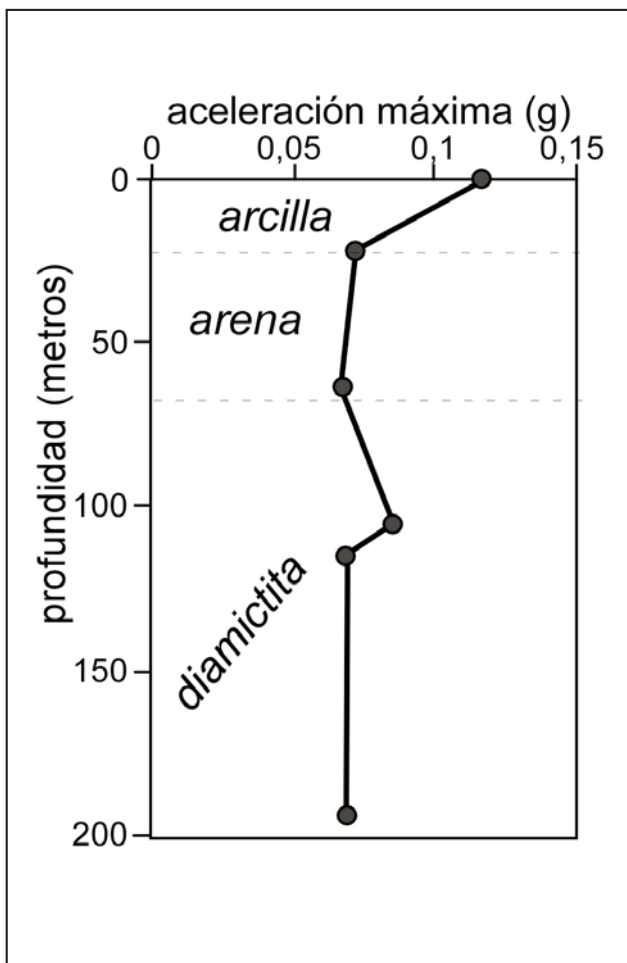


Figura 3. Resultado de la modelización con el programa EERA. El intervalo arcilloso superior, de 22 metros de potencia, es particularmente sensible a las vibraciones y amplifica considerablemente el movimiento sísmico. El intervalo con diamictita puede dar amplificación en partes.

## MODELIZACIÓN CON SELENA

SELENA se enfoca sobre dos de las posibles consecuencias de un terremoto, los daños a edificios y las lesiones a personas. La metodología implementada en SELENA está basada en la del programa HAZUS-MH (FEMA, 2003), una poderosa herramienta para el cálculo de riesgo de origen natural implementada por la agencia federal de emergencia ambiental de los EEUU (Federal Emergency Management Agency, FEMA). A diferencia de HAZUS-MH, cuyos resultados son estimaciones óptimas, SELENA trabaja con un esquema de árbol lógico y así toma en cuenta la indeterminación en los valores de ciertos parámetros. SELENA supone que el sustrato de las construcciones se comporta de modo elástico o plástico y no considera fenómenos de licuefacción.

Los datos de ingreso necesarios para operar con SELENA son aquellos que describen la fuente sismogénica y la atenuación de la energía sísmica con la distancia al epicentro, la cualidad sismorresistente y el valor monetario (por  $m^2$ ) de las construcciones, y cierta información demográfica. La secuencia operativa de SELENA se resume en el diagrama de flujo de la Figura 4. La estructura de árbol lógico permite que para una misma variable se ingresen valores diferentes, ponderados según la presunta influencia sobre el riesgo, con el propósito de abarcar la incertidumbre epistémica así como la variabilidad natural del fenómeno sísmico, y de factores económicos y sociales. En la Tabla 1 se describe el contenido de los archivos empleados en

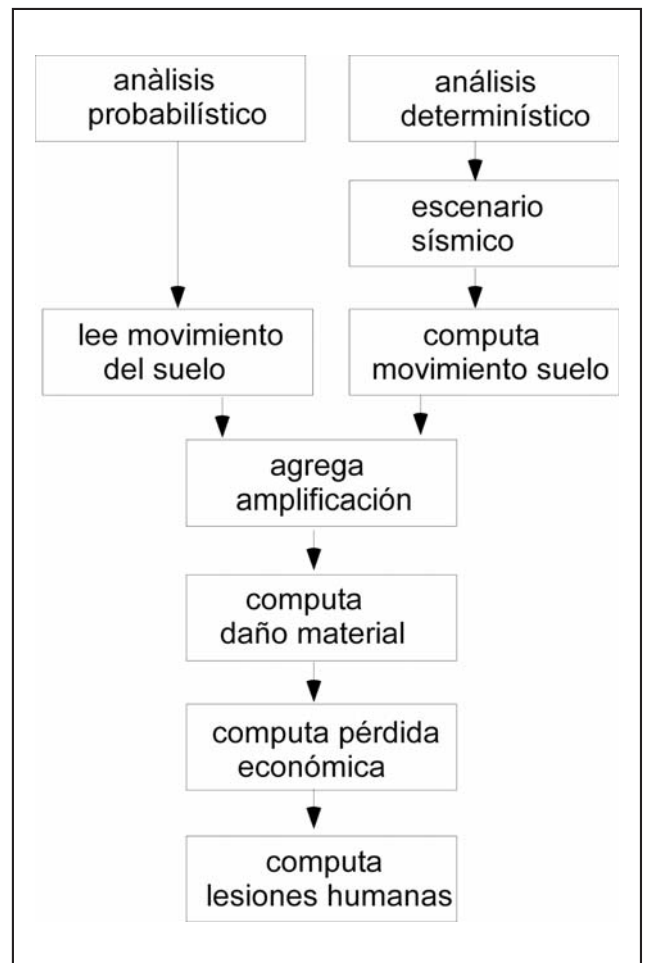


Figura 4. Diagrama de flujo que representa la secuencia operativa del programa SELENA.

este estudio. Los procesos de análisis probabilístico y determinístico se distinguen en que el determinístico calcula el valor de la aceleración del suelo en base a los datos de atenuación y sismicidad, mientras que el probabilístico lee esos valores de un archivo de entrada. Se corrieron dos simulaciones determinísticas y una probabilística.

#### Relación de atenuación sísmica

Las relaciones de atenuación sísmica se clasifican, según el contexto tectónico de los sismos en que se fundamentan, como : de continente estable, de subducción y de corteza tectónicamente activa (Douglas, 2011). El sector argentino de Tierra del Fuego, caracterizado por sismos someros en una situación alejada de una zona de subducción, califica en la última categoría. Las relaciones de atenuación propuestas por Boore y Atkinson (2008) y por Campbell y Bozorgnia (2003, 2008), están basadas en sismos intracorticales y con distancias al epicentro inferiores a unos 100 km, y son aplicables a la zona de interés. Se seleccionaron dos epicentros hipotéticos, uno coincidente con el sitio del 'foreshock' del 17/12/1949, a 120 km de Tolhuin, y el otro situado arbitrariamente 30 km al oeste de

Tolhuin. En ambos casos se adoptó  $M=7,8$ , magnitud registrada instrumentalmente en el pasado. Estos eventos representan una potencial actividad en el tramo transpresivo ('*restraining bend*') de la falla Magallanes-Fagnano. Para el epicentro lejano (120 km), las relaciones de Boore y Atkinson y de Campbell y Bozorgnia predicen similares valores de atenuación. Para el epicentro cercano (30 km), en cambio, las relaciones de Campbell y Bozorgnia (2003) y de Campbell y Bozorgnia (2008) predicen valores de atenuación respectivamente menores y mayores que la de Boore y Atkinson (2008) (Figura 5). Por simplicidad se optó por emplear la relación de Boore y Atkinson (2008) para ambos epicentros en el archivo 'attenuation.txt'. Esta relación emplea la distancia Joyner-Boore, o distancia mínima entre el sitio y el plano de ruptura. Para un sismo de  $M=7,8$ , el largo del plano de ruptura es de unos 160 km (cf., Wells y Coppersmith, 1994), y, debido al rumbo de la falla Magallanes-Fagnano respecto de Tolhuin, la distancia Joyner-Boore es considerablemente menor que la distancia epicentral: 73 km para el sismo lejano y 5 km para el cercano. Esto da valores de aceleración pico en suelo tipo D del orden de 0,51g para el sismo cercano y de 0,12g para el sismo lejano.

**Tabla 1. Archivos con datos de ingreso. Aquellos identificados con \* se emplean únicamente en el análisis determinístico y aquellos identificados con \*\* únicamente en el análisis probabilístico; los demás son comunes a ambos tipos de análisis. (i comodín, PGA Peak Ground Acceleration, Sa0,3 aceleración espectral para período 0,3 segundos, Sa1,0 aceleración espectral para período 1 segundo).**

soilfiles.txt	refiere a los archivos soilcenteri.txt; puede incluirse más de un archivo con ponderación relativa
soilcenteri.txt	coordenadas del centro de cada sector en que se dividió la ciudad y el tipo de suelo dominante en esa zona (clasificación del NEHRP, National Earthquake Hazards Reduction Program; ver texto); ponderación relativa
vulnerability.txt	refiere al conjunto de 2 archivos: capacityi.txt y fragilityi.txt; puede incluirse más de un conjunto con ponderación relativa
capacityi.txt	parámetros para calcular el límite de resistencia elástica a la deformación horizontal de un edificio (tomados de FEMA, 2003)
fragilityi.txt	parámetros para calcular la probabilidad de que el valor de la deformación horizontal de un edificio caiga dentro de un cierto nivel de daño, o lo supere (tomados de FEMA, 2003)
ecfiles.txt	refiere al conjunto de 4 archivos: elosssdi.txt, elossmdi.txt, elosseddi.txt, y elosscdi.txt; puede incluirse más de un conjunto ponderación relativa
eloss_i.txt	costo monetario estimado, por m <sup>2</sup> de construcción, para reparar o reemplazar el daño estructural
builtarea.txt	superficie en m <sup>2</sup> que ocupa cada uno de los tipos estructurales de edificación considerados en la simulación
numbuild.txt	número de edificios de cada tipo estructural considerado en la simulación
ocupmbti.txt	m <sup>2</sup> adjudicados a cada una de las categorías de uso en cada uno de los tipos estructurales de edificación considerados en la simulación
population.txt	número de habitantes en cada sector en que se dividió la ciudad
poptime.txt	proporción de la población que se encuentra fuera o dentro de un edificio según las franjas horarias matutina (10 horas), vespertina (17 horas) y nocturna (2 horas) y el tipo de ocupación de cada edificio
ocupmbtp.txt	distribución de la población entre los distintos tipos estructurales de edificación
injuryi.txt	número de lesionados y muertes, según el nivel de daño estructural, para cada uno de los tipos estructurales de edificación, clasificado por gravedad de las lesiones; valores tomados de tablas 13.3 a 13.7 en FEMA (2003)
debris.txt	toneladas/100 m <sup>2</sup> de escombros según tipo de construcción; tabla 12.1 en FEMA (2003)
earthquake.txt*	máximo terremoto considerado: coordenadas del epicentro, magnitud, rumbo e inclinación de la falla asociada, y profundidad al foco
attenuation.txt*	relaciones de atenuación empleadas para estimar PGA, Sa0,3 y Sa1,0; ponderación relativa
shakefiles.txt**	refiere a los archivos shakecenteri.txt; puede incluirse más de un archivo con ponderación relativa
shakecenteri.txt**	valores de PGA, Sa 0,3 seg y Sa 1,0 seg para cada sector

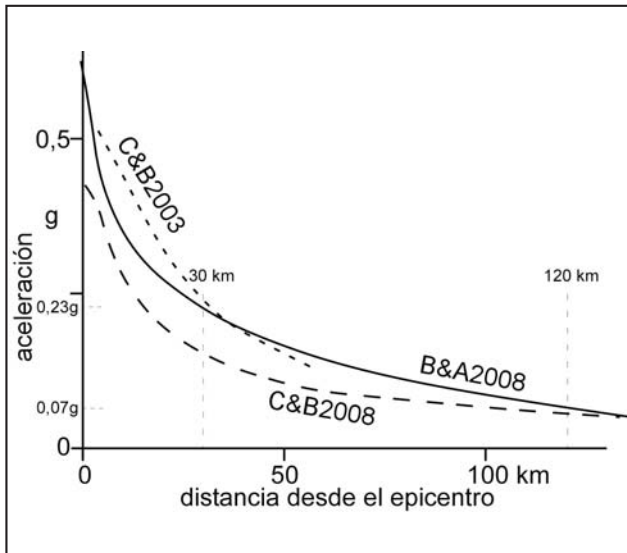


Figura 5. Relaciones de atenuación de Campbell y Bozorgnia (2003; C&B2003), Campbell y Bozorgnia (2008; C&B2008) y Boore y Atkinson (2008; B&A2008), graficadas en entorno OpenSHA (Field et al., 2003), con  $V_{s30}=300$  m/seg<sup>2</sup>. La aceleración del suelo está dada en fracciones de la aceleración de la gravedad, g.

### Microzonificación sísmica

La microzonificación sísmica consiste en subdividir el área urbana en sectores distintivos, ya sea por el tipo dominante de edificación, por la naturaleza geotécnica del sustrato, por la densidad de población, u otro factor de interés en el cómputo del riesgo. La zona urbana de Tolhuin fue dividida en diecisiete sectores (Figura 6). Los sectores 2, 3, 4, y 7 comprenden el casco céntrico y comercial, el sector 13 es predominantemente industrial, y los demás son mayormente residenciales. Los sectores 1 a 5, y 7 a 13, ocupan terreno alto, a cotas entre 60 y 90 m sobre el nivel del lago Fagnano. El sector 12 comprende un barrio de casas gemelas, aislado del resto de la urbanización. Los sectores 6 y 14 a 17 ocupan el faldeo que desciende hasta la playa de grava sobre el lago Fagnano, y comprende principalmente viviendas y cabañas turísticas. Para cada sector se estimó la población, el tipo de edificación, el número de edificios de cada tipo y la superficie ocupada por cada tipo de edificación.

### Población e infraestructura edilicia

El censo 2010 estimó la población de Tolhuin en 2400. Para el presente estudio se supuso un leve incremento en la población, a 2500 habitantes, desde la fecha del censo. Las ocupaciones dominantes son asalariados en establecimientos productivos mayormente ligados a la industria maderera, empleados públicos, y proveedores de servicios varios.

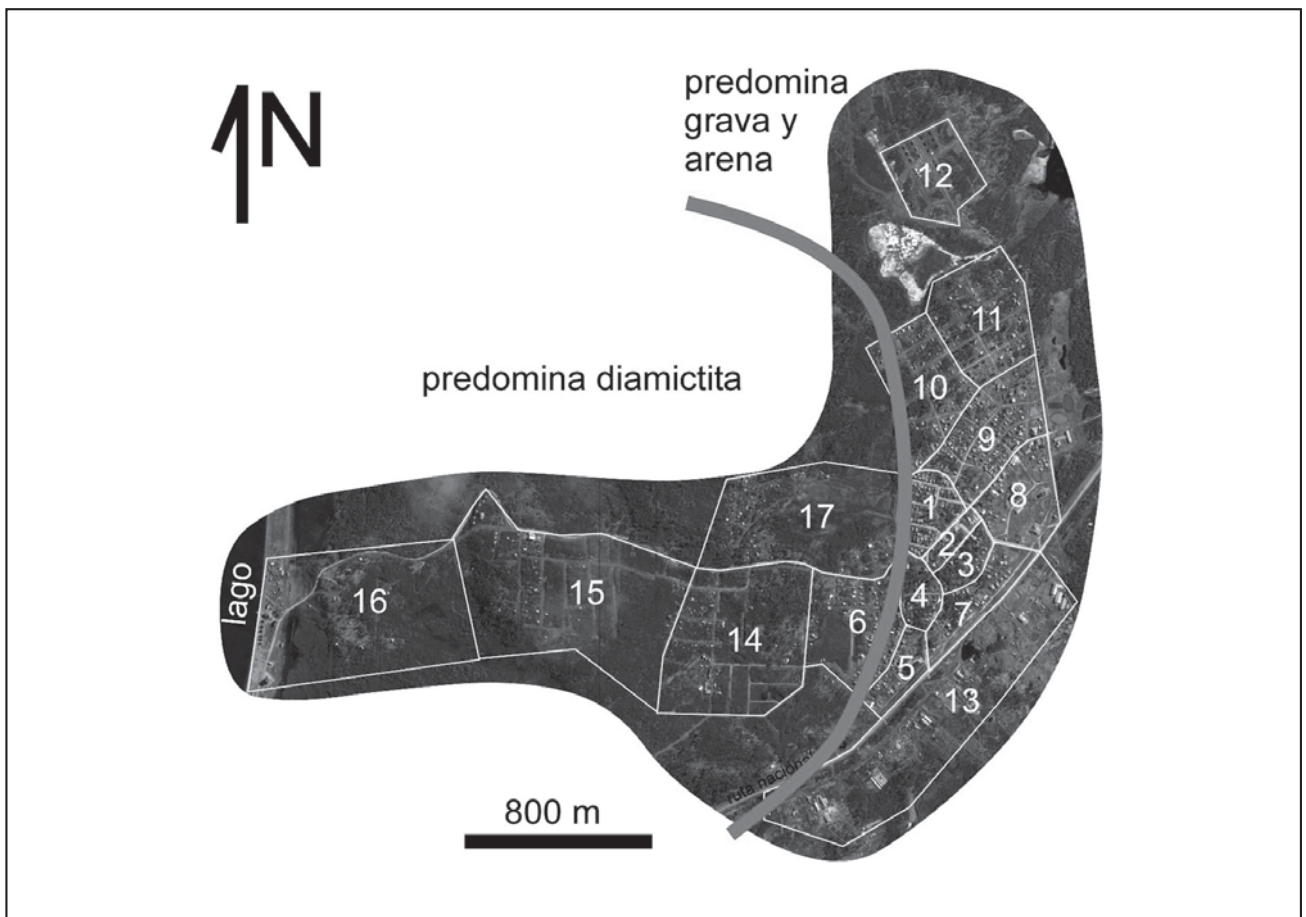


Figura 6. Imagen de Google Earth de la urbanización de Tolhuin con la división en sectores y la distribución de los principales tipos de sustrato. Al oeste de la línea naranja el sustrato dominante es una diamiclita arcillosa, mientras que al este domina grava y arena, con estratos de arcilla.

La urbanización de Tolhuin es relativamente joven, en general tiene menos de 20 años. Una pequeña fracción de las construcciones, menos del 10% en número, comprende escuelas, centros comunitarios (biblioteca, iglesias), centros de salud, sedes del gobierno y de las fuerzas de seguridad (bomberos, policía) y conjuntos de viviendas económicas. La construcción de estos edificios fue gerenciada por entes gubernamentales como el Instituto Provincial de la Vivienda (IPV) y el Ministerio de Educación, y es razonable suponer que se adecuan a las normas de sismorresistencia INPRES-CIRSOC 103. El resto de las edificaciones, mayormente viviendas familiares y galpones de chapa, que constituyen la mayor parte del inventario edilicio es posible que no cumplan plenamente con dichas normas.

El número total de edificios en Tolhuin se estimó en 1240, con una superficie construida de alrededor de 135.000 m<sup>2</sup>. Estos valores se obtuvieron de la inspección de una imagen de Google Earth de 2006 y de estimaciones del censo 2010. El número de edificios y la superficie construida por sector y por tipo estructural se incluyeron en los archivos 'builtarea.txt' y 'num-build.txt'.

El inventario edilicio se llevó a cabo de manera expeditiva por observaciones de terreno. Ante un evento sísmico, el daño que puede afectar un edificio depende esencialmente de la altura, de los materiales que lo componen, y del diseño estructural, condiciones que varían notoriamente entre edificios. Los edificios en Tolhuin son de una planta en más del 95% de los casos. El manual *FEMA 154 (2002)* contiene una tipología

edilicia apropiada para una inspección visual expeditiva, tipología que fue adoptada en SELÉNA. Empleando esta tipología, las construcciones en Tolhuin se han agrupado en tres grandes tipos estructurales: hormigón, metal y madera. Entre las estructuras de hormigón se distinguen dos subtipos: C1L, vigas, columnas, pisos y paredes de hormigón armado (Figura 7A) y C3L, paredes de mampostería no reforzada, con columnas y vigas de hormigón armado (Figura 7B). Entre las metálicas se distinguen: S3, paredes y techo de chapa, y S5, techo y piso en metal o hormigón y paredes de mampostería. Sólo se reconoció un tipo de estructura en madera, W1, con base de losa o de madera (Figura 7C). Un tipo adicional, URML, consiste de paredes de mampostería no reforzada, y techo de madera o chapa, con o sin losa.

Las construcciones de madera (W1), mayormente viviendas familiares pero también algunos comercios, comprenden un 4% en superficie, y un 7% del número total de construcciones. Este tipo es más común sobre el faldeo que desciende al lago Fagnano. Las estructuras metálicas (S3 y S5; 16% en superficie y 6% en número) corresponden a los numerosos galpones, concentrados al este de la ruta 3. Las construcciones C1L (7% en superficie y 6% en número) comprenden la mayor parte de los edificios públicos construidos por organismos nacionales y de las viviendas construidas por el IPV, y las C3L (70% en superficie y 78% en número) corresponden principalmente a viviendas familiares y a locales comerciales. Las construcciones no reforzadas (URML; 3% en superficie y en número) son viviendas precarias.



Figura 7. Ejemplos de los principales tipos edilicios en Tolhuin. A - Escuela (C1L). B - Vivienda de mampostería (C3L). C - Vivienda de madera (W1).

De acuerdo al uso, o modo de ocupación, que se hace de ellos, los edificios se clasificaron en: residencial (casas separadas, condominios, hospedajes; RES), comercial (locales comerciales, estación de servicio, restaurante/bar; COM), industrial (industria liviana, como aserraderos; IND), religioso (iglesias; REL), gubernamental (sedes del poder político y de servicios como hospitales; GOV), y educativo (escuelas, bibliotecas; EDU), y se estimó sobre el terreno la proporción de la superficie construida que ocupa cada uno de estos usos (archivo 'ocupmbti.txt'). Estos datos son relevantes para estimar el riesgo para las personas según la hora en que ocurre un sismo. En el horario nocturno, las 2 horas, el sismo afectará preferencialmente a personas en edificios de uso residencial, mientras que en el horario diurno, 10 horas, la mayor parte de la población estará en sus lugares de trabajo y estudio. La simulación supone que el 98% de la población está en residencias permanentes en el horario nocturno, contra 10% en el horario matutino.

### Sismorresistencia

Las vibraciones sísmicas imponen una demanda sobre la capacidad de una estructura para resistir los esfuerzos horizontales que puedan causar una deformación permanente en ella. Esa capacidad puede representarse mediante curvas de capacidad espectral, o espectros de capacidad (ATC-40, 1996). De modo simplificado, y en un espacio aceleración-desplazamiento horizontal, una curva de capacidad espectral queda definida por el origen, un punto de cedencia, o de fluencia (Ay, Dy) y un punto de resistencia última (Au, Du), que precede al colapso (Figura 8A). Entre el origen y el punto de cedencia se supone que la estructura se comporta de modo elástico, y que pasado ese punto lo hace de modo plástico. En rigor, la curva representa el comportamiento promedio ponderado de los numerosos componentes estructurales de un edificio, cada uno de los cuales responde a los esfuerzos de modo particular.

La sismorresistencia de cada uno de los tipos estructurales reconocidos en Tolhuin se representó mediante curvas de capacidad espectral, con parámetros tomados de tablas en FEMA (2003), e incorporados en los archivos 'capacity.txt' de SELENA. FEMA (2003) agrupa las curvas de capacidad en cuatro clases, según el grado de adecuación a las normas de edificación sismorresistente actualmente vigentes en los Estados Unidos: (a) 'pre-code' – aquellas que mayormente describen edificaciones antiguas, previas a la implementación generalizada de las normas edilicias de sismorresistencia, (b) 'low-code' y (c) 'moderate-code' – curvas representativas de construcciones que cumplen con algunos de los preceptos de la sismorresistencia, y (d) 'high-code' – aquellas propias de edificios modernos, adecuados a las normas más estrictas. En la Figura 8 se grafican curvas de capacidad espectral para las tres tipologías edilicias simuladas para Tolhuin. Se trata de curvas promedio, que se aplican a un conjunto edilicio con características estructurales similares y no a edificaciones individuales.

En la simulación con SELENA se supuso que todas las construcciones en Tolhuin cumplen con al menos algunas de las normas sismorresistentes, es decir, están por encima del nivel 'pre-code'. Las viviendas precarias, del tipo edilicio URML, probablemente clasifiquen como 'pre-code', pero debido a su baja representatividad, en la simulación de daños fueron incluidas en la categoría 'low-code', de la tipología en hormigón. Los edificios públicos probablemente cumplen plenamente con la reglamentación INPRES-CIRSOC 103, y califican para curvas 'high-code'. El resto de las construcciones se distribuye en

las categorías 'low-code' y 'moderate-code'. En la simulación se recurrió a una estructura de árbol lógico, empleando tres archivos de capacidad, respectivamente con probabilidades 50% 'low-code', 40% 'moderate-code' y 10% 'high-code'; las tres tipologías edilicias fueron representadas por los espectros de capacidad C1L (hormigón), W1 (madera) y S3 (metal).

### Espectros de diseño

Las vibraciones del suelo se transfieren a las estructuras, generando en éstas aceleraciones, velocidades y desplazamientos que pueden inducir deformaciones más o menos destructivas, y que dependen fuertemente del período de la vibración y también de las propiedades geotécnicas del sustrato. El espectro de diseño es una adecuada representación de este fenómeno. El espectro de diseño puede representarse en un espacio aceleración espectral, Sa(g), versus desplazamiento horizontal, Sd(m). La Figura 8 muestra espectros de diseño Sa/Sd para suelo tipo D: "Suelo cohesivo consistente, de baja plasticidad. Gravillas y/o arenas de baja densidad" (Tabla 2.2 en INPRES-CIRSOC 103, 2003), que se considera representativo del potente espesor de gravas, arenas y pelitas que subyace Tolhuin, y para niveles de aceleración correspondientes a las zonas sísmicas 2 y 4 definidas en INPRES-CIRSOC 103 (2013).

### Punto de desempeño

La intersección en el plano Sa/Sd de un espectro de capacidad y un espectro de diseño define un punto de desempeño (Figura 8A). Este punto permite estimar la capacidad de una determinada estructura para resistir una demanda sísmica dada, es decir, el valor de desplazamiento máximo que podrá soportar. SELENA calcula estos valores para cada tipología edilicia y con ellos inspecciona las curvas de fragilidad, o de vulnerabilidad edilicia, pertinentes para esa tipología, contenidas en el archivo 'fragility(i).txt', con el fin de calcular la probabilidad de que el edificio alcance, o exceda, un determinado nivel de daño: nulo, leve, moderado, extenso y total. El punto de desempeño resulta de un proceso iterativo, método del espectro de capacidad ('Capacity Spectrum Method', ATC-40, 1996), que involucra un progresivo aumento del amortiguamiento del espectro de demanda. En la Figura 8A se ilustra el concepto empleando la intersección con el espectro elástico, 5% de amortiguamiento.

### Valuación de los daños materiales y humanos

El costo monetario por daños edilicios, definido en los archivos 'loss\_i.txt', se estimó en base a la superficie cubierta, suponiendo un costo de construcción por m<sup>2</sup> de \$4.000 para edificios de madera (W1) y de \$5.000 para el resto. SELENA estima los perjuicios a las personas, expresados como heridas leves a mortales. La información necesaria está incluida en los cuatro archivos 'injury(i).txt', que corresponden a cuatro niveles de gravedad de lesiones: 1 - heridas leves, 2 - heridas que requieren atención profesional pero sin peligro de vida, 3 - heridas que hacen peligrar la vida, y 4 - heridas mortales. Para estimar este tipo de daños se empleó la rutina en SELENA 'Basic methodology'.

### RESULTADOS

Se corrieron sendas simulaciones determinísticas para el epicentro lejano y el cercano, y una simulación probabilística combinando ambos epicentros. En los tres casos se aplicó un árbol lógico con tres ramas de espectros de capacidad: 'low-code', 'moderate-code' y 'high-code', ponderados al 50, 40 y

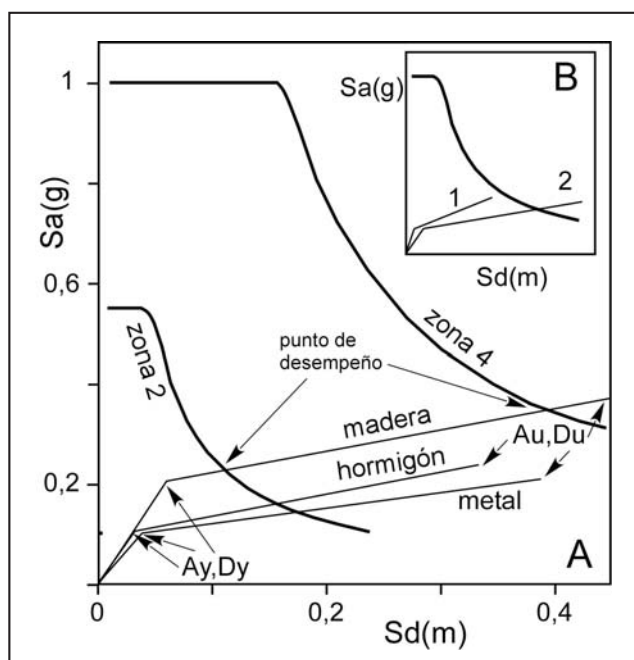


Figura 8. A. Espectros de diseño sísmico en formato aceleración-desplazamiento para las zonas 2 y 4, construidos según normas en INPRES-CIRSOC 103 (2013); corresponden a suelo tipo D, moderadamente dúctil. Se grafican también las curvas de capacidad espectral 'low-code' para las tres tipologías edilicias simuladas para Tolhuin, con parámetros tomados de Molina et al. (2014). Se indican los puntos de desempeño iniciales, sobre los espectros de demanda elástica. B. Definición de sismorresistencia. La hipotética demanda sísmica excede la resistencia última del edificio representado por el espectro de capacidad 1, el cual probablemente colapsaría; en cambio, el espectro de capacidad 2 sí resistiría dicha demanda sin colapsar.

10%. La Tabla 2 resume los resultados para daños edilicios por metro cuadrado y en pesos, según el tipo de edificación y la naturaleza geotécnica del sustrato, para cada sector urbano. Sólo se presentan los porcentajes de construcciones que habrían sufrido daños entre moderado y colapso total. En el caso del sismo lejano, entre 1 y 8% de las construcciones sufrirían daños moderados y mayores, y las pérdidas materiales serían relativamente poco onerosas, de unos pocos millones de pesos (Tabla 2, columna 6). En el caso del sismo cercano, entre el 45 y el 88% de la superficie edificada sufriría daños moderados y mayores, con pérdidas materiales valuadas en más de 100 millones de pesos (Tabla 2, columna 7). Las construcciones en madera surgen como las menos afectadas en ambos escenarios. Las estructuras en metal aparecen como levemente menos resistentes a la deformación que las de hormigón para vibraciones moderadas, pero más resistentes para vibraciones fuertes. La modelización probabilística sugiere pérdidas monetarias intermedias, de entre 1 y 11 millones de pesos por sector urbano (Tabla 2, columna 8). En general, los sectores urbanos que apoyan sobre suelo blando, tipo 4 (diamictita arcillosa), se verían más afectados. La simulación resultó en una baja probabilidad de heridos y víctimas fatales. En el caso del sismo cercano, en el sector 6, con una población estimada en 400 personas, habría menos de cinco heridos leves en el horario nocturno (2 horas), y menos de uno en el horario matutino (10 horas).

## DISCUSIÓN

La diversidad geotécnica del sustrato en Tolhuin constituye un factor importante en la vulnerabilidad. La diamictita que subyace el faldeo posiblemente esté suficientemente compactada como para no contribuir significativamente a la amplificación, excepto en ciertos tramos. Aun así, el mayor daño potencial estaría parcialmente contrarrestado por la baja densidad de construcciones. La unidad arcillosa superior, en cambio, es propensa a amplificar las vibraciones sísmicas del suelo superficial. La estimación con EERA indica una potencial amplificación por un factor 2, con este valor la aceleración pico para el epicentro lejano podría alcanzar 0,13 g, y para el epicentro cercano 0,55 g, ambos valores potencialmente dañinos.

El Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) ha establecido la zonificación sísmica para la Argentina con cinco niveles de peligrosidad, 0 el más bajo a 4 el más alto, y en base a dicha zonificación determina la rigurosidad de la aplicación de las normas de sismorresistencia (INPRES-CIRSOC 103, 2013). Tierra del Fuego comprende tres zonas, 1, 2 y 3, de intensidad creciente hacia el oeste-sudoeste, y orientadas con rumbo NNO-SSE (Figura 9A). Tolhuin está situado en zona 2, definida como de peligrosidad moderada, y caracterizada por una aceleración máxima del suelo de 0,18 g (INPRES-CIRSOC 103, 2013). La orientación NNO-SSE de las zonas sísmicas en Tierra del Fuego refleja la adopción de un modelo tectónico donde la principal fuente sismogénica se encuentra sobre la margen del continente sudamericano que linda con el océano Pacífico. Este modelo es válido al norte de la dorsal de Chile (ca 52°S) donde la sismicidad está dominada por la rápida convergencia de la placa de Nazca, a una velocidad de 8 cm/año. Al sur de esa dorsal, la placa Antártica converge a una velocidad baja de 2,4 cm/año y genera una sismicidad débil (Barrientos, 2007) que no implica amenaza de daño para el sector argentino de Tierra del Fuego, distante más de 200 km de esa zona de subducción en distancia horizontal y posiblemente más de 80 km en distancia vertical hasta la zona de Benioff.

Para la Tierra del Fuego argentina la única fuente sismogénica de interés es la falla Magallanes-Fagnano (González Bonorino et al., 2012). Empleando el programa OpenSHA (Field et al., 2003) se calculó la distribución probabilística de aceleraciones del suelo referidas a la falla Magallanes-Fagnano. En la modelización se supuso que cada punto sobre la traza de la falla tiene igual probabilidad de generar un sismo de magnitud  $M=8$ . Con este modelo tectónico, la zonación sísmica es paralela y simétrica a la traza de la falla (Figura 9B), y Tolhuin queda situado en la zona 4 de peligrosidad sísmica, caracterizada por una aceleración pico del suelo de 0,35 g (INPRES-CIRSOC 103, 2013). La peligrosidad sísmica para Tolhuin es, pues, similar a la de San Juan con el terremoto de 1944 ( $M=7,4$ ) y de Cauce en 1977 ( $M=7,5$ ).

Las curvas espectrales 'low-code' para tipologías en madera, hormigón y metal intersectan la rama descendente del espectro de zona 2 para suelo tipo D en sus sectores plásticos (Figura 8A). Esto implica que probablemente sufrirían deformación permanente, pero sin llegar al colapso, en el caso de un sismo moderado. Si se diera un sismo fuerte, propio de zona sísmica 4, sin embargo, las construcciones 'low-code' en hormigón y metal alcanzarían condiciones de colapso; sólo las de madera podrían resistir las deformaciones asociadas. Estos resultados remarcan la necesidad de ejecutar un relevamiento geotécnico más detallado y una inspección rigurosa de la calidad sismorresistente de las construcciones existentes en Tolhuin,

Tabla 2. Porcentaje de daños edilicios de gravedad moderada a total, según sector (columna 1), tipo de suelo (columna 2), y tipo de construcción (columnas 3 a 5) para el epicentro lejano (L) y cercano (C), de acuerdo con la modelización determinística. Las columnas 6 a 8 dan una estimación del valor monetario de los daños materiales según la modelización determinística (columnas 6 y 7), y probabilística (MP, columna 8).

1	2	Modelización determinística								MP 8	
		3		4		5		6			7
		Madera (W1)		Metal (S3/S5)		Hormigón (C1L, C3L)		millones de \$			
		L %	C %	L %	C %	L %	C %	L	C	millones de \$	
1	4	2,5	58	7,3	79	5,7	86	0,9	50	11	
2	4	2,5	59	7,5	79	5,7	86	0,2	9	2	
3	4	2,5	59	-	-	5,6	86	0,2	9	1,9	
4	3	-	-	3,6	66	2,1	74	0,1	8	1,4	
5	3	1,0	45	3,6	68	2,1	76	0,1	10	2	
6	4	-	-	7,6	77	5,7	84	0,6	31	7	
7	3	1,0	49	3,6	72	2,1	79	0,1	9	1,4	
8	3	-	-	3,5	69	2,1	77	0,2	22	3,3	
9	3	1,0	46	3,6	68	2,1	76	0,4	37	6	
10	3	-	-	3,7	68	2,1	76	0,2	17	2,7	
11	3	-	-	4,0	66	2,1	74	0,03	3	4,8	
12	3	-	-	-	-	2,1	72	0,1	9	1,7	
13	4	-	-	7,5	79	5,5	85	0,7	20	4,6	
14	4	2,5	58	7,8	79	5,8	85	0,2	9	2	
15	4	2,6	59	8,0	80	6,0	86	0,2	8	1,8	
16	4	2,8	63	-	-	6,2	88	0,1	5	1	
17	4	2,5	60	-	-	5,8	86	0,2	8	1,8	

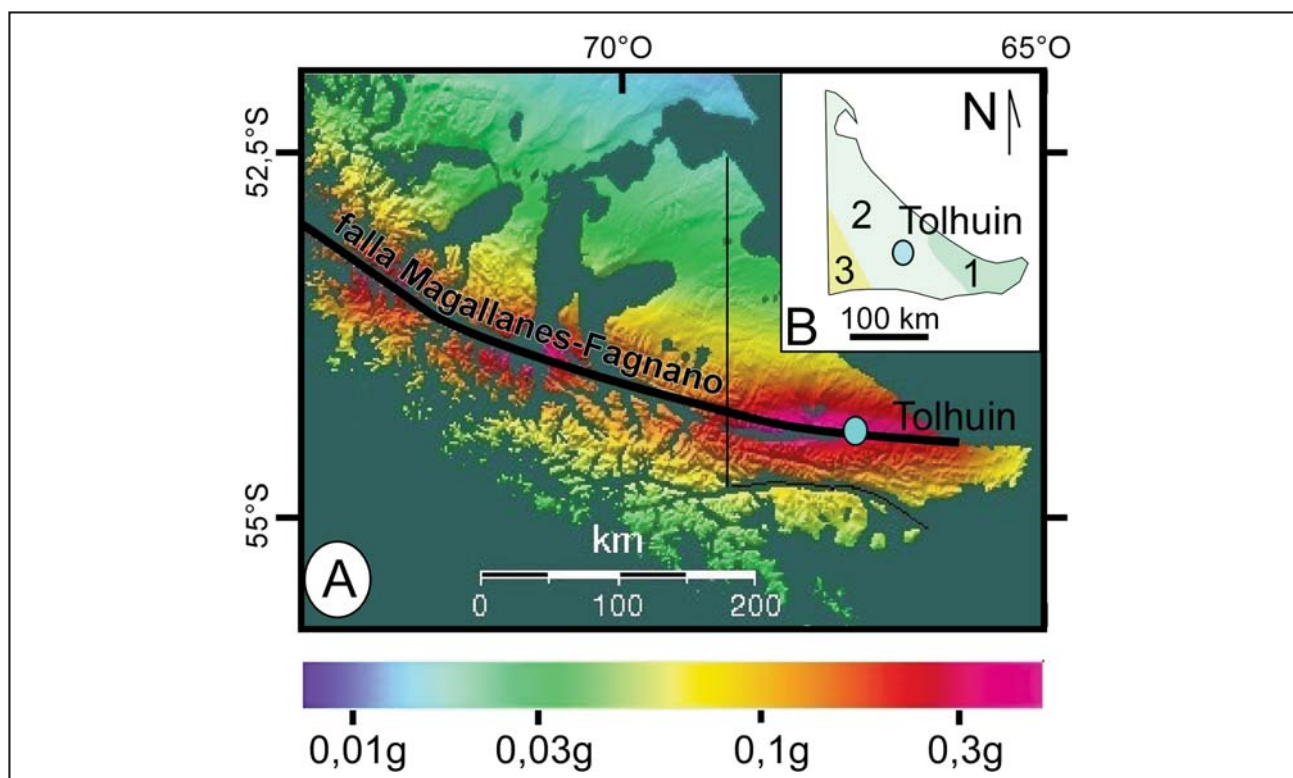


Figura 9. A - Zonificación sísmica basada en la falla Magallanes-Fagnano como fuente sismogénica. Modelización con el programa OpenSHA. B - Zonificación sísmica para Tierra del Fuego tomada de la Figura 2.1 en INPRES-CIRSOC 103 (2013).



con el fin de detectar las construcciones deficientes en sismo-resistencia y adecuarlas a niveles 'moderate-code' o 'high-code', según sea su destino de ocupación. Además, sugiere la conveniencia de adecuar las normas de construcción en Tierra del Fuego para adaptarlas a zona sísmica 4 del INPRES. Este cambio tendría un efecto mayor sobre Tolhuin, el municipio con menor población de los tres, y un efecto mediano en Ushuaia y Río Grande. Ushuaia dista 30 km de la falla Magallanes-Fagnano, y la urbanización apoya mayormente sobre roca y suelo firme, por lo cual es dable esperar una aceleración pico de 0,14g, aproximadamente, adecuada para zona 2, clasificación que ocupa actualmente. Queda por evaluar una posible amplificación local por efecto de la topografía para construcciones en las laderas. Río Grande dista 80 km de la falla Magallanes-Fagnano y está clasificada actualmente en zona 1, definida por una aceleración pico de 0,09 g (INPRES-CIRSOC 103, 2013). La urbanización asienta sobre suelo firme y muy firme, posiblemente tipo C, con  $V_{s30}=500$  m/seg<sup>2</sup>, aproximadamente. Estas condiciones geotécnicas y la distancia permiten estimar la aceleración pico esperable en Río Grande en el orden de 0,09g, es decir, zona 1.

### CONCLUSIONES

La información sísmológica regional indica que el modelo sismotectónico basado en la zona de subducción que bordea Chile, modelo adoptado en la Figura 2.1 de INPRES-CIRSOC 103 (2013), no es aplicable al sector argentino de la Tierra del Fuego. La zonificación sísmica para Tierra del Fuego debe

seguir un modelo sismotectónico basado en la falla Magallanes-Fagnano, el cual resulta en zonas sísmicas orientadas aproximadamente este-oeste. En esta situación, la amenaza sísmica para Tolhuin puede ser superior a la actual zona 2, y aun alcanzar zona 4 del esquema del INPRES. Estudios previos habían establecido que la amenaza sísmica para Tolhuin es elevada. El presente estudio expeditivo indica que la exposición a esa amenaza es moderadamente elevada, en virtud de la baja densidad de población y el bajo valor medio de las instalaciones. E indica también que la vulnerabilidad varía entre moderada y alta, condicionada principalmente por la potencial amplificación sísmica en el suelo blando y por la probable insuficiencia en el cumplimiento de las normas de sismo-resistencia edilicia.

Los resultados de este estudio ponen de manifiesto la conveniencia de ejecutar un relevamiento geotécnico más detallado y una tipificación más rigurosa de la cualidad sismo-resistente de las construcciones existentes, acciones necesarias para disminuir el riesgo sísmico para Tolhuin.

### AGRADECIMIENTOS

Los fondos para el desarrollo de este estudio fueron aportados por el Consejo Federal de Ciencia y Tecnología a la Dra. Abascal a través del PFIP 2005, Convenio N° 63, y del PFIP 2007, Convenio n° 74. Las imágenes ASTER DEM fueron obtenidas de <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. Agradecemos la lectura crítica de este manuscrito por el Dr. Sergio Molina Palacios (Universidad de Alicante, España).

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ABASCAL, L. DEL V. Y GONZÁLEZ-BONORINO, G., 2008.  
Seismic risk associated with the Magallanes-Fagnano continental transform fault, Tierra del Fuego, Southern Argentina. *7th International Symposium on Andean geodynamics (ISAG 2008, Nice), Extended Abstracts*, p. 13-16.
- ABASCAL, L.; GONZÁLEZ BONORINO, G.; BUJALESKY, G.G.Y COTO, C., 2012.  
Efecto amplificador del suelo en la exposición al peligro sísmico de Tolhuin, Tierra del Fuego, Argentina. *Revista de ASAGAI*, Vol. 28: 45-56.
- ATC-40, 1996.  
Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Volume 1. *Applied Technology Council, Report No. SSC 96-01, 346 p., California.*
- BARDET, J.P.; ICHII, K. Y LIN, C.H., 2000.  
EERA - A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits. *Department of Civil Engineering, University of California.*
- BARRIENTOS, S.E., 2007.  
Earthquakes in Chile. En: Moreno, T., y Gibbons, W. (eds) *The geology of Chile. The Geological Society of London, London, p. 263-289.*
- BOORE, D.M. Y G.M. ATKINSON, 2008.  
Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, Vol. 24(1): 99-138.
- BRADLEY J.; ZOLTAN, H. Y ARNFINN, P., 1998.  
Shear-wave studies in glacial till. *Geophysics*, Vol. 63(4): 1273-1284.
- BUFFONI, C.; SABBIONE, N.C.; CONNON, G. Y HORMAECHEA, J.L., 2009.  
Localización de hipocentros y determinación de su magnitud en Tierra del Fuego y zonas aledañas. *Geoacta*, Vol. 34: 75-86, Buenos Aires.
- CAMINOS, R., 1980.  
Cordillera Fueguina. *En: Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional Ciencias, Córdoba, Vol. 2: 1463-1501.*

- CAMPBELL, K.W. Y BOZORGNIA, Y., 2003.  
Updated near-source ground motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra.  
*Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93(1): 314-331.
- CAMPBELL, K.W. Y BOZORGNIA, Y., 2008.  
NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10s.  
*Earthquake Spectra*, Vol. 24(1): 139-171.
- CFI, 1996.  
Estudio sobre provisión de agua para la Comuna de Tolhuin.  
*Programa de Desarrollo de Pequeñas Comunidades, Consejo Federal de Inversiones*, 17 p.
- CORONATO, A.; SEPPALA, M.; PONCE, J.F. Y RABASSA, J., 2009.  
Glacial geomorphology of the Pleistocene Lake Fagnano ice lobe, Tierra del Fuego, southern South America.  
*Geomorphology*, Vol. 112: 67-81.
- DEMETS, C.; GORDON, R.G.; ARGUS, D.F. Y STEIN, S., 1990.  
Current plate motions.  
*Geophysical Journal International*, Vol. 10: 425-478.
- DIRAISON, M.; COBBOLD, R.; GAPAIS, D.; ROSSELLO, E.A. Y LE CORRE, C., 2000.  
Cenozoic crustal thickening, wrenching and rifting in the foothills of the southernmost Andes.  
*Tectonophysics*, Vol. 316: 91-119.
- DNV, 2004.  
Informe de Ingeniería, IIIa2. Capítulo 1, Suelos y materiales. Ruta Khamy-Kosobo.  
*Dirección Nacional de Vialidad*, 78 p., Buenos Aires.
- DOUGLAS, J., 2011.  
Ground-motion prediction equations 1964-2010.  
*PEER Report 2011/102, Pacific Earthquake Engineering Research Center. College of Engineering, University of California, Berkeley*, 455 p.
- ESTEBAN, F.D.; TASSONE, A.; LODOLO, E.; MENICETTI, M.; LIPPAI, H.; WALDMANN, N.; DARBO, A.; BARADELLO, L. Y VILAS, J.F., 2014.  
Basement geometry and sediment thickness of Lago Fagnano (Tierra del Fuego).  
*Andean Geology*, Vol. 41(2): 293-313.
- FEMA 154, 2002.  
Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards.  
*Washington, D.C., USA*.
- FEMA, 2003.  
Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model-Hazus®-MH 2.0, Technical Manual.  
*Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, Mitigation Division*, 736 p., Washington, D.C.
- FIELD, E.H.; JORDAN, T.H. Y CORNELL, C.A., 2003.  
OpenSHA: A Developing Community-Modeling Environment for Seismic Hazard Analysis.  
*Seismological Research Letters*, Vol. 74(4): 406-419.
- GOMEZ, F.; NEMER, T.; TABET, C.; KHALIE, M.; MEGHRAOUI, M. Y BARAZANGI, M., 2007.  
Strain partitioning of active transpression within the Lebanese restraining bend of the Dead Sea Fault (Lebanon and SW Syria).  
*En Cunningham, W.D. y Mann P. (eds) Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends, Geological Society, Special Publication 290*, p. 285-303.
- GONZÁLEZ BONORINO, G.; RINALDI, V.; ABASCAL, L. DEL V.; ALVARADO, P.; BUJALESKY, G.G. Y GÜELL, A., 2012.  
Holocene paleoseismicity in southern Patagonia (Argentina-Chile; 52°-55°S); the role of the Magallanes-Fagnano transform fault.  
*Journal of Natural Hazards*, Vol. 61(2): 337-349.
- INPRES-CIRSOC 103, 2013.  
Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes.  
*Parte I. Construcciones en general. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires*, 87 p.
- JASCHEK, E.; SABBIONE, N. Y SIERRA, P., 1982.  
Reubicación de sismos localizados en territorio argentino (1920-1963).  
*Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de La Plata, Serie Geofísica. Vol. XI, No 1*, 79 p.

- KANAMORI, H. Y ALLEN, C.R., 1986.  
 Earthquake repeat time and average stress drop.  
*En Das, S.; Boatwright, J. y Scholz, C.H. (eds) Earthquake source mechanics, Issue 7. AGU Geophysical Monograph 37, Maurice Ewing Volume 6, p. 227-236.*
- KLEPEIS, K.A., 1994.  
 The Magallanes and Deseado fault zones: major segments of the South American-Scotia transform plate boundary in southernmost South America, Tierra del Fuego.  
*Journal of Geophysical Research, Vol. 99: 22001-22014.*
- LAKEFIELD RESEARCH, 2000.  
 Geomorfología. Subárea este del lago Fagnano, provincia de Tierra del Fuego.  
*PASMA II - Zona Sur, Plano N° TFTF-3-GM2A.*
- LAWRENCE, J.F. Y WIENS, D.A., 2004.  
 Combined receiver-function and surface wave phase-velocity inversion using a niching genetic algorithm: application to Patagonia.  
*Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94: 977-987.*
- LODOLO, E.; MENICETTI, M.; BARTOLE, R.; BEN-AVRAHAM, Z.; TASSONE, A. Y LIPPAI, H., 2003.  
 Magallanes-Fagnano continental transform fault (Tierra del Fuego, southernmost South America).  
*Tectonics, Vol. 22(6): 1076, doi:10.1029/2003TC001500.*
- MARTINIC, M., 2008.  
 Registro histórico de antecedentes volcánicos y sísmicos en la Patagonia austral y la Tierra del Fuego.  
*Magallania, Vol. 36: 5-18.*
- MENICETTI, M.; E. LODOLO, E. Y TASSONE, A., 2008.  
 Structural geology of the Fuegian Andes and Magallanes fold-and-thrust belt - Tierra del Fuego Island.  
*Geologica Acta, Vol. 6: 19-42.*
- MOLINA, S.; LANG, D.H. Y LINDHOLM, C.D., 2010.  
 SELENA - An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure.  
*Computers & Geosciences, Vol. 36(3): 257-269.*
- MOLINA-PALACIOS, S.; LANG, D.H. Y LINDHOLM, C.D., 2014.  
 SELENA v6.0,  
*User and Technical Manual v6.0, Report no. 14-003, Kjeller (Norway) - Alicante (Spain), 97 pp.*
- PELAYO, A. Y WIENS, D.A., 1989.  
 Seismotectonics and relative plate motions in the Scotia sea region.  
*Journal of Geophysics Research, Vol. 94: 7293-7320.*
- REITER, L., 1990.  
 Earthquake hazard analysis.  
*Columbia University Press, New York, 254 pp.*
- ROSYIDI, S.A.; NAYAN, K.A.M.; TAHA, M.R. Y ISMAIL, A., 2006.  
 Estimating G-Max & Field CBR of Soil Subgrade Using a Seismic Method.  
*NDT.net, June, Vol. 11(6), <http://www.ndt.net/article/v11n06/rosyidi/rosyidi.htm>.*
- SMALLEY, R., JR.; KENDRICK, E.; BEVIS, M.; DALZIEL, I.; TAYLOR, F.; LAURÍA, E.; BARRIGA, R.; CASASSA, G.; OLIVERO, E. Y PIANA, E., 2003.  
 Geodetic determination of relative plate motion and crustal deformation across the Scotia-South America plate boundary in eastern Tierra del Fuego.  
*Geochemical, Geophysical, Geosystems, Vol. 4: 1-19.*
- WALDMANN, N.; ANSELMETTI, F.S.; ARIZTEGUI, D.; AUSTIN, JR, J.A.; PIROUZ, M.; MOY, C.M. Y DUNBAR, R., 2011.  
 Holocene mass-wasting events in Lago Fagnano, Tierra del Fuego (54°S): implications for paleoseismicity of the Magallanes-Fagnano transform fault.  
*Basin Research, Vol. 23: 171-190.*
- WELLS, D.L. Y COPPERSMITH, K.J., 1994.  
 New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width and Surface Displacement,  
*Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84: 974-1002.*

# INSTRUCCIONES PARA AUTORES

*La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente publica: Artículos Originales, Artículos Invitados, Notas Técnicas, Reseñas de Libros, Artículos especiales sobre casos de estudio históricos de interés relevante, Discusiones Técnicas breves de artículos y comunicaciones publicadas en la Revista y Anuncios de eventos.*

*En atención al procedimiento de arbitraje, se solicita a los autores leer y seguir estrictamente las siguientes instrucciones:*

## a) De carácter general:

- Las contribuciones deben ser originales.
- El/los autor/es deberá/n garantizar que el artículo no ha sido publicado, total o parcialmente, con anterioridad.
- El/los autor/es deberá/n garantizar que el artículo no será publicado en otras publicaciones en cualquier idioma sin el consentimiento de los propietarios de los derechos de autor (o copyright), que los derechos de terceros (terceras partes) no serán violados y que el editor no será considerado legalmente responsable si existe algún reclamo de indemnización.
- Se podrán recibir trabajos escritos en español, portugués o inglés.
- El Comité Editorial y la Dirección de la Revista se reservan la posibilidad de invitar a especialistas reconocidos a enviar artículos sobre temas de interés específico

## b) Sobre el formato y la extensión del texto, tipos de letra, páginas, párrafos y leyendas:

- La versión original deberá ser editada en Microsoft Word (.doc o .docx).
- En la primera página se deberá incluir el título del artículo, que debe ser conciso, informativo e indicativo del contenido del mismo y escrito sin utilizar abreviaturas. Se debe utilizar letra Times New Roman tamaño 12, mayúscula, negrita y centrado, sin subrayar.

El título se debe expresar en español y en inglés. Si el trabajo está escrito en portugués, también se debe incluir en inglés. Si el trabajo está escrito en inglés, también se debe incluir en español.

- Debajo del título, el texto centrado, en letra Times New Roman tamaño 10, con los datos de los autor/es y afiliaciones. Los nombres de los autores se deben escribir en letra normal, las afiliaciones y direcciones de correo electrónico en letra cursiva. Se deberá identificar con un superíndice al autor que se deba dirigir la correspondencia.
- Desde la segunda página comienza el desarrollo del trabajo. Se debe incorporar, en forma consecutiva, el "Resumen" de hasta 250 palabras; un "Abstract", y opcionalmente se podrá incorporar el "Resumo" en portugués, de hasta 200 palabras y las Palabras Clave en un número entre 3 y 5 y las correspondientes "Keywords" y "Palavras chave" en portugués.
- En el caso que el idioma del trabajo no sea español, la primera sección será el "Abstract", además de un resumen en el idioma en el que está escrito el trabajo. A continuación el resumen en español y tras ello el desarrollo.
- Todo el texto deberá estar escrito en letra Times New Roman punto 12 a un espacio de interlínea, sin sangrías (ya sea mediante tabulador o espacios) y sin doble espacio entre párrafos. Se conservarán los destacados que el autor considere convenientes, así como los correspondientes a determinados términos científicos o expresiones latinas o extranjeras. Deberá estar escrito en una sola columna. El tamaño de la hoja es A4 (210 x 297 mm). El área de trabajo será de 170 mm de ancho y 247 mm de altura. Es decir, 20 mm de márgenes derecho e izquierdo y márgenes superior

e inferior de 25 mm. Se debe usar justificación completa.

- La extensión no deberá superar las 20 páginas en el caso de Artículos Originales. En el caso de Artículos Invitados la extensión podrá ser superior, siempre que el interés del contenido lo justifique y previo acuerdo con la Dirección de la Revista y el Comité Editorial. En el caso de las Notas Técnicas la extensión no deberá superar las 3 carillas, y en el resto de las situaciones mencionadas una página. En todos los casos la fuente y los márgenes se conservan.
- Es obligatorio el uso del sistema métrico decimal.
- Cuando una abreviatura, o un acrónimo, aparezca en el texto por primera vez, su significado deberá ser aclarado en forma completa entre paréntesis.
- No se aceptarán notas de pie de página. La información respectiva deberá incorporarse en el texto.
- Las expresiones matemáticas deben ser elaboradas con el procesador de texto y formar parte del mismo. Las ecuaciones deben estar centradas y separadas por una interlínea. Todas las ecuaciones deben estar numeradas consecutivamente, usando numerales en paréntesis alineados al margen derecho. La secuencia de paréntesis deberá ser la usual en Matemática:}}).
- Las fórmulas deben ser digitadas. Deje un espacio amplio alrededor de la fórmula.
- Los subíndices y superíndices deben ser claros.
- Los caracteres especiales y otras letras no latinas deben ser explicados en el margen, donde sean usados por primera vez. Tenga especial cuidado en diferenciar entre cero (0) y la letra "o", y entre uno (1) y la letra "l".
- Proporcione el significado de todos los símbolos inmediatamente después de la ecuación en la que son usados por primera vez.
- Para fracciones simples use el símbolo "/" en lugar de la línea horizontal; por ejemplo:  $Sy/Xm$  en lugar de  $\frac{Sy}{Xm}$
- En las fórmulas químicas deben especificarse la valencia de los iones como, por ejemplo,  $Ca^{2+}$  y  $CO_3^{2-}$ , no como  $Ca^{++}$  o  $CO^{-3}$ .
- Los números de isótopos deben indicarse mediante un superíndice antecediendo a los símbolos químicos, por ejemplo:  $^{18}O$ .
- Donde sea posible se debe evitar la escritura repetida de fórmulas químicas en el texto. En lugar de ello se debe dar el nombre completo del compuesto. Se exceptuarán aquellos casos de nombres muy largos y frecuentes, o de compuestos que son descritos como el producto final de una determinación gravimétrica (ejemplo: fosfato como  $P_2O_5$ ).

## c) Sobre el formato de figuras y tablas:

- Se incluirán como figuras todas las ilustraciones, mapas, fotografías, gráficos, etc., presentes en el texto, que deberán llevar numeración arábiga correlativa por orden de aparición y se ajustarán al tamaño de la caja. Las ilustraciones deben diseñarse teniendo en cuenta el formato de la página de la revista. Su tamaño original debe permitir una reducción del 50%, sin pérdida de claridad. Deben tener una resolución mínima de 300 dpi.
- Se deben evitar los espacios en blanco sobrantes alrededor de la figura, o la presencia de grandes sectores sin información en el interior de la misma.
- Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente después de la misma, la que no se debe incluir en el cuerpo de la figura. Se usará letra Times New

Roman punto 12, a interlineado sencillo. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Figura n: donde n es el número de orden que corresponda. Se recomienda que las leyendas sean cortas y concisas.

- Las figuras serán citadas en el texto como (Figura n), siendo n el número de orden que corresponda, sea directamente como Figura 1, por ejemplo, o bien entre paréntesis como (Figura 1). Se deberán limitar, como máximo, a una caja de 15 x 23 cm, debiendo considerar el espacio ocupado por el epígrafe. Se las deberá enviar como archivos individuales en uno de los formatos aceptables (.tif, .jpg, .pdf o .eps). No se aceptan archivos incluidos en documentos de otros formatos, como Word o PowerPoint, por ejemplo. En el caso de una figura compuesta por varias imágenes las mismas deberán estar debidamente identificadas con una letra en la esquina inferior derecha de la misma.
- Las fotografías (y figuras en formato raster con tono continuo) deben ser pancromáticas, contrastadas, claras y con una luz adecuada, ni demasiado clara ni oscura. Deben ser enviadas como archivos .tif, .jpg, .pdf o .eps. No se aceptarán fotografías en color. Las fotografías en color serán reproducidas en escala de grises, salvo que él o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos.

Deberán incluir escala, vertical y horizontal en caso de ser distintas, cuando no existan elementos en la misma que permitan su dimensionamiento (escala, cinta métrica, martillo geológico, brújula, vehículo, etc.).

- Las figuras delineadas o dibujos deben ser contrastados y claros.
- Las figuras de tipo mapa deben estar orientadas, incluir escala gráfica e indicación de la localización geográfica (trazas UTM o Lat/Long). Deberán tener referencias adecuadas a los símbolos, rastras, etc. utilizados. No se aceptarán mapas en color. Los mapas en color serán reproducidos en escala de grises, salvo que él o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos.
- Se debe utilizar la misma tipografía en todas las ilustraciones.
- Los gráficos deben poseer ejes de coordenadas correctamente rotulados y con indicación de la unidad de medida correspondiente, en el caso que corresponda.
- Las tablas deben ser remitidas en páginas separadas, indicando su ubicación dentro del texto. Se deben remitir como archivo de texto y no como imagen.
- Las Tablas serán citadas en el texto iniciando con mayúscula en citas directas, o indirectas entre paréntesis. Es decir como Tabla 1, o bien (Tabla 1).
- La información presentada en las tablas no debe aparecer repetida en las figuras.
- Cada tabla debe llevar, del mismo modo que las figuras, una leyenda breve y explicativa, en la parte inferior. Se usará letra Times New Roman punto 12, a interlineado sencillo. La tabla y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Tabla n: donde n es el número de orden que corresponda.

#### **d) Sobre las referencias bibliográficas y las citas de trabajos de otros autores**

- No se admite la reproducción de figuras o tablas originales de otros artículos o capítulos de libros si no se dispone de la autorización expresa de quién detente los derechos, es decir de la editorial responsable de la publicación correspondiente o bien del autor o los autores. La reproducción autorizada de tablas, fotografías u otras ilustraciones procedentes de otros trabajos deberá incorporar en el epígrafe la cita del tra-

bajo original de donde fue obtenido. Con respecto a las figuras, en el caso que la misma se reelabore, o de una tabla, que sea editada, se deberá indicar “modificada a partir de ...” seguido de la cita del artículo original.

- A los autores que deseen incluir figuras tablas o secciones completas de texto que ya han sido publicados en otras publicaciones, se les requiere obtener el permiso del/de los propietario/s del copyright y que incluyan evidencias que dicho permiso ha sido concedido al presentar sus artículos. Todo ello sin perjuicio que otras inclusiones de párrafos, definiciones, conceptos o clasificaciones provenientes de otros autores puedan ser aceptadas con la cita expresa de la referencia correspondiente. Cualquier material recibido sin esa documentación será considerado como originado por los autores, quienes, por lo tanto, deberán asumir la responsabilidad legal correspondiente.
- Las referencias bibliográficas serán incluidas bajo el título de TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO. Las mismas deberán estar ordenadas alfabéticamente.
- La cita de trabajos en el texto estará referida a la lista bibliográfica final, indicando apellido de los autores (en mayúsculas) y año de publicación entre paréntesis, por ejemplo: (Caminos, 1975). En caso de ser más de dos autores se usará et al. (en itálica, sin subrayado ni negrita). Cuando se cite más de un trabajo del mismo autor se separarán por una coma, por ejemplo: Caminos (1956, 1978). En el caso de ubicar varios autores dentro del paréntesis se separarán entre ellos por un punto y coma. Si se citan varios trabajos del mismo autor y del mismo año se agregarán, a continuación del año, letras, de acuerdo al orden de aparición en el texto.
- Las citas bibliográficas estarán justificadas a la izquierda y la segunda línea tendrá una sangría especial francesa de 15 puntos ó 0,75 cm.
- Los artículos en publicaciones periódicas se citarán empleando texto en cursiva sea para el título de la revista o actas de congreso o reunión científica, en el caso de artículos o el título del libro, en el caso de textos:  
CARRANZA TORRES, C.M., 1991. Cálculo analítico de redes de filtración. Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, Vol. VI: 250-267.
- Los artículos en textos:  
MATEOS RUIZ, R.M. y M. FERRER GIJÓN, 1994. Methodology for landslides hazard map 1:10,000 in the area of Monachil (Granada, Spain). En R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha (eds.), 7th International Congress International Association of Engineering Geology, Vol III: 2059-2064, Rotterdam.
- Los libros de textos:  
DEARMAN, W.R., 1991. Engineering geological mapping. Butterworth-Heinemann Ltd, 387 pp. Oxford.
- En el caso de citar un párrafo o frase de otro trabajo, éste deberá aparecer entre comillas y cursiva, acompañada de la correspondiente cita. Por ejemplo,..... según Casio et al., (1980), “la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma”... o bien directamente “la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma” (Casio et al., 1980).
- Las citas correspondientes incluirán a la totalidad de los autores. Ejemplo para Casio et al., (1980):  
CASIO, M.; MARCINUS, F; SALINA, R y HUBBARD, R.T., 1980. La caída del imperio romano. Revista de Occidente, Vol 180: 224-234.
- Las citas correspondientes de páginas Web se efectuarán de acuerdo al siguiente modelo: Barker, A and C Jones 2007.

---

Reassessing the direction of postgraduate environmental assessment education: the Manchester experience 1996–present. En *Environmental Assessment Lecturer's Handbook*, ed. T B Fischer et al., pp. 29-38. Disponible en <<http://www.penta-eu.net>>, ultimo acceso 28 de Junio de 2010.

**e) Notas Técnicas**

- Es un artículo original que describe un proceso o técnica sin incluir, necesariamente, una exposición teórica y datos. También puede referirse a un estudio de caso, el que por lo novedoso de los datos que se obtienen o de las técnicas utilizadas, el/los autor/es consideran de interés su difusión. La extensión total del manuscrito, que no debe superar las

3 (tres) páginas y ajustarse a los parámetros mencionados en el punto b, incluye Resumen, Abstract, palabras clave, keywords, hasta 2 (dos) figuras y una tabla acorde a lo establecido en el punto c. Las referencias bibliográficas deberán respetar lo establecido en el punto d.

**f) Arbitraje**

- La evaluación por pares es efectuada mediante el envío del original a dos evaluadores. En el caso de disparidad de opiniones, se remite a un tercer evaluador.
- Los Editores se reservan la posibilidad de tomar la decisión final en el caso que la tercera evaluación no establezca si el artículo debe ser aceptado, o no, para su publicación.



**Revista de Geología  
Aplicada a la Ingeniería  
y al Ambiente**

**FORMULARIO DE SUSCRIPCIÓN O COMPRA**

ENVIAR A:

Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería  
Maipú 645 - Piso 1° - C1006ACG  
Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina

(Una vez completado el formulario envíelo a la dirección antes mencionada)

1. Suscripción a la *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, por el corriente año (marcar la siguiente casilla) [ ]

2. Deseo adquirir los números *atrasados*:

\_\_\_\_\_ [ ]

3. Deseo comprar los artículos:

\_\_\_\_\_ [ ]

Indique si desea recibir su pedido en formato *papel* (por correo tradicional), o en formato *electrónico en fichero pdf* (por correo electrónico):

**FORMA DE PAGO**

Adjuntando cheque a nombre de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería.

Mediante depósito en la Cuenta Corriente N° 20566/5 Sucursal 115 del Banco Santander Río

Mediante transferencia bancaria a la Cuenta Corriente. CUIT: 30 - 67660597- 1.

CBU 0720 11542 000000 2056654

Solicitud de *factura* para pago mediante transferencia.

**PRECIO DE COMPRA (Desde 01-06-2014):**

**Para Argentina:** Gastos de envío incluidos.

- Compra de número vigente: **400** Pesos
- Compra de número atrasado: **320** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **160** Pesos por artículo

**Para el exterior:** Gastos de envío no incluidos.

- Compra de número vigente: **50** Dólares
- Compra de número atrasado: **40** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **16** Dólares por artículo

**PRECIOS DE SUSCRIPCIÓN (Desde 01-06-2014):**

**Para Argentina:** Gastos de envío incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **400** Pesos, en formato electrónico, y **600** Pesos en edición papel
- Suscripción Instituciones: **1600 / 2400** Pesos
- Compra de número atrasado: **320** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **160** Pesos por artículo

**Para el exterior:** Gastos de envío no incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **40** Dólares, en formato electrónico, y **60** Dólares en edición papel
- Suscripción Instituciones: **200/240** Dólares
- Compra de número atrasado: **40** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **16** Dólares por artículo

**Envíos fuera de Argentina:** se añadirán gastos de envío a los precios anteriormente señalados. Ver tarifas de correos en: [www.correoargentino.com.ar](http://www.correoargentino.com.ar)

*Quienes quieran asociarse a la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería encontrarán información a tal efecto en [www.asagai.org.ar](http://www.asagai.org.ar)*

**Los Socios de ASAGAI reciben sin cargo alguno la revista.**



Copyright  
© Editorial ASAGAI. 2014  
Printed in Argentina

Se terminó de imprimir en Diciembre de 2014