



ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

Número 27 · Noviembre 2011

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Control geológico - geomorfológico en la hidroquímica subterránea de un sector de la zona deprimida del Salado, provincia de Buenos Aires

Kruse, Eduardo - Carol, Eleonora - Deluchi, María - Laurencena, Patricia - Rojo, Adolfo

Simulación espacio - temporal del escurrimiento directo en la cuenca del arroyo Pillahuinco Grande

Gaspari, Fernanda Julia - Senisterra, Gabriela Elba - Rodríguez Vagaría, Alfonso - Delgado, María Isabel - Besteiro, Sebastián

Simulación de caudales de los ríos Nervión e Ibaizabal. País Vasco

Llanos, Hilario - Bâ, Khalidou

Modelación numérica del flujo de agua subterránea del acuífero freático sedimentario de la cuenca del arroyo El Barreal, Córdoba

Matteoda, Edel Mara - Blarasin, Mónica - Vives, Luis - Cabrena, Adriana - Felizzia, Juan

Funciones hidráulicas en suelos loésicos no saturados en una parcela experimental

Reyna, Teresa - Reyna, Santiago - Lábaque, María - Fulginiti, Fabián

Características del comportamiento hidrológico en áreas de llanuras basado en el análisis morfométrico. Caso de estudio: arroyo Del Tala. Provincia de Buenos Aires

Gaspari, Fernanda Julia - Kruse, Eduardo Emilio

El uso de corine land cover en la identificación de actividades potencialmente contaminantes del agua subterránea. Análisis preliminar en el área Mar del Plata-Balcarce (Argentina)

Massone, Hector - Sagua, Marisa - Tomas, Monica - Zelaya, Karina - Betancur, Teresita - Romanelli, Asunción - Lima, Lourdes

Límites y potencialidades de las reservas de agua dulce en el humedal de la Bahía de Samborombón, Argentina

Tejada, Macarena - Carol, Eleonora - Kruse, Eduardo

Evaluación del comportamiento hidrodinámico y cuantificación de la recarga en la cuenca del arroyo Langueyú, partido de Tandil

Barranquero, Rosario - Varni, Marcelo - Ruiz de Galarreta, Alejandro - Ocampo, Dora

Evaluación de los cambios en la morfología y tamaño de fibras de crisotilo de mina La Bélgica (Calamuchita, prov. de Córdoba, Argentina) simulado en ensayos de laboratorio

Lescano, Leticia - Marfil, Silvina - Maiza, Pedro - Sfragulla, Jorge - Bonalumi, Aldo

Institucional. 10° Simposio de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente.

Conferencia sobre problemas geológicos-geotécnicos y aspectos ambientales relacionados con el proyecto y construcción de caminos de montaña

Portada Presa Nogolí - San Luis. Fotografía: Gustavo Parenti

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



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



ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

Córdoba - Argentina

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



Publicación Oficial de la

ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

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

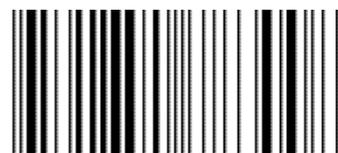
editores@asagai.org.ar

www.asagai.org.ar

Tel/Fax (011)4322-2820

Número 27 • 2011

ISSN 1851-7838



REVISTA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA Y AL AMBIENTE

DIRECTOR

MSc Geól. Norberto Jorge Bejerman
Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba

SECRETARIO

Geól. Francisco Locati
CICTERRA-CONICET
FCEfyN
Universidad Nacional de Córdoba

EDITOR ASOCIADO

Prof. Dr. José Chacón Montero
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Granada
España

COMITÉ EDITORIAL

Prof. Dr. Helder Iglésias Chaminé
Departamento de Engenharia Geotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Politécnico do Porto
Portugal

Dr. Julio Luis del Río
Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario
Universidad Nacional de Mar del Plata

Prof. Dr. Luis I. González de Vallejo
Departamento de Geodinámica
Universidad Complutense de Madrid
España

Dra. Silvina A. Marfil
Departamento de Geología
Universidad Nacional del Sur
Comisión de Investigaciones Científicas
de la Prov. de Bs. As.

Dra. Graciela E. Tello
Universidad Nacional de la Patagonia Austral
Unidad Académica Río Turbio

Dra. Ofelia Tujchneider
Grupo de Investigaciones Geohidrológicas
Departamentos de Hidrología y Ambiente
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Universidad Nacional de El Litoral.
Santa Fe

PRODUCCIÓN EDITORIAL

Encargada de Diseño *Paula Paredes*
Webmaster *Mauricio Balocco*

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

COMISIÓN DIRECTIVA 2010 - 2014

PRESIDENTE	<i>Norberto Jorge Bejerman</i>
VICEPRESIDENTE	<i>María Beatriz Ponce</i>
SECRETARIO	<i>Rubén A. López</i>
TESORERO	<i>Adrián Angel Silva Busso</i>
VOCAL TITULAR	<i>Fabio S. Luna</i>
VOCAL TITULAR	<i>Cristina Dapeña</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Mabel Mena</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
Control geológico - geomorfológico en la hidroquímica subterránea de un sector de la zona deprimida del Salado, provincia de Buenos Aires	<i>Kruse, Eduardo - Carol, Eleonora Deluchi, Marta - Laurencena, Patricia Rojo, Adolfo</i>	1
Simulación espacio - temporal del escurrimiento directo en la cuenca del arroyo Pillahuinco Grande	<i>Gaspari, Fernanda Julia Senisterra, Gabriela Elba Rodríguez Vagaría, Alfonso Delgado, María Isabel - Besteiro, Sebastián</i>	7
Simulación de caudales de los ríos Nervión e Ibaizabal. País Vasco	<i>Llanos, Hilario - Bâ, Khalidou</i>	13
Modelación numérica del flujo de agua subterránea del acuífero freático sedimentario de la cuenca del arroyo El Barreal, Córdoba	<i>Matteoda, Edel Mara - Blarasin, Mónica Vives, Luis - Cabrera, Adriana Felizzia, Juan</i>	25
Funciones hidráulicas en suelos loésicos no saturados en una parcela experimental	<i>Reyna, Teresa - Reyna, Santiago Lábaque, María - Fulginiti, Fabián</i>	35
Características del comportamiento hidrológico en áreas de llanuras basado en el análisis morfométrico. Caso de estudio: Arroyo del Tala. Provincia de Buenos Aires	<i>Gaspari, Fernanda Julia Kruse, Eduardo Emilio</i>	43
El uso de corine land cover en la identificación de actividades potencialmente contaminantes del agua subterránea.	<i>Massone, Héctor - Sagua, Marisa Tomas, Mónica - Zelaya, Karina Betancur, Teresita - Romanelli, Asunción Lima, Lourdes</i>	49
Análisis preliminar en el área Mar del Plata-Balcarce (Argentina)	<i>Tejada, Tejada, Macarena - Carol, Eleonora Kruse, Eduardo</i>	57
Límites y potencialidades de las reservas de agua dulce en el humedal de la Bahía de Samborombón, Argentina	<i>Barranquero, Rosario - Varni, Marcelo Ruiz de Galarreta, Alejandro Ocampo, Dora</i>	63
Evaluación del comportamiento hidrodinámico y cuantificación de la recarga en la cuenca del arroyo Langueyú, partido de Tandil Evaluación de los cambios en la morfología y tamaño de fibras de crisotilo de mina La Bélgica (Calamuchita, prov. de Córdoba, Argentina) simulado en ensayos de laboratorio	<i>Lescano, Leticia - Marfil, Silvina Maiza, Pedro - Sfragulla, Jorge Bonalmi, Aldo</i>	73
Instrucciones para autores		85
Formulario de suscripción o compra		87
Institucional.		89

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 230 pesos, deberán contactarse con la Editorial (editores@asagai.org.ar).

En la página 87 encontrará el formulario a completar a tal efecto

Aims and objectives

*The Journal of Engineering Geology and the Environment 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 230, should be in contact with the Editor (editores@asagai.org.ar).

In page 87 an application form to be fulfilled and sent to the Editor is available.



Control geológico - geomorfológico en la hidroquímica subterránea de un sector de la zona deprimida del Salado, provincia de Buenos Aires

Kruse, Eduardo ¹ ✉ - Carol, Eleonora ¹ - Deluchi, Marta ² - Laurencena, Patricia ³ - Rojo, Adolfo ³

Recibido: 18 de abril de 2011 • Aceptado: 02 de junio de 2011

Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar los procesos geoquímicos que asociados a las particularidades geológicas - geomorfológicas definen las características químicas del agua en un sector de la zona deprimida del Salado. En un ambiente extremadamente llano se reconocen formas menores que adquieren influencia hidrológica local. Las relaciones iónicas evidencian procesos de disolución de $\text{CO}_2(\text{g})$ en todos los ambientes indicando la importancia de la recarga del acuífero por infiltración del agua de lluvia. En los mantos y lomadas eólicas el agua es de tipo Na-HCO_3 y su composición se asocia a procesos de disolución de carbonatos cálcicos e intercambio de bases. En la planicie de inundación el agua evoluciona de tipo Na-HCO_3 a tipo Na-ClSO_4 y dominan los procesos de evaporación. Estas variaciones en la composición química del agua permiten determinar el control que ejercen los rasgos geomorfológicos locales en un ambiente regionalmente llano.

Palabras clave: hidroquímica, Río Salado, geoformas.

Abstract

The aim of this work is to analyze the geochemical processes that associated with the geological - geomorphological particularities define the chemical characteristics of the groundwater in a sector of the Pampa Deprimida of the Salado River. Minor geoforms with important hydrologic local influence are recognized in this flat area. The ionic ratios reveal dissolution of $\text{CO}_2(\text{g})$ processes in the region. It indicates the importance of groundwater recharge by rain infiltration. Groundwater is Na-HCO_3 type in the eolic ridges and its composition is associated with calcium carbonate dissolution and base exchange processes. In the flood plain groundwaters evolves from Na-HCO_3 to Na-ClSO_4 types and dominate the evaporation processes. The groundwater hydrochemistry variations indicate the control that the local geomorphological features show in a flatland.

Keywords: hydrochemical, Salado River, geoforms.

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Cátedra de Hidrología General, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP. Calle 64 n°3 La Plata (1900), Argentina.

✉ kruse@fcnym.unlp.edu.ar

² Cátedra de Hidrología General, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP. Calle 64 n°3 La Plata (1900), Argentina.

³ Comisión de Investigaciones Científicas (CIC). Cátedra de Hidrología General, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP. Calle 64 n°3 La Plata (1900), Argentina.

METODOLOGÍA

Se estudiaron las características geológicas y geomorfológicas de la región a través de la recopilación de antecedentes, relevamientos de campo y análisis de cartas topográficas e imágenes satelitales. Ello permitió reconocer tres zonas geomorfológicamente distintivas: lomadas eólicas, mantos eólicos y planicie de inundación. En cada una de ellas se ejecutaron un conjunto de perforaciones al acuífero freático.

Los freáticos se construyeron con barreno manual y fueron entubados con caño de PVC de 2,5 pulgadas con filtro ranurado continuo. Durante la ejecución de los pozos se realizó la descripción litológica y se extrajeron muestras de sedimento.

Para la extracción de muestras de agua los freáticos fueron purgados extrayéndose el volumen de agua contenida en cada uno de los pozos al menos 3 veces. La recolección, preservación y análisis químico de las muestras de agua fue realizada según los métodos establecidos por la American Public Health Association (1998).

Los resultados de las concentraciones de los iones mayoritarios se analizaron mediante gráficos hidroquímicos, y las determinaciones de especies iónicas solubles e índices de saturación se efectuaron con el programa PHREEQC (Parkhurst y Appelo 1999).

Los procesos determinados a partir de relaciones iónicas fueron verificados por modelación hidrogeoquímica basada en el programa NETPATH (Plummer *et al.* 1991).

RESULTADOS

Dentro del área estudiada se reconocen tres zonas con características geológicas y geomorfológicas propias: lomadas eólicas, mantos eólicos y planicie de inundación.

Las lomadas eólicas están compuestas por depósitos arenosos de escaso espesor (menores a 1 m). El nivel freático se ubica a 3,0 m de profundidad reconociéndose entre lomadas sectores deprimidos que suelen presentar agua en superficie. El agua es de tipo Na-HCO₃ (Figura 2) con pH entre 7,2 y 7,8. De los ambientes estudiados es el que presenta menor salinidad con valores de conductividad eléctrica entre 382 y 520 µS/cm.

Los mantos eólicos están compuestos por sedimentos arenosos o arena limosos depositados sobre los Sedimentos Pampeanos. Su espesor es generalmente superior a 1 m y el agua freática se encuentra a 1,2 m de profundidad. La permeabilidad media a alta de sus sedimentos favorece la infiltración siendo zonas que se caracterizan por no presentar agua en superficie. El agua es de tipo Na-HCO₃ (Figura 2) con valores de pH entre 7,1 y 8,4. Los valores de conductividad eléctrica varían principalmente entre 1865 y 2940 µS/cm a excepción de un pozo cuyo valor es de 553 µS/cm.

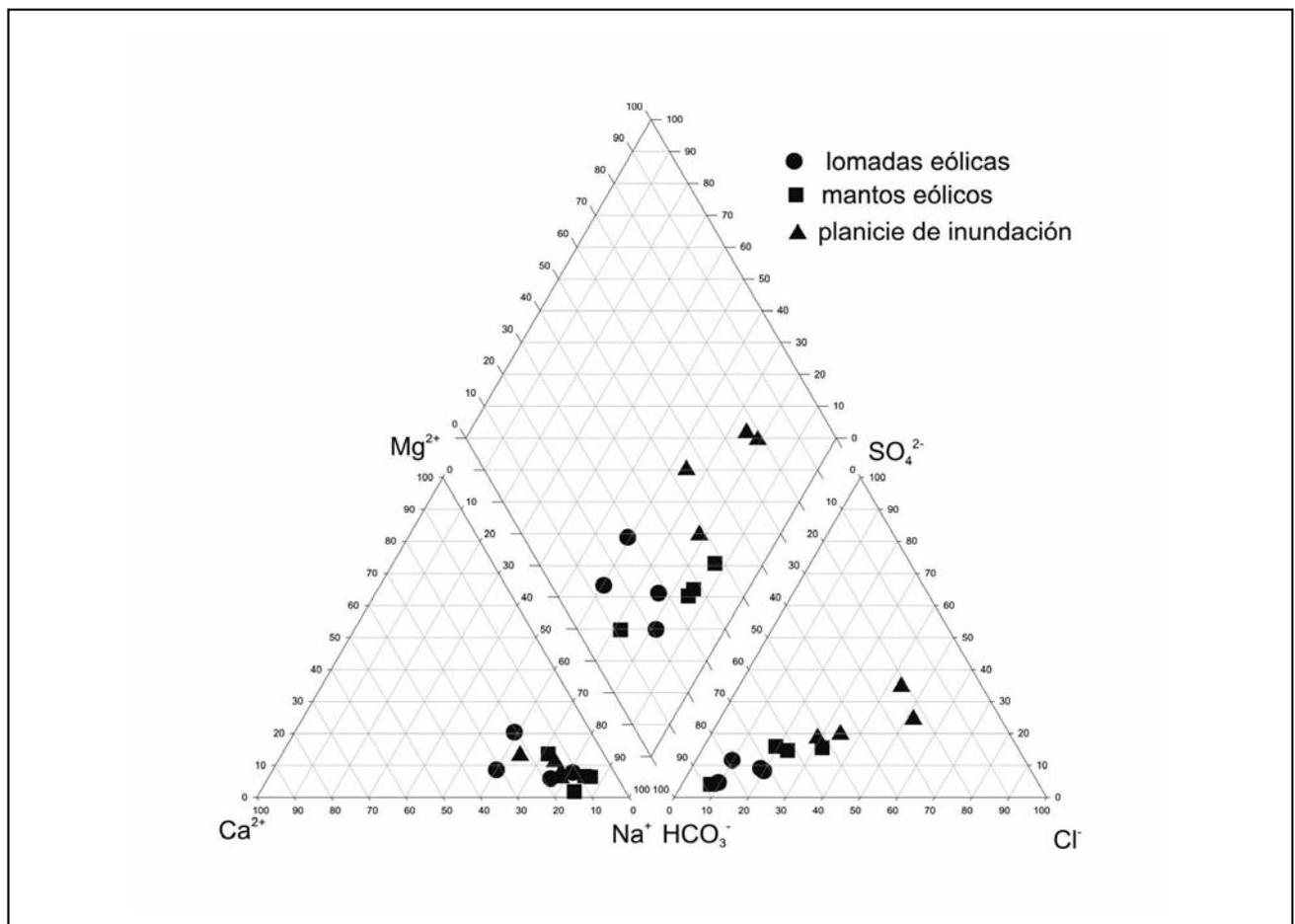


Figura 2. Diagrama de Piper.

La planicie de inundación es un ambiente deprimido en el que se reconoce un escaso espesor de sedimentos fluvio-lacustres sobre los depósitos limo arcillosos con manifestaciones de tosca correspondientes a los Sedimentos Pampeanos. La superficie freática se localiza aproximadamente a 1,5 m por debajo del nivel de terreno, observándose en los sectores más deprimidos el afloramiento del nivel freático. El agua evoluciona de tipo Na-HCO₃ a tipo Na-ClSO₄, con pH entre 8,0 y 8,4 y con altos contenidos salinos (conductividad eléctrica entre 1963 y 4540 µS/cm) (Figura 2).

El análisis de las relaciones iónicas muestra excesos de Na⁺ respecto de Cl⁻ los que son más notorios en las lomadas y mantos eólicos (relación Na⁺/Cl⁻ entre 2,4 y 8,5) (Figura 3a). Para las lomadas y mantos eólicos los valores de Cl⁻-(Na⁺ + K⁺)/Cl⁻ negativos (entre -1,8 y -8,2) y la relación Na⁺-Cl⁻ en función de (HCO₃⁻ + SO₄²⁻)/(Ca²⁺ + Mg²⁺) próxima a 1, estaría determinando que dichos excesos se asocian a intercambio de bases de tipo Ca²⁺/Na⁺ (Mc Lean et al. 2000) (Figura 3b y c). En la planicie de inundación los valores Na⁺/Cl⁻ próximos a 1 indicarían que la presencia de estos iones en el agua subterránea podrían deberse a aportes de sales NaCl disueltas desde la descarga del flujo subterráneo y/o procesos de evaporación en los sectores donde la superficie freática aflora o se encuentra a poca profundidad.

Se observa un déficit de Ca²⁺ respecto a HCO₃⁻, el cual está dado por relaciones Ca²⁺/HCO₃⁻ inferiores a 1, característica más notoria en las lomadas y mantos eólicos (Figura 3d). La disolución de carbonatos aportaría iones Ca²⁺ y HCO₃⁻, mientras que un exceso de HCO₃⁻ como el observado se asociaría a procesos de disolución de CO_{2(g)} a partir de la infiltración del agua del lluvia, la cual es más notoria en los ambientes geomorfológicos de mayor permeabilidad y a procesos de intercambio iónico Ca²⁺/Na⁺.

La relación Ca²⁺/SO₄²⁻ presenta valores positivos entre 1 y 7,2 para las lomadas eólicas. Esta característica hace suponer que en este ambiente el Ca²⁺ proviene principalmente de la disolución de carbonatos (Figura 3e). Los bajos contenidos en SO₄²⁻ registrados en todas las muestras (menores a 5 meq/L en las lomadas y mantos eólicos y entre 4 y 14,7 meq/L en la planicie de inundación) sugerirían que este ión puede provenir de la evaporación del agua de lluvia que recarga estos ambientes tal como se determinó en otras regiones de la provincia de Buenos Aires (Bonorino et al. 2001, Quiroz Londoño et al. 2008). Las muestras con relación Ca²⁺/SO₄²⁻ próxima a 1 podrían estar indicando la disolución de yeso. Si bien no se han realizado análisis mineralógicos en el área de estudio, el yeso fue determinado en estos sedimentos en sectores próximos (Dangavs y Blasi, 2002) y en varios sitios de la provincia (Teruggi et al. 1974, Dangavs y Blasi 1992, Dangavs et al. 1998).

Los índices de saturación (IS) de calcita y yeso muestran valores subsaturados en ambos minerales en el agua subterránea de las lomadas eólicas, valores subsaturados en yeso y sobre y subsaturados en calcita en los mantos eólicos, y valores subsaturados en yeso y sobresaturados en calcita en la planicie de inundación (Figura 3f).

A partir de los procesos sugeridos mediante la interpretación de las relaciones iónicas se realizaron modelados hidro-

geoquímicos, mediante el uso del programa NETPATH (Plummer et al. 1991). Estos modelos que contemplan el balance de masas y la termodinámica de las reacciones permitieron verificar los distintos procesos hidroquímicos descriptos para cada uno de los ambientes.

Los resultados obtenidos muestran que en las lomadas eólicas la disolución de carbonatos cálcicos, la disolución de CO_{2(g)}, el intercambio de bases de tipo Ca²⁺/Na⁺ y la evaporación dominan la química del agua subterránea. Entre estos procesos las mayores transferencias de masas se relacionan al intercambio Ca²⁺/Na⁺.

La hidroquímica de los mantos eólicos es corroborada por los mismos procesos pero a diferencia de las lomadas eólicas las mayores transferencias de masa se asocian a la disolución de carbonatos cálcicos registrándose también un aumento en la evaporación.

En la planicie de inundación el proceso que domina es la evaporación acompañada de disolución de CO_{2(g)}. La falta de información relacionada al flujo subterráneo que descarga en este ambiente imposibilitó verificar mediante el modelado si existe aporte de sales disueltas de tipo NaCl desde dicha fuente. Sin embargo, los bajos contenidos de Cl⁻ en la mayoría de las muestras permiten plantear que la evaporación es suficiente para explicar las concentraciones de Cl⁻ registradas, principalmente en la planicie de inundación donde el nivel freático aflora o se encuentra muy próximo a la superficie.

La disolución de yeso fue un proceso no corroborado en ninguno de los ambientes.

CONCLUSIONES

Las características químicas y relaciones iónicas analizadas muestran cómo la geología y geomorfología determinan los procesos geoquímicos que regulan la hidroquímica de las aguas subterráneas.

Los procesos de disolución de CO_{2(g)} se reconocen en las unidades geomorfológicas identificadas, indicando la importancia de la infiltración y la consecuente recarga del sistema subterráneo. Aguas de tipo Na-HCO₃ caracterizan a los mantos y lomadas eólicas. La composición se asocia a procesos de disolución de carbonatos cálcicos, intercambio de bases de tipo Ca²⁺/Na⁺ y evaporación. En la planicie de inundación las aguas evolucionan de tipo Na-HCO₃ a tipo Na-ClSO₄ dominando en este ambiente los procesos de evaporación.

A partir de las variaciones en las características químicas del agua subterránea es posible reconocer el control que ejercen las particularidades geomorfológicas locales en un área de llanura.

El análisis mediante gráficos hidroquímicos, determinaciones de especies iónicas solubles e índices de saturación asociados al modelado hidrogeoquímico basado en el balance de masas y la termodinámica de las reacciones resulta una metodología de aplicación para la determinación de los procesos hidrogeoquímicos que dominan la composición del agua subterránea en ambientes de llanura.

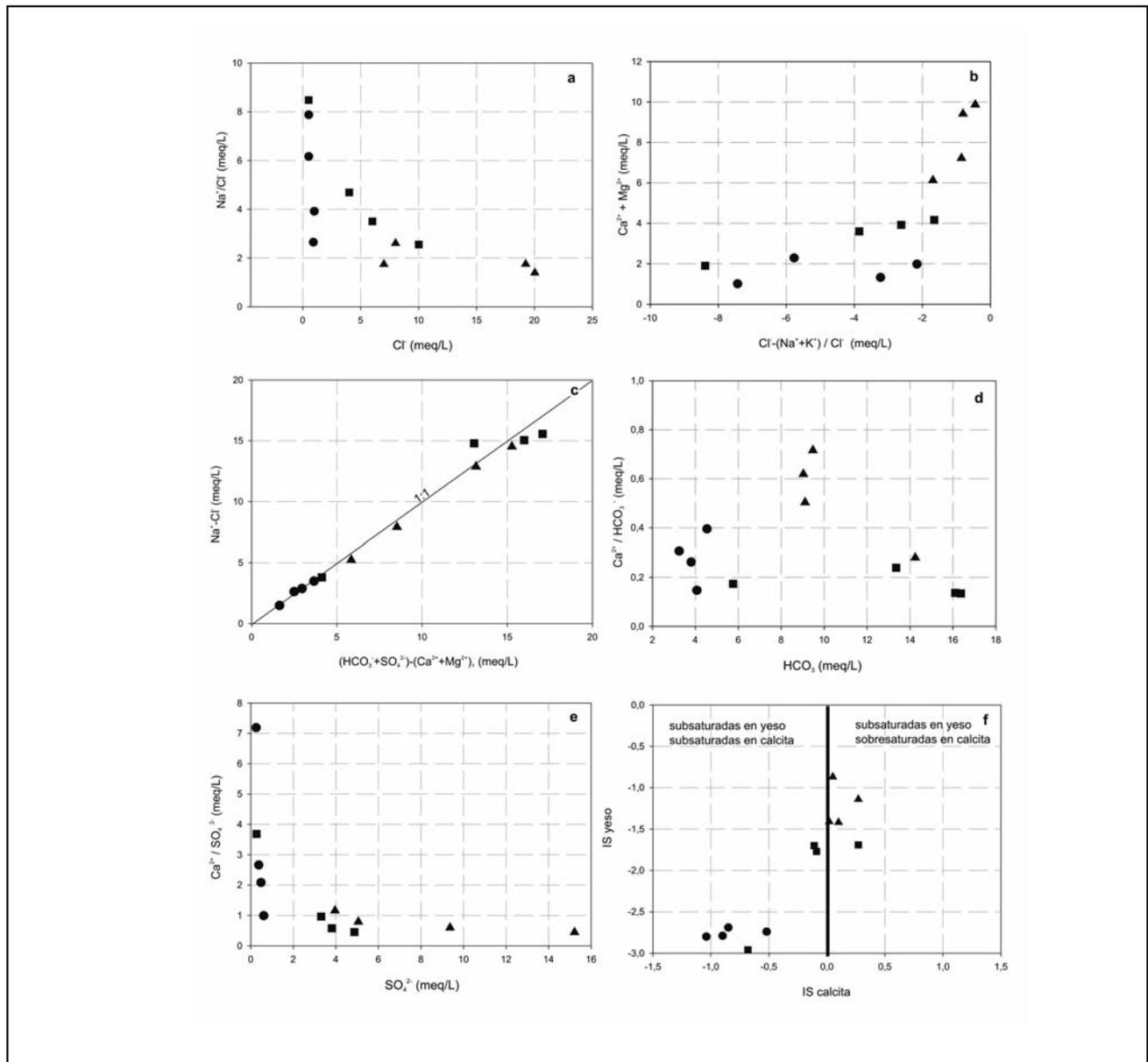


Figura 3. Relaciones iónicas e índices de saturación. Referencias iguales a la Figura 2.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. 1998.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed.

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, DC.

DANGAVS N. V. Y BLASI A. M. 2002.

Los depósitos de yeso intrasedimentario del arroyo El Siasgo, partidos de Monte y General Paz, provincia de Buenos Aires.

Revista de la Asociación Geológica Argentina 57 (3): 315-327.

DANGAVS, N. Y BLASI, A. 1992.

Presencia de yeso en Lobos, Buenos Aires, Argentina

Revista Museo de La Plata, Sección Geología 11: 17-32.

DANGAVS, N. Y BLASI, A. Y MERLO, D. 1998.

Los depósitos de yeso intrasedimentario en la subcuenca de la laguna Esquivel, Chascomús, provincia de Buenos Aires.

5° Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses Actas 1: 175-184. Mar del Plata.

- KRUSE, E., LAURENCENA, P., ROJO, A. DELUCHI, M. 2005.
Interacción de flujos subterráneos en la Zona Deprimida del Salado (Provincia de Buenos Aires, Argentina)
II Seminario Hispano Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea. Río Cuarto. Córdoba.
- BONORINO, G., ALBOUY, R. Y CARRICA, J. 2001.
Hidroquímica de un Acuífero Loésico.
Geoacta 26:33-45.
- KRUSE E., ROJO A., LAURENCENA P., DELUCHI M. 2003.
Comportamiento del agua subterránea en relación al Canal 16 - Provincia de Buenos Aires.
Actas III Congreso Argentino de Hidrogeología. Memorias: 245-254. Universidad Nacional de Rosario. Rosario
- KRUSE, E., LAURENCENA, P., ROJO, A., DELUCHI, M. Y CAROL, E. 2007.
Variaciones hidrodinámicas e hidroquímicas del agua freática en el Canal 16, Provincia de Buenos Aires.
Actas XXI Congreso Nacional de Agua, Tucumán, Argentina.
- MCLEAN, W., JANKOWSKI, J. AND LAVITT, N. 2000.
Groundwater quality and sustainability in an alluvial aquifer, Australia.
In: Sililo O et al (eds) Groundwater, past achievements and future challenges. A Balkema, Rotterdam: 567-573.
- PARKHURST, D.L. AND APPELO, C.A.J., 1999.
User's guide to PHREEQC. A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations
US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 310 p.
- PLUMMER, L.N., PRESTEMON, E.C. AND PARKHURST, D.L. 1991.
An interactive code (NETPATH) for modelling NET geochemical reactions along a flow PATH.
US Geol Surv Water Resour Invest 4078.
- QUIROZ LONDOÑO, O. M., MARTÍNEZ, D. E., DAPEÑA C. Y MASSONE, H. 2008.
Hydrogeochemistry and isotope analyses used to determine groundwater recharge and flow in low-gradient catchments of the province of Buenos Aires, Argentina.
Hydrogeology Journal 16: 1113-1127.
- ROJO, A., KRUSE, E., LAURENCENA, P., DELUCHI, M. Y CAROL, E. 2006.
Relación de la capa freática y las obras de regulación en la región Vallimanca - Las Flores, Argentina.
VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Memorias: 78. Asunción (Paraguay)
- SALA, J.M., GONZÁLEZ, N., KRUSE, E. 1983.
Generalización hidrológica de la Provincia de Buenos Aires.
Coloquio sobre Hidrología de Grandes Llanuras. II: 973-1009. PHI - UNESCO. Olavarria.
- TERUGGI, M., DALLASALDA, L. Y DANGAVS, N. 1974.
La presencia de yeso en la laguna Las Barrancas, Prov. de Buenos Aires.
Anales LEMIT, Serie 2, 267: 123 -131. La Plata.



Simulación espacio - temporal del escurrimiento directo en la cuenca del arroyo Pillahuinco Grande

Gaspari, Fernanda Julia¹ ✉ - Senisterra, Gabriela Elba¹ - Rodríguez Vagaría, Alfonso¹
Delgado, María Isabel¹⁻² - Besteiro, Sebastián²

Recibido: 08 de abril de 2011 • Aceptado: 05 de junio de 2011

Resumen

La estimación del escurrimiento superficial de una lluvia aislada a partir de características del suelo, uso del mismo y de su cubierta vegetal permite la simulación espacio-temporal. El objetivo del trabajo fue realizar la simulación espacio-temporal del escurrimiento directo a partir de la tendencia de cambios de uso del suelo en la Cuenca del Arroyo Pillahuinco Grande, sudoeste bonaerense, Argentina. Se utilizó el método del número de curva (NC) para transformar la precipitación total en precipitación efectiva, procesando imágenes LANDSAT para la zonificación de la vegetación y uso del suelo, mediante el software Idrisi Andes®. El análisis espacio-temporal de cambio de uso generó nuevos NC. Los resultados de la zonificación temporal de uso del suelo se exponen a nivel diagnóstico. La variación del uso del suelo incidió directamente sobre el escurrimiento emitido, en consecuencia también cambió la cantidad de agua infiltrada y las pérdidas por abstracciones, y un aumento del coeficiente de escurrimiento.

Palabras clave: *Escurrecimiento directo - Número de curva - Sistema de Información Geográfica.*

Abstract

Superficial runoff estimation of a particular pluvial event, taking into account the particular soil and land use characteristics, allows a spatial-temporal simulation. The aim of this work was to simulate the direct runoff, considering the land use tendency of change, in the basin of the Pillahuinco Grande's Creek, SouthWest of Buenos Aires, Argentina. The Curve Number (CN) method was used to transform the total precipitation in effective precipitation, by processing LANDSAT images with the software Idrisi Andes®, for the distribution of vegetation and land use. The spatial-temporal analysis of the land use changes generated new values of CN. The land use variation had a direct impact over the runoff, changing the quantity of infiltrated water and the loss by abstraction, and also an increment of the runoff coefficient.

Keywords: *Direct runoff - Curve Number - Geographic Information System.*

¹ Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP) Av. 60 y 119
La Plata, Buenos Aires, Argentina.

✉ fgaspari@agro.unlp.edu.ar

² Becario de Postgrado de CONICET, CCT La Plata.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los factores que intervienen en los procesos hidrológicos es muy importante debido a que es, en las cuencas hidrográficas, donde se genera el agua necesaria para diferentes usos del suelo o consumo urbano, y por tanto la calidad y la cantidad del rendimiento hídrico se vuelve crítico (Chow *et al.* 1994).

El agua de las precipitaciones que no alcanza a infiltrar en el suelo, drena o escurre sobre la superficie del mismo, generando escurrimiento superficial fluyendo hacia los cauces. Este caudal puede ocasionar picos de crecida originando excesos hídricos con potenciales pérdidas de productividad. En esta instancia del ciclo hidrológico se debe intervenir activamente mediante la prescripción y aplicación de diferentes prácticas de conservación de suelos, que controlen el agua para evitar sus efectos negativos y que ocasione graves daños (Gaspari *et al.* 2007).

La infiltración y el escurrimiento dependen de las condiciones de la superficie del suelo, del contenido de agua y de la conductividad hidráulica del mismo (Villar Mir y Ferrer Alegre, 2005). Estos componentes del ciclo hidrológico pueden ser modelizados según una tendencia de cambio espacio - temporal expresando el carácter dinámico de la información incluida en el sistema (Gaspari *et al.*, 2009).

Un modelo hidrológico que permite transformar la precipitación total en precipitación efectiva (escurrimiento superficial) es el método del número de curva (NC). La estructura y textura del suelo y la cobertura vegetal junto a los registros pluviográficos, conforman los datos básicos para el análisis hidrológico espacio-temporal, en pequeñas cuencas hidrográficas (Kent, 1968).

El método del NC constituye una herramienta que permite realizar estudios hidrológicos en cuencas hidrográficas cuando hay una deficiencia de registros extensos y confiables, y además, fácilmente incorporable a una base de datos georreferenciados.

El uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituye una valiosa herramienta para la modelización hidrológica, permitiendo realizar operaciones de manera automática. Existen en la Argentina trabajos que utilizan esta metodología, como el realizado por Pusineri *et al.* (2002), en un sector de la llanura pampeana, desarrollando un procedimiento para determinar el parámetro NC, en forma distribuida a nivel regional usando técnicas de Teledetección y SIG. Otra aplicación es utilizar el modelo Lthia Gis, que permite el procesamiento cartográfico geoespacial bajo entorno SIG para el cálculo a nivel píxel de la lámina de escorrentía. Su empleo requiere de cartografía de suelos y vegetación y usos del suelo para obtener un mapa de número de curva a partir del cual se determina la lámina de escorrentía (Engel *et al.* 2005).

Para analizar el escurrimiento superficial desde el punto de vista de los cambios que se producen sobre la cobertura vegetal por acción antrópica y la representación de su distribución espacial, se tomó como área modal de estudio, la cuenca del arroyo Pillahuinco Grande, en la región serrana del sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. El clima de la región es templado, sub-húmedo, con temperaturas moderadas y alta variabilidad. La región presenta índices de aridez elevados y prácticamente nulo exceso de agua, con deficiencia en la época estival, que cuando no coincide con los momentos de mayores requerimientos de los cultivos no pone en riesgo las

cosechas (Spinelli Zinni, 1970). Particularmente, la cuenca hidrográfica del arroyo Pillahuinco Grande se asienta sobre el cordón serrano de Ventania, el cual presenta una topografía abrupta, que durante las tormentas genera actividad torrencial, originando caudales de avenida con escurrimientos instantáneos que pueden provocar pérdida de suelo superficial e inundaciones, a nivel local.

Fitogeográficamente se encuentra en la Región Neotropical, Dominio Chaqueño, Provincia Pampeana, Distrito Pampeano Austral. La fisonomía dominante en la región es el pastizal cuyas comunidades están dominadas por arbustos, lo que estaría indicando un pastoreo excesivo y otras áreas con suelos erosionados principalmente en forma natural. Las áreas ubicadas en barrancas bajas, muy húmedas de los bordes de cursos de agua serranos, a veces formando una franja marginal estrecha, paralela al cauce sobre suelos en general profundos, húmedos ligados a vertientes en concavidades y pendientes serranas suaves (3 a 11%), y abanicos aluviales (Frangi y Bottino, 1994). El sistema de producción actual es esencialmente mixto, basado en una ganadería vacuna que se orienta desde la cría a invernada aprovechando la cobertura natural para la alimentación del ganado durante el periodo invernal.

Según Spinelli Zinni, (1970), en la región, se reconocen 4 ambientes geológicos, denominados: serrano, intraserrano, periserrano y de llanura. En el ambiente serrano, el loess post-pampeano, puede estar apoyado directamente sobre escasas rocas antiguas frescas. El ambiente intraserrano se extiende sobre depresiones y valles longitudinales y transversales. Los materiales que rellenan estas depresiones son predominantemente gruesos y de tipo coluvial en contacto con las sierras, de carácter loessico sobre el llano general y fluvio lacustres, en parte recubiertos por material edáfico retransportado, hacia los ejes de los cursos. El ambiente periserrano se desarrolla adosado a la sierra y la bordea a manera de una falda, con depósitos eólicos lujanenses, en un plano inclinado, apoyado contra las sierras y según la pendiente decreciendo hasta la llanura. El ambiente de llanura se extiende externamente al ambiente periserrano y se caracteriza porque la cobertura loessica va perdiendo homogeneidad al tiempo que se torna más abundante la presencia de tosca, destacándose distintos sectores: (a) Septentrional: predomina la llanura extendida, homogénea, cuyos cursos fluviales alcanzan una inflexión apenas perceptible, (b) De derrames: en áreas con riqueza en carbonato de calcio disuelto, el cual, por evaporación se depositó bajo la forma de una plancha calcárea, (c) Sudoriental: representado por una capa de sedimentos eólicos, espesa y abundante, al pie de las sierras.

El objetivo del trabajo fue realizar la simulación espacio-temporal del escurrimiento superficial, a partir de la tendencia de cambios de uso del suelo en la Cuenca del Arroyo Pillahuinco Grande, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

El método del número de curva (NC), desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos, se basa en la estimación directa del escurrimiento superficial de una lluvia aislada a partir de características del suelo, uso del mismo y de su cobertura vegetal (SCS, 1964; Mintegui Aguirre y López Unzué, 1990; López Cadenas del Llano, 1998). El método expresa el escurrimiento directo (Pe) en respuesta ante una precipitación (P). Este modelo asume que un complejo suelo-vegetación se comporta de manera similar frente a P. A menor NC, menor es el escurrimiento.

El método NC utiliza datos de precipitación y características de los suelos donde no existen aforos de corrientes o datos hidrométricos (SCS, 1964).

Los números de curva en este trabajo se corresponden con la condición II de humedad antecedente, representando la humedad media del suelo.

Se simuló la tendencia de cambio de uso del suelo a partir de la situación actual en la Cuenca del Arroyo Pillahuinco Grande, Provincia de Buenos Aires, Argentina (38° LS y 61° LW), y su influencia directa sobre el escurrimiento superficial (Figura 1). Para ello, se utilizó un modelo cartográfico georreferenciado en el sistema de coordenadas planas Gauss Krügger, Faja 5 Argentina con unidades de longitud expresadas en metros. A partir de la misma se obtuvo una superficie total de la cuenca de 109.350 has.

La zonificación de la vegetación y uso del suelo actual (Situación a) en la Cuenca del Arroyo Pillahuinco Grande fue generada por el procesamiento de imágenes LANDSAT TM con una clasificación supervisada por medio del Sistema de Información Geográfica (SIG) Idrisi Andes® (Eastman, 2006). Para ello se tomaron y analizaron datos a campo, encuestas a productores y estudios antecedentes (Gaspari et al., 2007) y se contempló la clasificación de Spinelli Zinni (1970).

La simulación temporal se estableció con una zonificación proyectada de la cobertura vegetal a partir del uso actual del suelo (situación a), y dos períodos consecutivos (situación b, a los 5 años; y c, a los 10 años), donde se proyecta una condición de cobertura vegetal en degradación debido a la ausencia de medidas de manejo y conservación de suelos.

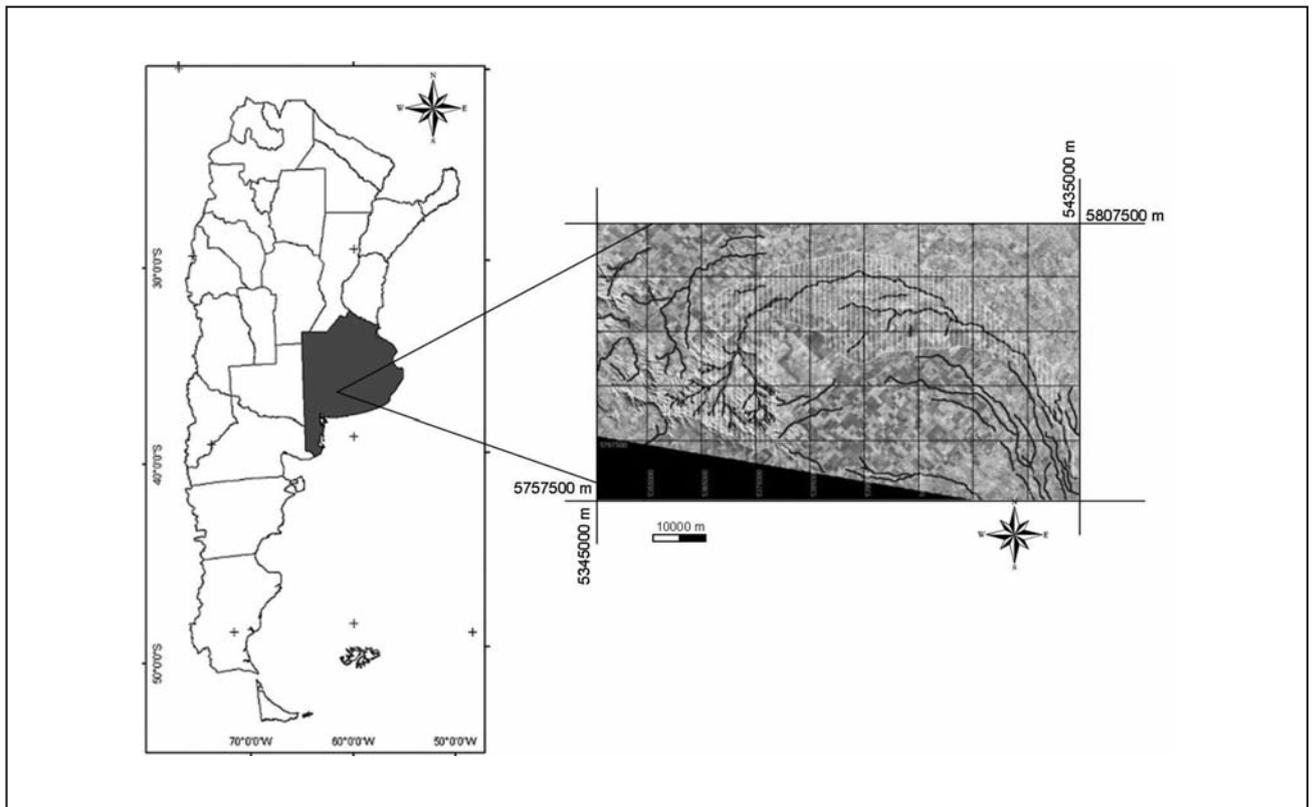


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Cuenca del Arroyo Pillahuinco Grande.

Para la definición del GH de suelos se utilizó la clase textural y el diagrama triangular con las curvas de conductividad hidráulica a saturación según la clasificación de USDA (United States Departamento of Agricultura) (López Cadenas del Llano, 1998). Posteriormente, con el procesamiento de los mapas de suelos y geomorfología, se generó el mapa de GH.

La determinación del NC actual y potencial se realizó con el uso del Macro Modeler GeoQ (Rodríguez Vagaría y Gaspari, 2010) del SIG Idrisi Andes®, representando cartográficamente diferentes situaciones de escurrimiento superficial.

A partir de la zonificación del NC se definió el coeficiente de escurrimiento ponderado para la cuenca, considerando una tormenta modal representativa de Coronel Pringles (Figura 2).

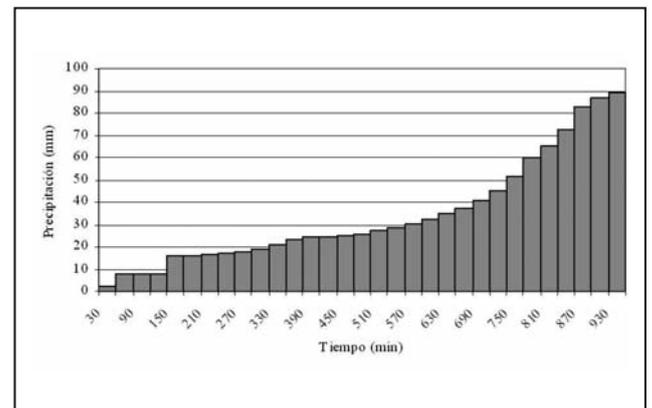


Figura 2. Curva de masa de lluvia modal de Coronel Pringles.

El escurrimiento directo (Pe) se determinó con la metodología del NC, cuantificando las pérdidas iniciales (Ia) y la infiltración (F) (Kent, 1968; López Cadenas del Llano, 1998).

El análisis se complementó con la simulación del grado de ocupación en superficie de cada NC en los períodos estudiados

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis espacio temporal de cambio de uso del suelo, por medio del procesamiento de imágenes con Sistema de Información Geográfica., generó la zonificación actual de la cobertura vegetal y uso del suelo (Figura 3 a; Tabla 1). El 65,7% de la cuenca presenta un paisaje de llanura, con uso agrícola-ganadero. La actividad agrícola-ganadera denominada en derrame, ocupa un 48,7% de la superficie basada en ganadería vacuna que se orienta desde la cría a invernada, aprovechando la cobertura natural para su alimentación. Además se identificaron áreas con uso agrícola predominante (agricultura), donde se practican técnicas convencionales y de siembra directa (17% de ocupación).

Sobre los faldeos de la sierra, en relieves de baja pendiente, se realiza agricultura extraserrana, ocupando el 19 % de la superficie de la cuenca. La actividad forestal es complementaria

a la actividad agropecuaria, en forma de cortinas rompevientos, montes de reparo y sombra.

El área serrana (14 % de la superficie de la cuenca) está cubierta por vegetación de pastos serranos y pequeños bosques de vegetación arbustiva densa, con buenas condiciones de humedad.

Tabla 1. Caracterización de la cobertura vegetal y uso del suelo.

Tipo de cobertura vegetal y uso del suelo	Superficie ocupada (hectáreas)	Porcentaje de ocupación en la cuenca (%)
Pastizal serrano	1.562,5	13,95
Agricultura extraserrana	20.827,8	19,03
Agricultura	18.605,9	17,00
Agrícola ganadero en derrame	53.299,5	48,70
Urbanización	1.249,8	1,14
Lagunas	190,9	0,17

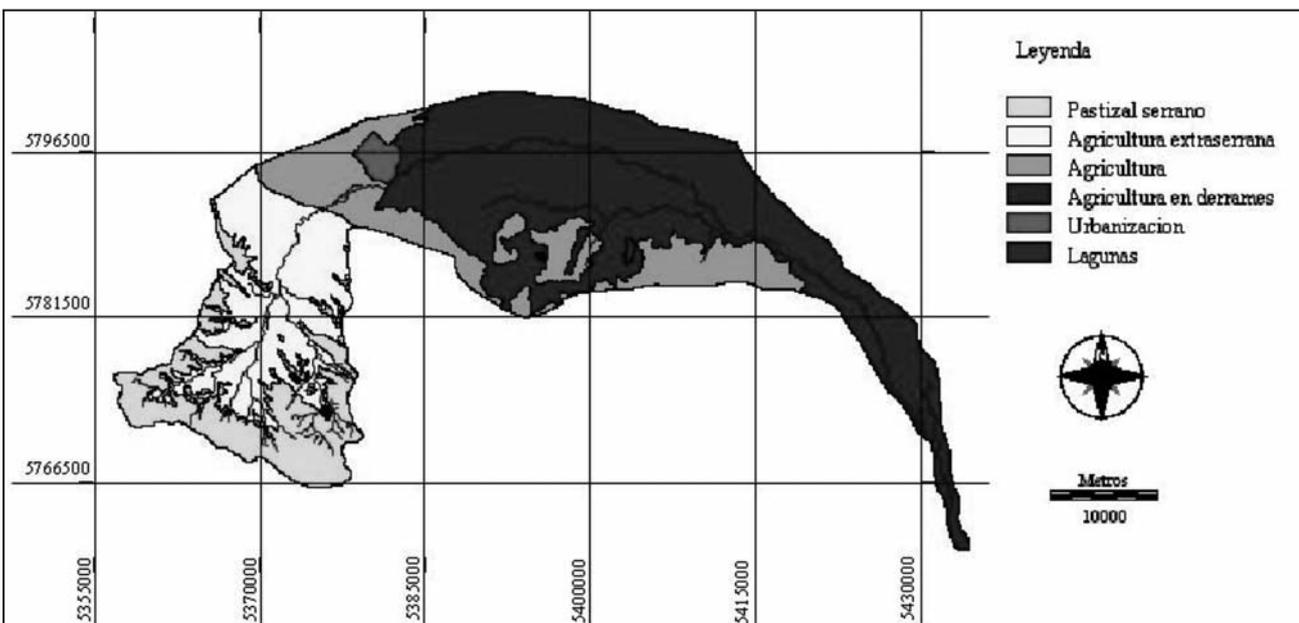


Figura 3a. Zonificación de la cobertura vegetal.

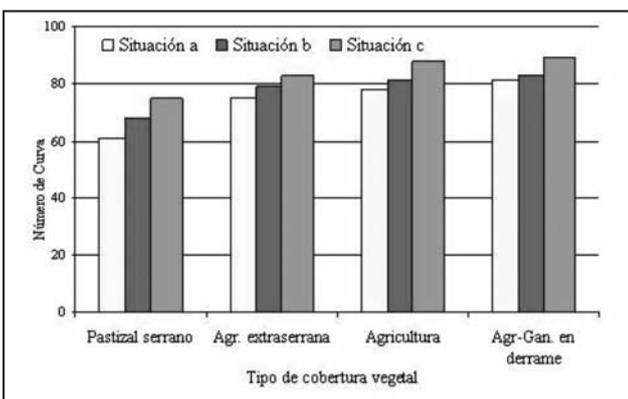


Figura 3b. Valores de NC para los períodos considerados.

Cabe mencionar que las clases urbanización y lagunas también corresponden a paisajes de llanura y no han sufrido modificaciones en el análisis temporal.

La simulación espacio temporal de los cambios de uso del suelo se exponen a nivel de diagnóstico. Los mismos generan nuevos valores de NC y coeficiente de escurrimiento (CE). Esta zonificación de la cobertura vegetal a nivel temporal indicó aumentos del valor de NC, como se expresa en la Figura 3 b. El pastizal serrano se simuló con una sobreexplotación ganadera, generando una degradación del suelo, aumentando el NC. En relación a la los tres tipos de agricultura practicadas en la zona, presentaron un NC creciente en el tiempo, debido a la ausencia de implementación de prácticas conservacionistas del suelos.

La zonificación espacio temporal del NC en la cuenca hidrográfica se expone en la Figura 4 a, b, c, indicando la situación a, b y c, respectivamente.

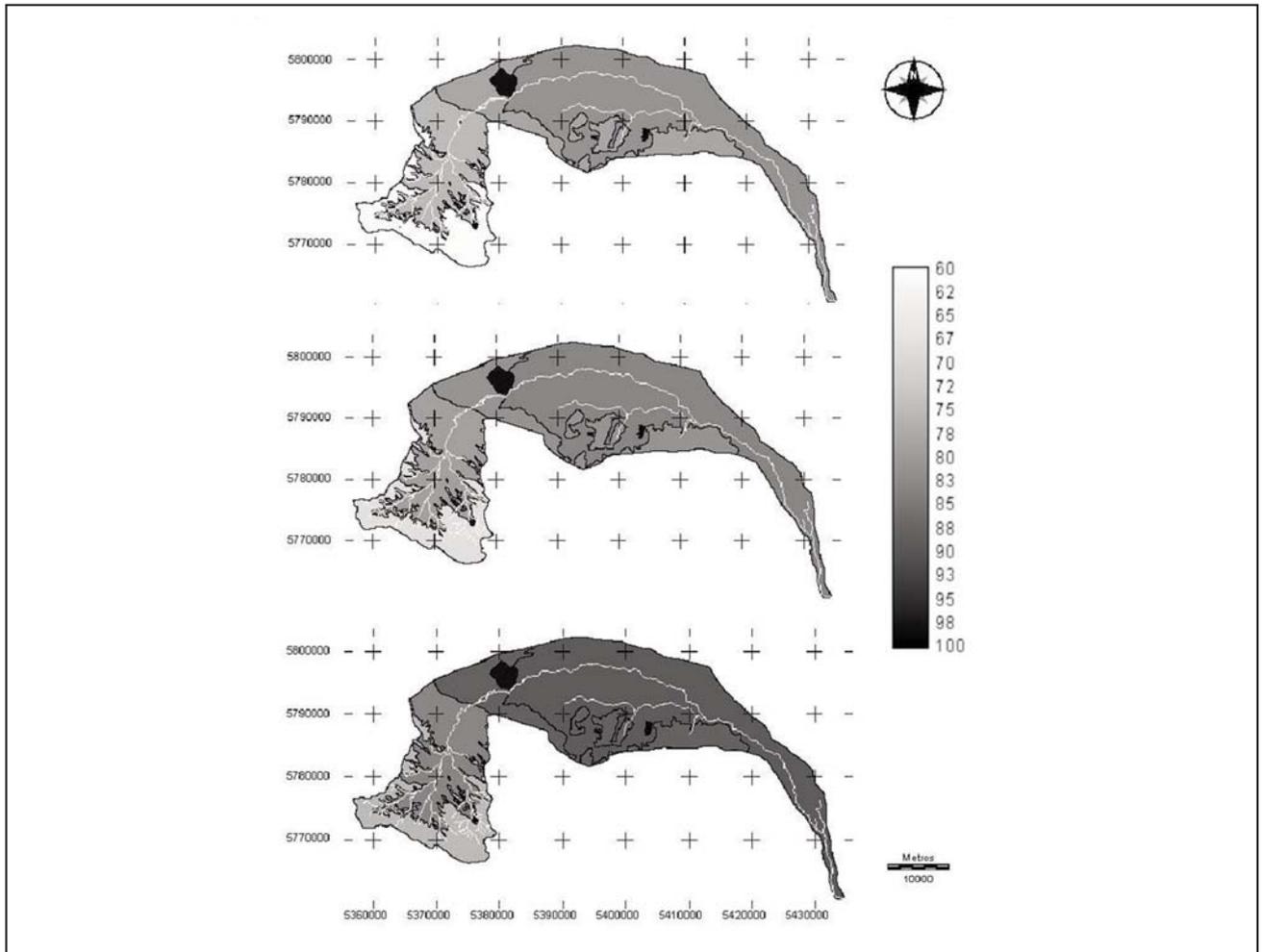


Figura 4. Zonificación de la tendencia de cambio del NC en la Cuenca del Arroyo Pillahuinco Grande.

En la Figura 5 se observan los resultados de la aplicación del método de NC para las tres situaciones temporales de estudio (a, b, c), identificando las tres variables cuantificadas (Pe, Ia, F).

El análisis de los resultados permite inferir que la variación del uso del suelo incide directamente sobre la cantidad de escurrimiento emitido, la infiltración y las pérdidas por absorciones. Esta relación expresa un aumento temporal del coeficiente de escurrimiento alcanzando los valores de 39, 45 y 53 % para los períodos a, b y c respectivamente.

En los últimos años la agricultura parece expandirse, obediendo a factores tecnológicos, económicos y climáticos. Esta situación que en muchos casos significa el uso de los suelos por encima de su aptitud productiva y en detrimento de su potencial de producción y del suelo puede conducir a un grave deterioro de los mismos y sin duda constituye uno de los problemas prioritarios a enfrentar (Gaspari y Rodríguez Vagaría, 2006).

De esta manera se plantea la necesidad de un manejo adecuado de los recursos ambientales, a fin de evitar la degradación ambiental en la cuenca. Las actuaciones deben centrarse en la utilización racional de las áreas de cultivo, que cubren las zonas de menores pendientes y suelos más fértiles, y el establecimiento de una cubierta vegetal protectora adecuada en el resto del territorio. Esta cobertura del suelo puede adquirir distintas formas: praderas, áreas de matorral, zonas forestadas. Las mismas pueden contemplar prácticas conservacionistas tendientes a evitar la degradación del ambiente de llanura y el aprovechamiento sustentable del recurso hídrico.

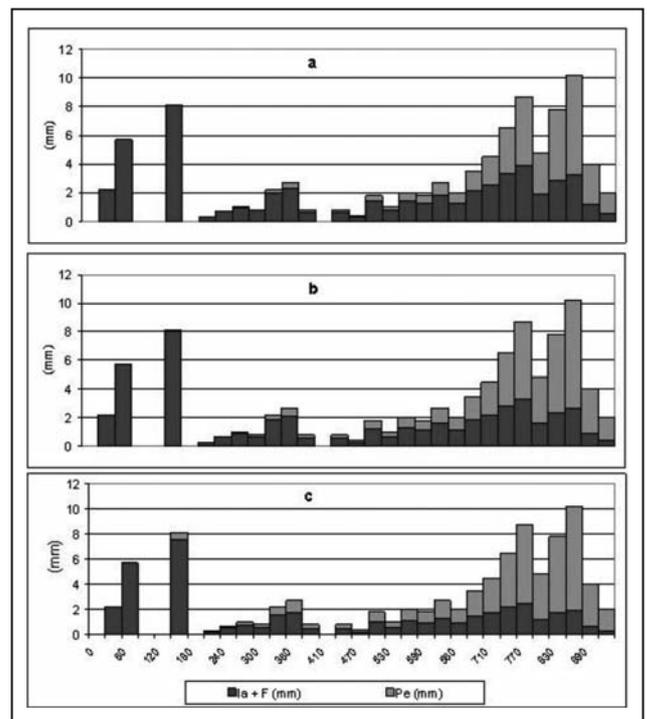


Figura 5. Variables del método de abstracciones de precipitación del SCS.

CONCLUSIONES

El cambio temporal del uso del suelo incidió directamente sobre la disponibilidad de agua superficial y demostró una falta potencial del manejo del suelo y del recurso hídrico.

En la actualidad, en la cuenca del arroyo Pillahuinco Grande el uso del suelo provoca procesos de degradación sobre el complejo suelo-agua-vegetación debido a la falta de prácticas conservacionistas. La simulación realizada indicó el aumento

del NC y consecuentemente del escurrimiento directo potencial, demostrando la necesidad de llevar adelante medidas que atiendan a un ordenamiento territorial, para el desarrollo sustentable en la cuenca.

En la cuenca, los estudios de modelización hidrológica son incipientes. Este trabajo continúa con el aporte de conocimientos básicos hidrológicos - geoespaciales para la zona en estudio.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CHOW, V.T; MAIDMENT, D. Y L. MAYS. 1994.
Hidrología Aplicada.
Editorial Mc Graw Hill. 584 pp. Colombia.
- FRANGI, J. Y O. BOTTINO. 1994.
Comunidades de Sierra de La Ventana, Bs. As., Arg.
Revista de la Facultad de Agronomía de La Plata. Tomo 71(1), p 93-133. Argentina
- GASPARI, F.J. Y A.M.RODRÍGUEZ VAGARÍA. 2006.
Zonificación Ambiental de la Cuenca Pillahuinco Grande.
XI Reunión Argentina de Agrometeorología. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. Versión CD. p 9-10. Argentina.
- GASPARI, F.J.; SENISTERRA, G.E. Y R.M. MARLATS. 2007.
Relación precipitación-escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo aplicada a una cuenca modal del Sistema Serrano de la Ventana.
Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. U.N.C. Tomo XXXIX. N°1. p 21-28. Argentina.
- GASPARI, F.J.; SENISTERRA, G.E.; DELGADO, M.I.; RODRÍGUEZ VAGARÍA, A. Y S. BESTEIRO. 2009.
Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas.
Primera Edición. La Plata. 321 pp. Argentina.
- EASTMAN, J.R. 2006.
User Manual Idrisi Andes. Clark University. Web: <http://www.clarklabs.org>.
- ENGEL, B, HARBOR, J, MUTHUKRISHNAN,S, PANDEY,S, KYOUNG, J.L, THELLER,L. 2005. L-THIA Nps.
User Manual.
Purdue University, United States Environmental Protection Agency. 46 pp. United States.
- KENT, K.M. 1968.
A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds.
U.S. Departamen of Agriculture. Soil Conservation Service. SCS-TP-149. 63 pp. United States.
- LÓPEZ CADENAS DE LLANO, F. 1998.
Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión.
Ed. TRAGSA. 945 pp España.
- MINTEGUI AGUIRRE, J. A.; F. LÓPEZ UNZU. 1990.
La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación.
Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 308 pp. España.
- PUSINERI, G.M.B, D'ELIA, M.P., PEDRAZA, R.A. Y MARANO, R.P. 2002.
Uso de los sistemas de información geográfica y teledetección para la estimación del parámetro número de curva.
En: CD y Memorias del Congreso Nacional del Agua. Villa Carloz Paz, Córdoba, Argentina.
- RODRÍGUEZ VAGARÍA, A. Y F. GASPARI, 2010.
GeoQ: herramienta para la determinación del número de curva y escorrentía bajo entorno SIG Idrisi Andes®.
GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica. N° 10, p.11-26. España.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). 1964.
Hydrology. Part I. Wathershed Olanning.
S.C.S. National Engineering Handbook. Section 4. U.S. Department of Agriculture. Washington DC. 33 pp. United States.
- SPINELLI ZINNI, F. 1970.
Estudio de situación del Partido de Coronel Pringles.
INTA. Tomo III. 92 pp Argentina.
- VILLAR MIR, J. Y F. FERRER ALEGRE, 2005.
Agua y Agronomía. Técnicas de medida y control del agua en el suelo. Capítulo I
Mundi-Prensa. p 23-86. España



Simulación de caudales de los ríos Nervión e Ibaizabal. País Vasco

Llanos, Hilario ¹ ✉ - Bâ, Khalidou ²

Recibido: 14 de abril de 2011 • Aceptado: 22 de julio de 2011

Resumen

Se ha establecido el comportamiento hidrológico del sistema de cuencas de los ríos Nervión e Ibaizabal en base a la aplicación del modelo Cequeau. El estudio se ha abordado para establecer sus recursos globales y reproducir a paso diario los caudales correspondientes a un periodo de observación de ocho años, teniendo en consideración las distintas características fisiográficas presentes en las subcuencas que componen el sistema, mediante la discretización espacial de las mismas. En este sentido, se ha constatado la especial incidencia que sobre la dinámica fluvial tienen las características estructurales y, especialmente, las de tipo litológico, ya que el sistema en su totalidad se haya intersectado por unidades hidrogeológicas de importancia regional, cuyos funcionamientos específicos afectan de un modo diferencial y de manera sectorial a los hidrogramas observados. Además, se ha puesto de manifiesto la influencia sobre el régimen hidráulico de la gestión intracuencas que se realiza en la cabecera del sistema entorno a la presa de Undurruga, para el abastecimiento del Gran Bilbao y su comarca, en base a un transvase que tiene su origen en los embalses de la vecina cuenca del río Zadorra. Los resultados obtenidos son altamente satisfactorios y ponen en evidencia la validez del modelo analizado que, dado su carácter distribuido, se presenta como un elemento operacional extremadamente flexible a las necesidades actuales, pudiéndose incorporar tanto a la previsión de avenidas como a estudios de planificación hidráulica sectorial.

Palabras clave: Hidrología, cuenca Nervión-Ibaizabal, modelos matemáticos, Cequeau, País Vasco.

Abstract

The hydrologic behaviour of the Nervión and Ibaizabal rivers basin system is established by applying the Cequeau model. The research is raised in order to establish its global resources and replicate the daily discharges for an eight year period, taking into account the different physiographic characteristics of the sub-basin that compose the system, through their areal discretization. That way, the special importance of the watershed structural characteristics and, specially, the lithologic ones, over the fluvial dynamic response has been shown, since the whole system is intersected by different regional importance hydrogeological units which affect the observed hydrographs in a different and regional way. Moreover, it is shown that the basin management carried out for the water supply of Bilbao and its region, on the basis of a decant that take place in the reservoirs of the Zadorra river basin, in the heading of the system close to the Undurruga dam, has a high influence over the analyzed

1 Universidad del País VascoUPV/EHU. Departamento de Geodinámica. 1006 Vitoria-Gasteiz, País Vasco

✉ gpplach@vc.ehu.es

2 Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Interamericano de Recursos del Agua. Facultad de Ingeniería, Cerro de Coatepec, C.U., Toluca, Estado de México, C.P.50130

hydraulic behaviour. The obtained result are highly satisfactory and assert the validity of the employed model that, taking into account its spread character, is shown as an extremely flexible operational element to the present needs, which could be included in the flood forecast and in the regional hydraulic planning studies.

Keywords: Hydrology, Nervión-Ibaizabal basin, mathematical models, Cequeau, Basque Country.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la disponibilidad de los recursos hídricos, permite a los países planificar el uso y conservación racional de los mismos a través del diseño de planes maestros multidimensionales basados en la política y estrategia de desarrollo definida por cada país tanto en el ámbito nacional como en el internacional (*UNESCO 1995*). Para alcanzar este objetivo, el uso de los modelos hidrológicos es una herramienta imprescindible y de gran utilidad (*Llamas 1985*). A lo largo del tiempo, se han venido utilizado diferentes modelos hidrológicos para analizar las magnitudes de las variables que intervienen en el ciclo del agua, siendo así que en el campo de la Hidrología aplicada, la mayoría de los modelos tienen por finalidad la estimación de los recursos hídricos globales de una cuenca vertiente.

En la práctica, un modelo de simulación de caudal es útil para resolver un importante número de problemas hidrológicos tales como la reconstrucción y generación de largas series de datos para la evaluación de recursos y el dimensionamiento de obras hidráulicas, entre otros, la detección de errores de observaciones y la estimación de caudales en puntos no aforados de la red hidrográfica, así como en la explotación de embalses y en el análisis y previsión de avenidas asociadas a eventos meteorológicos de carácter extremo. De forma complementaria, y con un enfoque multidisciplinar, los modelos hidrológicos son igualmente útiles para el desarrollo de proyectos ambientales y para el estudio de la calidad química del agua de un río; ejemplo de ello son los modelos de simulación del transporte de contaminantes e incluso los de simulación de los niveles de un acuífero en zonas agrícolas, entre otros.

Existen dos tipos de modelos de simulación lluvia-escurrimiento, los agregados y los llamados distribuidos. En los primeros las variables meteorológicas y fisiográficas son promediadas en el conjunto de la cuenca y en los modelos distribuidos, que representan un avance significativo en la investigación hidrológica, se posibilita el tener en cuenta la variabilidad espacial de la lluvia y de los diferentes parámetros que intervienen en cada proceso tales como evapotranspiración, infiltración, escorrentías hipodérmica y subterránea. Esta característica de los modelos distribuidos se fundamenta en la evidencia de que en una misma cuenca existe una variabilidad espacial natural de la precipitación, de los parámetros de infiltración y de la estructura de la red de drenaje.

Así pues, la tendencia actual es el desarrollo y utilización de modelos distribuidos a pesar de que en muchos estudios aún se siguen aplicando los llamados modelos agregados en los que la variabilidad espacial de la precipitación y demás características se pierde al quedar promediadas en el conjunto de la cuenca (*HEC 1981; Jordan y Wisner 1983; USACE 1991; Quinn et al. 1995*). En este sentido, en el presente artículo se presenta la aplicación del modelo distribuido Cequeau (*Morin et al. 1981*) para la generación de caudales diarios y el análisis global del ciclo hidrológico en las diferentes subcuencas que componen el

sistema de cuencas formado por los ríos Nervión e Ibaizabal, integrantes ambos de la vertiente cantábrica del País Vasco (Figura 1).

EL SISTEMA NERVIÓN IBAIZÁBAL

EL sistema hidrológico Nervión Ibaizabal constituye con diferencia la arteria fluvial más importante de la Comunidad Autónoma Vasca, ya que abarca más de la mitad de la superficie de la provincia de Bizkaia y parte de la de Araba, internándose incluso en territorio burgalés por su extremo Suroeste, si bien con carácter puntual (Figura 1). Su importancia se ha visto incrementada por el elevado número de núcleos poblacionales e industriales que de antaño se han asentado en sus márgenes especialmente en los tramos bajos del sistema. Al estar limitado por la divisoria de aguas existente entre las vertientes cantábrica (Norte) y mediterránea (Sur) y situarse muy cerca de la costa los ríos que lo integran deben salvar en su recorrido grandes desniveles por lo que presentan pendientes acusadas, factores éstos que, unidos a las características climáticas existentes en la zona, son la causa de su elevada torrencialidad y de frecuentes crecidas, como las que tuvieron lugar en el mes de agosto de 1983 y posteriormente, y que causaron graves daños materiales y pérdidas humanas (*DGPV 1985; DFV 1984*).

El sistema presenta una superficie aproximada de 953 km², incluyendo las cuencas de los ríos Nervión e Ibaizabal, hasta su unión en las cercanías de Basauri. La cuenca del Nervión tiene una superficie de 536 km² extendiéndose el cauce en dirección Sur Norte con un recorrido de unos 55 km desde la sierra de Guillarte (Araba) que constituye el límite más meridional de la divisoria de aguas en territorio vasco. En un primer tramo de su cabecera el río normalmente no lleva agua salvo en períodos de intensas lluvias o deshielo, y pasa a presentar un régimen permanente únicamente al pie de los escarpes de la Peña de Orduña, tras salvar una cascada superior a los 100 m de desnivel. Posteriormente, tras atravesar la depresión de Orduña, condicionada por la existencia de una estructura diapírica (*ITGE 1990; EVE 1996*), llega a la localidad de Llodio donde recibe las aportaciones de los ríos Altube y Arnauri, procedentes del macizo del monte Gorbeia (1475 m).

La cuenca del Ibaizabal, con una superficie de 417 km², se sitúa al Noreste de la del Nervión comprendiendo una gran planicie central en torno a la localidad de Durango y valles aledaños, entre los que destaca el de Arratia por donde discurre el río del mismo nombre. La cuenca limita al Sur y al Sureste con el macizo del monte Gorbeia que la separa de las cuencas del Nervión y del Ebro, al Oeste y Sureste con los macizos de los montes de Anboto (1327 m) y Udalaiz (1093 m) respectivamente, y por el Norte con los montes del Oiz (1029 m). Con una longitud total de 43,5 km atraviesa desde el valle de Atxondo, y en sentido Suroeste Noroeste, gran parte de Bizkaia alojado en el sinclinal de Bilbao (*EVE 1996*), cuya estructura determina el trazado del cauce principal hasta su confluencia con el río Nervión. El río Arratia, cuyas aportaciones naturales derivan en su mayoría del macizo del monte Gorbeia, constituye un río muy especial

ya que se encuentra afectado en su cabecera por la presa de Undurraga utilizada en el trasvase que se efectúa desde la vecina cuenca del río Zadorra.

El sistema está fuertemente intervenido por el hombre siendo los principales usos del suelo los agropecuarios y forestales con

replantaciones de coníferas, especialmente de pino (Figura 2). Por otra parte, se encuentra muy industrializado, especialmente en su tramo final desde Basauri donde se encuentran los núcleos poblacionales e industriales más densos de Bizkaia que constituyen el Área Metropolitana de Bilbao.

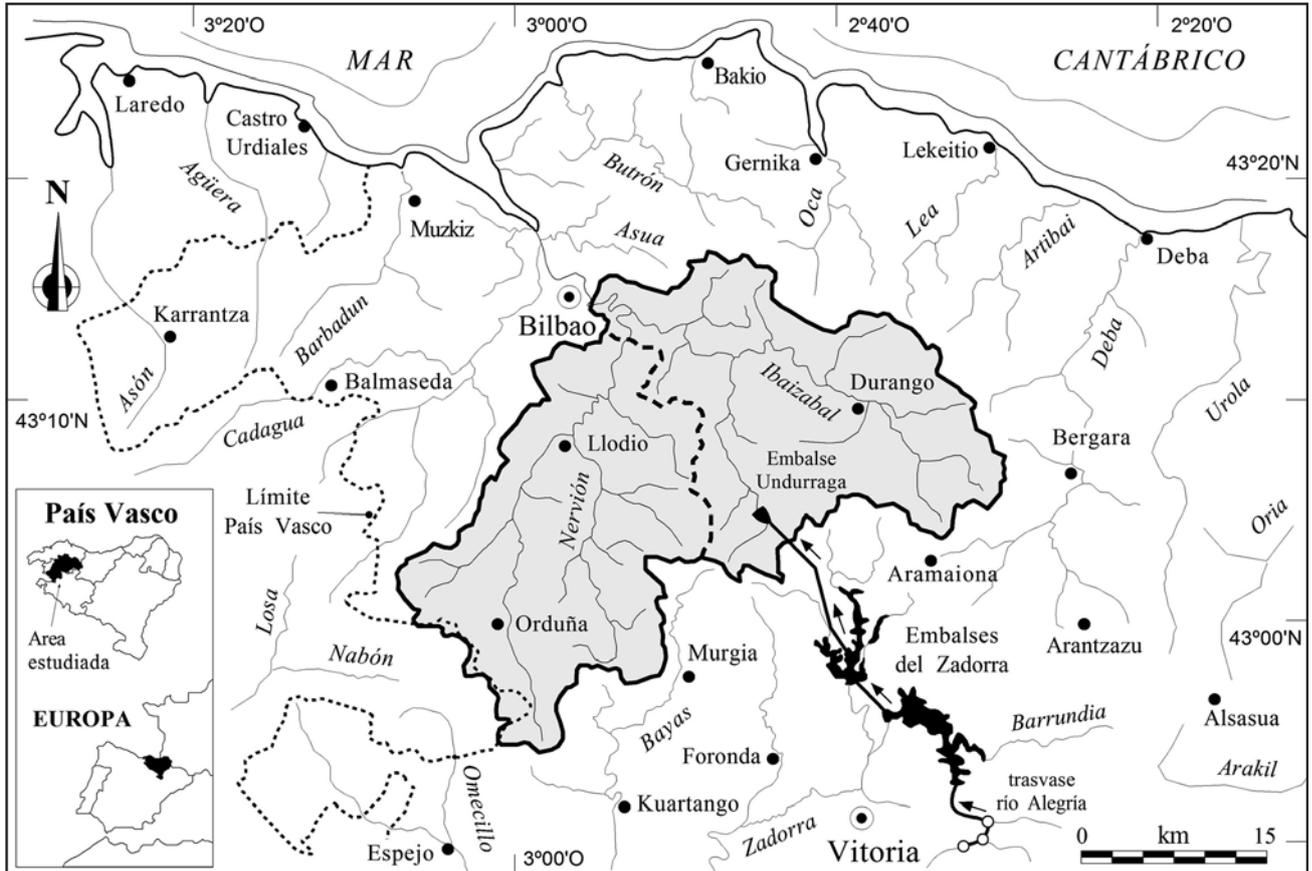


Figura 1. Localización del sistema Nervión Ibaizabal.

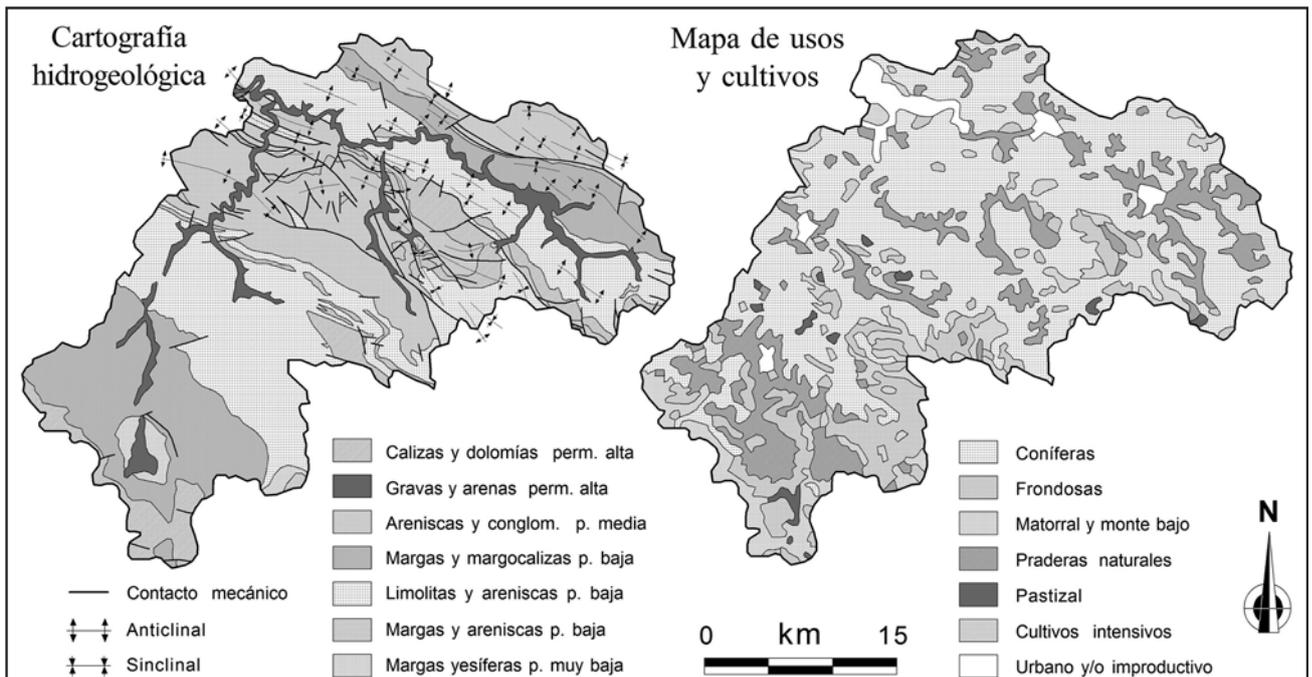


Figura 2. Cartografía hidrogeológica (establecida a partir de ITGE 1990) y mapa de cultivos y aprovechamientos (MAPA 1987).

Desde el punto de vista geológico el sistema de cuencas pertenece a la parte central de la Cuenca Vasco Cantábrica (ITGE 1990; EVE 1996) limitado de Norte a Sur por dos grandes unidades estructurales, el Sinclinorio de Bizkaia y la Plataforma Monoclinal Alavesa, entre las que se aloja el llamado Anticlinorio de Bilbao, el cual constituye una amplia banda de materiales cretácicos sumamente compleja que, en dirección Noroeste Sureste, cubre la mayor parte de la zona de estudio. Los materiales con una mayor representación son de naturaleza calcárea y alternan con secuencias de arcillas y areniscas en respuesta a los distintos cambios que tuvieron lugar en las condiciones de sedimentación en la Cuenca Vasco Cantábrica, lo que dio lugar a numerosos e importantes cambios laterales de facies entre las unidades sedimentarias (Figura 2).

A efectos de establecer el comportamiento del sistema interesa analizar las características hidráulicas de los materiales, y, en este sentido, hay que señalar la existencia de cuatro unidades hidrogeológicas de importancia regional, de las cuales una está constituida por areniscas y conglomerados, unidad de Oiz (EVE 1996), y el resto por calizas de desigual litología y edad, unidades de Aramotz, Itxina y Subijana (Antigüedad 1986; EVE 1996; Garfias y Llanos 2001). A excepción de la unidad de Oiz cuyos materiales muestran una permeabilidad por porosidad intergranular con escasa incidencia en el sistema, el resto y especialmente las unidades de Aramotz y Subijana afectan de un modo desigual a la dinámica fluvial.

El grado de afectación es variable en función del nivel de karstificación de sus materiales y de su ubicación en el sistema. Así la de Aramotz, con una circulación subterránea aprovechando la red de fracturas y la porosidad primaria de las calizas condiciona una descarga adicional claramente desfasada a través de sus manantiales hacia la cuenca del río Ibaizabal. Por su parte, la unidad de Subijana, aflorante en el curso alto de la cuenca del río Nervión, al Sur del diapiro de Orduña, forma parte de una amplia plataforma natural de materiales calizos cuyas condiciones estructurales posibilitan el tránsito de parte de sus recursos superficiales hacia las cuencas anexas situadas fuera del sistema a través de sus niveles karstificados.

EL ABASTECIMIENTO AL GRAN BILBAO

El sistema de cuencas de los ríos Nervión e Ibaizabal tiene la particularidad de estar afectado de trasvases desde cuencas adyacentes al objeto de garantizar el abastecimiento de la Comarca del Gran Bilbao (CAGB 1995), situada en la parte baja del sistema, que incluye un conjunto de 25 municipios. El Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia es actualmente la entidad responsable de la prestación de dicho servicio a aproximadamente un millón de habitantes de la provincia de Bizkaia. La gestión del ciclo completo se inicia con la captación del agua en los embalses de Ullibarri Ganboa y Urrunaga ubicados en la cuenca del río Zadorra, situada inmediatamente al Sureste del sistema en estudio. Las presas, de planta recta con contrafuertes de cabeza redonda, están enlazadas mediante una galería forzada de 3.551 m. de longitud y 2,5 m de diámetro (ASZ 1958) lo que permite el trasvase entre ambos embalses al objeto de mantenerlos sensiblemente al mismo nivel (Figura 3).

El dispositivo se completa con una segunda galería forzada, de 12.502 m. de longitud y 4,25 m. de diámetro, capaz de aportar un caudal máximo de 54 m³/seg, que tiene su origen en el embalse de Urrunaga y en cuyo extremo se localiza una chimenea de equilibrio que da paso a un pozo en carga, de 431 m. de longitud y 329 m. de desnivel, que enlaza con las turbinas de la central subterránea de Barazar para producción de energía hidroeléctrica, con una potencia instalada de 171.000 KW. Finalmente, de la central arranca un socaz en túnel de 1.024 m. de longitud para evacuación del agua hasta la cuenca alta del río Arratia, tributario del río Ibaizabal.

Es precisamente en este punto donde se localiza el embalse de Undurruga al que afluyen procedentes del sistema Zadorra una media de 176 hm³/año de los cuales un 55% se derivan mediante bombeo a la estación de tratamiento de agua potable de Venta Alta (Figura 3) con destino al abastecimiento y el resto (45%) se vierte directamente al cauce situado aguas abajo de la presa. Este esquema se complementa con las aportaciones secundarias procedentes del sistema Kadagua (pantanos de Ordunte, Oiola, Artiba y Nosedal), de captaciones directas del río Arratia y de otros pequeños embalses situados en la propia cuenca del Nervión (presas de Lekubaso y Zollo).

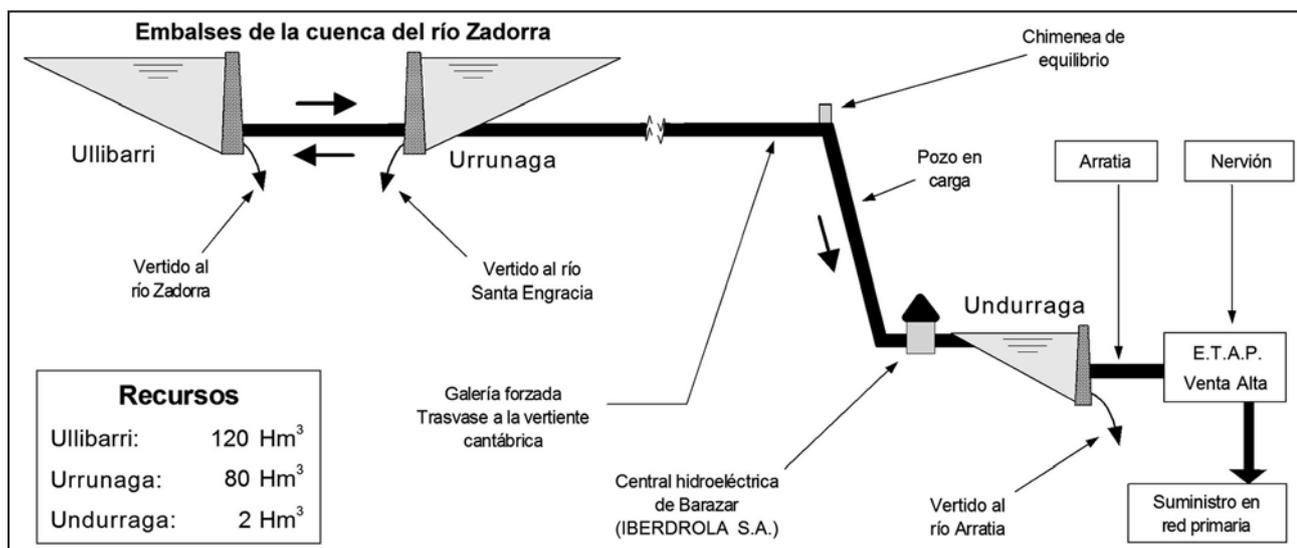


Figura 3. Sistema principal de abastecimiento del Gran Bilbao (modificado de CAGB 1995).

EL MODELO CEQUEAU

El modelo hidrológico Cequeau ha sido desarrollado en el INRS-EAU de la Universidad de Québec para reproducir el fenómeno de la escorrentía en una cuenca vertiente (Morin et al. 1981; Morin y Paquet 2007). Se trata de un modelo de parámetros distribuidos de uso flexible, que permite simular tanto los hidrogramas de descarga como importantes aspectos de la calidad del agua y su evolución a lo largo de un cauce, todo ello a pasos de tiempo variables que van desde una hora hasta un día. El modelo ha sido utilizado en varias cuencas de diferentes países de América, Europa y África para la gestión de recursos (Morin et al. 1982; Ayadi y Bargaoui 1998; Llanos et al. 1999; Bâ et al. 2001, 2009) y, así mismo, ha sido integrado en estudios de la Organización Meteorológica Mundial (WMO 1992) para su uso alternativo y/o comparación con otros modelos hidrológicos.

Al tratarse de un modelo distribuido tiene en cuenta las características fisiográficas de la cuenca y sus variaciones, tanto en el espacio como en el tiempo, como la cubierta vegetal y usos del suelo, hidrogeología, la red de drenaje, etc.; un ejemplo de ello son los documentos gráficos representados en la Figura 2 citados con anterioridad. Ello es posible gracias a que posibilita la descomposición de la cuenca en elementos cuadrados enteros, de igual dimensión, y en elementos parciales que resultan de la subdivisión de un elemento entero en un máximo de cuatro elementos menores definidos por la existencia bien de divisorias hidrográficas naturales o de infraestructuras hidráulicas como grandes canales de drenaje, trasvases y embalses para la regulación de recursos. Esta subdivisión permite tener en cuenta la influencia de la topografía de la cuenca en la generación y posterior vehiculización de la escorrentía. Además, el modelo permite calcular los caudales tanto en puntos de una cuenca donde se realiza un control continuo de los mismos como en puntos no aforados y, así mismo, ofrece la posibilidad

de simular la existencia de almacenamientos artificiales y de efectuar previsiones a diferentes plazos de tiempo.

El proceso de transformación de la lluvia en escorrentía requiere de los siguientes tres tipos de datos: fisiográficos, meteorológicos e hidrológicos. En relación con los primeros, hay que establecer para cada uno de los elementos cuadrados la altitud absoluta en metros y el porcentaje de bosques, cultivos, lagos, embalses y humedales naturales. Del mismo modo se han de integrar las características hidrogeológicas de la cuenca definiendo diferentes sectores con litologías y comportamientos hidráulicos similares, lo que facilita el establecimiento de los parámetros relacionados con la infiltración. De los datos meteorológicos, hay que diferenciar entre la precipitación líquida y la precipitación en forma de nieve, además, se precisa de las series de temperaturas del aire, máximas y mínimas, dado que controlan la fusión de la nieve. En cuanto a los datos hidrológicos se deben conocer las aportaciones registradas en las estaciones de aforo que se desean analizar, a fin de verificar el grado de ajuste con los caudales calculados por el modelo.

El modelo se encuentra estructurado en dos módulos principales que, en conjunto, tratan de describir las diferentes etapas del agua desde que alcanza la superficie de la cuenca hasta su llegada a la desembocadura de la misma bajo la forma de escorrentía, tanto superficial como subterránea (Figura 4). El primero de ellos se denomina función de producción y el segundo se conoce como función de transferencia. La función de producción tiene por objeto representar el movimiento vertical del agua, esto es, los diferentes procesos físicos por los que atraviesa el agua desde su precipitación hasta que está disponible como lluvia neta, apta para incorporarse a la escorrentía. Estos procesos son simulados, mediante la representación del suelo y del conjunto de materiales subyacentes bajo la forma de reservorios comunicantes, con la ayuda de expresiones matemáticas que reproducen las diferentes componentes que intervienen en el ciclo hidrológico.

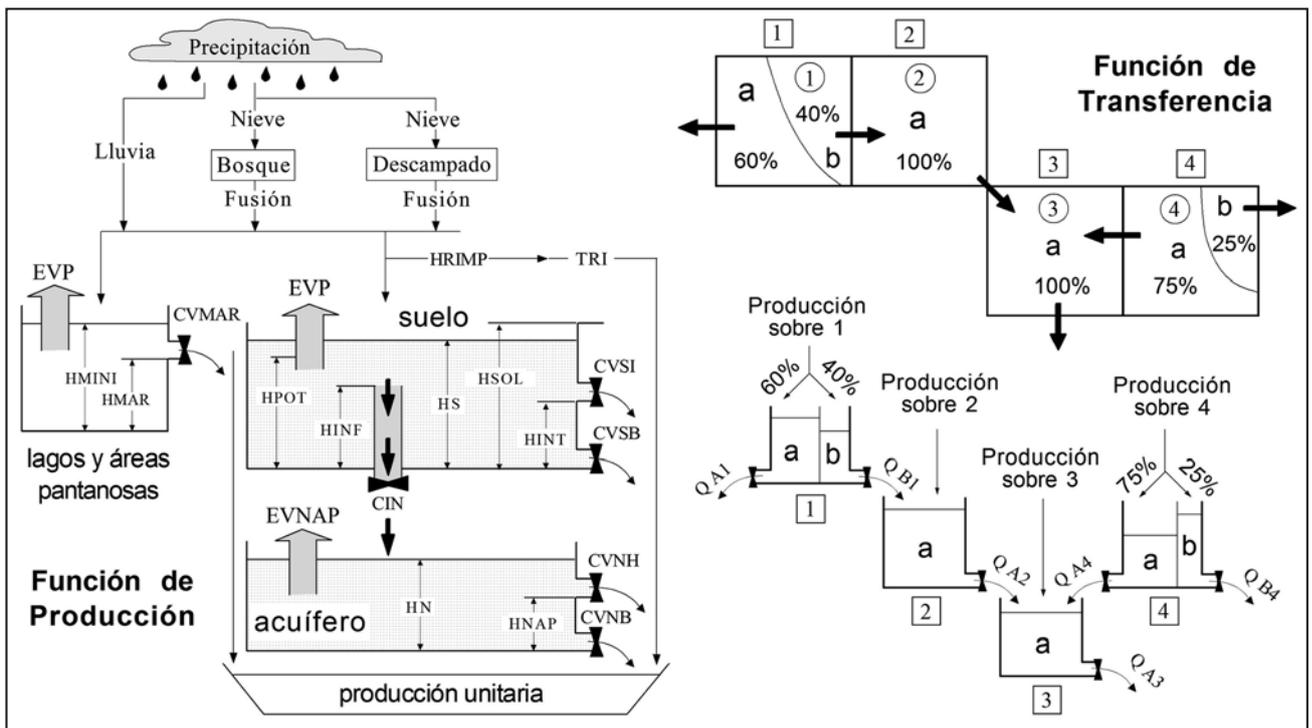


Figura 4. Funciones de producción y transferencia del modelo Cequeau.

La primera etapa de la función de producción establece para el recipiente denominado "suelo" (Figura 4) la lámina de agua procedente de la precipitación líquida y la derivada de la fusión de nieve, cuando exista, la cual se adiciona a la reserva de agua en el suelo, operación que realiza el modelo para cada elemento de la cuenca e intervalo de tiempo, en nuestro caso día del año. En el supuesto de la existencia de nieve los equivalentes en agua (mm) para la nieve existente en zona boscosa y no boscosa se establecen, respectivamente, mediante:

$$Nfb = C_1 \cdot \max[0, Tje - Tsc] \cdot hr \quad Nfsb = C_2 \cdot \max[0, Tje - Tsc] \cdot hr \quad (1)$$

siendo C_1, C_2 las intensidades potenciales de fusión en zona boscosa y no boscosa (mm/°C/día)

Tsc, Tsd los umbrales de temperatura de fusión en zona boscosa y no boscosa (°C)

hr un factor de tiempo (día)

Tje la temperatura media en el elemento cuadrado (°C)

Por su parte, las pérdidas ocasionadas por la acción combinada de la evaporación y la transpiración de la vegetación se calculan para cada intervalo de tiempo seleccionado mediante la fórmula de *Thornthwaite (1957)* modificada, teniendo en cuenta la duración potencial de la insolación en función de la latitud y del día del año, así como el estado de saturación del suelo, tal que:

$$Ethorn = \frac{10}{30,4} \cdot 1,62 \left[\frac{10Tje}{Xit} \right]^{Xaa} \quad (2)$$

siendo $Ethorn$ la evapotranspiración potencial (mm)

Tje la temperatura media sobre el elemento considerado (°C)

Xaa un exponente (adim)

Xit valor del índice de Thornthwaite (adim)

Siguiendo con el esquema precedente, las escorrentías superficial y retardada dependerán del nivel de agua en el suelo, de los coeficientes empíricos de vaciado y de las propias cotas de vaciado de este reservorio, de acuerdo con las expresiones:

$$Es = Hs - Hsol \quad Er_1 = \max(0, [Hs - H_{int}] \cdot Cvs_1) \quad Er_2 = [Hs - Er_1] \cdot Cvs_b \quad (3)$$

siendo Es la escorrentía superficial (mm)

$Hs, Hsol$ nivel de agua en el suelo y altura del reservorio "suelo" (mm)

Er_1 y Er_2 las escorrentías retardadas procedentes de los orificios alto y bajo (mm)

H_{int} el umbral de vaciado alto (mm)

Cvs_1, Cvs_b los coeficientes de vaciado alto y bajo (adim)

En este sentido, la escorrentía superficial tiene lugar cuando la altura de agua disponible en el suelo es superior a la altura del reservorio; es decir, cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad de infiltración del suelo. La escorrentía retardada se produce si la altura de agua en el reservorio es superior al umbral del orificio de vaciado, o en otras palabras, cuando el volumen de agua infiltrada es mayor que el déficit

de humedad del suelo. De este modo, las escorrentías superficial e hipodérmica generadas en cada elemento son adicionadas al movimiento de agua que tiene lugar en las superficies impermeables, para dar lugar a una parte de la lámina de agua finalmente disponible para su incorporación a los cauces.

Existe todavía una parte de agua procedente del suelo que, siempre y cuando exista un acuífero subyacente, se va a infiltrar a través de la zona no saturada, alimentando directamente a un segundo reservorio ("acuífero", Figura 4). Las salidas o aportaciones que se deriven de dicho reservorio dependerán de la posición del nivel piezométrico en el acuífero, de sus coeficientes de vaciado y de dos alturas de vaciado definidas para diferentes situaciones hidráulicas, tal que:

$$Snap_h = Cvn_h \cdot \max[0, Hn - Hnap] \quad Y \quad Snap_b = Cvn_b \cdot Hn \quad (4)$$

siendo $Snap_h, Snap_b$ las escorrentías de vaciado alto "rápido" y bajo "lento" (mm)

Cvn_h, Cvn_b los coeficientes de vaciado alto y bajo (adim)

Hn la cota del nivel piezométrico (mm)

$Hnap$ el nivel de vaciado alto del reservorio (mm)

Estas aportaciones se suman a las láminas de agua preexistentes, determinando la cantidad total de agua disponible para su incorporación a los cauces. Dicha incorporación se efectúa de elemento en elemento, de acuerdo con la estructura de la función de transferencia. Este proceso, que puede seguirse en la Figura 4, está básicamente controlado por dos parámetros, el tiempo de concentración de la cuenca y un coeficiente de transferencia específico para cada celda, relacionado con las características hidráulicas de la misma de acuerdo con:

$$Xkt_i = 1 - e \left[- \min \left(36, \frac{Exxkt \cdot Rma}{\max(Sl, Slac)} \cdot \frac{100}{Cekm} \right) \right] \quad (5)$$

siendo Xkt_i el coeficiente de transferencia del elemento i (adim)

$Exxkt$ el parámetro de cálculo del coeficiente (adim)

Rma el porcentaje acumulado de la superficie de los elementos situados aguas arriba (%)

$Sl, Slac$ la superficie y porcentaje de la superficie de agua en el elemento (km², %)

$Cekm$ la superficie de los elementos enteros (km²)

La función de producción, por tanto, está orientada a la obtención de un volumen de agua disponible para ser inmediatamente transferida. Esta transferencia se efectúa de elemento en elemento. El volumen de agua disponible sobre cada elemento parcial se obtiene multiplicando la lámina de agua producida sobre el elemento entero por la superficie del elemento parcial considerado. Este volumen es añadido a los volúmenes entrantes a este elemento, procedentes de los elementos parciales adyacentes situados en una posición estructural e hidráulica superior (Figura 4).

El modelo Cequeau permite además la existencia en una cuenca de presas reales o incluso ficticias, al objeto de simular posibles trasvases y derivaciones diversas. El procedimiento de cálculo se describe sintéticamente en la Figura 5. La parte izquierda de la Figura reproduce la presencia de una presa a la salida del elemento parcial ICP, en tanto que a su derecha se muestra la esquematización efectuada por el modelo, situando

la presa entre los elementos ICP e ICPAV, este último localizado inmediatamente aguas abajo, de modo que el volumen de agua V_e (m^3) entrante a una presa situada en un elemento parcial ICP está determinado por:

$$V_e = Xkt_{ICP} \cdot Volcp_{ICP} \quad (6)$$

siendo Xkt_{ICP} el coeficiente de transferencia del elemento ICP (adim)

$Volcp_{ICP}$ el volumen de agua disponible en el elemento ICP (m^3)

Hay que indicar que el coeficiente de transferencia en la práctica debe de ser cercano a 1 puesto que se entiende que en una presa el agua está en principio inmediatamente disponible para su evacuación.

El volumen evacuado de la presa (VBAR), para un paso de tiempo concreto y calculado de diferente modo según se trate de una presa real o ficticia, es transferido al elemento siguiente aguas abajo (ICPAV) incorporándose al flujo superficial en el cauce. En el caso de una presa real los vertidos son conocidos y constituyen parte de los datos hidrométricos de entrada al modelo, en tanto que en una presa ficticia son calculados por el método de *Goodrich (1931)* a partir de la ecuación de continuidad:

$$\frac{2V_2 + O_2}{\Delta t} = \frac{2V_1 - O_1 + 2\bar{I}}{\Delta t} \quad \text{con} \quad O_2 = f\left(\frac{V_2}{10^6}\right) \quad (7)$$

siendo V_1, V_2 el volumen almacenado al comienzo y al final del paso de tiempo (m^3)

Δt el intervalo de tiempo (día)

O_1, O_2 el caudal vertido al comienzo y al final del periodo ($m^3/\text{día}$)

\bar{I} el caudal medio entrante ($m^3/\text{día}$)

f un polinomio de grado inferior o igual a 5

Este último polinomio es el que en todo momento relaciona el caudal saliente en el embalse con el almacenamiento.

APLICACIÓN AL SISTEMA NERVIÓN IBAIZABAL

El análisis se abordó a paso diario para el periodo 1988-1995, al objeto establecer sus recursos globales y la gestión que se viene desarrollando en la cabecera del río Arratia entorno a la presa de Undurraga, teniendo en cuenta las diferentes estaciones hidrométricas existentes, tanto las afectadas por los vertidos de la presa de Undurraga, caso de las estaciones de Urkizu y Abusu-Lapeña, como la de Artezabal localizada en el sector central del río Ibaizabal y la de Zaratama perteneciente a la parte baja del río Nervión. Hay que indicar que el periodo de estudio considerado de ocho años hidrológicos incluye toda una gama de posibles regímenes acaecidos en los sistemas de cuenca de los ríos Zadorra y Nervión Ibaizabal. Así mismo, incluye el periodo de acentuada sequía que tuvo lugar durante el año 1989 y principios de 1990, pero que ya empezó a manifestarse durante el otoño 1988 de modo que al inicio del invierno las reservas totales de los embalses del Zadorra estaban a tan solo el 30% de su capacidad.

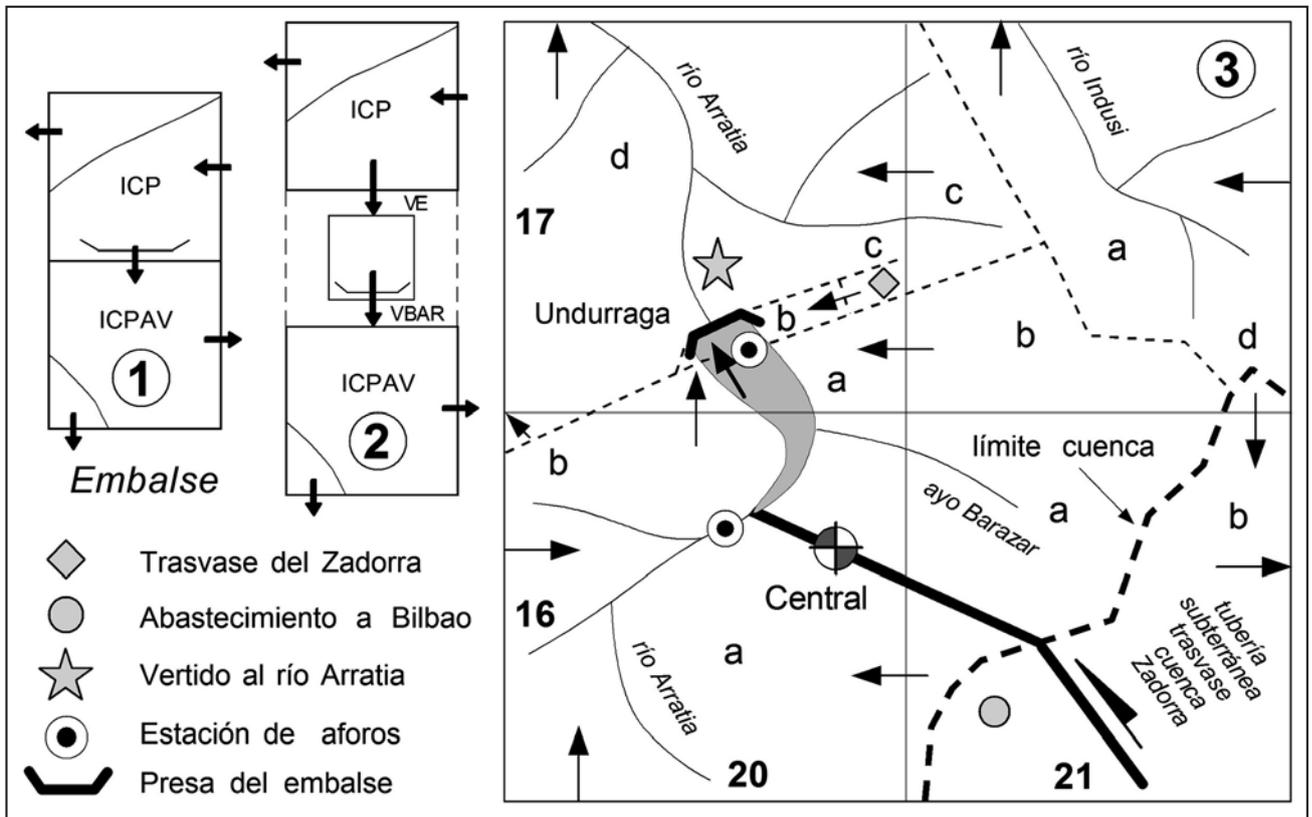


Figura 5. Esquematzación de un embalse por el modelo Cequeau (1-2) y ubicación de presas reales y ficticias adoptada en torno al embalse de Undurraga para la regulación de los recursos del sistema Zadorra y de la cuenca alta del río Arratia (3).

Como ya se ha adelantado, al tratarse de un modelo distribuido, es posible incorporar de manera sectorial la información básica que incluye las características de la red de drenaje y los datos fisiográficos e hidrometeorológicos, con los que estimar para cada elemento en que se descompone la cuenca los parámetros que intervienen en el cálculo de la escorrentía. Así, considerando la superficie del sistema y la desigual topografía de las subcuencas que lo componen, se definieron 148 elementos cuadrados de 3 km de lado (Figura 6). Los datos fisiográficos se obtuvieron a partir de los mapas temáticos ya comentados que incluyen aspectos tales como la vegetación y usos del suelo, las características topográficas y geológicas y la posible presencia de humedales naturales (Figura 2).

Además, fue necesario definir el movimiento del agua en la cuenca, teniendo en cuenta las diferentes divisorias existentes y el propio trazado de los cauces, lo que permitió dar la adecuada importancia a la topografía en el proceso. De este modo, cada elemento quedó caracterizado por el código alfanumérico del elemento al que transfiere la escorrentía en él generada, estableciéndose una jerarquización de la red de drenaje, elemento por elemento, cuya esquematización para el sistema en estudio se muestra en la Figura 6.

En principio, el sistema muestra una cierta dificultad de análisis en consonancia con su elevada complejidad motivada por las diferentes transferencias que se realizan tanto hacia su interior como al exterior, que se complica aún más por la existencia de una notable variabilidad a nivel orográfico, climático

y estratigráfico, lo que se traduce al término de su parte baja por un variable déficit de escorrentía.

Por ello, para analizar adecuadamente el plan de aprovechamiento de los recursos de los embalses del sistema Zadorra y tratar de reproducir la regulación llevada a cabo en el embalse de Undurraga, fue necesario definir una presa real y su correspondiente estación hidrométrica a fin de estimar las aportaciones naturales de su respectiva cuenca vertiente de la cabecera del río Arratia. Del mismo modo hubo que establecer la existencia de tres presas ficticias correspondientes respectivamente a las operaciones de transvase hasta la presa de Undurraga, así como a los vertidos directos al cauce del río Arratia y al bombeo que se efectúa en el embalse de Undurraga con destino a la depuradora de Venta Alta para el abastecimiento a Bilbao y su comarca (Figura 5).

Las simulaciones se abordaron considerando las diferentes subcuencas, en las que existen datos de aportaciones procedentes tanto del Servicio Vasco de Meteorología como de la Diputación Foral de Bizkaia y el Consorcio de Aguas del Gran Bilbao. En la Figura 6 se especifican las direcciones de flujo en las subcuencas que componen el sistema hidrológico, así como la localización de las estaciones de control de aforos y de las estaciones meteorológicas situadas tanto en el interior como en asentamientos periféricos. En total se consideraron 5 estaciones de aforo y 1 de control de niveles, al margen de otras 37 meteorológicas, 11 de la red automática y 26 de la red manual, cuya información diaria de base fue transformada en caudal por el modelo una vez terminada la calibración.

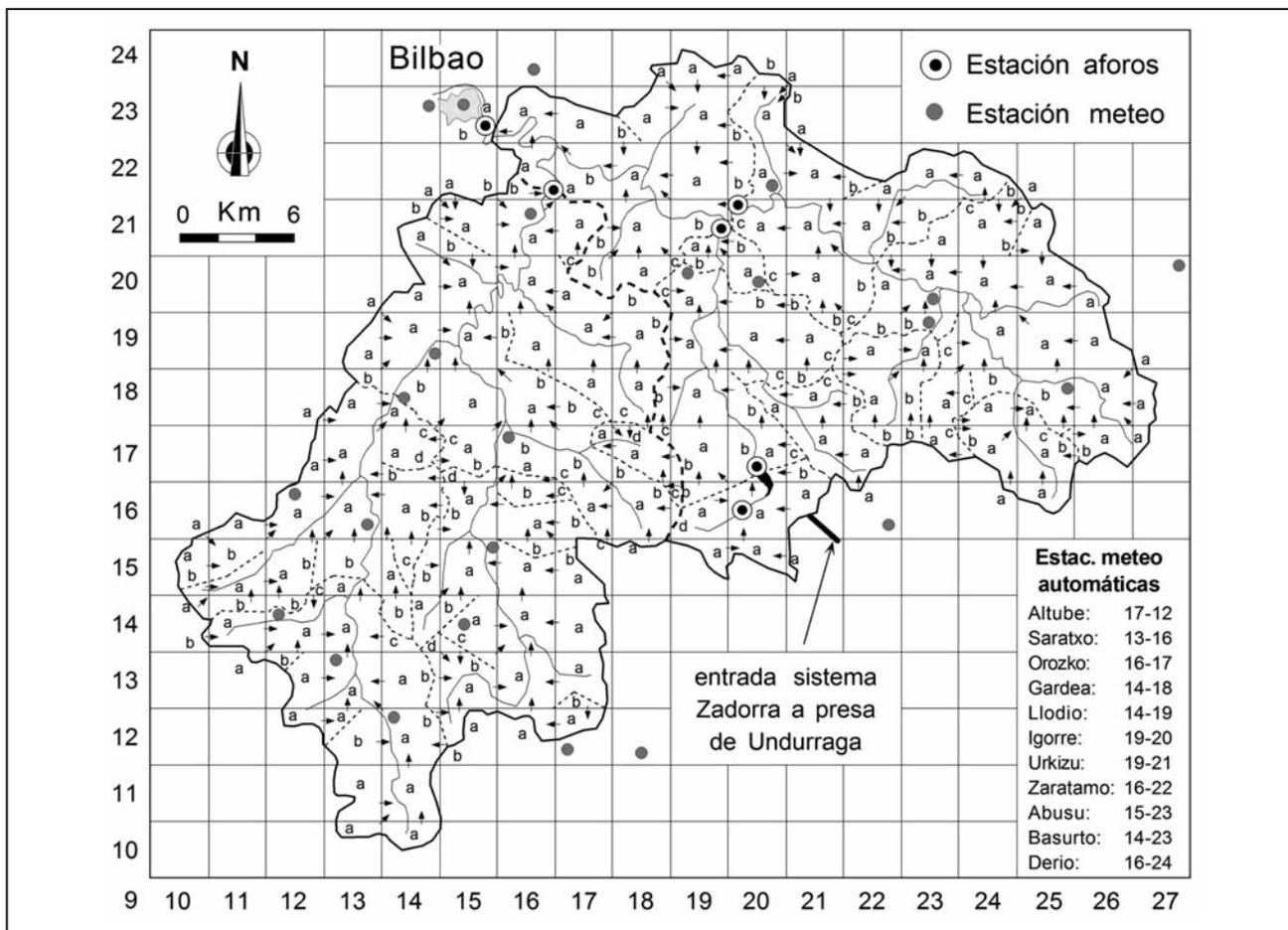


Figura 6. Esquematización del conjunto de subcuencas vertientes.

Tabla 1. Resultados de los criterios numéricos por estaciones de aforo y periodos considerados.

NTD / R	Nervión Abusu	Nervión Zaratamo	Ibaizabal Artezabal	Arratia Urkizu	Arratia Undurraga
1988	0,83 / 0,92	0,75 / 0,87	0,60 / 0,78	---- / ----	0,74 / 0,85
1989	0,73 / 0,89	0,74 / 0,86	0,58 / 0,75	---- / ----	0,76 / 0,88
1990	0,85 / 0,95	0,87 / 0,93	0,68 / 0,89	0,77 / 0,91	0,74 / 0,91
1991	0,74 / 0,90	0,82 / 0,92	0,56 / 0,74	0,87 / 0,94	0,85 / 0,94
1992	0,77 / 0,91	0,83 / 0,91	0,60 / 0,83	0,87 / 0,95	0,78 / 0,88
1983	0,91 / 0,97	0,90 / 0,95	0,61 / 0,76	0,84 / 0,92	0,79 / 0,90
1984	0,81 / 0,92	0,77 / 0,88	0,70 / 0,86	0,87 / 0,95	0,73 / 0,84
1985	0,80 / 0,91	0,86 / 0,93	---- / ----	0,85 / 0,93	0,76 / 0,92
11/90-05/91	0,78 / 0,91	0,82 / 0,91	0,63 / 0,81	0,81 / 0,94	0,81 / 0,91
Promedio	0,80 / 0,92	0,82 / 0,91	0,62 / 0,80	0,84 / 0,93	0,77 / 0,89

La calibración se efectuó mediante el programa de optimización automática, incluido en el modelo, basado en el método de Powell (*Morin y Paquet 2007*), que permite una aproximación al valor real de los parámetros maximizando o minimizando una determinada función objetivo. Finalmente, la calibración se culminó por el método de ensayo y error mediante ejecuciones sucesivas del modelo variando el valor de alguno de los parámetros. Las simulaciones en conjunto han sido muy aceptables, como se observa en la Tabla 1, en la que se consignan por periodos y por estaciones los resultados de los dos criterios numéricos utilizados (*WMO 1992*), el NTD de Nash incluido en el modelo, y el coeficiente de correlación simple R, este último aplicado en principio a modo de comparación en las series incompletas.

Para los periodos analizados se constata por término medio un mejor ajuste en la estación de Urkizu (0,84/0,93) a pesar de ser la primeramente afectada por los vertidos, lo que corrobora la idoneidad del esquema propuesto para el tratamiento de los recursos en el sector de Undurraga (Figura 5). En orden decreciente el grado de ajuste para el resto de estaciones sería: Zaratamo (0,82/0,91), Lapeña (0,80/0,92), Arratia (0,77/0,89) y Artezabal (0,62/0,80). Los valores de Arratia y en especial de Artezabal, sin ser bajos, ponen de manifiesto el desigual control que por sectores ejercen las unidades hidrogeológicas existentes en el régimen hidráulico del sistema, siendo máximo en la cuenca del Ibaizabal a la que, como se comentó, afluye con un cierto retardo temporal buena parte de los flujos subterráneos procedentes de la unidad de Áramotz. (*Antigüedad 1986*).

Otro tanto, aunque en menor medida, sucede en la parte alta del río Arratia en relación con el funcionamiento de la unidad kárstica de Gorbeia (*Garfias y Llanos 2001*), además de las transferencias difícilmente cuantificables que se realizan en la cabecera del río Nervión hacia las cuencas de la vertiente mediterránea a través de las calizas de la unidad hidrogeológica de Subijana (*EVE 1996*). A título de ejemplo en la Figura 7, junto a los gráficos que muestran las transferencias efectuadas en el área de Undurraga durante el periodo final de la comentada sequía, se incluye las simulaciones obtenidas comprobándose que las estimaciones efectuadas por el modelo presentan en general una muy ajustada correspondencia con la información real, tanto para los caudales como en lo que se refiere a la variación de niveles.

No obstante, las variaciones de los niveles en el embalse muestran algunas desviaciones, lo que podría explicarse por modificaciones a lo largo del tiempo de la original curva de embalse desde su puesta en funcionamiento en el año 1957 (*ASZ 1958*), debido a un relleno parcial del vaso por sedimentos procedentes de la erosión de los relieves colindantes, especialmente de los que condicionan la divisoria hidrográfica principal del País Vasco desde el macizo del monte Gorbeia hasta las elevaciones más orientales existentes entre las sierras de Elgea y Aitzgorri.

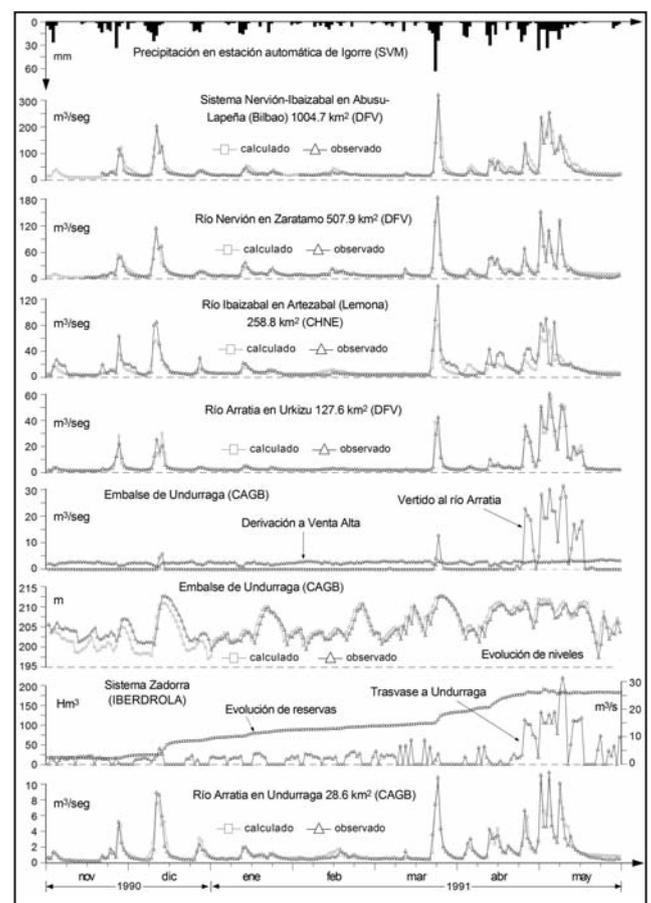


Figura 7. Resultados de la simulación diaria para el periodo final de la sequía ocurrida en el País Vasco entre los años 1989 y 1991.

Además se ha de señalar la existencia de un desfase adicional en los caudales de las estaciones derivado del proceso de fusión nival natural que, estacionalmente, tiene lugar en las cuencas, y que no queda reflejado en los registros de las estaciones automáticas debido a una incompleta instrumentalización de las mismas. Este hecho se manifiesta por una discrepancia variable entre los caudales punta observados y los calculados por el modelo, pero especialmente patente durante los primeros meses de cada año en la estación de Artezabal (Figura 7).

CONCLUSIONES

Como conclusión general a los trabajos de simulación hay que resaltar que los resultados obtenidos hasta el momento son sin ninguna duda muy alentadores, tanto más si, como ya se ha descrito, se tiene en cuenta la complejidad del sistema de cuencas investigado. En este sentido, se ha puesto de manifiesto la utilidad del modelo Cequeau, que permite estimar las variables del ciclo del agua, en cada punto concreto de una cuenca vertiente, simplificando el proceso de simulación mediante la división de la transformación lluvia-escorrentía en dos fases: la función de producción y la función de transferencia, facilitando de un modo realista el análisis de los procesos hidrológicos.

En consecuencia, son escasos los argumentos que pueden aducirse en contra de su empleo en el futuro, si acaso el elevado número de parámetros que considera y que requieren de una calibración minuciosa y de un conocimiento profundo de las condiciones fisiográficas de las cuencas, además del tiempo y el grado de laboriosidad que supone la compartimentación de la

cuencia en elementos individuales con características propias y el diseño de los flujos dentro de un esquema general de drenaje, si bien estos últimos aspectos constituyen una operación que debe efectuarse una sola vez y que, en todo caso, puede sufrir ligeras modificaciones a medida que el grado de complejidad, motivado por la creación de nuevas estructuras hidráulicas, aumenta en la cuenca.

Por todo ello, la presente aplicación se presenta como un elemento operacional extremadamente flexible a las necesidades actuales, con un amplio abanico de servidumbres en el campo de la gestión integral de recursos, pudiéndose incorporar tanto a los estudios de planificación hidráulica como a la previsión de avenidas en cuencas complejas, como el sistema Nervión Ibaizabal aquí tratado.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio se ha desarrollado en el marco del Proyecto: UPV/EHU 001.154 EA 061-95, subvencionado por la Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea. Los autores desean expresar su agradecimiento al Profesor Guy Morin y colaboradores de la Universidad de Québec por facilitar la utilización del programa Cequeau, así como a las Diputaciones de Bizkaia y Gipuzkoa, al Centro Territorial del País Vasco del Instituto Nacional de Meteorología, al Servicio Vasco de Meteorología, a Iberdrola SA, al Consorcio de Aguas del Gran Bilbao y a la Confederación Hidrográfica del Ebro, por la cesión de la información hidrometeorológica.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ANTIGÜEDAD, I., 1986.

Estudio hidrogeológico de la cuenca Nervión-Ibaizabal. Contribución a la investigación de los sistemas acuíferos kársticos.

Tesis Doctoral Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea, 336 pp. + anexos (inédito).

ASZ, 1958.

Obras del salto de Barazar y plan general de los aprovechamientos de las aguas del Zadorra y Bayas.

Aguas y Saltos del Zadorra SA, 26 pp. Madrid.

AYADI, M. Y M. BARGAOUI, 1998.

Modélisation des écoulements de l'oued Miliane par le modèle Cequeau.

Journal des Sciences Hydrologiques, Volume 43(5): 741-757.

BÂ, K.M., DIAZ, C. Y V. RODRÍGUEZ, 2001.

Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de México, México.

Ingeniería Hidráulica en México, Volumen XVI-4: 117-126.

BÂ, K.M., QUENTIN, E., CARSTEANU, A., OJEDA, I., DIAZ-DELGADO, C. Y J.H., GUERRA-COBIAN, 2009.

Modelling a large watershed using the CEQUEAU model and GIS: Case of the Senegal River at Bakel.

Geophysical Research Abstracts, Volume 11, EGU2009-0.

CAGB, 1995.

Memoria del ejercicio 1994.

Consorcio Aguas del Gran Bilbao, 131 pp. Bilbao.

DGPV, 1985.

La administración del estado y las inundaciones de agosto de 1983.

Delegación del Gobierno del País Vasco, 247 pp. Madrid.

DFV, 1984.

Lluvias torrenciales agosto-1983. Cuantificación de la catástrofe.

Diputación Foral de Vizcaya, 261 pp. Bilbao.

EVE, (1996).

Mapa hidrogeológico del País Vasco.

Euskal Herriko Mapa Hidrogeologikoa. (J. Aguayo, I. Antigüedad, I. Arrate, I. Arriabalaga, A. Cimadevilla, A. Eraso, A. García de Cortázar, V. Iribar, H. Llanos, T. Morales & P. Tamés, auts.). Ente Vasco de la Energía (EVE). Eusko Jaurlaritzza Gobierno Vasco, 350 pp. + anexos. Vitoria-Gasteiz.

- GARFIAS SOLIZ, J. Y H. LLANOS ACEBO, 2001.
A model of cells as practical approach to simulate spring flow in the Itxina karstic aquifer, Basque Country, Spain.
Ground Water, Volume 39-3: 339-347.
- GOODRICH, R., 1931.
Rapid calculation of reservoir discharge.
Civil Engineering, Volume 1: 417-418.
- HEC, 1981.
Hec-1. Flood hydrograph package.
User's manual. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers.
- ITGE, 1990.
Mapa geológico nacional a escala 1:200.000, hoja de Bilbao.
Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.
- JORDAN, J.P. Y P. WISNER, 1983.
Description du modèle Otthymo et exemples d'application.
Ecol. Pol. Fed. Laus. IGR-172, 117 pp. Lausanne.
- LLAMAS, J., 1985.
Hydrologie générale: principes et applications.
Gaëtan Morin. Québec.
- LLANOS, H., BÀ, K.M. Y A. CANALEJO, 1999.
Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Ega (País Vasco y Navarra).
Ingeniería del Agua, Volumen 6(3): 241-250.
- MAPA, 1987.
Mapa de cultivos y aprovechamientos del País Vasco.
Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Dirección General de Producción Agraria. Madrid.
- MORIN, G., FORTIN, J.P., LARDEAU, J.P., SOCHANSKI, W. Y S. PAQUETTE, 1981.
Modèle CEQUEAU, manuel d'utilisation.
INRS-Eau, Ste-Foy. Québec.
- MORIN, G., FORTIN, J.P. Y W. SOCHANSKI, 1982.
Simulation des débits du ruisseau des Eaux Volées et de sous-bassins.
Rapport:152 rédigé pour Environnement Canada, 63 pp. Québec.
- MORIN, G. Y P. PAQUET, 2007.
Modèle hydrologique Cequeau.
INRS-ETE, rapport de recherche: R000926, 458 pp. Québec.
- QUINN, P., BEVEN, K.J. Y R. LAMB, 1995.
The $\ln(a/\tan\beta)$ index: how to calculate it and how to use it within the Topmodel framework.
Hydrol. Processes, Volume 9: 161-182.
- THORNTHWAITE, C.W. Y J.R. MATHER, 1957.
Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance.
Climatology, Volume 10-3. Centerton N.J.
- UNESCO, 1995.
El programa hidrológico internacional de la Unesco en América Latina y el Caribe.
Pub. Unesco. París.
- USACE, 1991.
Model streamflow synthesis and reservoir regulation SSARR.
US. Army Corps of Engineers North Pacific Division. Oregon.
- WMO, 1992.
Simulated real-time intercomparison of hydrological models.
Geneva Switzerland Operational Hydrology WMO n°-779.



Modelación numérica del flujo de agua subterránea del acuífero freático sedimentario de la cuenca del arroyo El Barreal, Córdoba

Matteoda, Edel Mara ¹ ✉ - Blarasin, Mónica ¹ - Vives, Luis ² - Cabrera, Adriana ¹ - Felizzia, Juan ¹

Recibido: 19 de abril de 2011 • Aceptado: 01 de agosto de 2011

Resumen

En este trabajo se presenta el modelo conceptual del acuífero freático sedimentario de la cuenca del arroyo El Barreal y la validación realizada mediante la modelación numérica del flujo de agua subterránea. El modelo numérico reproduce, con una buena aproximación, la configuración de la superficie freática, los balances de masa y las direcciones predominantes de flujo de agua en el acuífero que fueron planteadas en el modelo conceptual. El balance de masas muestra que las entradas de agua ocurren fundamentalmente por recarga areal por infiltración efectiva y en menor medida por diversas secciones de entrada al acuífero. El egreso de agua se da principalmente por el drenaje del arroyo y en menor medida en forma subterránea a la salida de la cuenca.

Un mejor ajuste permitirá mejorar la calibración e incrementar la confiabilidad del modelo numérico.

Palabras clave: Modelo numérico, acuífero freático, balance de masas.

Abstract

This paper presents a conceptual model of the phreatic sedimentary aquifer of the Barreal stream basin. Also, the validation with a numerical model is showed, which reproduces with good accuracy the water mass balance, the water table morphology and groundwater flow explained in the conceptual model. The mass balance shows that the main water input to the aquifer occurs primarily by effective infiltration from precipitations, and, of minor interest, by various entry sections into the aquifer. Discharge of water occurs mainly in the stream and in the low basin by the aquifer section in the stream. More work and adjustment will improve the calibration and will increase the consistency of the numerical model.

Keywords: Numerical Model, phreatic aquifer, mass balance.

¹ Dpto. Geología. Universidad Nacional de Río Cuarto.
Ruta 36 Km 601. 5800. Río Cuarto. Córdoba.

² Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff"
(UNCPBA – CIC – Municipalidad de Azul).
República de Italia 780 (B7300), Azul, Buenos Aires, Argentina.

✉ ematteoda@exa.unrc.edu.ar

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

La cuenca del arroyo El Barreal (Figura 1) es un área predominantemente rural, en la que el agua subterránea es utilizada para todos los fines: consumo humano, ganadero, riego e industrial. La actividad principal del sector es la agricultura (mayormente de secano), con cultivos de soja, maíz y trigo, y en forma subordinada la ganadería de vacunos, porcinos y ovinos. Las prácticas agrícolas de rotación de cultivos se realizan desde hace pocos años y no están generalizadas, existiendo muchos sectores con monocultivo.

En el sector central de la cuenca se encuentra la localidad de Elena, de aproximadamente 3.000 habitantes, los que usan el agua subterránea que distribuye la Cooperativa Eléctrica a

través de una serie de perforaciones ubicadas en la periferia del pueblo, mientras que el agua superficial es el principal sumidero de efluentes urbanos e industriales.

Los estudios de base para comprender el funcionamiento del acuífero freático del área, consistieron en la realización de relevamientos geológico, geomorfológico e hidrogeológico, a escala 1:50.000, que fueron complementados con investigaciones de gabinete y laboratorio (Matteoda et al. 2007, Matteoda et al. 2008).

El presente trabajo tiene por objetivo mostrar el modelo conceptual del acuífero freático sedimentario de la cuenca del arroyo El Barreal y su validación mediante la modelación numérica del flujo de agua subterránea, en régimen permanente.

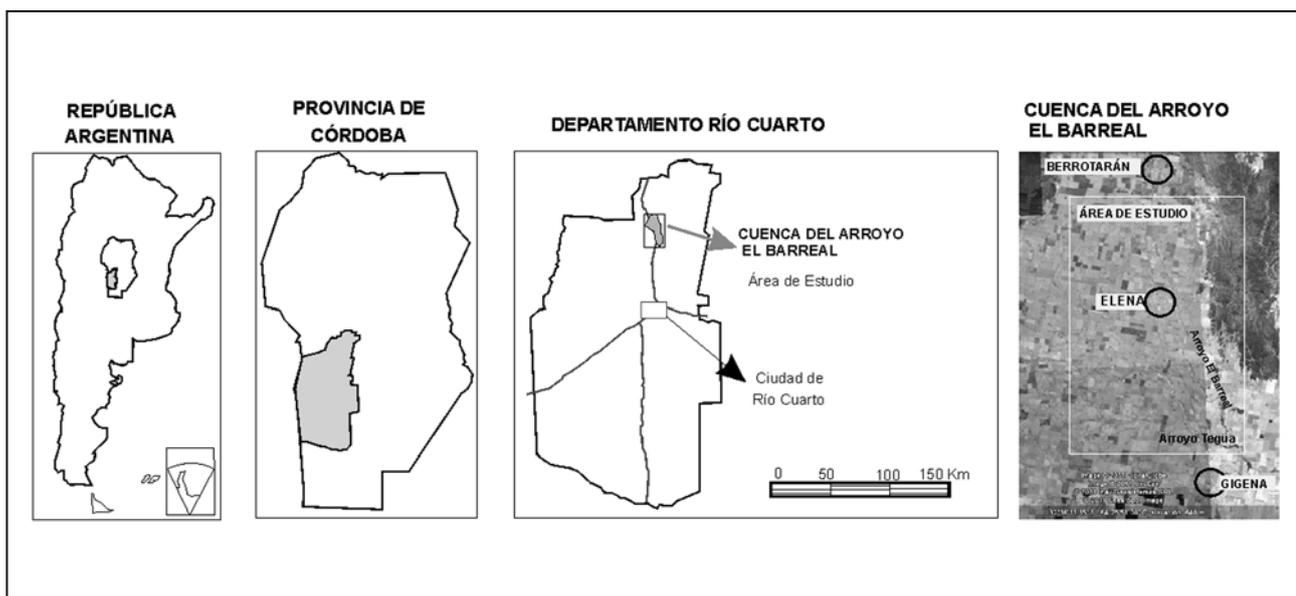


Figura 1. Mapa de ubicación.

CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área estudiada se encuentra en la llanura Chaco-Pampeana, es un valle ubicado entre dos cordones serranos, y presenta un fuerte control estructural. Se distinguen 4 familias de fallas, siendo las más relevantes las del grupo N-S a N 10° y luego las de orientación E-O (90°). El perfil transversal Oeste-Este (Figura 2) del valle de La Cruz, que excede los límites de la zona estudiada, muestra un relieve ondulado, cuyo relleno sedimentario de edad Terciaria-Cuaternaria, está constituido por potentes depósitos loésicos y materiales areno-gravosos (secuencias fluviales y de abanicos descendentes de las serranías periféricas). Se observan niveles de calcretos a diversas profundidades o aflorantes en los pedimentos periserranos, apareciendo también en estos últimos relictos de basamento (Degiovanni y Cantú 1997).

En la Figura 3, obtenida en un camino profundizado, puede observarse por debajo de la cubierta actual la sedimentación loésica correspondiente a la Formación La Invernada.

Teniendo en cuenta la caracterización regional realizada (Figura 4), se efectuó la correlación estratigráfica de los

materiales encontrados en perforaciones descriptas para la zona de estudio. Se contó con la descripción de perfiles de litologías aflorantes y del subsuelo, sobre la que se describieron perforaciones de hasta 200 m de profundidad realizadas por particulares y organismos públicos (Dirección Provincial de Hidráulica-DPH, Cooperativas, Universidad Nacional de Río Cuarto-UNRC).

La cuenca del arroyo El Barreal se ubica principalmente en la Unidad geomorfológica Llanura fuertemente ondulada (Degiovanni et al. 2005) en la cual las principales subunidades geomorfológicas son morfoestructuras modeladas durante el Pleistoceno superior-Holoceno, las que corresponden a bloques diferencialmente ascendidos y basculados, que condicionaron la sedimentación, el actual relieve del área y consecuentemente, la dinámica y calidad del agua superficial y subterránea.

En el relevamiento de campo se reconocieron las unidades geomorfológicas descriptas por Degiovanni y Cantú (1997) (dos sistemas y 7 unidades geomorfológicas) y se reformularon algunas de las unidades en base a las cuales se elaboró el mapa geológico-geomorfológico (Figura 5).

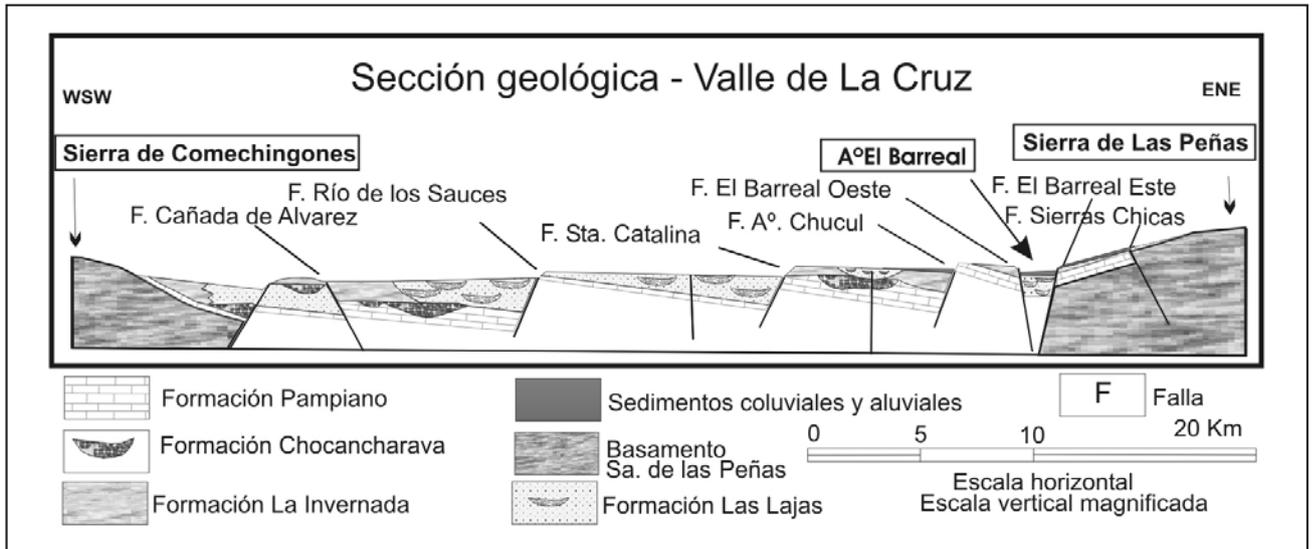


Figura 2. Perfil transversal. Valle de La cruz. Modificado de Degiovanni y Cantu, 1997.

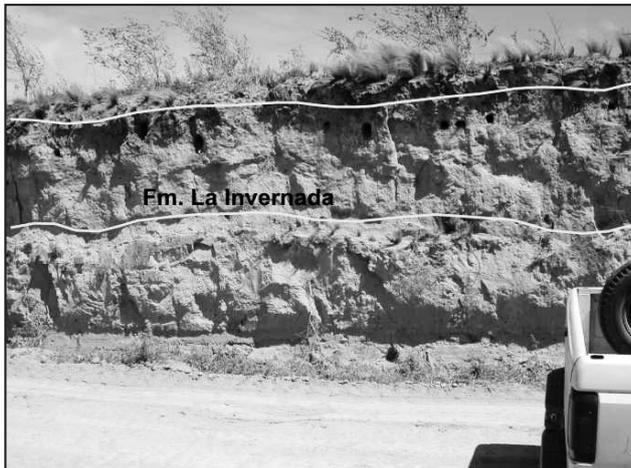


Figura 3. Afloramiento de sedimentos cuaternarios.

MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL

En el sector central de la cuenca, al pie de la sierra de Las Peñas, se encuentra la unidad descrita como Depresión Central-Faja Fluviol del Arroyo El Barreal, representada por un bloque hundido elongado en sentido NNO-SSE en el que se instala, por afloramiento del agua freática, un conjunto de pequeños humedales, que constituyen el “Sistema Humedal El Barreal” de los cuales, el mayor y situado al norte, da origen al arroyo (Figura 6). Este sistema humedal es drenado en forma natural por el arroyo El Barreal, tributario del arroyo Tegua, ubicado 20 km al sur de la cuenca estudiada, el que se constituye en el nivel de base local. La depresión central de la cuenca recibe escurrimientos superficiales efímeros del flanco oriental de las Sierras de Las Peñas y de la planicie circundante, organizados en redes de flujo cuyos colectores principales son los caminos rurales. El sistema humedal se origina por afloramiento de agua subterránea, siendo éste el aporte dominante, aunque en épocas de lluvia se ve incrementada la superficie.

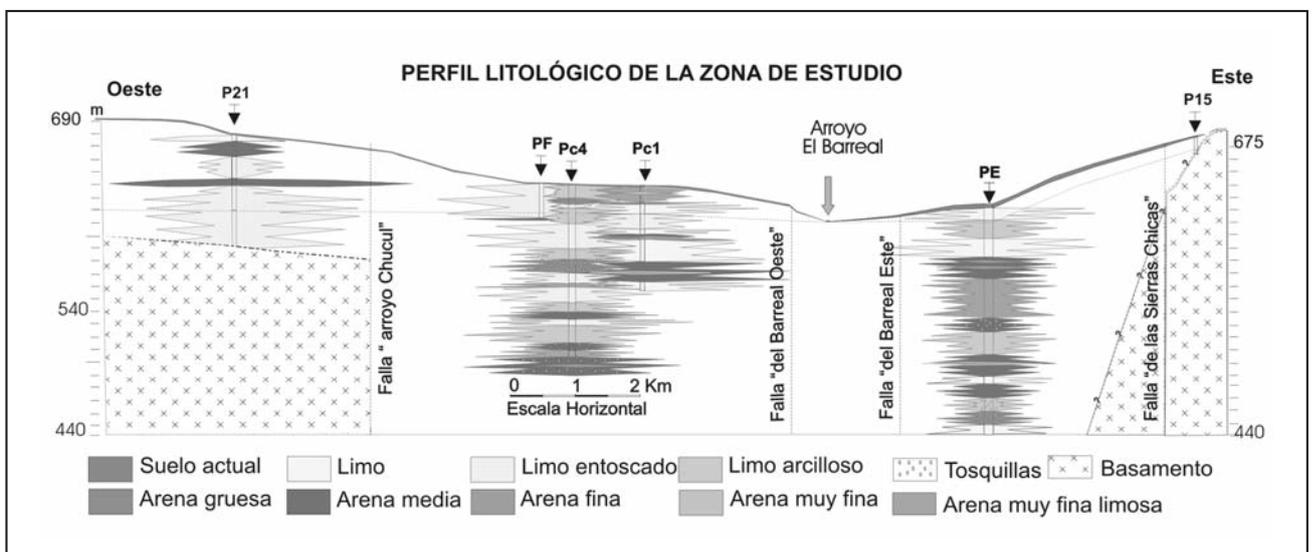


Figura 4. Perfil litológico. Sector central de la cuenca del arroyo El Barreal.

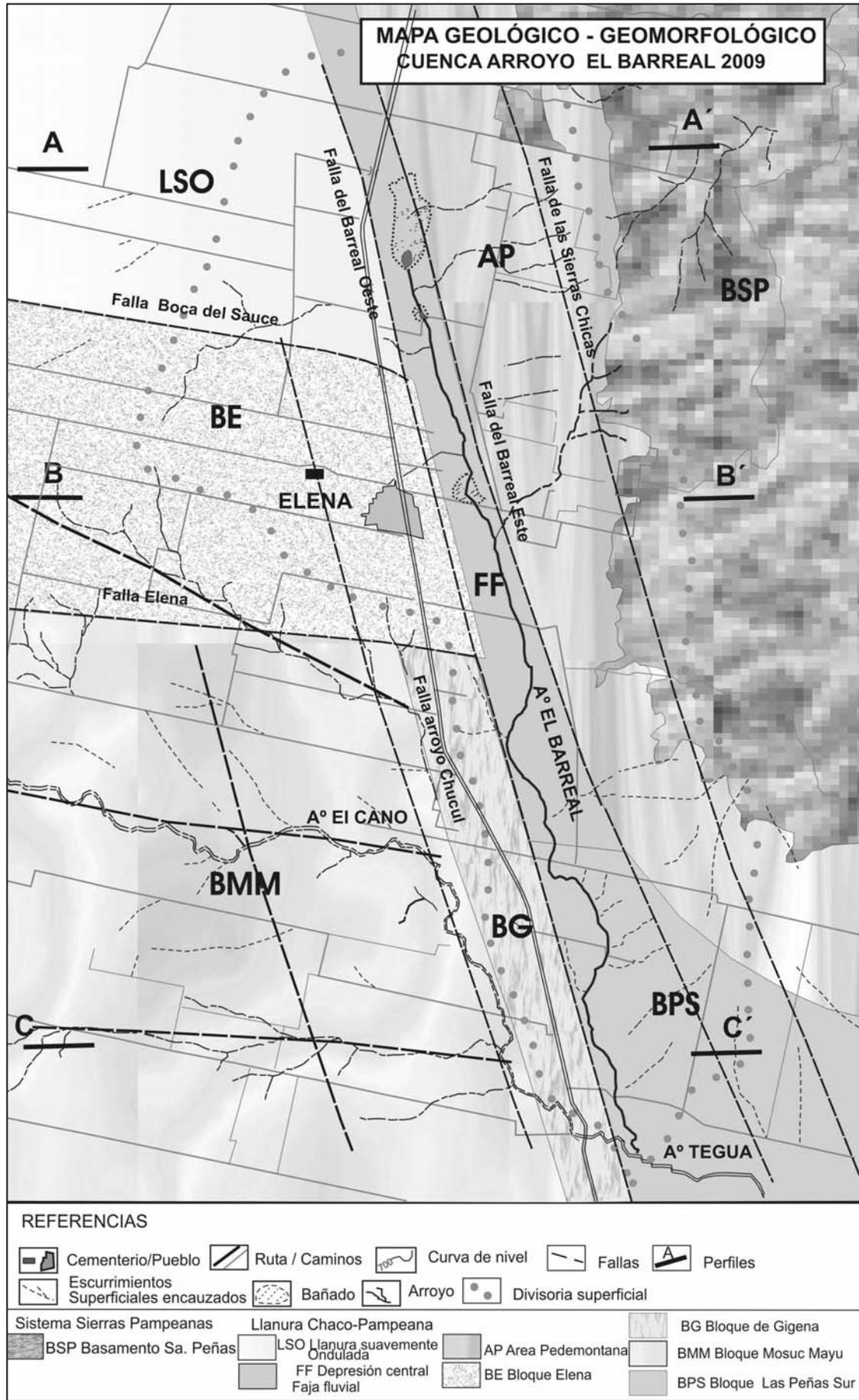


Figura 5. Mapa Geológico- Geomorfológico. Límites de la zona de estudio.

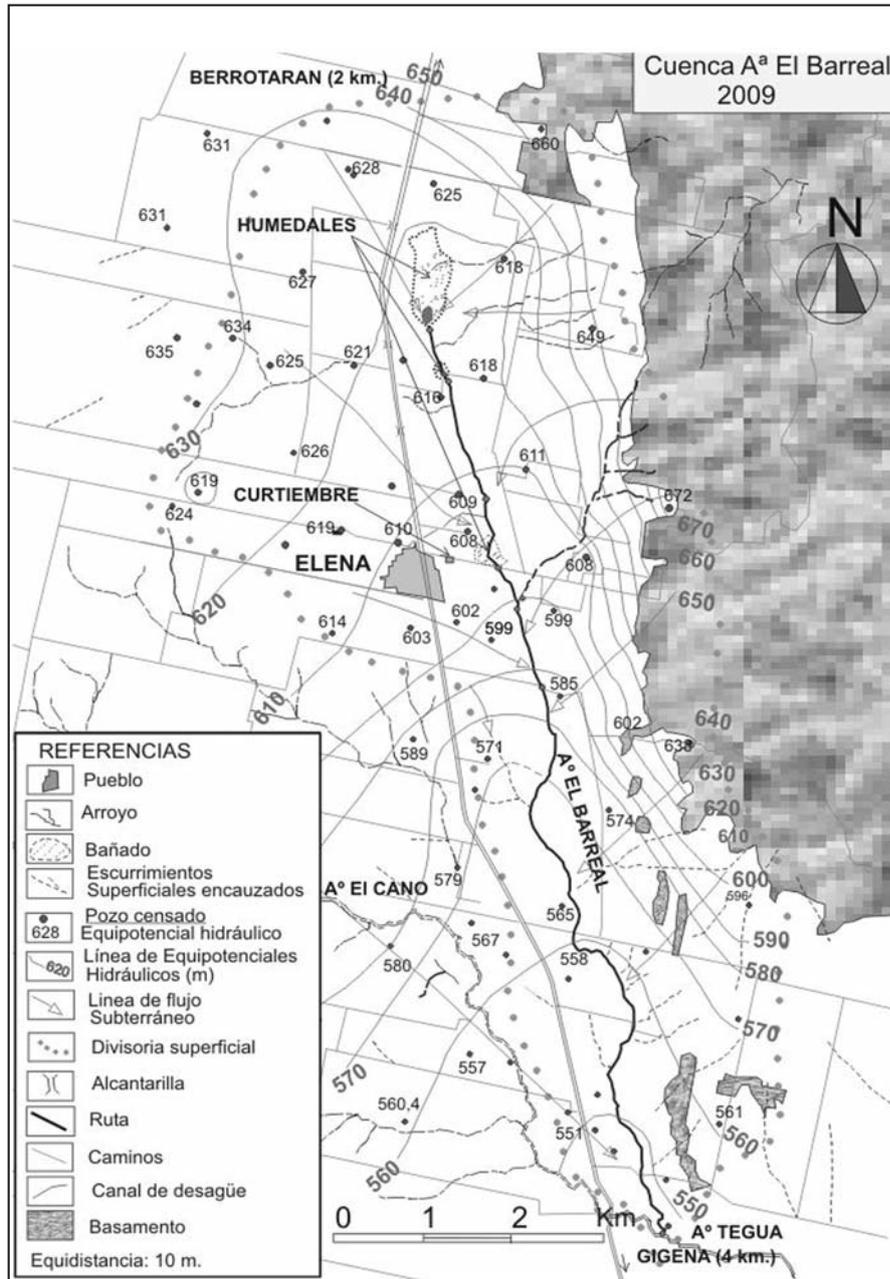


Figura 6. Equipotenciales hidráulicos. Censo 2008 - 2009.

A partir de variaciones litológicas descritas en perforaciones y estudios geofísicos (sondeos eléctricos verticales) pudo determinarse que el acuífero freático está constituido por material poroso clástico de origen eólico y fluvial, representado por sedimentos limosos con intercalaciones limo-arenosas, arenosas y gravosas. Los primeros metros del subsuelo son sedimentos loésicos, diferencialmente cementados por carbonato de calcio. En el ámbito occidental de la cuenca se detectaron paleocauces a distintas profundidades, constituidos por sedimentos arenosos finos, arenosos gruesos y gravosos de los que se extraen mayores caudales de agua de mejor calidad. La morfología de la superficie freática es suavemente ondulada y fuertemente asimétrica. Se encuentra condicionada por las morfoestructuras y presenta una gran diferencia de gradientes hídricos a ambas márgenes del arroyo El Barreal. Los gradientes de la margen izquierda son muy elevados, del orden del 1,5 %, mientras que

en la derecha son de 0,5 %. El sistema de flujo del acuífero libre es centrípeto y circula hacia el sistema humedal y el arroyo, otorgándole a ambos carácter permanente (Figura 6). En perforaciones ubicadas en distintos sectores de la cuenca pudo detectarse, entre los 70 a 90 m de profundidad, un material arcilloso que posiblemente esté actuando como base del acuífero freático.

La precipitación media anual en la cuenca es de 798 mm, distribuida en dos períodos muy marcados, correspondiendo el más húmedo a los meses de noviembre a marzo con el 76 % del total anual. Se observa una alternancia de años lluviosos y secos, con una tendencia al aumento de la precipitación media anual. El balance hídrico modular exhibe un marcado déficit hídrico, permitiendo caracterizar al clima de la zona como subhúmedo seco con nulo a pequeño exceso de agua. Sin embargo, la elaboración del balance hídrico seriado para el mismo

período, permitió observar claramente que los ciclos más húmedos resultaron en excesos hídricos, coincidentes con las crecientes en el arroyo, los escurrimientos superficiales en campos y caminos que generaron las cárcavas más importantes de la cuenca y el ascenso de niveles freáticos, aspectos corroborados mediante encuestas realizadas a productores de la cuenca. La recarga, calculada por el método del ión cloruro (Custodio y Llamas 1983), es aproximadamente entre el 7 y el 10 % de la precipitación, dependiendo de los materiales y el relieve.

MODELO NUMÉRICO Y MODELACIÓN

La zona seleccionada para simular numéricamente posee un área de 120 km² y, como se indicara, se modela el acuífero libre poroso, heterogéneo e isótropo. Para realizar la modelación se empleó el programa computacional Modflow (Mc Donald y Harbaugh 1988) y la versión Visual Modflow Versión 2.8.1, que resuelve las ecuaciones de flujo de agua subterránea por medio del método de las Diferencias Finitas.

Se utilizó como base del modelo el mapa de líneas equipotenciales del acuífero elaborado a partir de potenciales hidráulicos medidos durante el censo de perforaciones de 2008 - 2009 (Figura 7). Se discretizó el dominio de modelación en una malla de 3480 celdas (60 filas x 58 columnas) con dos tamaños de celdas de 460 x 395 m y 460 x 195 m inactivando todas aque-

llas correspondientes al dominio no modelado (1590 celdas). El refinamiento de la malla se realizó en la margen izquierda del arroyo donde los gradientes topográficos son más elevados. Se utilizó un modelo de acuífero monocapa no confinado. El régimen temporal es estacionario y el dominio del modelo es bidimensional.

La capa tiene impuesta como superficie superior la topografía que se extrajo del modelo digital del terreno Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), información captada en el mes de febrero del año 2000, resolución 3 segundos ~ 90 m (logrado a partir de imágenes en banda C y X). La capa inferior se interpoló con la información de las perforaciones. La Figura 8 presenta algunos cortes Oeste-Este, los que se encuentran ubicados en la Figura 5.

Las condiciones de borde empleadas fueron de flujo nulo, nivel fijo y condición mixta, las cuales se distribuyeron según se indica en el mapa de la Figura 9, utilizándose valores de conductancia según el detalle indicado en la Tabla 1. A la salida por el borde Sur se la trabajó como de nivel constante, en coincidencia con la línea de equipotencial de cota 550 m.

En el caso en particular del límite Norte, y a manera de ejemplo, el valor de la conductancia (C) fue calculada por medio de la ecuación (1).

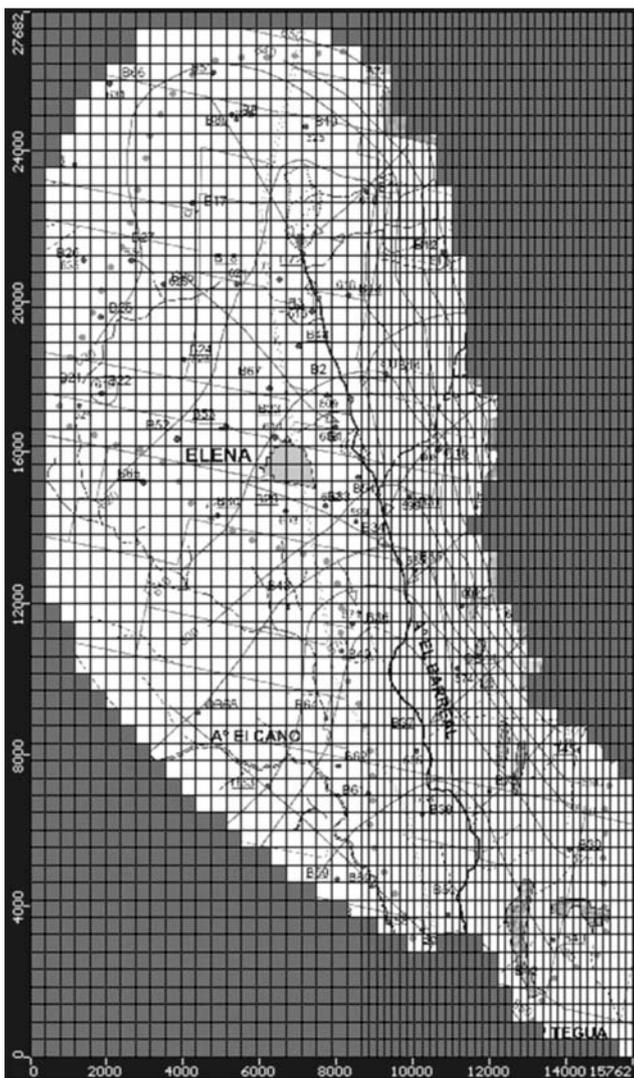


Figura 7. Malla de Diferencias Finitas.

Tabla 1. Condiciones de contorno. El límite de flujo variable se asocia a una condición River o General Head Boundary de MODFLOW.

Zona	Límite usado	Observación
1	Línea de flujo	Impermeable
2	Flujo variable	Conductancia 400 m ² /d
3	Flujo variable	Conductancia 200 m ² /d
4	Flujo variable	Conductancia 1 m ² /d
5	Flujo variable	Conductancia 1 m ² /d
6	Nivel Fijo	Equipotencial 550 m
9	Flujo variable	Conductancia 100 m ² /d
10	Flujo variable	Conductancia 2 m ² /d
11	Flujo variable	Conductancia 1000 m ² /d

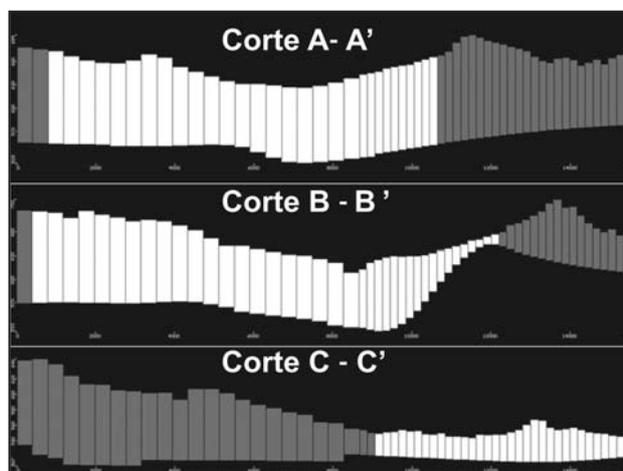


Figura 8. Perfiles oeste-este con exageración vertical 1:20.

$$C = k \cdot a \cdot e / L = 220 \text{ m}^2/\text{d} \quad (1)$$

Donde,

k (conductividad hidráulica) = 0,4 m/d

a (ancho de la celda) = 395 m

e (espesor del acuífero en la celda) = 70 m

L (distancia en que las isopiezas varían una unidad) = 50 m

Para simular el humedal aguas arriba del arroyo El Barreal se estimó un valor de conductancia de 1000 m²/d por cada celda, una cota del fondo de 617 m y un tirante de agua de 0,1 m.

El arroyo El Barreal se trabajó mediante una condición de río donde se adoptó una cota inicial en la zona en que se origina de 617 m como fondo de cauce y un tirante de agua de 0,10 m variables hasta la celda donde finaliza con una cota de fondo de cauce de 549,8 m y una cota de pelo de agua de 550 m. Para asignar la conductancia C a cada celda se realizó el cálculo de la ecuación (2).

$$C = kR \cdot L \cdot W / M \quad (2)$$

Donde:

kR (de los materiales del fondo) = 0,1 m/día

L (longitud del río en cada celda) = 450 m

W (ancho del río) = se adoptó variable de 0,60 m en el origen y 2,5 m a la salida.

M (espesor del material del lecho) = se adoptó variable de 0,50 m en el origen y 0,3 m a la salida.

De esta manera se obtuvo una conductancia variable con valores en cuenca alta de 54 m²/día y de 375 m²/día a la salida de la cuenca.

En relación a la entrada de agua al acuífero, como recarga o infiltración eficaz, según la precipitación anual calculada para la serie 1975 - 2009 con el método del ión cloruro (Custodio y Llamas 1983) y de variación de niveles usando la aplicación Liqko (Alincaastro y Algozino 2010), se definieron dos áreas de recarga anual: en el sector E, al pie de la sierra de Las Peñas, de 40 mm y para el resto de la cuenca 50 mm.

En cuanto a la asignación de las conductividades hidráulicas (Figura 10 y Tabla 2) y dada la gran heterogeneidad de los materiales de la región, se asignaron 11 zonas diferentes que en

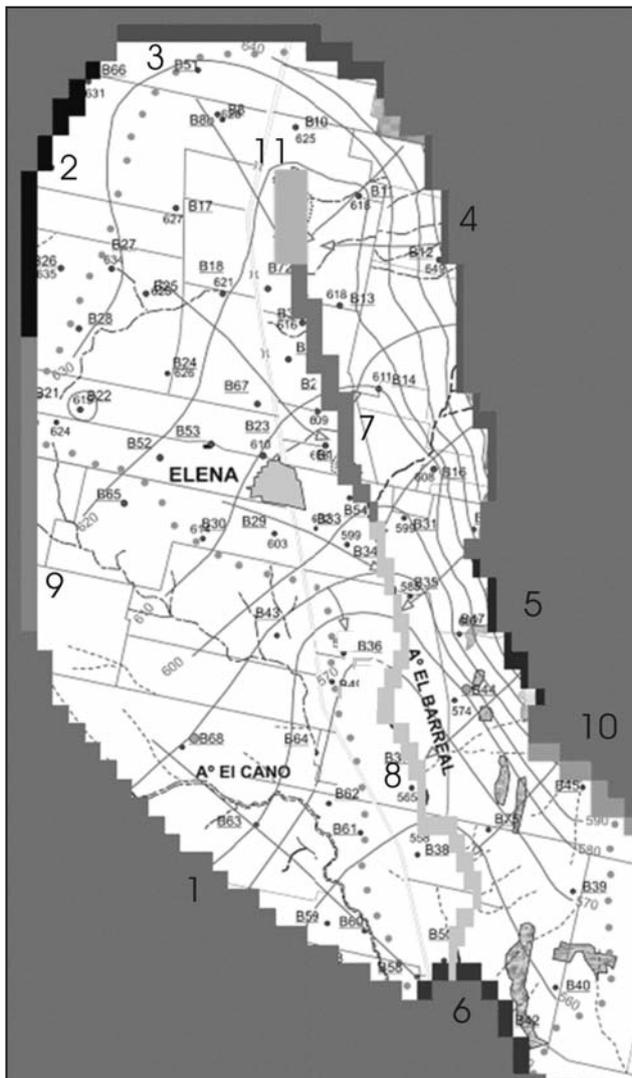


Figura 9. Condiciones de contorno con el número de zona.

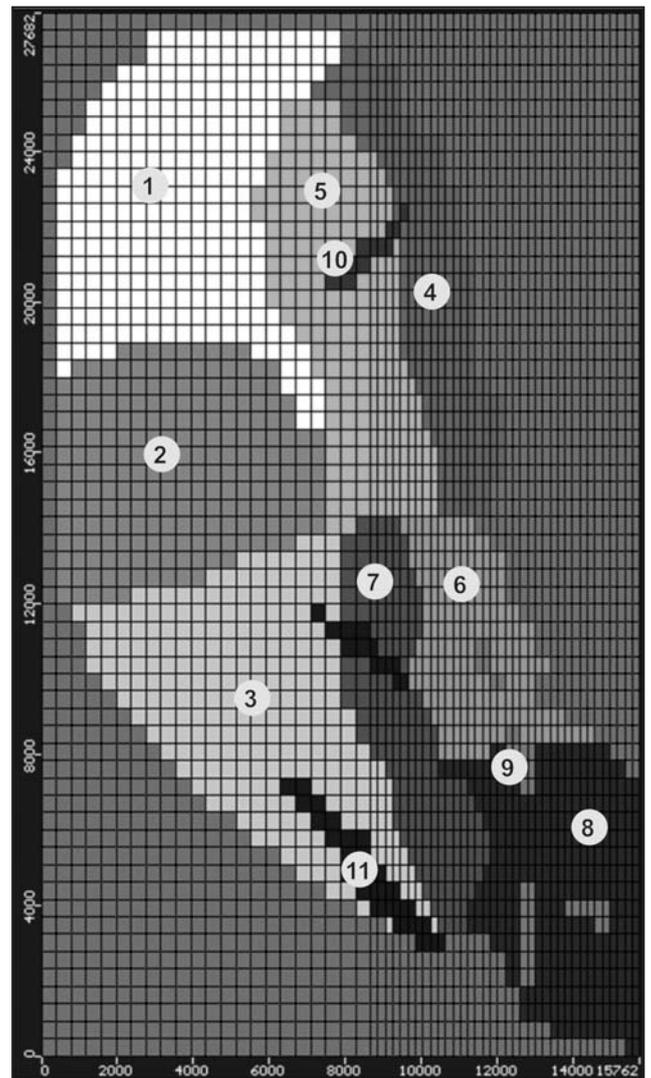


Figura 10. Zonas de conductividades.

términos generales coincidieron con las unidades geomorfológicas descritas. Con la adopción de k equivalentes se trató de simular la existencia de diversos paleocauces de gran desarrollo portadores de materiales gravosos y arenogravosos (zonas 10 y 11) y en sectores donde la densidad de los paleocauces es de mediana a alta se eligieron valores de k del orden de los 3 -5 m/d, tal como ocurre en el sector del “Bloque elevado de Elena”, “Bloque Gigena” y la “Llanura suavemente ondulada”, si bien en perforaciones de la zona fueron alumbrados, además, calcretos y niveles loésicos a diferentes profundidades. Para representar los sectores donde aflora el basamento de la Sierra de la Peñas se estimó una $K= 0,03$ m/d.

Se incluyeron 50 perforaciones, distribuidas en toda la cuenca, en las que se midieron los potenciales hidráulicos, que sirven como puntos de observación para el proceso de calibración (Figura 11). Para la determinación de la cota de referencia de cada punto se empleó la carta del Instituto Geográfico Nacional.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el mapa equipotencial obtenido con la modelación numérica (Figura 12), puede observarse la similitud existente con el observado (Figura 6).

Tabla 2. Conductividades hidráulicas en m/d.

Zona	Valor (m/d)	Zona	Valor(m/d)
1	5	7	5
2	3	8	1,75
3	3,25	9	0,03
4	0,3	10	12
5	6	11	60
6	0,2		

En la Figura 13 se presentan las cargas hidráulicas observadas versus calculadas donde se observa un buen ajuste con un índice de correlación $R= 0,99$ y un error cuadrático medio normalizado de 4 %. El error medio absoluto es de 3,5 m, aunque se obtuvieron errores significativos en algunos sectores de la cuenca.

En este sentido, son numerosos los factores que pueden contribuir al error, entre ellos la compleja geometría del acuífero, la gran heterogeneidad de los materiales, pendientes muy disímiles en ambas márgenes del arroyo, el cálculo de niveles

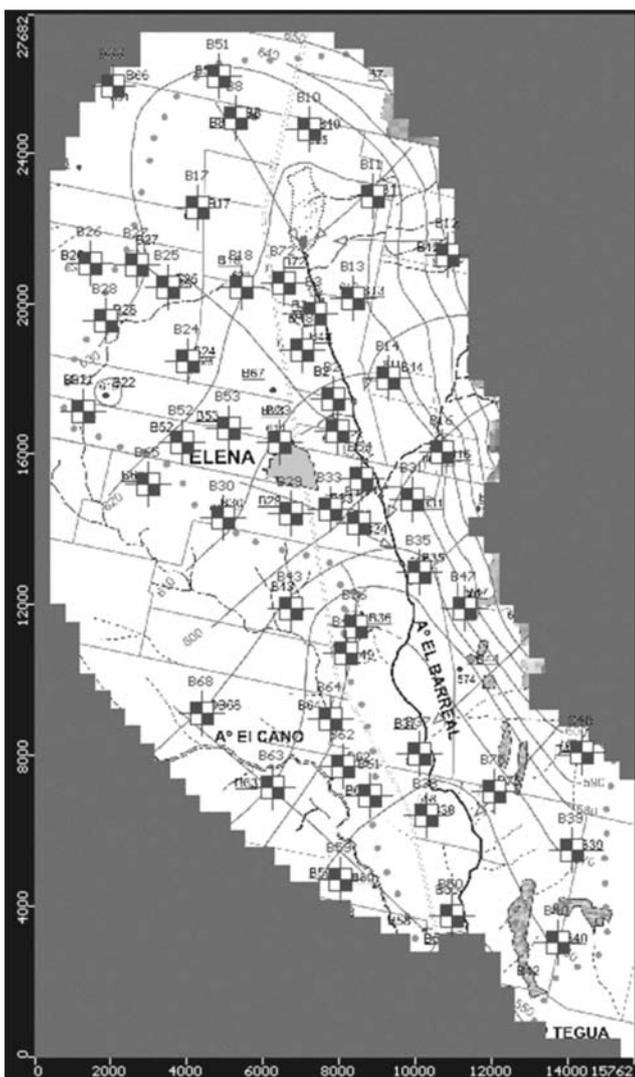


Figura 11. Puntos de observación.

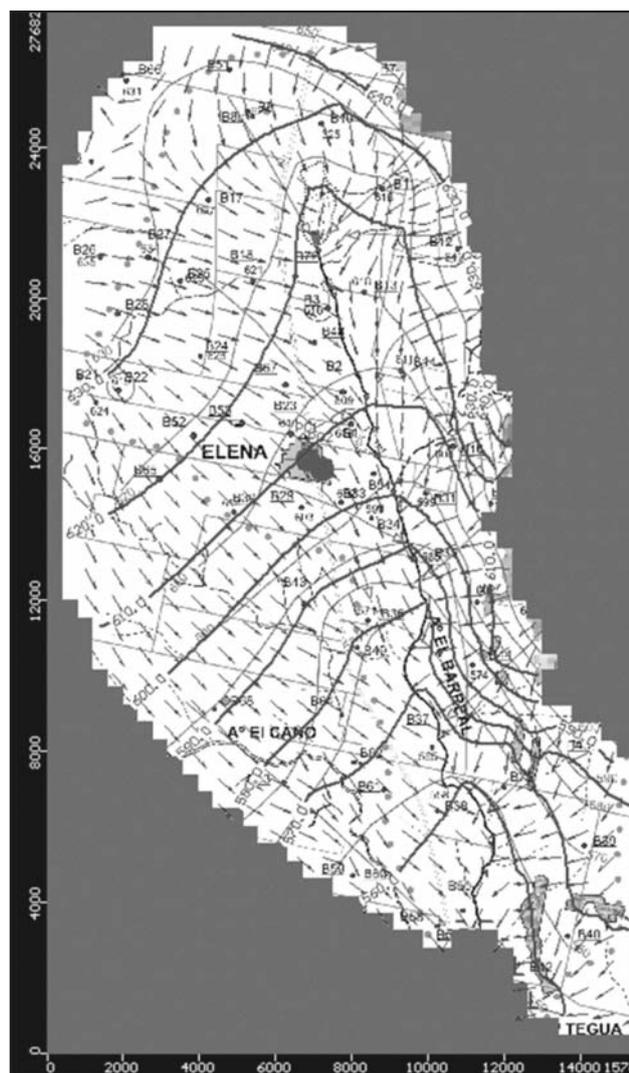


Figura 12. Mapa equipotencial (equidistancia 10 m) y velocidades de flujo.

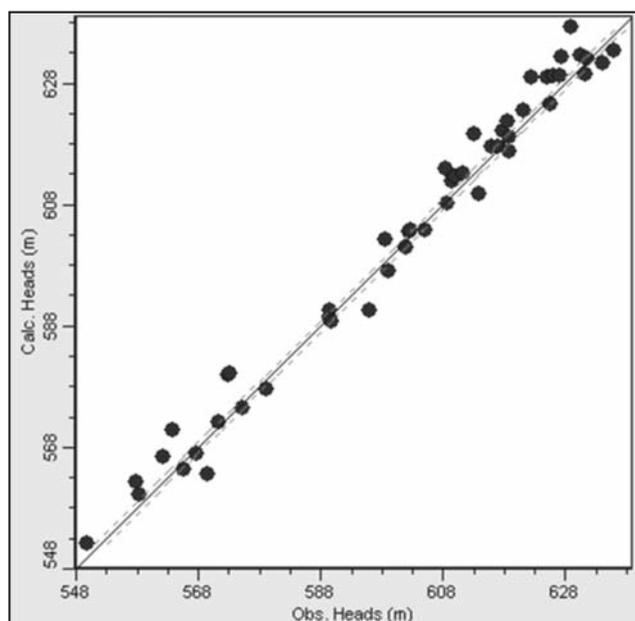


Figura 13. Niveles Medidos vs. Calculados.

piezométricos realizados en base a cartas topográficas con equidistancias de 25 m, entre otros.

La Figura 14 presenta los espesores saturados calculados para los perfiles Oeste-Este de la Figura 8.

En cuanto al balance de masas, puede observarse que las entradas de agua ocurren por recarga areal por infiltración efectiva del agua de lluvia (58,5 %), por diversas secciones de entrada al acuífero (41,5 %) simuladas en las condiciones de borde identificadas en la Figura 9 e identificadas como zonas 9 (3,1 %), 2 (4,0 %), 3 (15,9 %), 4 (0,7 %), 5 (0,3 %), 10 (3,1 %), y en algunos sectores por aporte del arroyo. Los egresos están constituidos en su mayor parte por el drenaje del río (78,1 %) y por la salida de carga constante (17,6 %). Con respecto a la relación agua superficial-subterránea, se observa un predominio del carácter efluente del arroyo, si bien en algún tramo el modelo muestra lo contrario, aspecto no planteado en el modelo conceptual y para trabajar en un futuro ya que corresponde a un sector donde hay menor coincidencia entre las cargas hidráulicas calculadas y observadas. El caudal descargado del acuífero al río (caudal base) por el paso de la ciudad de Elena es de 0,06 m³/s y de 0,215 m³/s, ambos coherentes con los aforos realizados.

Los valores de recarga efectiva resultaron adecuados a la modelación, así como los de conductancia en los cuerpos de agua, aunque podrían ajustarse mejor si es incluido con mayor

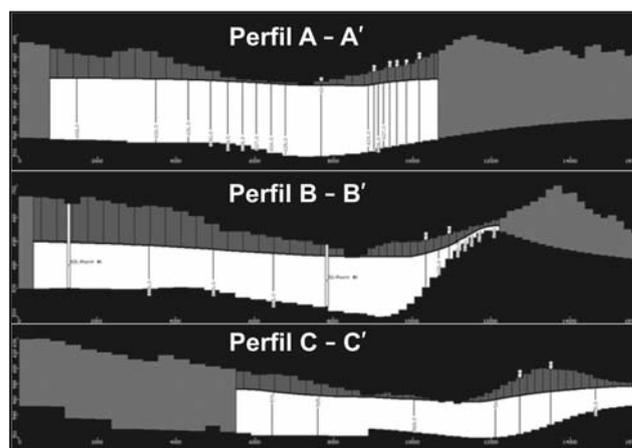


Figura 14. Perfiles piezométricos oeste-este calculados por el modelo, con exageración vertical 1:20.

detalle los diferentes tramos y sus respectivas características geológicas y geomorfológicas.

CONCLUSIONES

En general el modelo numérico presenta un buen ajuste de niveles, reproduce en forma satisfactoria la configuración de la superficie freática y las direcciones predominantes del flujo, pero fundamentalmente es coherente con el modelo conceptual de funcionamiento del sistema propuesto.

El balance de masas muestra ingresos y egresos de agua a la cuenca coherentes para la zona de estudio; en este sentido se ha monitoreado durante años el caudal del arroyo, arrojando valores coincidentes totalmente en orden de magnitud con el obtenido en la modelación.

El modelo, si bien preliminar, ha sido de utilidad para integrar la información disponible y mejorar el análisis cualitativo del funcionamiento hidrodinámico del acuífero. Un mejor ajuste y una extensión al análisis temporal, permitirá mejorar la calibración e incrementar la confiabilidad del modelo numérico con el objetivo de emplearlo para la gestión de los recursos subterráneos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con subsidio de FONCYT-PICT 562/06 y SECYT-UNRC.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ALINCASTRO, N. Y R. ALGOZINO, 2010.

Liqko. Aplicación informática para el cálculo de la recarga en acuíferos freáticos. *Informe de Práctica Profesional de Ingeniería. Dpto de Geología. UNRC*

CUSTODIO, E. Y M. LLAMAS, 1983.

Hidrología subterránea. *Ediciones Omega. Barcelona. 2 Vol. 1-2350.*

DEGIOVANNI, S. Y CANTÚ, M. 1997.

Neotectonic activity in the La Cruz-Gigena depresión, Córdoba, Argentina. *IV International Conference on Geomorphology. Tomo I. Bologna. Italia.*

DEGIOVANNI, S., VILLEGAS, M., BLARASIN, M. Y SAGRIPANTI G. COLABORADORES:

MATTEODA, E., DOFFO, N. Y VILLALBA, G. 2005.

“Hoja Geológica 3363-III-Río Cuarto”.

Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Boletín N° 349. SEGEMAR. 95 pp.

ISSN: 0328-233

MATTEODA, E., BLARASIN, M., DAMILANO, G. Y CABRERA, A. 2007.

Valores característicos del fondo natural de flúor y arsénico en aguas subterráneas en la cuenca del arroyo

El Barreal, Córdoba.

II Taller sobre arsénico en aguas. V Congreso Hidrogeológico Argentino. Entre Ríos. 31-41. ISBN: 978-987-23936-4-9.

MATTEODA E., BLARASIN M., DAMILANO, G. Y CABRERA, A. 2008.

Contaminación por nitratos en el acuífero freático: análisis del fondo natural y relaciones con las actividades de uso del territorio.

IX Congreso ALHSUD. Quito, Ecuador.

MC DONALD, M.G. AND HARBAUGH, A. 1988.

A modular three dimensional finite difference groundwater flow model.

USGS. Techniques of Water resources investigations. Book 6. Chapter A1.



Funciones hidráulicas en suelos loésicos no saturados en una parcela experimental

Reyna, Teresa ¹ ✉ - Reyna, Santiago¹ - Lábaque, María ¹ - Fulginiti, Fabián ¹

Recibido: 02 de mayo de 2011 • Aceptado: 01 de agosto de 2011

Resumen

Para determinar el flujo de agua en la zona vadosa es necesario resolver la ecuación de Richards y para ello se necesitan definir las funciones hidráulicas: humedad del suelo - succión y conductividad hidráulica - succión. Estas funciones requieren de la determinación de las propiedades hidráulicas que pueden obtenerse mediante la medición del contenido de agua (perfiles de humedad) en laboratorio o en campo.

El objetivo de este trabajo fue la verificación de las curvas de humedad de los suelos loésicos al sur de la ciudad de Córdoba determinadas teóricamente a través de estudios realizados en laboratorio, en otros suelos y curvas granulométricas. Para ello se realizaron modelaciones de infiltración utilizando las funciones hidráulicas determinadas y se contrastaron con las mediciones realizadas. Las mediciones se efectuaron utilizando tres sondas (una de Humedad, Temperatura y Conductividad Eléctrica del Suelo y dos sólo de Humedad) que se instalaron a distintas profundidades. Este análisis muestran que las funciones hidráulicas determinadas precedentemente representan adecuadamente el comportamiento de humedecimiento y secado. Los resultados de la simulación justifican utilizar metodologías que permitan incorporar las propiedades hidráulicas de los suelos en las simulaciones hidrológicas para representar la respuesta del suelo frente a los eventos de precipitación y secado.

Palabras clave: funciones hidráulicas, loess, zona vadosa.

Abstract

To determine the water flow in the vadose zone is necessary to solve the Richards equation and for this purpose it is needed to define the hydraulic functions: soil moisture - suction and hydraulic conductivity - suction. These functions require the determination of hydraulic properties. These properties can be obtained by measuring the water content (humidity profiles) in laboratory or field.

The aim of this study was the verification of soil moisture curves for loessic soil of the south of the city of Córdoba that were determined theoretically by laboratory studies in other soils and for other grading curves. This infiltration models were made using hydraulic functions determined and compared with instrumented measurements. The measurements were made using three probes (one for Humidity, Temperature and Electrical Conductivity, and two for Soil Moisture only) that were installed at different depths.

Keywords: hydraulics functions, loess, vadose zone.

¹ Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (UNC)
Av. Vélez Sarsfield 1611 Córdoba, Córdoba, Argentina

✉ teresamaria.reyna@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Cuando no es posible tener mediciones de las propiedades hidráulicas en todo el rango de succión, se pueden determinar las curvas de humedad-succión y conductividad hidráulica-succión del suelo combinando los conocimientos de las propiedades de otros suelos y el conocimiento de otros parámetros del suelo en estudio. Si los datos de campo o laboratorio son escasos se pueden utilizar otros parámetros del suelo para definir sus funciones hidráulicas.

Bredden (1963) planteó una clasificación gráfica que permite establecer la conductividad hidráulica saturada a través de las curvas granulométricas de suelos. En particular, el conocimiento de la distribución granulométrica y los parámetros de humedad natural, humedad saturada y conductividad hidráulica saturada (todos parámetros que se determinan de manera frecuentes con ensayos estándares en cualquier laboratorio de suelos) permiten obtener las funciones de conductividad hidráulica y humedad del suelo en forma aproximada (*Reyna, 2000*).

Los suelos loésicos de Argentina constituyen el principal depósito de su tipo en Sudamérica, cubriendo más de 600.000 km² de superficie. Son suelos de origen eólico, que pueden conservar su estructura generada al depositarse (loess primario) o sufrir transporte o alternación in-situ (loess secundario o loessoides) (*Rocca et al., 2006*)

Recientemente se han realizado avances en el conocimiento de los procesos de cementación, las propiedades dieléctricas y las variaciones mecánicas con distintos niveles de deformaciones,

en el empleo de nuevos métodos no destructivos, ensayos in-situ y variaciones areales de los parámetros más significativos (*Rocca et al., 2006*).

Sin embargo la información de sus propiedades hidráulicas es escasa o inexistente. Las funciones hidráulicas no estaban definidas; los valores existentes de humedad - succión en todo el rango eran escasos y el único dato sobre conductividad hidráulica era en estado saturado. Durante el año 2000, se propusieron funciones hidráulicas teóricas para el loess de la Ciudad de Córdoba (*Reyna, 2000*).

El objetivo de este trabajo fue la verificación de las curvas de humedad de suelos loésicos determinadas utilizando estas funciones hidráulicas teóricas en una parcela experimental de 5 x5 m, ubicada al sur de la ciudad de Córdoba (31°26'24.91"S; 64°10'44.51"O). Para ello se contrastaron estas curvas con los valores medidos obtenidos mediante sensores de humedad ante la ocurrencia de eventos de precipitación y de riego en la parcela experimental.

SUELOS LOÉSICOS

Los estudios geotécnicos realizados en general en Córdoba sobre el loess son muy importantes desde el punto de vista de la geotecnia, pero no se adecuan a las necesidades hidrogeológicas. Por este motivo fue necesario determinar las funciones hidráulicas.

Unas de las principales dificultades que se encuentran para modelar los procesos de infiltración es la de conocer los



Figura 1. Ubicación Zona de estudio.

parámetros de los suelos para lograr una adecuada representación de la realidad.

En la ciudad de Córdoba no se conocen tareas sistemáticas de producción experimental de datos de mediciones de infiltración en áreas permeables urbanas (Weber et al., 2005).

Existen mediciones de conductividad saturada en loess y permeabilidad en función de la presión vertical efectiva para muestras compactadas y en estado natural permeadas con distintas soluciones para un estudio de la conductividad del loess natural y limo mejorado para el diseño de barreras. Es importante destacar que debido a las técnicas utilizadas en todas las mediciones realizadas, no se tienen valores de conductividad hidráulica para distintas succiones. Por este motivo, para determinar la conductividad hidráulica en función de la succión se realizó un estudio de las propiedades hidráulicas de los suelos finos.

El loess de Córdoba en general está compuesto por: Arena fina (>0,080 mm): 3,1%, Limo (0,080 a 0,002 mm): 84,4% y Arcilla (<0,002 mm): 12,5%. El Peso Unitario Seco promedio es (γ_d): 13,14 kN/m³ (1,34 g/cm³) y el grado de saturación varía entre el 27% y el 38% (Redolfi, 1993). En la tabla 1 se presentan valores orientativos de los loess locales.

Tabla 1. Valores orientativos del loess local.

PARÁMETRO	ENTORNO
Humedad Natural	
Gravimétrica (w %)	≈ 20
Densidad Seca (kN/m ³)	12,5 - 15,3
Límite Líquido (%)	20 - 27
Índice Plástico (%)	2 - 6
Pasante Tamiz T 200 (%)	85 - 99

Propiedades Hidráulicas

Para determinar las funciones hidráulicas primero se procedió a comparar las propiedades hidráulicas de otros suelos con características físicas similares.

Los datos de los suelos y las mediciones se obtuvieron del programa UNSODA, el cual constituye una base de datos

elaborada por Leij et al (1996), pertenecientes al Laboratorio de Salinidad de los EEUU y por Joseph R. Williams de la División de Restauración y de Protección Subsuperficial.

La base de datos proporciona las propiedades hidráulicas de los suelos no saturados (contenido de humedad, conductividad hidráulica y difusividad del agua en el suelo), propiedades básicas del suelo (distribución del tamaño de partículas, densidad, contenido de materia orgánica, etc.) e información adicional sobre el suelo y los procedimientos experimentales (Leij et al., 1996).

De acuerdo a los datos de suelos se realizaron las curvas de las propiedades hidráulicas medidas (ver Figura 2), en las mismas se puede observar que los valores son similares. Se pueden definir entonces envolventes que marcan el rango de variación de los valores de humedad y conductividad para este tipo de suelos y para distintas succiones.

El rango de variación de las propiedades hidráulicas de distintos tipo de suelos finos permite establecer un marco para las propiedades y para los estudios de infiltración.

La curva correspondiente a la envolvente de las conductividades hidráulicas superior corresponde a un suelo hipotético con función de conductividad hidráulica - succión por encima de las conductividades de los suelos analizados, lo mismo se realizó para la función hidráulica límite inferior de las conductividades hidráulicas y de las curvas de humedad-succión.

Estas funciones hidráulicas se determinaron utilizando el modelo de van Genuchten-Mualem.

Los parámetros del suelo hipotético correspondiente a la función hidráulica conductividad superior son humedad de saturación 0,467 cm³/cm³ y conductividad saturada 2,92 cm/h; para el suelo hipotético límite conductividad inferior: humedad de saturación 0,30 cm³/cm³ y conductividad hidráulica saturada 0,004 cm/h.

Para los suelos hipotéticos límites de la humedad se obtuvieron los siguientes parámetros: superior, humedad de saturación 0,47 cm³/cm³ y conductividad saturada 2,91 cm/h y; para el suelo hipotético límite humedad inferior: humedad de saturación 0,30 cm³/cm³ y conductividad hidráulica saturada 0,006 cm/h (Reyna, 2000).

La determinación de estos parámetros es particularmente significativa en los suelos loésicos, en los que el agua tiene un

Tabla 2. Características de los suelos (Leij et al., 1996).

SUELO	WARDEN LIMO	OHLENDORF PARABRA UNERDE LOESS	CHERNOZEM LOESS	MOLDOVA CHERNOZEM I	MOLDOVA CHERNO-ZEM II
Textura	Limo	limo	limo, loam	limo arcilloso	limo arcilloso
Ubicación	Hanford, Richlan, WA, USA	Ohlendorf, Hannover, Alemania Occidental	Ucrania región DE Odessa Rusia	Moldova, región de Dnestr, Rusia	Moldova, región de Dnestr, Rusia
Densidad g/cm ³	1,54	1,37	1,4	1,14	1,35
Porosidad	No Disponible	0,45	0,457	0,551	0,469
Ks (cm/día)	77,8	35	19,5	168	91

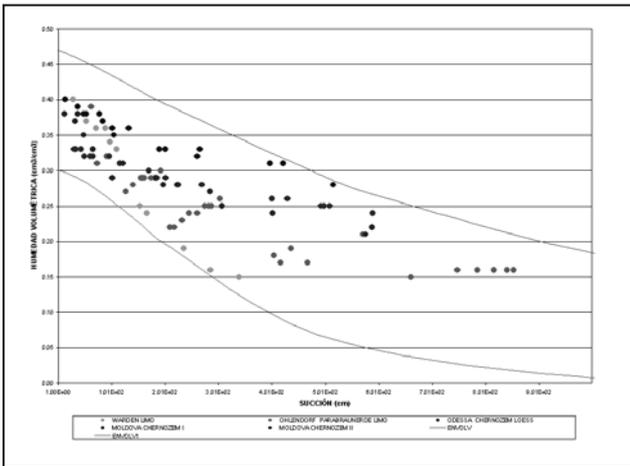


Figura 2. Curvas de humedad - succión, suelos; Warden Limo (Rockhold et al., 1987), Ohlendorf (Plagge et al., 1990), Odessa (Shein, 1990), Moldova Chernozem I y II (Meschtankova, 1989).

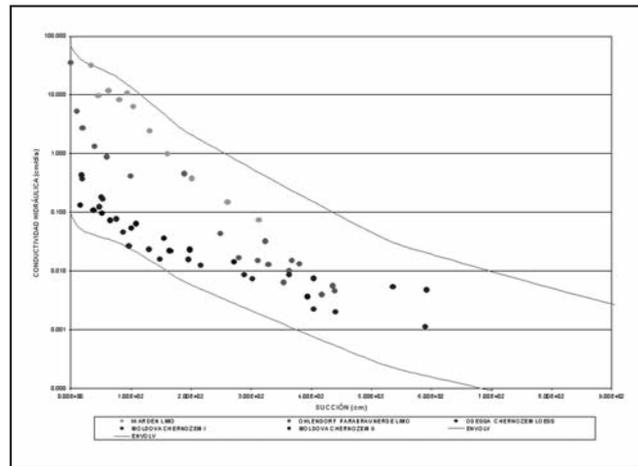


Figura 3. Curvas de Conductividad - succión, suelos; Warden Limo (Rockhold et al., 1987), Ohlendorf (Plagge et al., 1990), Odessa (Shein, 1990), Moldova Chernozem I y II (Meschtankova, 1989).

rol muy importante en la formación y comportamiento posterior de los mismos (Rinaldi, 1994).

Curvas Granulométricas

De acuerdo a lo planteado es recomendable comparar las curvas granulométricas para definir las funciones hidráulicas que mejor representen a un suelo.

En la Figura 4 se muestran las curvas granulométricas de los distintos suelos que se utilizaron, Warden Limo (Rockhold et al., 1988), Ohlendorf (Plagge et al., 1990), Odessa (Shein, 1990), Moldova Chernozem I y II (Meschtankova, 1989) la curva de la muestra ensayada del loess local. La tabla 2 muestra las características de los suelos utilizados de base para la obtención de las funciones hidráulicas para el loess.

ENSAYOS DE CAMPO

Según lo expresado por Robinson et al. (2008) quienes revisaron recientemente los métodos disponibles para medir la humedad del suelo en aplicaciones ecológicas e hidrológicas a

escala de cuenca, la medición en continuo con redes de sensores puede cubrir escalas espacio-temporales intermedias que ningún otro método puede abarcar.

Se planteó entonces, la necesidad de realizar mediciones de humedad en los suelos del sur de la Ciudad de Córdoba. Para ello se procedió a monitorear mediante sensores de humedad la respuesta de una parcela ante la ocurrencia de eventos de precipitación y de riego. Las dimensiones de la misma son de 5 m x 5 m con escasa pendiente hacia el centro donde un receptáculo conectado a un ducto enterrado conduce los excedentes hacia el exterior del predio.

La cubierta vegetal es césped gramillón, el cual es cortado semanalmente para mantener su altura entre 1,5 y 4 cm.

El tiempo total del período de monitoreo fue aproximadamente de 4 meses y se inició en el mes de diciembre, para poder considerar periodos de precipitación y secado. El intervalo de lectura en cada sensor fue seteado en 5 minutos.

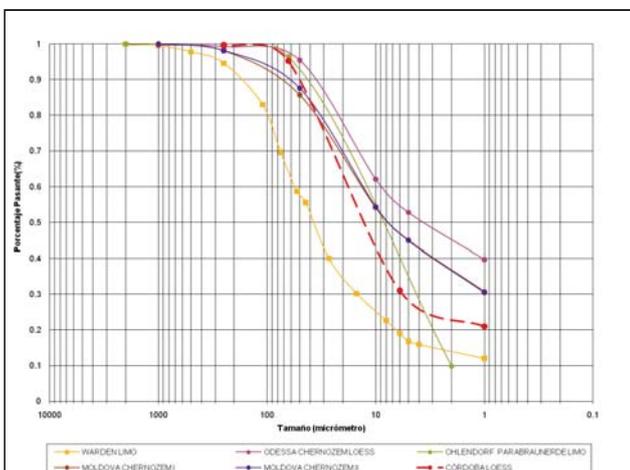


Figura 4. Curvas granulométricas Warden Limo (Rockhold et al., 1987), Ohlendorf (Plagge et al., 1990), Odessa (Shein, 1990) y Córdoba Loess (Reyna, 2000),



Figura 5. Imágenes de los sensores 10-HS y 5-EC.

Los sensores utilizados son sensores de capacitancia que ofrecen una excelente alternativa al TDR (time domain reflectometer - reflectómetro de dominio del tiempo), por su bajo coste y bajo consumo energético (Bogena et al., 2007). Los sensores empleados fueron adquiridos a la empresa DECAGON y corresponden a los modelos (Figura 5):

- 10 - HS (Denominado a partir de este momento P1): Colocado a 10 cm bajo el nivel del terreno
- 5 - TE (P2): Colocado a 30 cm bajo el nivel del terreno
- 5 - EC (P3): Colocado a 80 cm bajo el nivel del terreno.

ANÁLISIS

Los datos fueron recogidos mediante un datalogger modelo EM-50 y posteriormente procesados identificando y eliminando errores de muestreo.

Seguidamente se procedió a realizar el ajuste de las funciones de correlación entre los valores no procesados de conductividad eléctrica que arroja el sensor y la humedad del tipo de suelo de la parcela.

Para ello, sobre la serie de datos depurados, se generaron las siguientes funciones de correlación considerando la humedad de saturación registrada para este tipo de suelos y la humedad residual obtenida en ensayos sobre muestras análogas.

Luego se procedió a graficar las curvas de humedecimiento - secado en función del tiempo para los distintos sensores.

Para verificar las funciones hidráulicas determinadas anteriormente se procedió a modelar un evento empleando el mo-



Figura 6. Imagen Pluviógrafo ECHO Rain

delo NET-RAIN 3.0 (Reyna, T. 2008). A partir del 1º de marzo se colocó un pluviógrafo de una sola cuchara autodescargable marca Decagon Modelo ECHO - RAIN de exactitud +/- 2% (Figura 6).

El evento modelado corresponde a la precipitación de 1 mm ocurrida el 17 de marzo del 2010. En la modelación se consideró una humedad superficial inicial de 0,21. Este programa permite resolver la ecuación de Richards en diferencias finitas considerando las propiedades hidráulicas de los suelos

de la base de datos de UNSODA u otras funciones hidráulicas del suelo definidas por el usuario.

Al ser los datos de UNSODA (Leij et al., 1996) una base de datos discreta, obtenida de las mediciones realizadas en distintas partes del mundo, NETRAIN interpola entre los datos originales para obtener una curva continua de conductividad - succión y humedad-succión.

La salida de NETRAIN permite obtener el perfil de humedad para cada tiempo y la precipitación efectiva al descontar el agua que se infiltra en el suelo durante el proceso lo que caracteriza no sólo el escurrimiento superficial, sino también los estados de humedad del suelo en la zona vadosa durante y luego de estos eventos.

Este conocimiento permite determinar la capacidad disponible de humedad en el suelo para actividades agronómicas y es una herramienta importante en el estudio del transporte de contaminantes.

Las curvas de humedecimiento - secado en función del tiempo para los distintos sensores se presentan en la Figura 7.

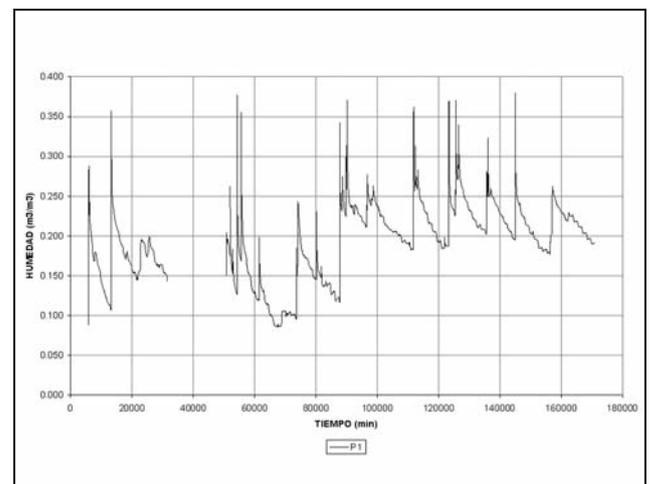


Figura 7. Curva de Humedecimiento - Secado - Sensor P1: h=10 cm

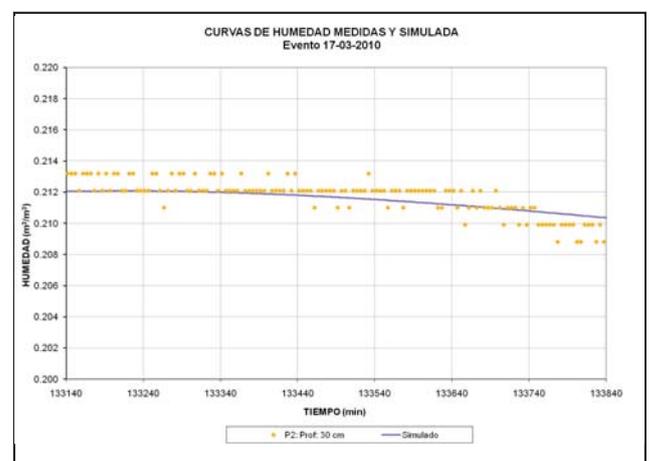


Figura 8. Curvas de humedad medidas y modelada.

Los resultados del perfil de humedad obtenido a 30 cm de profundidad modelados para el evento descrito junto con los datos medidos se presentan en la Figura 8.

Estos resultados muestran que las funciones hidráulicas determinadas precedentemente representan adecuadamente el comportamiento de humedecimiento y secado.

CONCLUSIONES

De lo observado en las granulometrías, en las curvas de humedad-succión y en los parámetros físicos de los suelos analizados, se puede inferir, comparando con los datos del loess pampeano, que las propiedades hidráulicas del loess pampeano son semejantes a las del loess ruso Ohlendorf Parabraunerde.

Además el valor de conductividad saturada para el loess local es similar al del loess ruso.

Con respecto a la curva de humedad en función de la succión obtenida del ajuste de los datos de Redolfi (1993) se obtiene un valor de humedad saturada para el loess de 36,0%.

Este valor es compatible con los datos obtenidos de los ensayos existentes en loess y similares a los presentados por Zeballos y Terzariol (2002) para suelos loésicos en estado natural. Mustafaeu y Khodzhabekov (1972), dieron valores de humedad saturada en suelos de Tadjikistan de 40%. (Reyna, T., 2008).

Los resultados presentados en este artículo muestran que las funciones hidráulicas determinadas teóricamente representan adecuadamente el comportamiento de humedecimiento y secado en la parcela experimental estudiada.

Los resultados de la simulación justifican utilizar metodologías que permitan incorporar las propiedades hidráulicas de los suelos en las simulaciones hidrológicas para representar la respuesta del suelo frente a los eventos de precipitación y secado.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BOGENA, H.R.; HUISMAN, J.A.; OBERDÖRSTER C. Y VEREECKEN, H. 2007
Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications.
Journal Hyd. 344, 32-42.
- BREDDIN, H. 1963
Die Grundrißkarten des Hydrogeologischen Kartenwekes der Wasserwirtschaftsverwaltung von Nordrhein-Westfalen. Geologische Mitteilungen.
Aachen, Germany, Geologische Mitteilungen, v.2. p.393-416.
- LEIJ, F. J.; ALVES, W. J.; VAN GENUCHTEN, M. TH. Y WILLIAMS, J. R. 1996
The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database - User's Manual version 1.0. National Risk Management Research Laboratory.
Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. U.S.A.
- MESCHTANKOVA, L. 1989
Ph.D. Thesis, Moscow State Univ.
Citado por The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database (Leij, F. J.; Alves, W. J.; Van Genuchten, M. Th. Y Williams, J. R.).
- MUSTAFAEV, A.A. Y KHODZHABEKOV, V. S. 1972
Approximate method of solving unsteady problems relating to wetting of layers of collapsible soils.
Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol 9, Number 3, p 145-150. U.S.A.
- PLAGGE R., RENGER M., AND ROTH C., 1990
A new laboratory method to quickly determine the unsaturated hydraulic conductivity of undisturbed soil cores within a wide range of textures.
J. Plant Nutr. Soil Sci., 153, 39-45.
- REDOLFI, E. 1993
Comportamiento de Pilotes en Suelos Colapsables.
Tesis doctoral presentada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid de la Universidad Politécnica de Madrid, España.
- REYNA, T. 2000
Funciones Hidráulicas en Suelos No Saturados - Aplicación al Loess Pampeano.
Tesis de Maestría presentada en la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. U.N.C. Córdoba. Argentina.
- REYNA, T. 2008
Acoplamiento de los proceso de Precipitación y escorrentía.
Tesis doctoral presentada en el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. U.N.C. Córdoba. Argentina.
- RINALDI, V. 1994
Propiedades Dieléctricas del Loess del Centro de Argentina.
Tesis doctoral presentada en el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

- ROBINSON, D.A.; CAMPBELL, C.; HOPMANS, J.W.; HORNBLUKLE, B.; JONES, S.B.; KNIGHT, R.; OGDEN, E.; SELKER, J. Y WENDROTH, O. 2008
A review vision for soil moisture measurements for ecological and hydrological watershed scale observations.
Vadose Zone Journal, Vol 7; 358–389.
- ROCCA R.J.; REDOLFI E.R.; TERZARIOL R.E. 2006
Características Geotécnicas de los Loess de Argentina.
Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2) 149.
- ROCKHOLD M. L.; FAYER M. J. GEE C. W. 1988
Characterization of Unsaturated Hydraulic Conductivity at the Hanford Site.
Publication, PNL-6488, Pac. NW Lab, Richland, WA. U.S.A.
- SHEIN, 1990.
Thesis, Moscow State Univ. U.R.S.S.
Citado por The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database (Leij, F. J.; Alves, W. J.; Van Genuchten, M. Th. Y Williams, J. R.).
- WEBER, J. F., URBANO, J. M., STUYCK, E. E., AZELART, D., MARTÍNEZ, N. B. 2005.
Caracterización de los parámetros del Modelo de Infiltración de Horton en suelos de la Ciudad de Córdoba.
Cuadernos del Curiham. Vol. 11 1er semestre. pag 29-38. Argentina.
- ZEBALLOS, M. Y TERZARIOL, R. 2002.
Modelaciones de flujo unidimensional en suelos loésicos.
XVI Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sesión Técnica II, TPN°02. Trelew, Argentina.



Características del comportamiento hidrológico en áreas de llanuras basado en el análisis morfométrico. Caso de estudio: Arroyo del Tala. Provincia de Buenos Aires

Gaspari, Fernanda Julia ¹ ✉ - Kruse, Eduardo Emilio ²

Recibido: 19 de abril de 2011 • Aceptado: 19 de agosto de 2011

Resumen

El objetivo del trabajo fue analizar las características morfométricas y su influencia hidrológica en un sistema hidrológico transicional, como es la cuenca del Arroyo Del Tala. Se trata de una cuenca ubicada en la Pampa Ondulada Argentina, con pendientes bajas e irregulares y drenaje natural moderadamente bueno. El método se basó en la recopilación-interpretación de antecedentes para una caracterización morfométrica e hidrológica con apoyo SIG. En base a 8 descriptores morfométricos es posible reconocer que la respuesta a las crecidas es moderada a baja, indicando un escurrimiento superficial de una significación menor. La relación entre las características hidrogeológicas y la densidad de drenaje permiten deducir que la infiltración es una componente destacable en el balance hidrológico.

Palabras clave: llanura - red de drenaje - SIG

Abstract

The objective was to analyze morphometric and hydrological influence in a transitional water system, as is the basin of Del Tala. This is a watershed located in the Pampa Ondulada of Argentina, with low slopes and irregular and moderately good natural drainage. The method is based on the compilation, interpretation of data for a morphometric and hydrological characterization with GIS support. Based on eight morphometric descriptors can be recognized that the response to flooding is moderate to low, indicating a runoff of less significance. The relationship between the hydrogeological characteristics and drainage density can be concluded that infiltration is a prominent component in the water balance.

Keywords: plain - drainage - GIS

¹ Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas.
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP.
Diagonal 113 N° 469, 3° piso. La Plata, Buenos Aires, Argentina.

✉ fgaspari@agro.unlp.edu.ar

² Cátedra de Hidrología General. Facultad de Ciencias Naturales
y Museo. UNLP. Av. 60 y 122. La Plata, Buenos Aires, Argentina

INTRODUCCIÓN

Las relaciones entre los comportamientos hidrológicos en los sistemas lineales y la morfometría han tenido un amplio desarrollo. A partir de las características geomorfológicas cuantitativas descritas por *Horton (1945)*, *Strahler (1952)*, *Shreve (1967)*, entre otros, han sido de utilidad para facilitar la transformación precipitación - escurrimiento. Incluso han llevado a la aplicación del concepto de hidrograma geomorfológico unitario (*Rodríguez Iturbe y Valdes, 1979*, *Gupta et al, 1983*, *Agnese et al, 1988*, *Rodríguez Iturbe, 1993*). Esta aplicabilidad es más dificultosa en sistemas areales, que son propios de los ambientes de llanura, los cuales naturalmente presentan un bajo potencial morfogenético, predominando los movimientos verticales del agua (evapotranspiración e infiltración) sobre los horizontales (escurrimientos) (*Fuschini Mejía, 1983*). En estos terrenos con pendientes topográficas extremadamente pequeña o nula, no existe suficiente energía hídrica para generar cauces y generalmente se encuentran indefinidas las divisorias de agua. Constituyen los denominados sistemas hidrológicos no típicos (*Fertonani y Prendes, 1983*) como contraposición del típico en que la cuenca de drenaje en la unidad hidrológica de estudio.

En algunos sectores de las llanuras de clima húmedo, si bien son características las bajas pendientes y la presencia de cobertura vegetal, existen evidencias que en determinados casos el escurrimiento en superficie se puede asociar a la saturación de la capacidad de almacenamiento subterráneo, dado por niveles freáticos situados a escasa profundidad o aflorantes. Esta situación origina incipientes procesos erosivos (*Kruse, 1992*) que pueden dar lugar a una red de drenaje de escasa densidad, lo cual permite que a partir de suaves divisorias (a veces vinculadas a bañados o lagunas) se organice el escurrimiento que es conducido hacia un punto de descarga. El comportamiento de estos sistemas hidrológicos que presentan características transicionales entre los típicos y no típicos, no significa una modificación en cuanto al comportamiento hidrológico general en una llanura.

El objetivo de este trabajo fue analizar las características morfométricas y su influencia hidrológica en un área de llanura, eligiéndose para ello como caso de estudio la cuenca de Arroyo del Tala en la Provincia de Buenos Aires.

MATERIALES Y MÉTODOS

El método aplicado en el desarrollo del trabajo se adaptó para la integración de las componentes del ciclo hidrológico y la morfometría en esta área de llanura.

Para ello se realizó la recopilación e interpretación de antecedentes, como ser: topografía, hidrogeología, condiciones geológicas particulares, procesos hidrológicos dominantes, y una caracterización general morfométrica de la cuenca.

El análisis de las características morfológicas de la cuenca del Arroyo del Tala, se realizó a través de la determinación de parámetros de forma, de relieve y relativos a la red hidrográfica. Para definir la morfometría de la cuenca se seleccionaron los siguientes descriptores: factor de forma (IF), coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc), Índice de alargamiento (Ial), índice de homogeneidad (Ih), densidad de drenaje (Dd), pendiente media del cauce (J), pendiente media de la cuenca (PM) y coeficiente de rugosidad (Ra), determinados según la metodología propuesta por *López Cadenas del Llano (1998)*.

Se esquematizó la morfología y topografía de la cuenca del Arroyo Del Tala, utilizando un modelo cartográfico con Sis-

tema de Información Geográfica (SIG), por medio de la aplicación de diferentes metodologías de interpolación espacial de datos. Además se implementó para la caracterización hidrogeológica regional.

El SIG conforma herramientas tecnológicas muy adecuadas para analizar la regionalización de variables hidrológicas así como la clasificación de áreas homogéneas ecológicamente (*Usunoff et al, 1999*).

El procesamiento SIG de la información cartográfica digital se realizó con tecnología de Idrisi Andes[®] (*Eastman, 2003*) de Clark Labs for Cartographic Technology and Analysis. Clark University y con apoyo de diseño asistido por el programa AutoCAD[®] y Surfer 5.0[®].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características generales

La unidad de estudio está representada por la cuenca hidrográfica del Arroyo del Tala (89.211 has), situada al norte de la provincia de Buenos Aires (entre latitud sur 33°40' y 33°60') y entre longitud oeste 59°30' y 60°15'), ocupando parcialmente los partidos de Ramallo, San Pedro, Pergamino y Bartolomé Mitre (Figura 1).

Esta cuenca presenta un paisaje suavemente ondulado, con un desnivel de 68 metros sobre el nivel del mar, indicando una pendiente regional del orden de 0,098%.

La precipitación en la cuenca es característica de un clima húmedo (precipitación media anual de la Estación Experimental Agropecuaria San Pedro de INTA (Latitud: 33° 41' S - Longitud: 59° 41' W) de la Serie Histórica 1965 - 2008: 1.051,4 mm) registrándose ocasionales crecidas de magnitud. Los mayores excesos hídricos se producen durante el otoño - invierno y el déficit más significativo en el verano. El clima es templado húmedo, registrando temperaturas medias mensuales, en la misma estación INTA y período, que oscilan entre los 10,3 y 23,9 °C (*INTA, 2010*).

En el esquema hidrogeológico adquieren importancia práctica dos unidades: 'Arenas Puelches' y 'Sedimentos Pampeanos' (*Sala, 1975*). Estas unidades presentan una alternancia de secciones productivas separadas por sedimentos de menor permeabilidad que conforman un acuífero multiunitario. El nivel superior conocido como Pampeano está integrado por limos, y en forma subordinada por arenas y arcillas de color castaño rojizo, presentando con frecuencia concreciones o bancos de carbonato de calcio. Este nivel incluye a la capa freática, cuya profundidad, en condiciones naturales, varía entre 5 y 10 metros. Por debajo del Pampeano se sitúan las Arenas Puelches que representan al acuífero más importante del Noreste de la Provincia de Buenos Aires. Se trata de una secuencia de arenas cuarzosas finas a medianas, con un tamaño de grano que aumenta en profundidad.

El agua subterránea es utilizada para distintos fines (agua potable, riego, industrias, ganadería) y ello ha tenido influencia en el desarrollo socioeconómico y un papel fundamental en las variaciones ambientales (sequías e inundaciones) dada su vinculación directa con el agua superficial.

El 90% presenta suelos de aptitud agrícola, con drenaje natural moderadamente bueno. Morfológicamente se observa: la llanura alta en la cabecera, la llanura intermedia con un relieve más marcado donde se reconocen cursos pequeños y la llanura baja representando la sección inferior con carácter inundable.

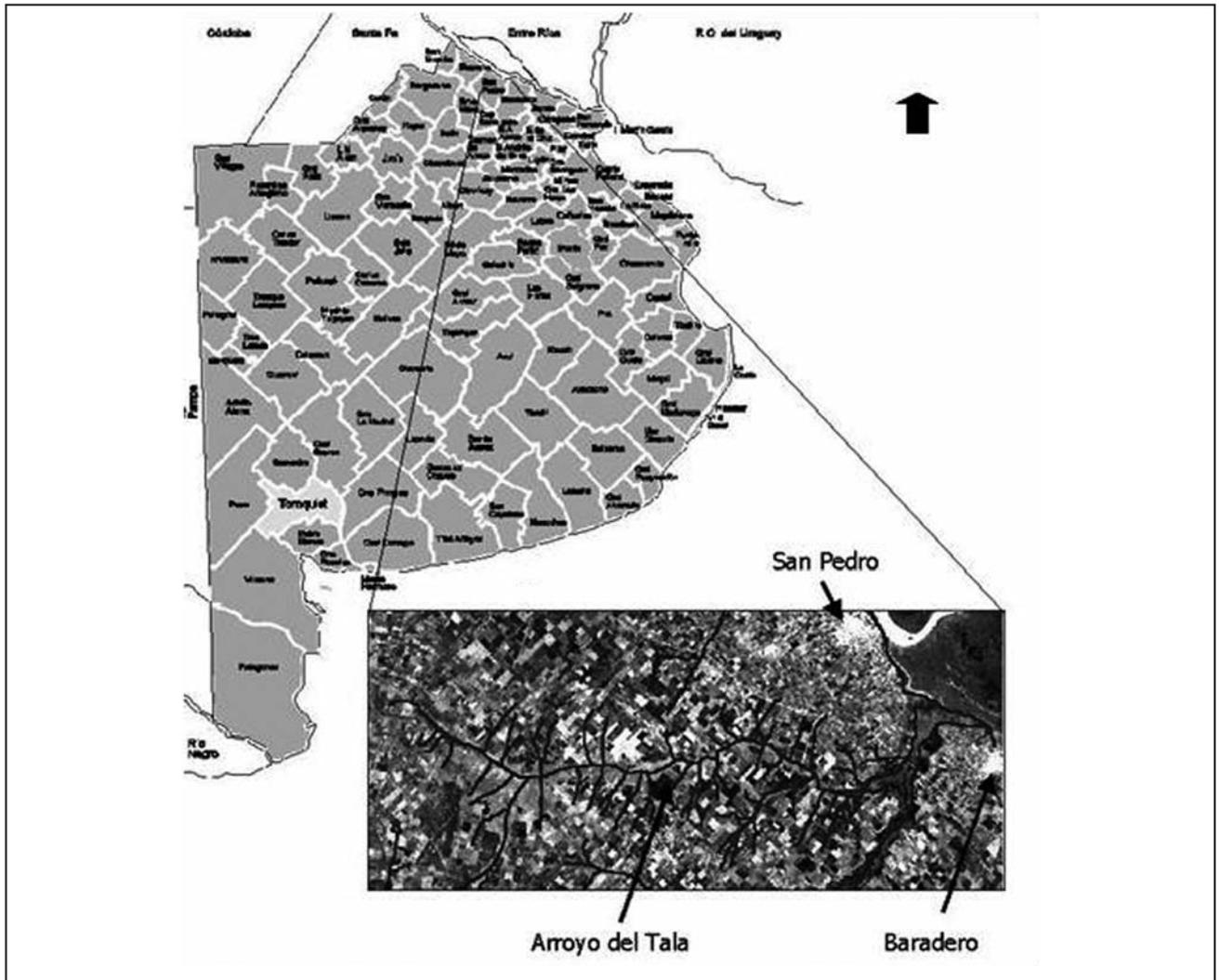


Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca del Arroyo del Tala, Prov. Buenos Aires, Argentina.

El uso agrícola ganadero es el predominante en la cuenca, siendo los cultivos como la soja, el trigo y maíz y la ganadería vacuna, los de mayor distribución (Michelena et al, 1989).

Morfometría

El análisis morfométrico de la cuenca permitió evaluar los descriptores (Tabla 1) desde un punto de vista tradicional relacionado con el escurrimiento superficial y además una interpretación vinculada con los procesos dominantes en la llanura.

Para el primer caso los parámetros morfométricos en la cuenca del Arroyo del Tala indican que la forma es oval - oblonga a rectangular oblonga, que presupone que es poco susceptible a las crecidas, cuyas aguas escurren en general por un solo curso principal (IF - Kc).

La densidad de drenaje natural (Dd), es relativamente baja, en relación a la superficie de la cuenca (A), generando áreas de almacenamiento superficial, como ser los bañados y lagunas intermitentes. La Dd baja, indica que la respuesta de la cuenca frente a una tormenta es moderada a lenta, considerando los cursos de agua permanentes y transitorios de mayor envergadura, que se ve favorecido por el factor topográfico y el coeficiente de rugosidad.

Tabla 1. Caracterización morfométrica.

Identificador	Unidad de medida	Resultado
(P)	km	158,39
(La)	km	60,07
(A)	km ²	892,11
(Ap)	km	18,85
(IF)	Adimensional	0,24
(Kc)	Adimensional	1,49
(Ial)	Adimensional	2,54
(Ih)	Adimensional	0,58
(Dd)	km km ⁻²	0,35
(J)	Porcentaje	0,08
(PM)	Porcentaje	0,0003
(Ra)	Adimensional	0,02

La baja pendiente (J - PM) genera un mayor tiempo de concentración y un mayor tiempo de acumulación de aguas - almacenamiento.

El Ra establece que la cuenca presenta una baja relación entre el desnivel y la densidad de drenaje, generando una leve rugosidad. El perfil longitudinal de la cuenca expresa una depresión de forma suavemente parabólica. Este mismo diseño se observa en los perfiles transversales sobre la cuenca superficial, con aspecto de capa moderadamente radial convergente.

Las características descritas permiten reconocer que el escurrimiento superficial en condiciones normales adquiere una

significación menor. A su vez ello refuerza el concepto de la importancia de los movimientos verticales del agua.

Desde ese punto de vista, la cuenca se caracteriza por presentar una fuerte interrelación entre el agua superficial y subterránea.

Las divisorias de aguas superficiales de la cuenca coinciden, en gran parte, con las subterráneas y es posible que las pequeñas variaciones se deban en parte a la distinta precisión con que se ha trabajado en los relevamientos (Figura 2).

La red de flujo subterráneo (Figura 3), actualizada a partir de *EASNE (1972)*, refleja esta situación y el espaciamiento

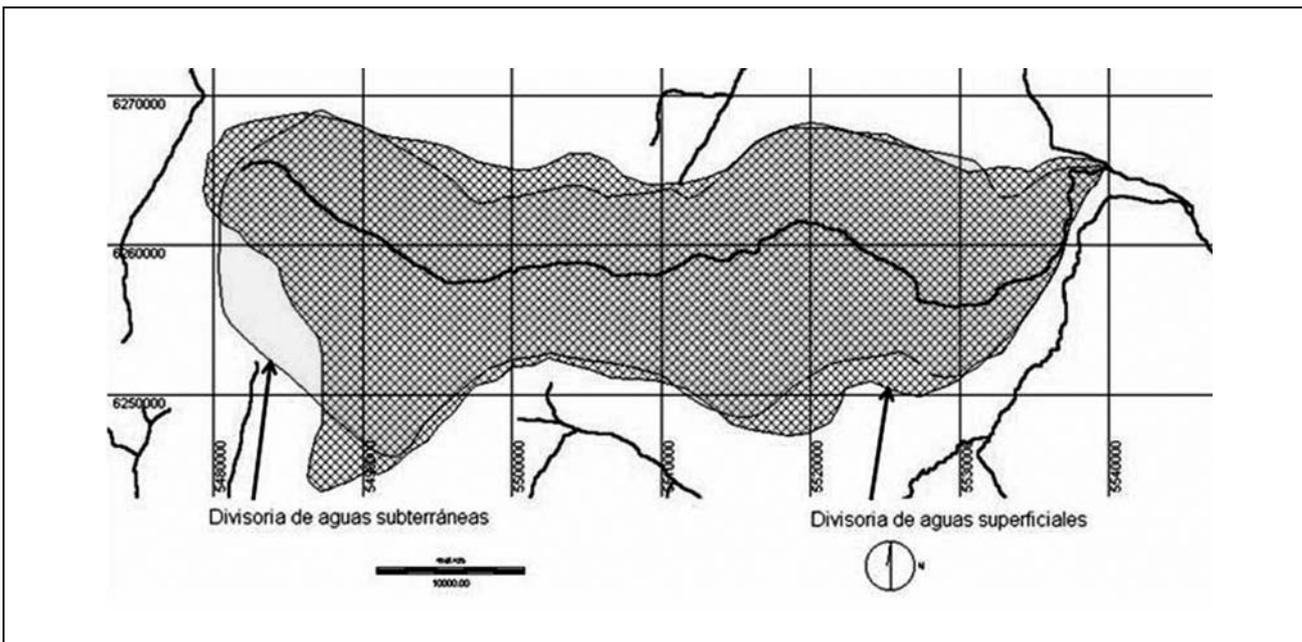


Figura 2. Divisorias de aguas superficial y subterránea de la cuenca del Arroyo del Tala.

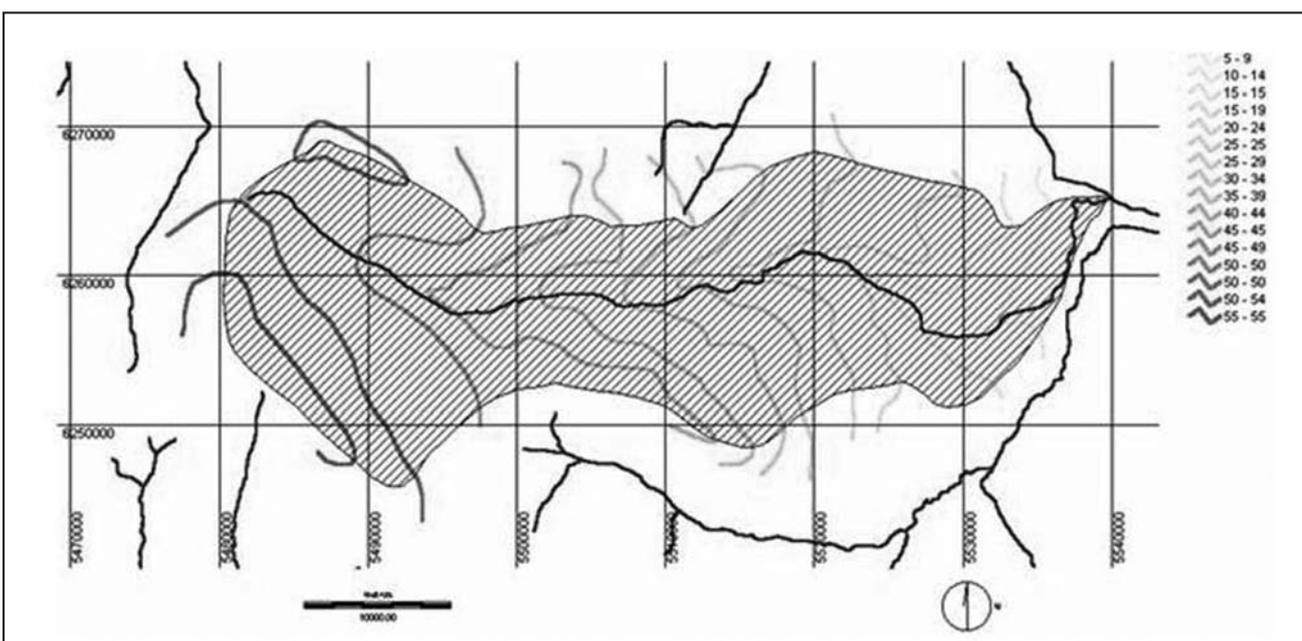


Figura 3. Líneas isofreáticas y divisoria de agua subterránea del Arroyo del Tala. Equidistancia 5 metros.

de las curvas isofreáticas permite reconocer escasas variaciones en los espesores saturados (zonas de una mayor infiltración) y en la permeabilidad del medio.

La Figura 4 manifiesta la orientación de descarga subterránea que representa la dirección del escurrimiento subterráneo, que coincide con la dirección de flujo superficial. Las zonas de recarga dominante se localizaron en la porción superior de la cuenca; mientras que la descarga se materializa en el curso principal.

El carácter relativamente homogéneo de las unidades litológicas aflorantes hace que los factores morfológicos presenten un control en el comportamiento hidrológico. Un incremento en el flujo subterráneo en la llanura alta se refleja generalmente solo como un mayor espaciamiento en las curvas; mientras que en las vecindades de las zonas de descarga hay una aceleración en el flujo, acompañada de un aumento de gradiente.

Las características señaladas asociadas a la homogeneidad climática regional permiten plantear preliminarmente una relación entre la morfometría y las condiciones hidrogeológicas, siendo esta última representada fundamentalmente por transmisividad de la capa freática y la densidad de drenaje.

Es posible asumir que existe una relación entre la transmisividad de la capa freática (T) y la densidad de drenaje (Dd) en el concepto de *Horton (1945)*. Aunque es evidente que esta no es una relación directa ya que existen otros factores que pueden tener influencia.

En las condiciones expuestas para la cuenca del Arroyo del Tala, clima húmedo y con cursos efluentes con respecto al agua subterránea, es posible plantear dicha relación, que estaría dada (*Custodio y Llamas, 1996*) por: $T = W / 8 Dd^2 \Delta h$. Se

puede deducir que conociendo, en la cuenca del Arroyo del Tala, el valor de la transmisividad de medio (T), la diferencia de elevación máxima de la capa freática y el nivel en el río en una sección (Δh) y la densidad de drenaje (Dd) es posible valorar preliminarmente la infiltración eficaz (W). Por ello, siendo la transmisividad media de la unidad hidrogeológica superficial del orden de $100 \text{ m}^2/\text{día}$, la Δh de 5 m y la Dd de $0,35 \text{ km}/\text{km}^2$, el valor de infiltración eficaz (W) es de aproximadamente $180 \text{ mm}/\text{año}$. Este valor representa alrededor del 18% de la precipitación anual, que al mismo tiempo es agua aportada al curso por escurrimiento subterráneo.

Si bien puede considerarse un valor relativamente alto, existen antecedentes de estimaciones similares en distintos sectores de la llanura, lo cual permite verificar la significación que adquiere el proceso de infiltración en una región de llanura como la analizada.

CONCLUSIONES

Las características morfométricas de la cuenca del Ao. Del Tala permiten reconocer una baja susceptibilidad a las crecidas, mostrando una respuesta moderada a lenta frente a una tormenta y un retardo en la acumulación de agua y las crecidas. De esta forma se reconoce que el escurrimiento superficial, en condiciones normales, adquiere una significación menor, a diferencia de lo que ocurre con la infiltración e interrelación entre aguas subterráneas y superficiales.

A partir de la densidad de drenaje y condiciones hidrogeológicas es posible deducir un valor de infiltración que en una primera aproximación resulta coherente con el comportamiento hidrológico de la cuenca.

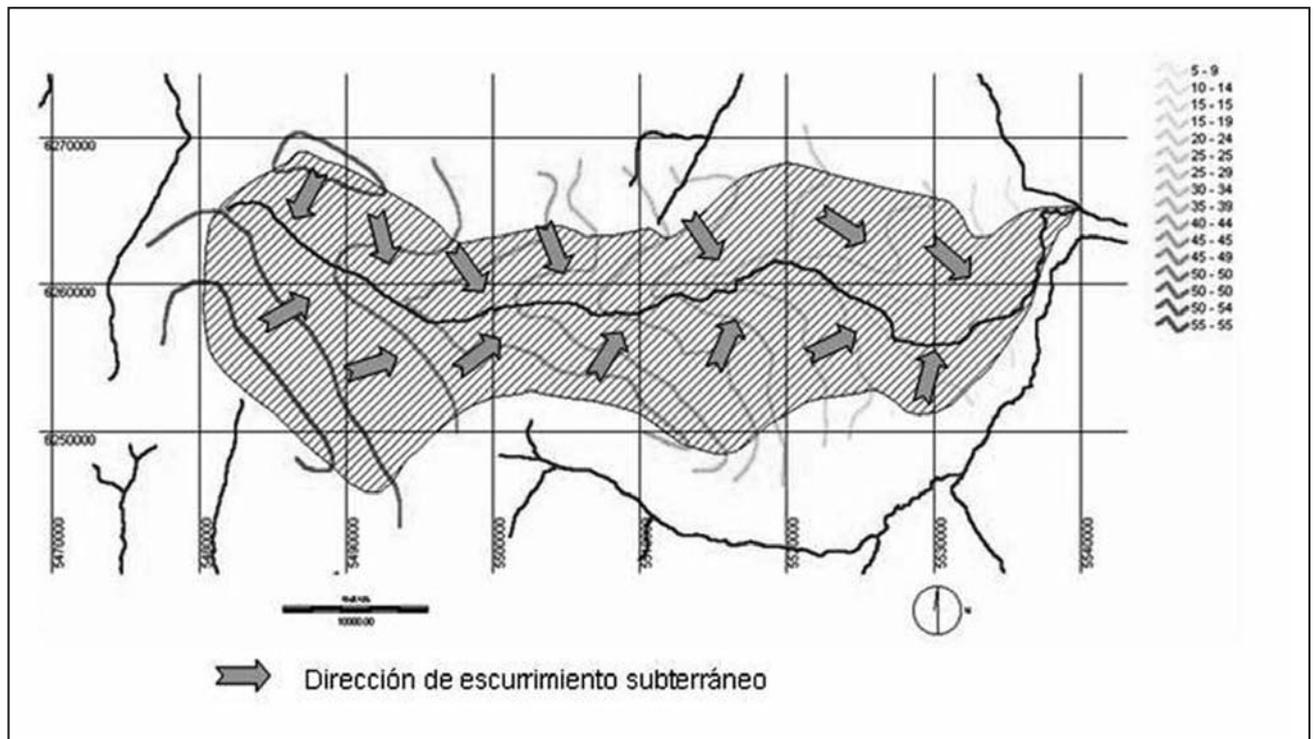


Figura 4. Dirección de descarga subterránea en la cuenca subterránea, con líneas isofreáticas.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AGNESE, C., DASARO Y G.GIORDANO. 1988.
Estimation of the time scale of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph from effective streamflow velocity.
Water Resour. Res., 24 (7): 969 - 978.
- CUSTODIO E. Y M.R.LLAMAS. 1996.
Hidrología Subterránea.
Ed. Omega. Barcelona. T2. pp 2276 – 2283.
- EASNE. 1972.
Contribución al estudio geohidrológico del noreste de la provincia de Buenos Aires.
CFI. Serie Técnica 24. Tomos 1 y 2. Buenos Aires.
- EASTMAN, J.R.. 2003.
Guía del usuario digital. IDRISI Kilimanjaro.
Clarks Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis. Clark University. USA.
- FERTONANI, M. Y H. PRENDES. 1983.
Hidrología en áreas de llanura. Aspectos conceptuales teóricos y metodológicos.
Coloquio Internacional sobre hidrología de grandes llanuras. Olavarría, Argentina. Tomo I: 120 – 156.
- FUSCHINI MEJIA, M.C. 1983.
Editor. Hidrología de Grandes Llanuras.
Actas del Coloquio de Olavaria. PHI - UNESCO. Olavaria.
- GUPTA, V.K. Y WAYMIRE, E. 1983.
On the formation of analytical approach to hydrologic response and similarity at the basin scale,
J. Hydrol. 65: 95 - 123
- HORTON, R.E. 1945.
Erosional development of stream and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology.
Geol. Soc. Am. Bull., 56: 275 - 370.
- INTA. 2010.
Estadísticas climatológicas. 1965 / 2007.
Estación Experimental Agropecuaria San Pedro. Buenos Aires. Edición Web.
<http://www.inta.gov.ar/sanpedrol/info/met/otros/resumen2008.htm>.
- KRUSE, E. 1992.
El agua subterránea y los procesos fluviales en la región centro - oriental de la Provincia de Buenos Aires.
Situación Ambiental de la Provincia de Buenos Aires: II: 15 (13-31). Comisión de Investigaciones Científicas. La Plata.
- LÓPEZ CADENAS DE LLANO, F. 1998.
Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y Control de la Erosión.
Ingeniería Medioambiental. TRAGSATEC. Min.Medio Ambiente. Ed. Mundi Prensa. España. 945 pp
- MICHELENA, R; IRURTIA, C.; VAVRUSKA, F; MON, R. Y A.PITTALUGA. 1989.
Degradación de suelos en el norte de la Región Pampeana.
Publicación técnica N°6. EEA Pergamino. INTA. 120 pp.
- RODRÍGUEZ ITURBE, I. 1993.
The geomorphological unit hydrograph.
In Channel Network Hydrology. John Willey and Sons. New York.
- RODRÍGUEZ ITURBE, I. Y VALDES, J.B. 1979.
The geomorphologic structure of the hydrologic response.
Water Resour. Res., 15 (6): 1409 - 1420.
- SALA, J. M. 1975.
Recursos Hídricos. Especial Mención de las Aguas Subterráneas.
Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires. V Congreso Geológico Argentino. Buenos Aires.
- STRAHLER, A.N. 1952.
Hypsometric (area – altitude) analysis of erosional topography.
Geol. Soc. Am. Bull., 63: 1117 - 1142.
- USUNOFF E, VARNI M, WEINZETTEL P. Y R.RIVAS. 1999.
Hidrogeología de grandes llanuras: La pampa húmeda argentina.
Boletín Geológico y Minero. 110 (4). 391-406. ITGE-IAH-UNESCO.



El uso de Corine Land Cover en la identificación de actividades potencialmente contaminantes del agua subterránea. Análisis preliminar en el área Mar del Plata-Balcarce (Argentina)

Massone, Héctor ¹ - Sagua, Marisa ² - Tomas, Mónica ¹ - Zelaya, Karina ³ - Betancur, Teresita ⁴
Romanelli, Asunción ¹⁻⁵ - Lima, Lourdes ¹⁻⁵

Recibido: 15 de febrero de 2011 • Aceptado: 06 de setiembre de 2011

Resumen

Este estudio se desarrolla en un área de 830 km² entre las ciudades de Mar del Plata y Balcarce (provincia de Buenos Aires, Argentina) en la que se desarrollan actividades agrícolas, residenciales, comerciales, industriales, turísticas. El objetivo del trabajo es evaluar las potencialidades y restricciones que presenta la metodología CORINE Land Cover, ampliamente utilizada en Europa, para discriminar diferentes usos del suelo y permitir, así, asociar cada uno de ellos con una carga contaminante potencial. Se ha adaptado la metodología en aspectos vinculados a la unidad mínima de análisis y a la generación de categorías que no estaban contempladas originalmente para la asignación de carga contaminante potencial se siguieron los lineamientos del método POSH. El relevamiento se realizó a partir de imágenes satelitarias Landsat TM, Google EarthPro y reconocimiento de campo. Se identificaron y mapearon categorías de uso hasta tercer nivel. El uso de esta metodología es eficaz, aunque deben adecuarse la escala de trabajo y modificarse algunas categorías vinculadas a uso residencial.

Palabras clave: contaminación, Corine, agua subterránea.

Abstract

The study area (830 km²) is located between Mar del Plata and Balcarce cities (Buenos Aires Province, Argentina), whose axis is route 226 which connects several settlements. Mar del Plata-Balcarce Corridor is a complex area given that it constitutes a multi-purpose zone used for recreational, residential, industrial, tourist and intensive agricultural activities. The aim of this study is to assess the potentials and constraints of the CORINE Land Cover methodology, widely used in Europe, in discriminating different land covers. Moreover, according to the POSH method, the potential pollutant load associated to each category was done. The land cover analysis was performed by using Landsat TM satellite

1 Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (FCEN - UNMDP) - Funes 3350 (B7600), Mar del Plata, Argentina.

2 Centro de Investigaciones Ambientales (FAU - UNMDP) Funes 3350 (B7600), Mar del Plata, Argentina.

3 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Ruta 226 km 73, Buenos Aires, Argentina

4 Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

5 CONICET

✉ hmassone@mdp.edu.ar

images, Google EarthPro and also through field work. This study identified and mapped land cover categories up to the third level. The use of this methodology in the area was feasible, although the working scale and some categories related to residential use must be adequate.

Keywords: pollution, corine, groundwater.

INTRODUCCIÓN

El riesgo de contaminación de acuíferos está dado por la interacción de la peligrosidad de contaminación (Foster et al. 2002) con la vulnerabilidad de la población expuesta (Massone y Sagua 2005); el concepto de peligrosidad de contaminación se entiende como la posibilidad o probabilidad que un contaminante afecte la calidad del agua subterránea y está definido por la interacción entre vulnerabilidad del acuífero y carga contaminante (Foster e Hirata 1988; Massone y Martínez 2008).

El inventario de carga contaminante es una actividad que comprende la identificación, localización espacial, período de funcionamiento y la caracterización de las prácticas utilizadas, de forma sistemática (WHO 1982). Si bien las propuestas de clasificación de fuentes y su valoración en relación al potencial de contaminación son variadas (Foster e Hirata 1988; Foster et al. 2002; Zaporocec 2004), es destacable que a la etapa de identificación y localización espacial de actividades se le ha prestado muy escasa atención (con algunas excepciones como por ejemplo la guía editada por Zaporocec (2004) que incluye un lineamiento metodológico para estos aspectos).

El objetivo del trabajo es evaluar las potencialidades y restricciones que presenta la metodología CORINE Land Cover, para discriminar diferentes usos del suelo que luego puedan

asociarse a una tipificación de carga contaminante potencial. El área de estudio (Figura 1) es el llamado “Corredor Mar del Plata-Balcarce” (Sagua y Massone 2007), faja de 830 km² que tiene como eje central la ruta 226, que une las ciudades de Mar del Plata y Balcarce, de 700.000 y 40.000 habitantes respectivamente.

El proyecto CORINE (Coordination of information on the environment) se inició en la Unión Europea en 1985, siendo la sección “Land Cover” (CLC) uno de sus principales componentes. CLC en su versión 2000 reconoce y clasifica mediante imágenes satelitarias hasta en 5 niveles los diferentes usos del suelo, estableciendo la unidad mínima de mapeo en 25 Ha.

METODOLOGÍA

La identificación y localización espacial de actividades se basó en CLC (2000), trabajando hasta el nivel 3, con unidad mínima de mapeo de 1 Ha. La identificación y localización de actividades se realizó mediante la interpretación de la escena 224-086 de LandSat, utilizándose los sensores TM y ETM+, y las bandas del visible, Infrarrojo cercano y medio; Google Earth-Pro fue de suma utilidad a la hora de identificar el máximo detalle alcanzado en este trabajo y el reconocimiento de campo completó detalles de relevamiento.

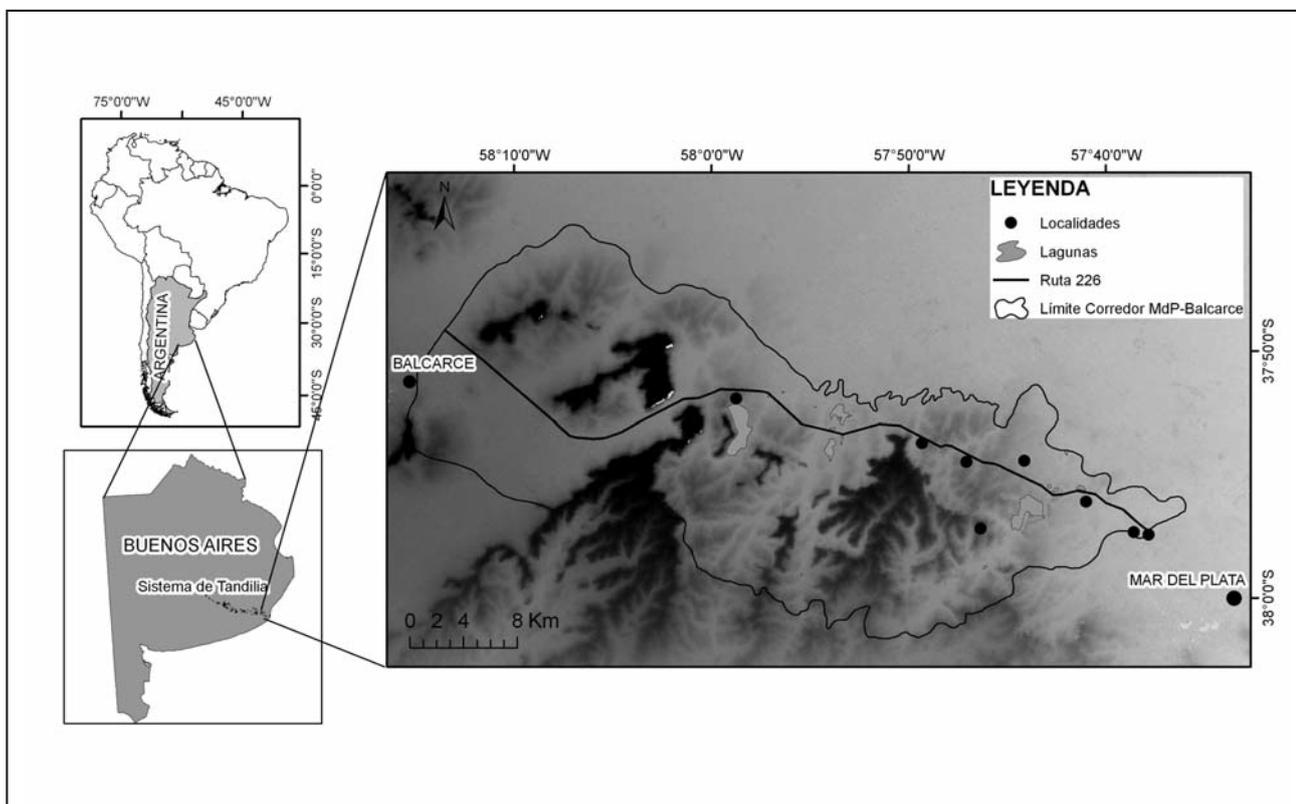


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Tabla 1. Clasificación de usos del suelo según CORINE, hasta nivel 3.

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
1. ZONAS ARTIFICIALES	1.1. Tejido Urbano	1.1.1. Tejido Urbano Continuo 1.1.2. Tejido Urbano Discontinuo
	1.2. Zonas Industriales, Comerciales y de Transporte	1.2.1. Zonas Industriales y Comerciales
	1.3. Zonas de Extracción Minera, Vertidos y de Construcción	1.3.1. Zonas de Extracción Minera
	1.4. Zonas Verdes Artificiales, No Agrícolas	1.4.2. Instalaciones Deportivas y Recreativas
	2.1. Tierras de Labor	2.1.1. Tierras de labor en secano 2.1.2. Terrenos Regados Permanentemente
2. ZONAS AGRICOLAS	2.2. Cultivos Permanentes	2.2.2. Frutales y Plantaciones de Bayas
	2.3. Praderas	2.3.1. Prados y Praderas
	3.1. Bosques	3.1.1. Bosques de Frondosas
3. BOSQUES Y AREAS SEMINATURALES	3.2. Matorrales y/o Asociaciones de Vegetación Herbácea	3.2.1. Pastizales Naturales
	3.3. Espacios Abiertos con Escasa Vegetación	3.3.2. Roquedo
5. SUPERFICIES DE AGUA	5.1. Aguas Continentales	

Los resultados se volcaron luego mediante ArcView 3.1 (ESRI 2006) en un sistema de información geográfica que permitió compatibilizar las observaciones realizadas por estas diferentes herramientas.

A modo de ensayo preliminar la asignación de carga contaminante potencial se realizó siguiendo lo establecido por el método POSH (Foster et al. 2002)

RESULTADOS

El mapa de Nivel 1 (Figura 2a) permite reconocer 4 de las 5 clases establecidas por la metodología; en el Nivel 2 se reconocieron 11 categorías (Figura 2b; Tablas 1 y 2); el Nivel 3, muestra 12 clases (Figura 3a; Tablas 1 y 2), no se discriminaron categorías a este nivel para las aguas continentales. En este nivel 3, el de mayor detalle alcanzado, la asignación de categorías corresponde al siguiente criterio:

Clase 1.1.1. Tejido urbano continuo: corresponde a una zona urbana consolidada; la mayor parte del territorio está cubierto por estructuras y redes de transporte. Edificios, carreteras y superficies artificiales cubren más del 80% de la superficie total. Son casos excepcionales las zonas de vegetación no lineales y el suelo desnudo. Fue asignada a un extremo de la ciudad de Balcarce.

Clase 1.1.2. Tejido urbano discontinuo: La mayor parte de la tierra está cubierta por estructuras. Edificaciones, carreteras y superficies artificiales asociadas a zonas con vegetación y suelo desnudo, que ocupan superficies discontinuas pero significativas. Entre el 30 y 80% de la superficie total debe ser impermeable; a esta clase corresponden los barrios La Herradura e

Tabla 2. Superficies ocupadas por cada clase a nivel 3.

NIVEL 3	Km ²
1.1.1. TEJIDO URBANO CONTINUO	1,70
1.1.2. TEJIDO URBANO DISCONTINUO	13,70
1.2.1. ZONAS INDUSTRIALES Y COMERCIALES	2,59
1.3.1. ZONAS DE EXTRACCION MINERA	0,86
1.4.2. INSTALACIONES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS	2,79
2.1.1. TIERRAS DE LABOR EN SECANO	360,30
2.1.2. TERRENOS REGADOS PERMANENTEMENTE	61,60
2.2.2. FRUTALES Y PLANTACIONES DE BAYAS	0,02
2.3.1. PRADOS Y PRADERAS	199,83
3.1.1. BOSQUES DE FRONDOSAS	13,60
3.2.1. PASTIZALES NATURALES	66,60
3.3.2. ROQUEDO	106,50
5.1.1. AGUAS CONTINENTALES	10,10

Hipódromo (extremo de la zona periurbana de Mar del Plata) y Sierra de Los Padres, Santa Paula, El Paraíso, Colinas Verdes, El Coyunco, La Gloria de La Peregrina, Villa La Brava y periurbano oriental de Balcarce.

Clase 1.2.1. Zonas Industriales y Comerciales: corresponde a zonas con pavimento artificial (cemento, asfalto, tierra compactada) sin vegetación ocupan la mayor parte del área, en las que también aparecen edificios y/o vegetación. Se incluyeron en esta clase el establecimiento de McKain, la Estación Terrena de Comunicaciones, el complejo industrial "Tulio Crespi", 2 plantas embotelladoras de agua mineral, 5 granjas avícolas, el Mercado Concentrador Frutihortícola, la Estación Transformadora Eléctrica de Laguna de Los Padres y el camino de ingreso a Balcarce por ruta 55 y las áreas de servicios El Coyunco y El Dorado.

Clase 1.3.1. Zonas de Extracción Minera: áreas de extracción a cielo abierto de materiales de construcción (minas

de arena, canteras) u otros minerales. Incluye graveras inundadas, excepto extracción de lechos de los ríos. Se han ubicado en esta categoría más de 15 cavas ladrilleras identificadas en la zona.

Clase 1.4.2. Instalaciones Deportivas y Recreativas: Campings, terrenos deportivos, parques de ocio, campos de golf, hipódromos, etc. Incluye parques tradicionales no rodeados por zonas urbanas. Se han identificado 14 diferentes centros deportivos, campings y de recreación.

Clase 2.1.1. Tierras de labor en secano: Cultivos de cereales, leguminosas, forrajeras, tubérculos y barbecho. Incluye otros cultivos de cosecha anual con más del 75% del área bajo un sistema de rotación. Parte de esta clase son las parcelas de tierras de labor con una superficie de varias hectáreas alcanzando decenas (centenas) de hectáreas. Se agrupan aquí trigo, soja, girasol y maíz en orden decreciente de superficie sembrada.

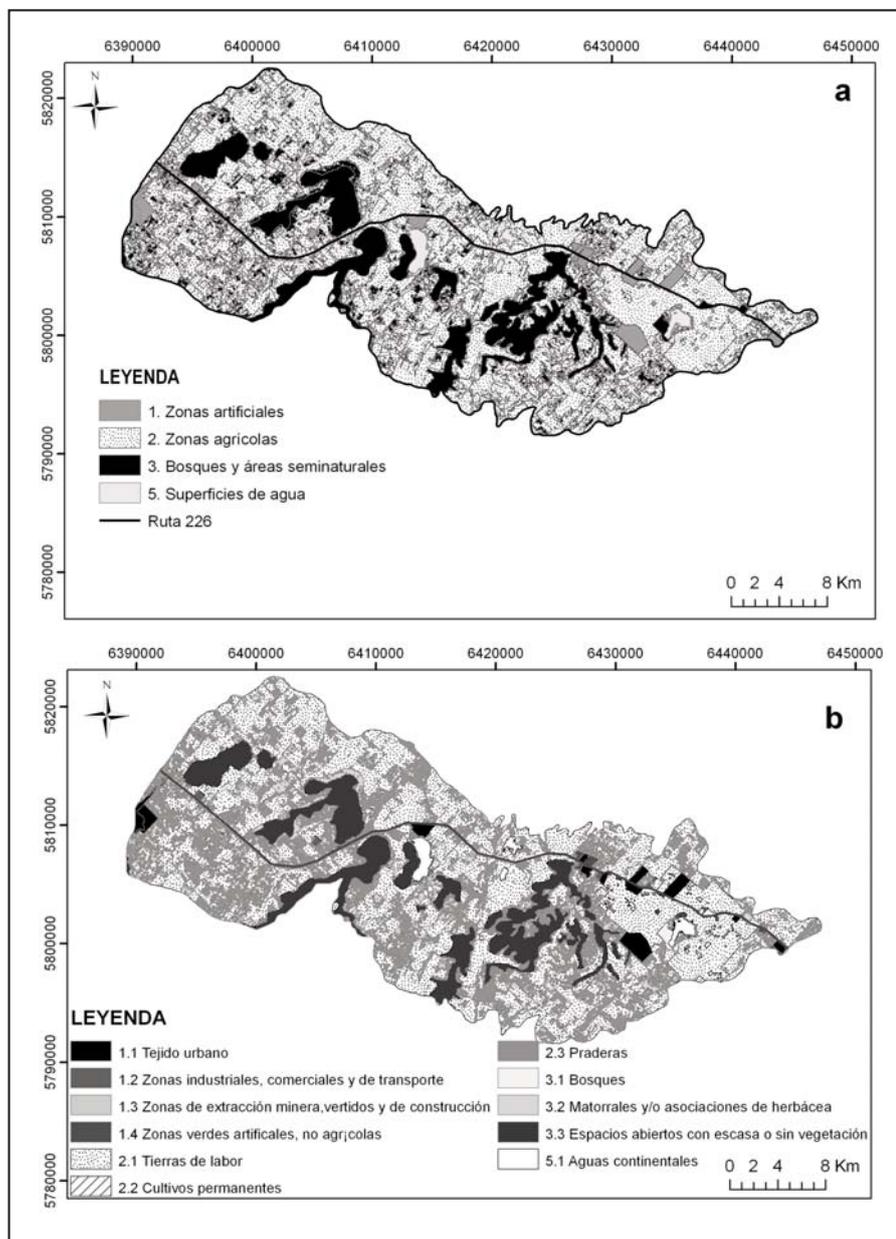


Figura 2. Identificación y localización espacial de actividades. a: Nivel 1; b: Nivel 2.

Clase 2.1.2. Terrenos Regados Permanentemente: Cultivos regados permanentemente o periódicamente, utilizando una infraestructura permanente (canales de riego, redes de drenaje). La mayoría de estos cultivos no pueden ser cultivados sin un aporte artificial de agua. No incluye tierras regadas esporádicamente. En esta clase se incluyó toda la zona hortícola de Laguna de Los Padres.

Clase 2.2.2. Frutales y Plantaciones de Bayas: Parcelas plantadas con frutales o arbustos: especies únicas o mezcladas de frutales, frutales asociados con áreas permanentemente cubiertas de hierba. Se incluyen en esta clase las 3 más grandes plantaciones de kiwi de la zona.

Clase 2.3.1. Prados y Praderas: Cobertura herbácea densa, de composición floral, dominada por gramíneas, no bajo un sistema de rotación. Utilizados principalmente para pasto pero pudiendo haber recogida mecánica para forraje. Se han incluido pasturas implantadas como raygrass, trébol blanco, cebadilla y pastosillo.

Tabla 3. Asignación preliminar de potencial de carga contaminante en base a POSH (Foster et al. 2002).

NIVEL 3	P CC
1.1.1. tejido urbano continuo	REDUCIDO
1.1.2. tejido urbano discontinuo	ELEVADO
1.2.1. zonas industriales y comerciales	MODERADO
1.3.1. zonas de extracción minera	ELEVADO
1.4.2. instalaciones deportivas y recreativas	REDUCIDO
2.1.1. tierras de labor en secano	MODERADO
2.1.2. terrenos regados permanentemente	ELEVADO
2.2.2. frutales y plantaciones de bayas	MODERADO
2.3.1. prados y praderas	REDUCIDO
3.1.1. bosques de frondosas	REDUCIDO
3.2.1. pastizales naturales	REDUCIDO
3.3.2. roquedo	REDUCIDO

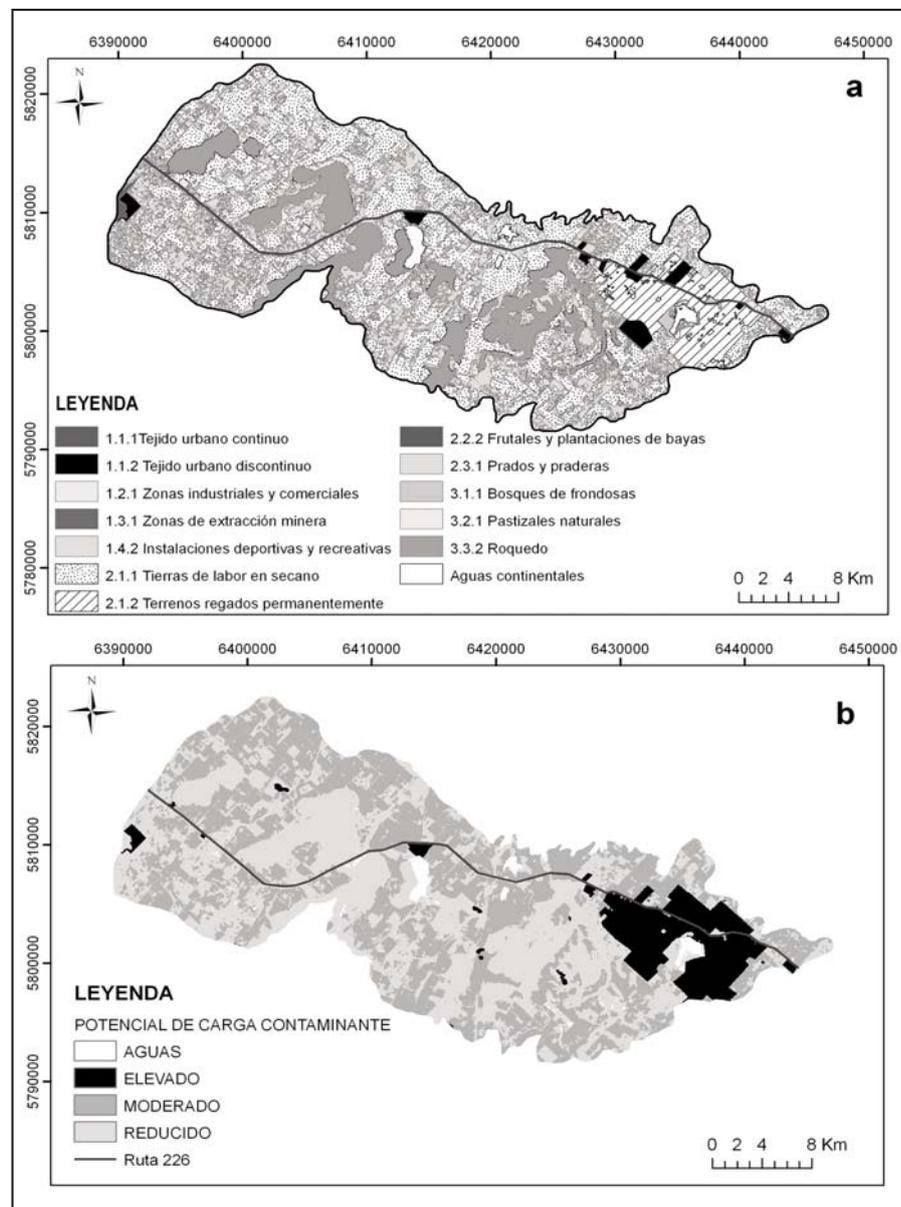


Figura 3. Identificación y localización espacial de actividades. a:Nivel 3; b: Potencial de Carga Contaminante al subsuelo.

Tabla 4. Superficies ocupadas por cada clase de potencial de carga contaminante

POTENCIAL DE CARGA CONTAMINANTE	Km ²
ELEVADO	75,8
MODERADO	362,9
REDUCIDO	391,1

Clase 3.1.1. Bosques de Frondosas: Formaciones vegetales compuestas principalmente por árboles, incluyendo monte bajo de arbustos, donde predominan las especies de frondosas. Esta clase incluye zonas con una cubierta vegetal mayor del 30%. Se asignaron a esta clase los montes de pino y eucaliptos, como también la Reserva Forestal de Laguna de Los Padres.

Clase 3.2.1. Pastizales Naturales: Los pastizales naturales son zonas con vegetación herbácea (la altura máxima son 150 cm y prevalecen las especies de gramíneas) que cubre al menos el 75% de la superficie cubierta por vegetación que se desarrolla bajo una interferencia humana mínima (no se siega, fertiliza o estimula con productos químicos que puedan influir en la producción de biomasa). Se incluyeron en esta clase las áreas-relicto de pastizal pampeano (conformado principalmente por espartillar, junco, cortaderal y vegetación psamófito, en orden de superficie ocupada).

Clase 3.3.2. Roquedo: incluye zonas con escasa vegetación donde un 75% de la superficie está ocupada por rocas. Bajo esta categoría se incluyeron todos los afloramientos serranos, admitiendo la particularidad que tanto en la cumbre como en el pie de monte el porcentaje de roca visible es menor al indicado.

Clase 5.1. Aguas Continentales. Lagos, estanques y charcas naturales que contienen agua dulce y aguas corrientes de todos los ríos y arroyos. Se incluyen las lagunas de Los Padres, La Invernada, El Encanto y La Brava.

El ejercicio de asignación de potencial de carga contaminante se realizó sobre la clasificación de Nivel 3 (Figura 3b). A modo de ensayo preliminar se utilizó el criterio establecido por la metodología POSH (Pollutant Origin - Surcharge Hydraulically) tomado de *Foster et al. (2002)*. Se reconocieron

3 categorías (reducido, moderado y alto) que implican solo una comparación relativa (Tablas 3 y 4). Potencial de carga contaminante (PPC) Elevado fue asociado a uso de agroquímicos en áreas regadas (herbicidas-fertilizantes) y a áreas urbanas sin red cloacal (nitratos, contaminación bacteriológica), es la categoría que menos superficie abarca. PCC Moderado, lo fue a áreas urbanas con red cloacal y sin presencia de industrias (solo podrían verificarse situaciones de contaminación de tipo puntual, a partir de presencia esporádica de pozos ciegos o disposición incorrecta de residuos sólidos domiciliarios) y a áreas rurales que tienen uso de agroquímicos pero en condiciones de secano. El PCC reducido fue adjudicado a situaciones donde la intervención humana es mínima o bien se realiza en condiciones seguras que evitan la descarga al subsuelo de potenciales contaminantes, y la posibilidad de contaminación es esporádica y muy puntual.

CONCLUSIONES

La metodología Corine Land Cover ha demostrado ser una interesante herramienta de aplicación en la identificación y localización espacial de actividades potencialmente contaminantes del agua subterránea. Su posibilidad de empleo a distintas escalas de detalle permite adoptarla para estudios con objetivos y escalas muy diferentes. En el corredor Mar del Plata-Balcarce las tierras de labor en secano y los prados y praderas ocupan alrededor del 50% del área; de manera concordante un porcentaje similar es ocupado por áreas con peligrosidad de contaminación del acuífero moderada o reducida. A partir de lo realizado en este trabajo puede indicarse que Corine resulta una eficaz manera de identificar usos del territorio de manera estructurada, sin dejar de mencionar que resultados más acordes a la realidad podrán obtenerse modificando parcialmente algunas de las pautas originales de clasificación, en especial las referidas a densidad de población en tejido urbano, a las que involucran a los afloramientos serranos y a las que representan los cursos de agua superficial.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue llevado a cabo como parte de un proyecto de investigación financiado por la UNMdP.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

CLC, 2000

Descripción de la nomenclatura del Corine Land Cover al nivel 5°. Área de Teledetección. *Subdirección Gral. de Geomática y Teledetección. Instituto Geográfico Nacional Madrid.*

ESRI. 2006

Environment System Research Institute.
Home page: <http://www.esri.com>.

FOSTER, S. E HIRATA, R. 1988.

Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. *Who-Paho/Hpe-Cepis Technical manual, Lima, Peru. 81pp*

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M. Y PARIS, M. 2002

Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies. *World Bank, GWMATE. Washington, 101p.*

MASSONE, H. Y M. SAGUA 2005.

La integración de la Vulnerabilidad Social en la Evaluación del Riesgo de Contaminación de Acuíferos. *IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano Latinoamericano sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea. Actas, 201-210. Rio Cuarto, Cordoba. ISBN 950-665-347-X*

MASSONE, H. Y D. MARTINEZ, 2008.

Consideraciones metodológicas acerca del proceso de gestión del impacto y riesgo de contaminación de acuíferos.
Publicación especial, Revista Ingenierías, Universidad de Medellín, Vol. 7 Núm. 12, 9-22. ISSN 1692-3324 Colombia.

SAGUA, M. Y H. MASSONE, 2007.

Corredor Mar del Plata - Balcarce. Caracterización preliminar del estado y tendencias ambientales de un territorio de expansión urbano-regional en el sureste bonaerense.

I Taller Sobre Dimensiones Humanas del Cambio Climático en la Argentina. 8-10 de Agosto de 2007, Universidad Nacional de Lujan. Zaporozec, A. 2004. Groundwater contamination inventory. A methodological guide. IHP-VI, UNESCO.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. (WHO). 1982.

Rapid assessment of sources of air, water, and land pollution.

WHO Offset Publication 62:113 p.

ZAPOROZEC, A., 2004.

Contaminant source inventory.

En: Zaporozec, A. (Ed.) Groundwater contamination inventory. A methodological guideline. UNESCO. Paris. 237p, 2001.



Límites y potencialidades de las reservas de agua dulce en el humedal de la Bahía de Samborombón, Argentina

Tejada, Macarena¹ - Carol, Eleonora² - Kruse, Eduardo³ ✉

Recibido: 18 de abril de 2011 • Aceptado: 19 de setiembre de 2011

Resumen

Los humedales son zonas frágiles y dinámicas expuestas a la influencia de factores naturales y humanos. El humedal de la Bahía de Samborombón se desarrolla en el límite oriental de la Región Deprimida del Salado (Provincia de Buenos Aires). El sector central y norte constituye un ambiente hidrogeológico particular donde la única fuente de agua dulce se aloja en cordones conchiles formando lentes. Desde principios del siglo XX, estos cordones han sido explotados eliminándose con ellos importantes reservorios de agua dulce. El objetivo del trabajo es evaluar los volúmenes de agua subterránea dulce eliminados como consecuencia de la actividad minera con el fin de conocer los límites y potencialidades de las reservas de agua dulce en el área. Se realizó una estimación del volumen de conchilla extraída y de la disminución del volumen de agua dulce como consecuencia de la explotación minera, a partir de relevamientos de campo, mediciones hidrogeológicas y el análisis de cartas topográficas e imágenes satelitales. Los resultados obtenidos evidencian que la eliminación de las reservas de agua dulce por la extracción de conchilla afecta la sustentabilidad hídrica del área.

Palabras clave: *gestión integrada costera, cordones conchiles, agua subterránea.*

Abstract

Wetlands are fragile and dynamic areas exposed to both human and natural influence. Samborombón Bay wetland is located on the eastern edge of El Salado lowland (Buenos Aires province). The central and northern area of the wetland is a particular hydrogeological environment where the only freshwater source is located on the shell ridges. Shell ridges have been exploited since the early twentieth century causing the exhaustion of important freshwater reserves. The aim of this work is to evaluate the reduction of fresh groundwater volume as a result of mining activity, in order to know the limits and potential of freshwater reserves in the area. To achieve this goal an estimation of the volume of shells ridges extracted due to mining activity has been carried out. Results show that fresh water reserves depletion by the extraction of shells affects hydric sustainability of the area.

Keywords: *integration coastal zone, shell ridges, groundwater.*

1 Universidad Pablo de Olavide de Sevilla, Crta. de Utrera, km.1, 41013 Sevilla, España.

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Cátedra de Hidrología General, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP. Calle 64 n°3 La Plata (1900), Argentina.

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Cátedra de Hidrología General, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP. Calle 64 n°3 La Plata (1900), Argentina.

✉ kruse@fcnym.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La sustentabilidad como concepto, pretende reconocer los límites y las potencialidades de la naturaleza e implica una relación directa entre el hombre y su actividad. Un equilibrio entre el uso y la capacidad de carga del medio, de manera que se evite la destrucción de la diversidad (Gil Pérez et al. 2006)

Las potencialidades de los humedales son conocidas por brindar numerosos beneficios a la sociedad a través de sus recursos y funciones (regulación de inundaciones, estabilización de microclimas, etc.) Asimismo son zonas frágiles y dinámicas expuestas a la influencia de factores naturales y humanos, razón por la cual deben ser protegidas y tratadas con planes de manejo adecuados. La conservación, restauración y manejo de humedales exigen conocer las relaciones funcionales entre sus componentes. Los sistemas de información geográfica (SIG) resultan ser una herramienta de importancia utilizada en la gestión integrada de humedales y zonas costeras (Vellinga et al. 1993, Rodríguez et al. 2009).

En la Provincia de Buenos Aires (Argentina), la mayoría de los humedales se encuentran en manos privadas y son explotados por sus propietarios de acuerdo a sus intereses económicos, generalmente, sin respetar criterios de conservación. Por esta razón resulta fundamental lograr un acuerdo entre los actores sociales del humedal, a fin de mantener la productividad y diversidad biológica y hacer posible el aprovechamiento de sus recursos; es decir establecer unos límites de uso que permitan el equilibrio.

El humedal de la Bahía de Samborombón es el más extenso de Argentina y fue designado sitio RAMSAR en 1997 por ser un área de alimentación, reposo y reproducción de aves migratorias y ser una reserva de especies en peligro de extinción (Canevari et al. 1998). Es un humedal mixohalino intermareal donde la única fuente de agua dulce se aloja en cordones conchiles que forman lentes sobre el acuífero salino de la planicie costera (Sala et al. 1978). Desde principios del siglo XX, estos cordones han sido explotados para la extracción del material carbonático y áridos, eliminándose con ellos importantes reservorios de agua dulce.

El objetivo del trabajo es evaluar los volúmenes de agua subterránea dulce eliminados como consecuencia de la actividad minera con el fin de conocer los límites y potencialidades de las reservas de agua dulce en el área.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio incluye el sector central y norte del humedal de la Bahía de Samborombón, ubicado en el límite oriental de la Región Deprimida del Salado (Provincia de Buenos Aires) (Figura 1).

Comprende una extensa planicie costera a la que se asocian cordones de conchilla, ambos depositados durante el Holoceno como consecuencia de los sucesivos desplazamientos de la línea de costa debidos a las oscilaciones del nivel del mar (Violante et al. 2001). La planicie costera es un área topográficamente baja con cotas inferiores a 5 m snm y de escasa pendiente topográfica con valores cercanos a 10^{-4} %. Es una zona mal drenada con numerosos bañados y cañadas compuesta por sedimentos limosos a arcillosos en los que intercalan arenas con restos de conchilla. Constituye una unidad hidrogeológica de baja permeabilidad que aloja un acuífero freático somero. El flujo subterráneo regional es hacia la bahía pudiendo descargar localmente en lagunas y cursos superficiales. El agua en este am-

biente es clorurada sódica salina con valores de STD entre 1662 y 5565 mg/L (Carol et al. 2009).

Los cordones de conchilla se desarrollan paralelos a la línea de costa desde la mitad de la bahía hacia el N. Son geofomas de relieve positivas con cotas que varían entre (6 y 12 m snm). Están compuestos por restos sueltos de conchillas marinas que alternan en sectores con capas de arenas y arcillas. Hidrogeológicamente es una unidad de mediana a alta permeabilidad que forma lentes de agua dulce sobre el acuífero salino de la planicie costera. El agua en esta unidad es bicarbonatada sódica con contenidos salinos inferiores a 1000 mg/L (Carol et al. 2009). Su importancia a nivel regional y local reside en que es la única fuente de agua dulce para abastecimiento de pobladores y sustento de especies dentro del humedal.

Los principales cursos superficiales que desembocan en esta zona de la bahía son el Río Samborombón y el Salado. La baja pendiente del área dificulta el drenaje natural de los cursos hacia la bahía los cuales se caracterizan por presentar numerosos meandros en el tramo final. Con el fin de facilitar este drenaje es que existen numerosos canales, siendo los más relevantes el Canal del Río Salado y el Canal 15 (Figura 1).

METODOLOGÍA

Se realizaron relevamientos de campo y análisis de cartas topográficas e imágenes satelitales para delimitar el área de canteras y estimar el volumen de conchilla y reservas de agua extraídos por la actividad minera.

Las cartas topográficas escala 1:50.000 confeccionadas entre los años 1954 y 1965 se utilizaron para conocer la morfología y cota de los cordones conchiles antes de ser explotados. La ubicación y delimitación del área de explotación de las canteras se realizó mediante la interpretación de imágenes satelitales del año 2003 y relevamientos de campo. Las imágenes fueron geo-referenciadas y digitalizadas, para computar la superficie aproximada de explotación minera.

Para estimar las reservas de agua dulce eliminadas se definió la posición media del nivel freático en el centro y en los bordes de la lente, de acuerdo a las mediciones realizadas en la zona de estudio. A partir de estos datos y los valores de ancho y longitud del cordón de conchilla obtenidos de la carta topográfica y la interpretación de imágenes se calculó el volumen de la lente de agua dulce a partir de la ecuación (1)

$$Vol = \frac{h^2}{(1-\sin\theta)^2} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) - \frac{\sin(2\theta)}{2} \right] \cdot l \quad (1)$$

Donde la sección transversal de la lente es modelada como parte de una sección circular, h es la altura del nivel freático desde la base de la lente a la cresta, l es la longitud del cordón de conchilla y θ es el ángulo formado por un radio que une el centro de la circunferencia que contiene a la lente con el semi ancho del cordón (s) (ecuaciones 2 y 3).

$$\theta = ar \cos \left(\frac{s}{r} \right) \quad (2)$$

$$r = \frac{h^2 + (s)^2}{2h} \quad (3)$$

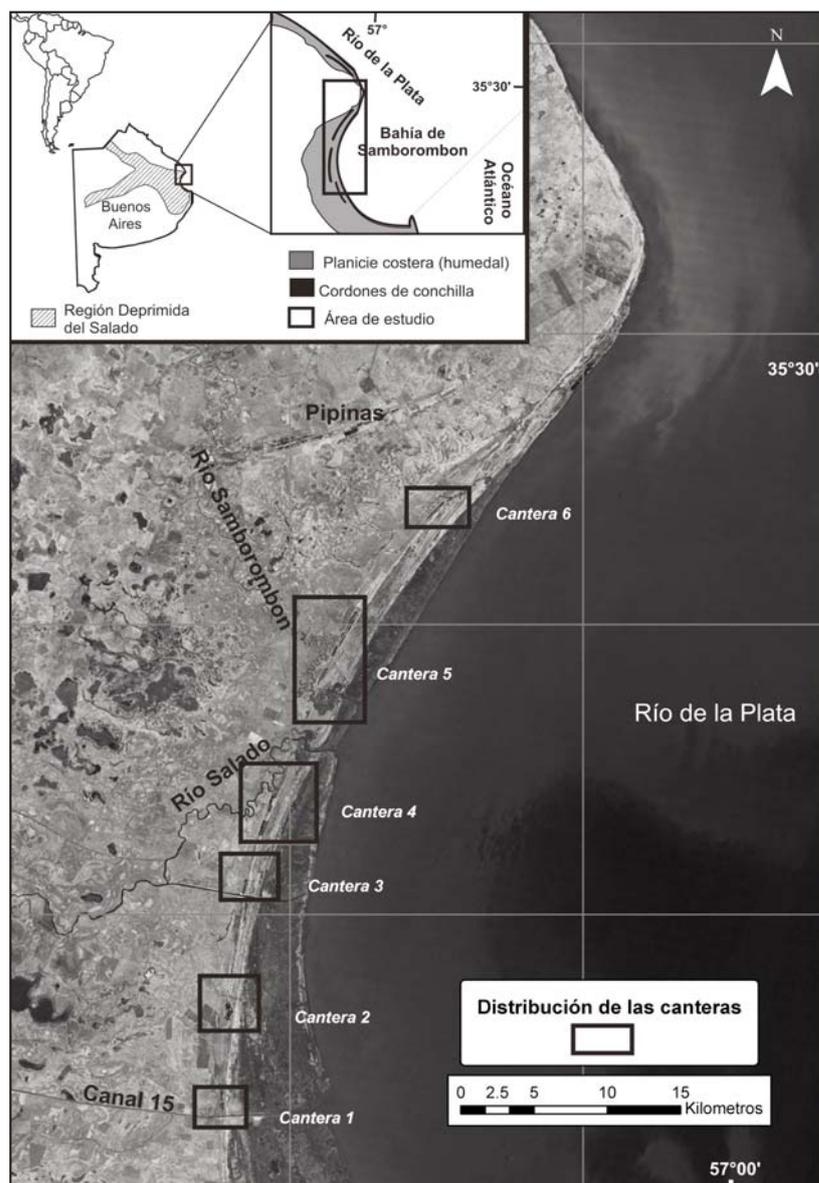


Figura 1. Localización del área de estudio.

A partir de la porosidad efectiva definida para los cordones conchiles del área de un valor de 0,3 (Sala et al. 1978) se estimó el volumen de agua dulce o reservas eliminadas.

RESULTADOS

El análisis de imágenes satelitales permitió reconocer seis sectores de explotación (Figura 1) los cuales fueron verificados en relevamientos de campo.

Definidos estos sectores, se analizaron las variaciones freáticas entre periodos secos y húmedos de cordones sin explotar para extrapolar un nivel freático medio en cada cordón explotado y así estimar el espesor saturado previo a la extracción. En función a la cota de los cordones se observó que el nivel freático medio en sectores próximos a la cresta de la lente se ubica generalmente a 1,7 m bbp (m bajo boca de pozo) en cordones cuya cota media varía entre 5,5 y 7,5 m snm, y a 1,4 m bbp en aquellos con cotas medias entre 4,0 y 5,5 m snm. Hacia los bor-

des, en la proximidad de la planicie costera, la profundidad del nivel disminuye encontrándose aflorando o a menos de 1 m bbp en la planicie.

En condiciones naturales el flujo subterráneo es desde los cordones conchiles (área de recarga) hacia la planicie costera (área de descarga) (Figura 2a). La extracción de material en las canteras por debajo del nivel freático produce la formación de pequeñas lagunas alimentadas por la descarga del agua subterránea de la planicie costera (Figura 2b). Cuando la explotación alcanza a cotas similares entre planicie costera y cordones, estos últimos dejan de ser zonas de recarga y pasan a ser zonas de transferencia del flujo subterráneo (Figura 2c). Ambas situaciones producen salinización del agua en la zona de la cantera por el ingreso de agua desde la planicie costera salina. Por otra parte, al formarse las lagunas el agua está expuesta a la evaporación directa, lo cual también favorece el aumento del contenido salino por concentración.

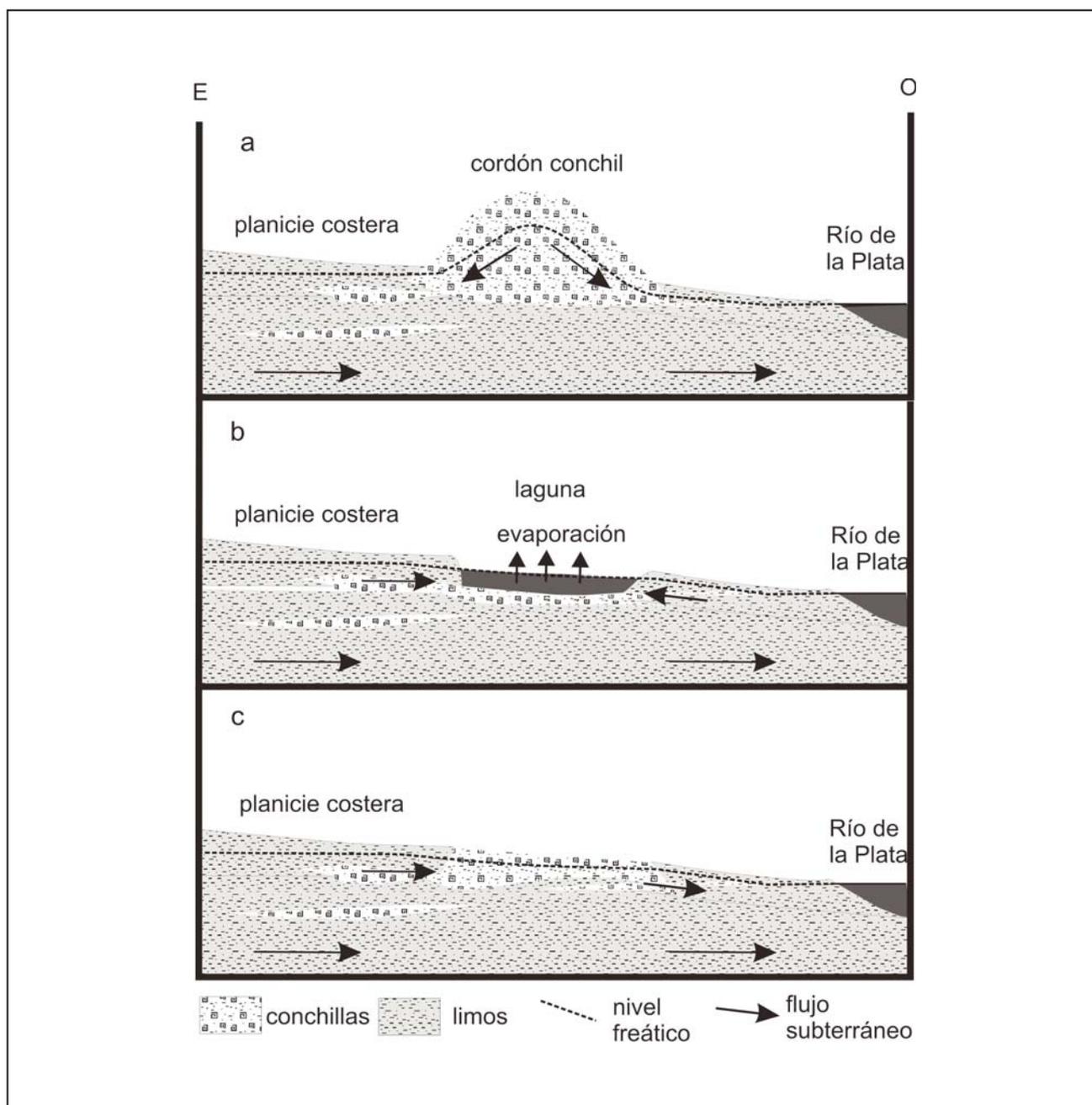


Figura 2. Esquemas de posición del nivel freático y flujo subterráneo en condiciones naturales y luego de la explotación.

El sector de explotación denominado cantera 1 se ubica al N del Canal 15 (Figura 1), sobre un cordón de conchilla cuyas cotas originales promediaban los 6,0 m snm, registrando localmente alturas máximas de 7,5 m snm. El área explotada es de 72000 m², la profundidad de extracción tiene una cota media de 3 m snm y el volumen de agua eliminado en esta cantera es de 25900 m³ (Tabla 1). Cabe destacar que la estimación realizada corresponde al año 2003, no obstante esta cantera continúa en funcionamiento extendiéndose el área de explotación hacia el N.

La cantera 2 abarca un sector de antigua extracción ubicado 7km al N de la cantera 1 sobre el mismo cordón de conchilla (Figura 1). En esta zona el cordón es más ancho y presentaba originalmente una altitud media de 6,5 m snm. Esta cantera

es explotada hasta una cota media de 4 m snm, su área es de 101400 m² y el volumen de agua subterránea eliminada se estima en 45600 m³ (Tabla 1).

La cantera 3 (Figura 1) se ubica al N del Canal del Río Salado abarcando dos cordones conchiles: un delgado cordón litoral con cotas medias originales de 4,6 m snm y un cordón adyacente de 6,5 m snm, el cual alcanzaba en un pequeño sector los 12 m snm. El área de cantera para ambas explotaciones es de 228700 m² con excavaciones que en algunos sectores se encuentran por debajo de 2 m snm. Esta profundidad de excavación ocasiona el afloramiento del nivel freático formándose en las cavas pequeñas lagunas. Los volúmenes de agua eliminados para este sector se estiman en 102900 m³ (Tabla 1).

Tabla 1. Superficie de las canteras y volúmenes estimados de agua subterránea eliminada.

Canteras	Superficie (m ²)	Volumen de agua eliminado (m ³)
1	72000	25900
2	101400	45600
3	228700	102900
4	529400	222400
5	525800	236600
6	104900	47200
Total	1562200	680600

La cantera 4 se ubica al S de la desembocadura del Río Salado (Figura 1). Se emplaza sobre los mismos cordones conchiles que la cantera 3 y presenta características hidrogeológicas y de explotación similares a esta. El área explotada abarca 529400 m² lo que representa un volumen de agua eliminado de 222400 m³ (Tabla 1).

La cantera 5 (Figura 1) agrupa un conjunto de explotaciones aledañas a la desembocadura del Río Samborombón. Abarcan principalmente un cordón conchil con cota media original de 6,5 m snm. La profundidad de la explotación, alcanza en sectores a 2,5 m snm, advirtiéndose en ellos el afloramiento de la capa freática. El área de explotación es de 525800 m² y el volumen de agua eliminado de 236600 m³ (Tabla 1). Esta área y volumen estimados es mayor en la actualidad debido a que la cantera continúa en explotación.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CAROL, E., KRUSE, E. Y VERA, F. 2009.
Caracterización hidrogeoquímica del sector central y norte del humedal de la Bahía de Samborombón. *VI Congreso Argentino de Hidrogeología*.
- CANEVARI, P., BLANCO, D. E., BUCHER, E., CASTRO, G. Y DAVIDSON, I (EDITORES). 1998.
Los Humedales de la Argentina. Clasificación, situación actual, conservación y legislación. *Wetlands International - Publicación N° 46, Buenos Aires, Argentina. 208p*
- CLARK, J.R. 1992.
Integrated management of coastal zone, FAO. *Fisheries Technical Paper, n° 327. 160 pp.*
- GIL PÉREZ, D; VILCHES, A; TOCANO GRIMALDI, J.C; MACÍAS ALVÁREZ, O. 2006.
Década de la educación para un futuro sostenible (2005-2014): un punto de inflexión necesario en la atención a la situación del planeta. *Revista Ibero americana de educación, 40: 125:178.*
- RODRÍGUEZ I., MONTOYA, I., SÁNCHEZ M.J., CARREÑO, F. 2009.
Geographic Information Systems applied to Integrated Coastal Zone Management. *Geomorphology 107: 100-105.*
- SALA, J., GONZÁLEZ, N. & HERNÁNDEZ, M. 1978.
Efectos de una barrera hidráulica natural en las aguas subterráneas del litoral de la Bahía de Samborombón. *Obra del Centenario del Museo de La Plata, Tomo IV. 153-166.*
- VELLINGA, P., KLEIN, R.J.T. 1993.
Climate change sea level rise and Integrated Coastal Zone Management: an IPCC approach. *Ocean and Coastal Management 21, 245-268.*
- VIOLANTE R, PARKER G, CAVALLOTTO J. 2001
Evolución de las llanuras costeras del este bonaerense entre la bahía de Samborombón y la laguna de Mar Chiquita durante el Holoceno. *Revista de la Asociación Geológica Argentina, 56 (1): 51 -66.*

La cantera 6 está ubicada al SE de la localidad de Pipinas (Figura 1), sobre un cordón de conchilla cuya cota original promediaba los 6,3 m snm. La explotación abarca 104900 m², con una cota de explotación cercana a 3 m snm, la cual se asocia a un volumen estimado de agua subterránea eliminada de 47200 m³ (Tabla 1). En esta cantera también puede apreciarse el afloramiento de la freática en varios sectores.

CONCLUSIONES

El desarrollo poblacional y económico de cualquier región presenta una fuerte dependencia de las fuentes de agua. En el caso estudiado, el agua almacenada en los cordones conchiles es la única posibilidad para el abastecimiento de agua dulce. La actividad minera extractiva de estos cordones conduce a la pérdida de parte del reservorio de agua.

La magnitud de las reservas de agua eliminadas, de acuerdo a la estimación realizada (0,68 hm³) resulta significativa para las condiciones ambientales de la región. Ello se puede apreciar si se tiene en cuenta que dicho valor, para un consumo de 200 L/habitante/día, sería suficiente para abastecer durante 1 año a una población de más de 9000 habitantes. Asimismo, debe considerarse que estos valores estimados pueden ser superiores en la actualidad, producto de que continúan habilitándose canteras de extracción y consecuentemente se producen pérdidas de agua dulce.

La explotación de los cordones conchiles debe realizarse en forma racional contemplando la sustentabilidad de las reservas de agua dulce y buscando un equilibrio entre el desarrollo socioeconómico y la preservación de los ambientes biológicos del humedal. Estas decisiones deben tomarse entre todas las partes interesadas, mediante el principio de responsabilidad compartida.



Evaluación del comportamiento hidrodinámico y cuantificación de la recarga en la cuenca del arroyo Languyú, partido de Tandil

Barranquero, Rosario ¹ - Varni, Marcelo ² - Ruiz de Galarreta, Alejandro ³ - Ocampo, Dora ⁴

Recibido: 19 de abril de 2011 • Aceptado: 28 de octubre de 2011

Resumen

El presente trabajo fue desarrollado en la cuenca del arroyo Languyú, que se ubica en el partido de Tandil, enmarcada por las sierras de Tandilia (provincia de Buenos Aires, Argentina), y posee una extensión aproximada de 600 km². El objetivo del mismo fue la estimación de la recarga, a través de la aplicación del balance de masas de cloruro y un balance de agua en el suelo a paso de tiempo diario para el período junio 2007 a junio 2008. Se consideró además importante evaluar las oscilaciones del nivel freático durante el período de un año y las relaciones que éstas presentan con la ocurrencia de precipitaciones, a fin de comprender en profundidad el funcionamiento hidrodinámico de la cuenca. Para ello se contó con datos de una red monitorea de 30 perforaciones de carácter estacional, en la cual se realizaron campañas hidrométricas cada tres meses, completando así un ciclo anual. La recarga, según el balance de cloruro, fue de entre 17 y 13 % de la precipitación total en el sector de serranía (cuenca alta) y disminuyó hacia el sector de llanura (cuenca baja). Los resultados del balance de agua en el suelo indicaron una misma distribución espacial de la recarga. Se concluyó que la recarga en la cuenca es regionalmente autóctona por precipitaciones, ubicándose mayormente en el sector de serranía aunque también es de magnitud importante en el sector de piedemonte.

Palabras clave: Cuenca del arroyo Languyú, hidrodinámica, balance de cloruros, balance de agua en el suelo.

Abstract

This paper was carried out in Languyú river basin which is located in the Tandil county, framed by the hilly range system of Tandilia (province of Buenos Aires, Argentina), and has 600 km² surface. The objective of the work was to estimate the recharge through the application of chloride mass balance and soil water balance on daily basis, for the period June 2007 to June 2008. It was also considered important to assess the groundwater levels fluctuations during one year and the relationships with the occurrence of rainfall. According with this, a monitoring network of thirty wells with seasonally measures was carried out. The recharge, according to the chloride mass balance was between 17 and 13 % of the total

1 CONICET (Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas). CINEA (Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales). UNICEN (Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires).

✉ rosariobarranquero@yahoo.com.ar

2 IHLLA (Instituto de Hidrología de Llanuras) "Dr. Eduardo J. Usunoff" [UNICEN-Comisión de Investigaciones Científicas (CIC)-Municipalidad de Azul].

3 CIC-CINEA-UNICEN.

4 CIC-IHLLA.

rainfall in the hilly range area (upper basin) and fell into the lowland sector (lower basin). The results of water balance in the soil indicated the same spatial distribution of recharge. It was concluded that recharge in the basin is regionally autochthonous by precipitation, mainly located in the hilly range area but it is also important in the piedmont sector.

Keywords: Langueyú river basin, hydrodynamic, chloride balance, soil water balance.

INTRODUCCIÓN

Se denomina recarga a la porción del agua que se ha infiltrado, que efectivamente desciende por gravedad hasta el nivel freático (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, 2009). Considerando que la recarga es un proceso complejo, su cuantificación es considerada generalmente como una estimación.

Teniendo en cuenta la escasez de antecedentes respecto a la cuantificación de la recarga en la cuenca de interés, se planteó como objetivo una primera aproximación a la estimación de la misma a través de la aplicación de un balance de cloruro y un balance de agua en el suelo a paso de tiempo diario.

Para completar el análisis hidrodinámico, se evaluó el comportamiento de los niveles freáticos en un ciclo anual y las relaciones que éste presenta con la ocurrencia de precipitaciones.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se limitó a la cuenca del arroyo Langueyú ubicada en el centro-Sudeste de la provincia de Buenos Aires, con cabeceras en el sistema serrano de Tandilia (Figura 1),

y que posee una extensión aproximada de 600 km², desde las nacientes en el faldeo N de las sierras de Tandil hasta el límite del partido de Tandil con el de Ayacucho.

Características físicas de la cuenca

La cuenca del arroyo Langueyú tiene la particularidad de presentar un escurrimiento superficial poco definido y disperso en la mayor parte de su área. Sólo en sus cabeceras, controladas por serranías, se identifica la concentración de aguas típica de la definición de cuenca. En tanto, en su área restante presenta dispersión y/o ausencia de definición del escurrimiento superficial. Esta dinámica superficial tiene correspondencia clara respecto al agua subterránea. Por ello, sólo en la zona serrana se puede establecer una delimitación precisa de la cuenca subterránea, en concordancia con las divisorias de agua determinadas por las sierras, las cuales están controladas por afloramientos rocosos. Aguas abajo, a medida que se pasa pasamos a la zona llana, los límites laterales no son tan claramente visibles de acuerdo al relieve y pueden variar por fenómenos naturales y acciones antrópicas. En principio, se han trazado en forma perpendicular a las curvas de nivel topográfico y han sido verificados luego

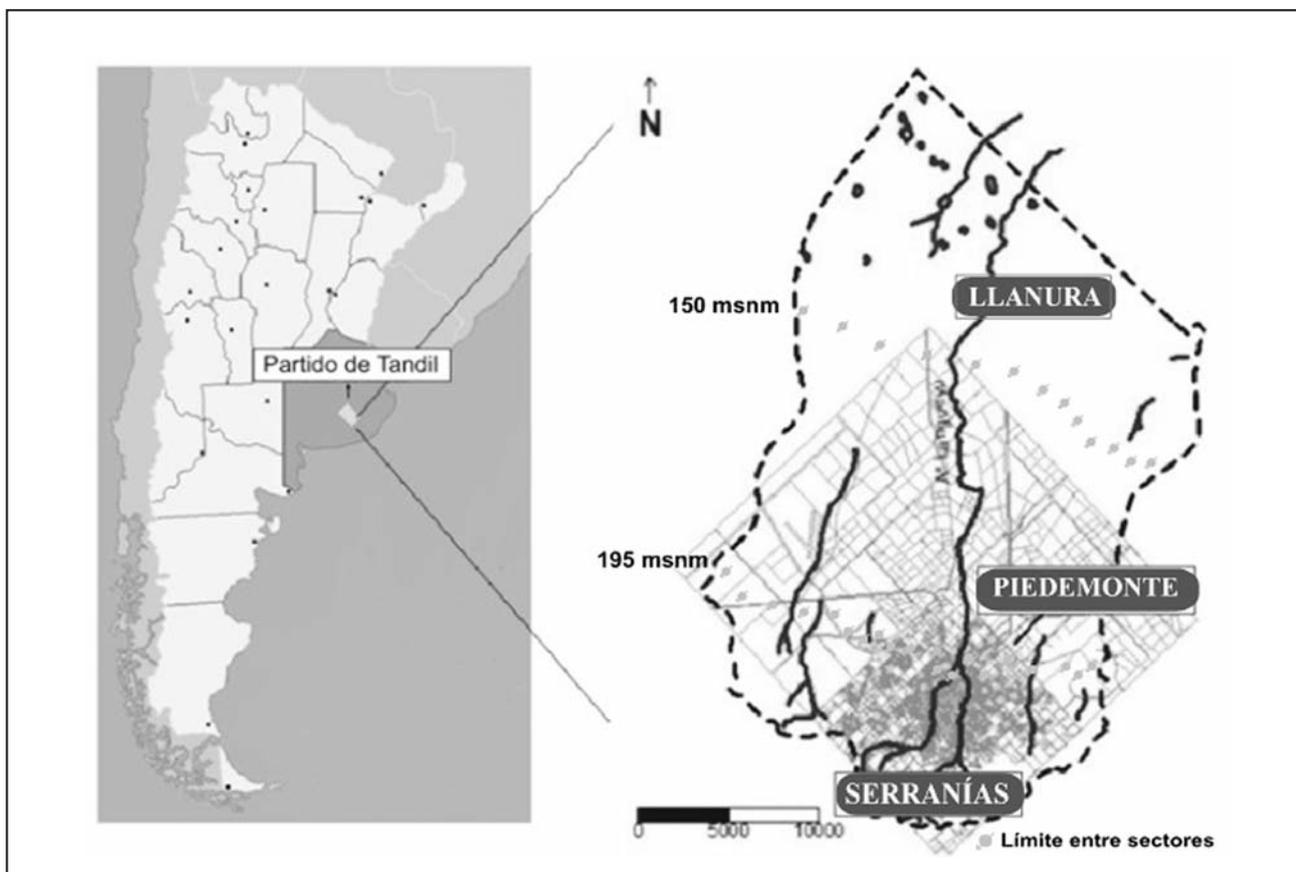


Figura 1. Ubicación de la cuenca del arroyo Langueyú y unidades morfológicas.

de obtener las equipotenciales de las aguas subterráneas. En tanto, en el borde N de la cuenca se estableció como demarcación arbitraria la divisoria política entre los partidos de Tandil y Ayacucho a fin de acotar el área de estudio, aunque el límite real se halla más al N, en la zona deprimida del río Salado, es decir que existe un flujo de agua (superficial y subterráneo) que egresa a través de este límite.

Esta cuenca presenta tres **unidades morfológicas** principales que por sus características particulares determinarían distintas dinámicas de recarga (ver Figura 1):

- Sector de serranías: caracterizado por la presencia de sierras, cerros aislados y valles. En este sector los valles de los cursos de agua están bien definidos (*Ruiz de Galarreta y Banda Noriega 2005*).
- Sector de Piedemonte: el mismo se localiza en continuidad con el primer sector, tiene pendientes más suaves que este último y ciertas depresiones aisladas que interrumpen la regularidad del relieve. Presenta una red de drenaje bien definida y con diseño distributivo (*Ruiz de Galarreta y Banda Noriega 2005*).
- Sector de llanura (*Fidalgo et al. 1975*): se caracteriza por la presencia de pendientes muy suaves. El drenaje poco definido y pobremente integrado muestra cauces estrechos, cursos temporarios y depresiones aisladas.

En el área de estudio se distinguen dos **unidades hidrogeológicas** que se comportan de manera diferente por su constitución, textura y estructura, en cuanto a la admisión y circulación del agua subterránea (*Ruiz de Galarreta y Banda Noriega 2005*). El Basamento Cristalino está compuesto por rocas primariamente acuífugas con distintos grados de fracturación que le confieren un carácter de acuífero pobre. Este material se corresponde con un ambiente fisurado que presenta porosidad y permeabilidad secundarias. El cuerpo cristalino, aflorante en las sierras, se profundiza hacia el N constituyendo la base del sistema acuífero poroso. En tanto, los Sedimentos Pampeanos y Postpampeanos, que integran la Cubierta Sedimentaria, constituyen un medio poroso en el que se ubica la batería de pozos de explotación utilizada para el abastecimiento de agua potable a la ciudad.

El sentido del flujo subterráneo regional es hacia el Noroeste. En tanto, la recarga del acuífero es regionalmente autóctona por precipitaciones, ubicándose las zonas preferenciales en el sector de serranías (*Ruiz de Galarreta et al. 2007*).

Si bien de acuerdo a la hidrodinámica regional las aguas subterráneas tienen naturalmente un carácter influente respecto al arroyo Langueyú y sus afluentes, existe una importante distorsión del flujo subterráneo, generada por la explotación del recurso, que ha producido la inversión de esta relación en las inmediaciones del predio de OST (Obras Sanitarias Tandil).

A partir de los datos de temperaturas y precipitaciones mensuales de 101 años correspondientes a la Estación Tandil del SMN (Servicio Meteorológico Nacional), *Ruiz de Galarreta (2006)*, considerando los balances climáticos de *Thornthwaite y Mather (1957)*, tipificó el clima de la ciudad como subhúmedo-húmedo, mesotermal, con un déficit de agua poco significativo y veranos frescos. Utilizando dichos balances para el período 1900-2000 (Tabla 1) se obtuvo un valor medio anual de precipitación (P) de 838 mm, la evapotranspiración real (ETR) y potencial (ETP) son de 694 y 712 mm, respectivamente, con un déficit poco significativo (18 mm) correspondientes a los meses de enero, febrero y marzo. Los excesos hídricos suman 144 mm y se distribuyen en los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre (*Ruiz de Galarreta et al. 2007*).

MATERIALES Y MÉTODOS

En el período de diciembre de 2006 a marzo de 2007, se relevó la existencia y accesibilidad de perforaciones particulares de extracción de agua subterránea, efectuando la medición del nivel de agua y la toma de muestras en los casos que esto fuera posible. Habiendo analizado la información recabada anteriormente se efectuó una selección de 30 perforaciones para llevar a cabo su monitoreo (Figura 2). Las campañas correspondientes a la red monitorea tuvieron carácter estacional, se realizaron en los meses de junio y octubre del año 2007 y febrero y junio del 2008, completando así un ciclo anual. En la Tabla 2 se muestra la totalidad de los datos de nivel estático (N.E.) obtenidos en las distintas campañas, la fecha de medición en cada pozo y el sector al que corresponde.

Tabla 1. Balance hídrico para el período 1900-2000 Tomado de Ruiz de Galarreta et al. 2007

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
P (mm)	86	78	99	68	67	49	41	44	61	83	83	79	838
ETP (mm)	124	95	83	51	29	17	18	22	33	55	78	107	712
P-ETP(mm)	-38	-17	16	17	38	32	23	22	28	28	5	-28	
P aa (mm)	-66	-83										-28	
Alm. (mm)	96	85	101	118	150	150	150	150	150	150	150	124	
Dif. Alm.	-28	-11										-26	
Déficit (mm)	10	6										2	18
Excesos (mm)	-	-	-	-	6	32	23	22	28	28	5	-	144
ETR (mm)	114	89	83	51	29	17	18	22	33	55	78	105	694

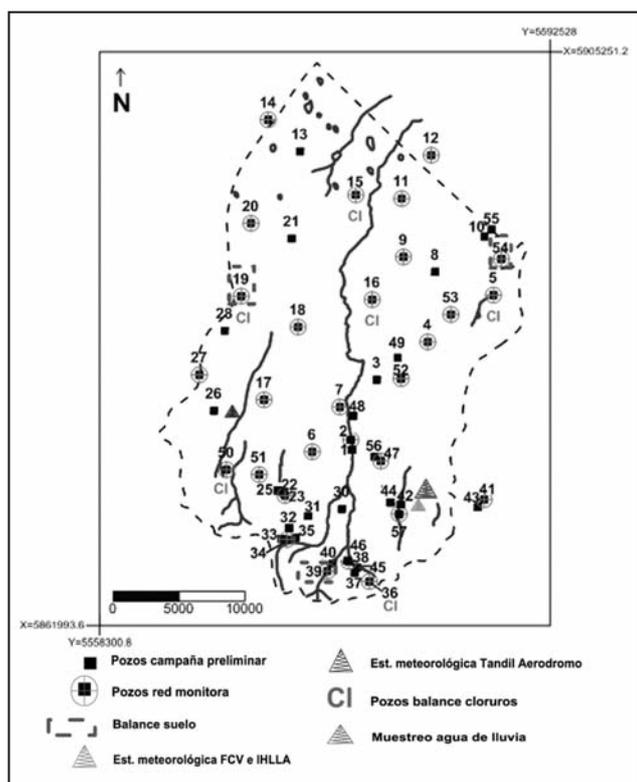


Figura 2. Perforaciones y sitios de muestreo de agua de lluvia y subterránea.

Para considerar la fluctuación de los niveles medidos en relación a las precipitaciones, se evaluó en primera instancia la ocurrencia de éstas respecto al balance hidrológico modular en el período 1900-2000 (Ruiz de Galarreta 2006). Los datos recabados en las distintas campañas fueron sistematizados y procesados, obteniendo los estadísticos para el conjunto de perforaciones de cada campaña y los gráficos de evolución del nivel freático en cada perforación. Se evaluó además esta evolución en función de las precipitaciones representando las sumatorias mensuales junto a los niveles estáticos obtenidos en cada pozo.

Respecto a la estimación de la recarga, tanto el balance de cloruro como el balance de agua en el suelo, se aplicaron para el período junio 2007 a junio 2008, considerando perforaciones representativas de cada uno de los ambientes geomorfológicos presentes en la cuenca (serranía, piedemonte y llanura) de la red de monitoreo de carácter estacional (Figura 2).

Balance de cloruro

El balance de cloruro se basa en el aumento de la concentración del ión cloruro como resultado de la evapotranspiración, en el camino que recorre el agua desde el nivel del terreno al nivel freático. Dado que el cloruro es un ión conservativo, por su elevada solubilidad y estabilidad, puede decirse que es un trazador natural del movimiento del agua. Considerando que el terreno sólo puede aportar este elemento en una ínfima proporción en condiciones naturales en la zona no saturada, en condiciones de permanencia (steady state) el principio de conservación de la masa establece que la masa de cloruro aportada por la lluvia es la misma que la zona no saturada aporta al acuífero freático con la recarga a largo plazo. Puede considerarse que el contenido de cloruros de una muestra de agua extraída

de la porción superior del acuífero es representativa de la concentración de cloruros de la recarga.

La ecuación utilizada convencionalmente considera que la muestra de agua obtenida de la precipitación incorpora la masa de cloruros de la deposición seca, y se expresa con la siguiente fórmula (Custodio 1997):

$$P * Cl'_p = R * Cl_r \quad (1)$$

siendo: P= precipitación; R= recarga; Cl_r= concentración de cloruros de la recarga; Cl'_p= concentración de cloruros de la lluvia más deposición seca.

Para el sector de serranías se considera adecuado incorporar al balance de cloruros el escurrimiento superficial, por lo cual se modifica la ecuación (1) obteniendo la ecuación (2):

$$(k * P) * Cl'_p = R * Cl_r \quad (2)$$

siendo: k= un coeficiente que equivale 100% (correspondiente a la P) menos el porcentaje correspondiente al escurrimiento superficial. Se considera que el escurrimiento superficial posee la misma concentración de cloruros que el agua de lluvia.

El valor de precipitación utilizado para el cálculo correspondió a la precipitación mensual para el período junio 2007-junio 2008, calculada a partir de datos del SMN (Estación 876450 SAZT "Tandil Aerodromo". Latitud: -37.23; Longitud: -59.25; Altitud: 175) (Figura 2). Se decidió adoptar un valor k de 0.96, teniendo en cuenta el valor de escurrimiento superficial medio de 4 % de la precipitación obtenido por Sala et al. (1987) y Kruse (1992) en la cuenca del arroyo Azul. Es importante destacar que dicha cuenca tiene sus nacientes en el sistema de Tandilia, al igual que la cuenca en estudio, y presenta características geomorfológicas e hidrodinámicas similares a ella. También se cuenta con el antecedente de Marchetti (1968) que estimó un escurrimiento de entre 3 y 7 % de la precipitación para un sector interserrano del Sur de la provincia de Buenos Aires.

La concentración de cloruros de la recarga se obtuvo realizando el promedio de los valores de concentración de cloruros determinados en cuatro campañas de la red monitora. Para este cálculo se consideraron 2 perforaciones representativas de cada ambiente geomorfológico (ver Figuras 1 y 2).

El valor de concentración de cloruro en el agua de lluvia correspondió a la recolección de la precipitación y el posterior análisis, llevado a cabo durante 3 años en un sitio de muestreo ubicado en el sector Sudeste de la cuenca (Ruiz de Galarreta y Varni 2010) (Figura 2).

Balance de agua en el suelo

El balance de agua en el suelo estima la disponibilidad de agua en el mismo, considerando que depende de la precipitación, del escurrimiento superficial, de la evapotranspiración y del drenaje profundo o percolación, sin flujo subsuperficial lateral en el caso de la llanura (Varni 2005).

Para efectuar el balance para el período junio 2007 a junio 2008 se seleccionaron tres perforaciones de la red de monitoreo que tuvieran distintas características edáficas y

Tabla 2. Niveles estáticos calculados a partir de las campañas que conforman el ciclo anual.

POZO	FECHA	N.E.	FECHA	N.E.	FECHA	N.E.	FECHA	N.E.	SECTOR
2	19/06/07	159,8	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	Piedemonte
4	17/06/07	141,4	16/10/07	143,5	11/02/08	141,7	02/06/08	141,8	Piedemonte
5	18/06/07	130,0	16/10/07	131,3	11/02/08	130,0	02/06/08	130,4	Llanura
6	17/06/07	171,9	16/10/07	171,4	11/02/08	170,5	02/06/08	171,1	Piedemonte
7	17/06/07	158,6	17/10/07	159,6	12/02/08	158,0	02/06/08	158,4	Piedemonte
9	17/06/07	132,1	16/10/07	133,2	11/02/08	132,2	02/06/08	132,7	Piedemonte
11	s/d	s/d	16/10/07	124,5	11/02/08	123,5	02/06/08	124,1	Llanura
12	17/06/07	118,9	16/10/07	120,0	11/02/08	118,6	02/06/08	119,1	Llanura
14	17/06/07	124,0	16/10/07	125,5	11/02/08	124,4	02/06/08	124,7	Llanura
15	18/06/07	126,6	16/10/07	127,9	11/02/08	126,8	02/06/08	127,0	Llanura
16	17/06/07	139,9	17/10/07	140,9	11/02/08	140,6	s/d	s/d	Piedemonte
17	17/06/07	160,1	17/10/07	162,0	12/02/08	159,1	03/06/08	160,1	Piedemonte
18	18/06/07	148,4	16/10/07	149,8	11/02/08	148,5	02/06/08	148,3	Piedemonte
19	18/06/07	144,3	16/10/07	145,7	11/02/08	144,9	02/06/08	145,0	Piedemonte
20	18/06/07	135,0	16/10/07	136,0	11/02/08	134,8	02/06/08	135,0	Llanura
23	17/06/07	190,6	17/10/07	190,5	12/02/08	189,9	03/06/08	189,3	Serranías
27	17/06/07	176,7	17/10/07	177,4	11/02/08	175,5	03/06/08	175,6	Piedemonte
34	17/06/07	236,3	17/10/07	237,3	12/02/08	236,1	s/d	s/d	Serranías
36	17/06/07	214,6	17/10/06	212,8	12/02/08	212,6	03/06/08	212,9	Serranías
38	17/06/07	204,9	18/10/07	205,4	12/02/08	204,5	03/06/08	204,9	Serranías
39	17/06/07	225,9	17/10/07	226,7	12/02/08	225,8	03/06/08	226,4	Serranías
41	17/06/07	147,6	17/10/07	147,6	12/02/08	147,2	03/06/08	147,1	Serranías
47	17/06/07	155,4	17/10/07	156,0	12/02/08	155,6	03/06/08	155,3	Piedemonte
50	17/06/07	194,1	17/10/07	194,2	12/02/08	194,0	03/06/08	193,9	Serranías
51	17/06/07	192,2	17/10/07	192,4	12/02/08	192,5	03/06/08	193,3	Serranías
52	17/06/07	152,1	16/10/07	153,6	11/02/08	151,8	02/06/08	152,0	Piedemonte
53	17/06/07	136,1	16/10/07	137,7	11/02/08	136,2	02/06/08	136,4	Llanura
54	18/06/07	124,3	16/10/07	125,5	11/02/08	124,7	02/06/08	125,1	Llanura
57	18/06/07	176,0	17/10/07	176,5	12/02/08	175,0	04/06/08	175,7	Serranías

geomorfológicas y que no mostraran una afectación antrópica en su hidrodinámica. Esta selección se basó en la posibilidad de tener datos de precipitación del propio lugar seleccionado. Las perforaciones seleccionadas fueron la 39 ubicada en la parte alta de la cuenca, la 19 correspondiente al sector medio y la 54 ubicada al Noreste del área de estudio, es decir en el sector de llanura (ver Figuras 1 y 2).

Para el área de influencia de cada una de estas perforaciones se realizó un balance de agua en el suelo a paso diario. Para ello se utilizó una planilla de cálculo donde los datos de entrada son la P y la ETP diarias y los niveles freáticos de las fechas en las que se han medido. A partir de la ETP se calcula la ETR teniendo en cuenta la reserva útil almacenada en el suelo con anterioridad al momento de cálculo y la infiltración. Por

otra parte, el balance se ajusta tratando de reproducir los niveles freáticos, para lo cual se cuenta con dos módulos: uno de recarga y otro de descarga del acuífero. Los parámetros de calibración son: la capacidad de almacenamiento del suelo (Alm), el número de curva (CN), el nivel de descarga de las aguas subterráneas regional (Nbase 1) y local (Nbase 2) con sus correspondientes coeficientes de agotamiento (Alfa 1 y Alfa 2), y finalmente el almacenamiento específico en la zona de variaciones del nivel freático (Pe). Estos parámetros fueron definidos de acuerdo a las características de cada una de las áreas en las que se hallan las perforaciones 39, 19 y 54 y con el objeto de reproducir lo más fielmente posible las fluctuaciones de nivel registradas en los pozos. Dichos parámetros se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de calibración del balance de agua en el suelo.

POZO	SECTOR	Alm (mm)	CN	Nbase 1 (m snm)	Nbase 2 (m snm)	Alfa 1	Alfa 2	Pe
39	Serranías	55	50	80	224,7	0,00003	0,004	0,05
19	Piedemonte	81	55	70	143	0,000012	0,0039	0,06
54	Llanura	60	79	60	124,3	0,00005	0,009	0,05

La planilla de cálculo utilizada está diseñada de forma tal de efectuar el balance de agua en el suelo de acuerdo a los siguientes pasos:

1. El día que llueve el agua escurre superficialmente según lo que indica el CN. Como se señaló antes, se adopta un CN para las condiciones medias de suelo y cultivo, el cual puede modificarse dentro de límites razonables en función de condiciones puntuales; es por esto que se consigna como parámetro de calibración. Sin embargo el CN no es constante, sino que varía, siguiendo la metodología del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (*USDA SCS 1985*), según la lluvia de los cinco días previos. Por lo tanto lo que no escurre infiltra, y esta agua es la que se incorpora al almacenamiento del suelo.

2. Si el agua infiltrada más la que estaba almacenada en el suelo supera su capacidad de almacenamiento, se produce un exceso que se cuantifica como recarga en milímetros. Es entonces que se produce el ascenso del nivel freático, que está dado por la recarga dividida por el almacenamiento específico.

3. El agua que queda almacenada en el suelo es evapotranspirada cada día según una ETR que se obtiene de adoptar una variación lineal de ETR entre ETR=0 para almacenamiento nulo y ETR=ETP para almacenamiento igual a la capacidad de almacenamiento del suelo. Entonces, cada día se ajusta el almacenamiento sumándole el agua infiltrada (lluvia menos escurrió) y restándole la ETR, siempre que no exceda su capacidad de almacenamiento.

4. Hasta el paso 3 se podría considerar que se trata del módulo de recarga. Simultáneamente, el módulo de descarga del acuífero, se basa en que éste descarga aguas hacia zonas de descarga regional (en el caso de la cuenca estudiada: el río Salado) y hacia zonas de descarga más locales (arroyo Langueyú). Eso hace que el nivel del acuífero descienda. La ecuación de descarga es del tipo:

$$Descenso = \alpha (hac - hdesc) \quad (3)$$

donde: α es un coeficiente de agotamiento, hac el nivel de agua en el pozo ese día y $hdesc$ el nivel de descarga (una altura que represente al río Salado, por ejemplo). Para este estudio se utilizaron dos ecuaciones de descarga: una para descarga regional y otra para cercana o local.

El cálculo encadenado de cada uno de estos procesos permite obtener un nivel del acuífero para cada día. Variando los parámetros, dentro de un rango razonable establecido de acuerdo a las características del área, se intenta que los niveles calculados reproduzcan lo mejor posible los niveles medidos en campo.

Los datos de precipitación empleados en el balance, correspondieron a la estación a cargo de la Facultad de Ciencias Veterinarias (UNICEN) e IHLLA, con coordenadas 37° 19' 17" S, 59° 04' 50" O (Figura 2). Los datos de evapotranspiración fueron suministrados por el IHLLA y son resultado del empleo de la ecuación de Penman-Monteith ajustada al área de estudio (*Ocampo et al. 2009*).

El almacenamiento en el suelo se estimó utilizando las funciones de pedotransferencia propuestas por *Saxton y Rawls (2007)*.

Los balances se ajustaron minimizando el error calculado como:

$$EMC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(med - sim)^2} \quad (4)$$

donde: EMC es el error medio cuadrático, n es el número de niveles medidos, med el valor de cada nivel medido y sim es el valor que simula el balance.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis de las precipitaciones en el período de estudio, puede inferirse que ha sido un año seco respecto al balance modular, dado que totaliza una precipitación de 623 mm. Para el período de análisis, durante los meses de mayo, julio, agosto y noviembre, en los cuales se registran excesos importantes en el balance modular, se han producido precipitaciones muy inferiores a la media histórica.

La representación de los niveles estáticos junto a las precipitaciones mensuales, ha permitido observar que en la mayoría de las perforaciones existe una cierta respuesta del nivel a los eventos de lluvia, condicionada por la evapotranspiración. Como puede observarse en la Figura 3 (representación del comportamiento en la perforación 38 ubicada en la parte alta de la cuenca) las precipitaciones en los meses de junio y septiembre del 2007 han generado evidentemente una recarga importante, reflejándose esto en los niveles encontrados en las campañas realizadas a mediados de junio, en el primer caso, y octubre en el segundo. En cambio, el aumento de la precipitación en el mes de enero del 2008 no se ha reflejado en la respuesta del nivel, siendo éste en la campaña del mes de febrero más bajo que en la anterior. Este hecho se justifica en los eventos de precipitación de tipo torrencial y en la alta evapotranspiración del período, que han disminuido la posible recarga asociada al evento de lluvia. En el mes de junio, aún siendo escasas las precipitaciones en los meses anteriores, se observa una recuperación del nivel freático asociada a la disminución de la evapotranspiración que ha permitido un aumento de la recarga.

A partir del análisis de la totalidad de los gráficos se observa que, aunque con magnitudes diferentes, la evolución del nivel estático presenta un mismo comportamiento en las perforaciones ubicadas en distintos sectores de la cuenca. En las Figuras 4 y 5 se representan los niveles estáticos en los pozos 52 y 54, ubicados en la parte media y Noreste respectivamente. Esta evolución normalizada se ha observado en el 75 % de las perforaciones de la red de monitoreo. En los pozos restantes se presenta una evolución del nivel freático muy diferente que se asocia a su ubicación en un área de distorsión del flujo natural, generada por la extracción de importantes caudales y los descensos abruptos del nivel en las perforaciones en explotación para el suministro de agua de red a la ciudad.

A partir de los datos de la Tabla 2 se calcularon los valores mínimos, medios y máximos para los niveles observados en la red monitorea (Tabla 4).

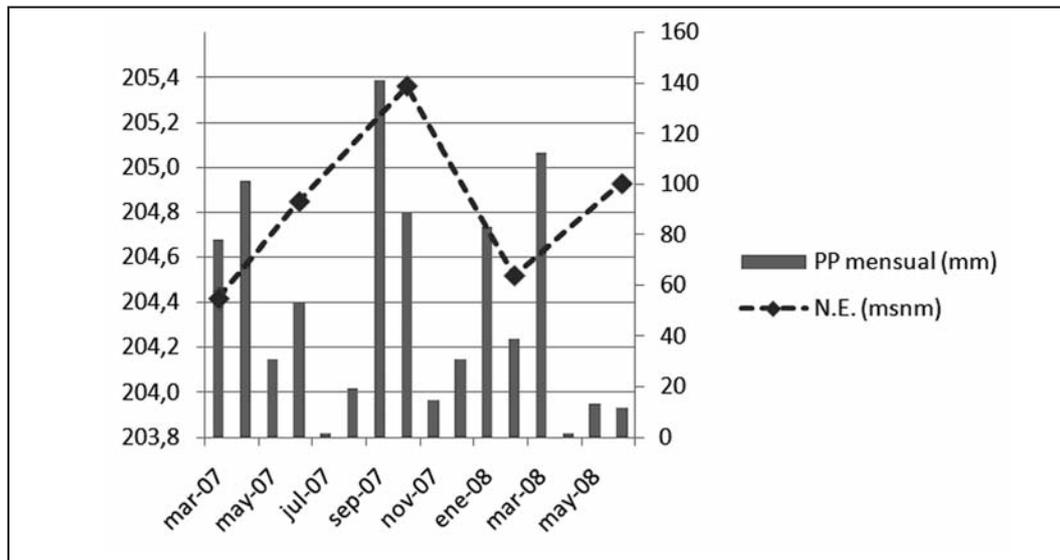


Figura 3. Comportamiento del nivel freático en la perforación 38.

Tabla 4: Valores mínimos, medios y máximos de los niveles observados en la red monitorea.

Pozo	Mínimo	Máximo	Media
4	141,4	143,5	142,0
5	129,9	131,3	130,3
6	170,5	171,9	171,2
7	157,4	159,6	158,4
9	132,1	133,2	132,5
11	123,5	124,5	124,0
12	118,6	120,0	119,1
14	124,0	125,5	124,5
15	126,6	127,9	127,1
16	139,9	140,9	140,4
17	159,1	162,0	160,2
18	148,0	150,0	149,0
19	144,0	145,7	144,8
20	134,3	136,0	135,0
23	189,3	190,6	190,0
27	175,0	177,4	176,0
34	236,0	237,3	236,4
36	212,6	214,6	213,2
38	204,4	205,4	204,8
39	224,8	226,7	225,9
41	147,1	148,0	147,5
47	155,3	156,0	155,6
50	193,6	194,2	194,0
51	192,2	193,3	192,6
52	151,8	153,6	152,5
53	136,1	137,7	136,5
54	124,3	125,5	124,8
57	175,0	176,5	175,8

Balance de cloruro

Con una precipitación media para el período junio 2007-junio 2008 de 623 mm y una concentración de cloruros de la precipitación de 4.66 ppm, se obtiene un valor de recarga del acuífero de entre 17 y 13 % de la precipitación total, en el sector de serranías de la cuenca. En tanto, hacia el NE la recarga sería menor al 10 % de la precipitación total (Figura 6). En la Tabla 5 se muestran los valores de concentración de cloruros en el agua subterránea para cada sitio de muestreo considerado y los porcentajes de recarga calculados.

Tabla 5. Concentración de cloruros y porcentaje de recarga en los sitios de muestreo de agua subterránea.

POZO	SECTOR	CLORUROS (ppm)	RECARGA (% respecto a precipitación)
50	Serranías	34,7	12,9
36	Serranías	26,1	17,1
19	Piedemonte	29,2	16,0
16	Piedemonte	42,6	10,9
15	Llanura	64,4	7,2
5	Llanura	38,8	12,0

Balance de agua en el suelo

Como se ha detallado en la metodología se utiliza el balance de agua en el suelo para el cálculo de la recarga en tres puntos de la cuenca, donde se sitúan las perforaciones 39, 19 y 54. En la Tabla 6 se presentan los montos de precipitación y recarga en mm, así como el porcentaje que representa la recarga en cada balance. La coincidencia de los valores de precipitación en los tres puntos de la cuenca obedece a que, como se explicara en la metodología, se utilizaron para todos ellos los registros de una única estación. Debe destacarse además que el porcentaje de recarga para la perforación 39 carece de validez dado el alto valor de error que posee el ajuste (41 cm) de los niveles estáticos calculados respecto a los medidos.

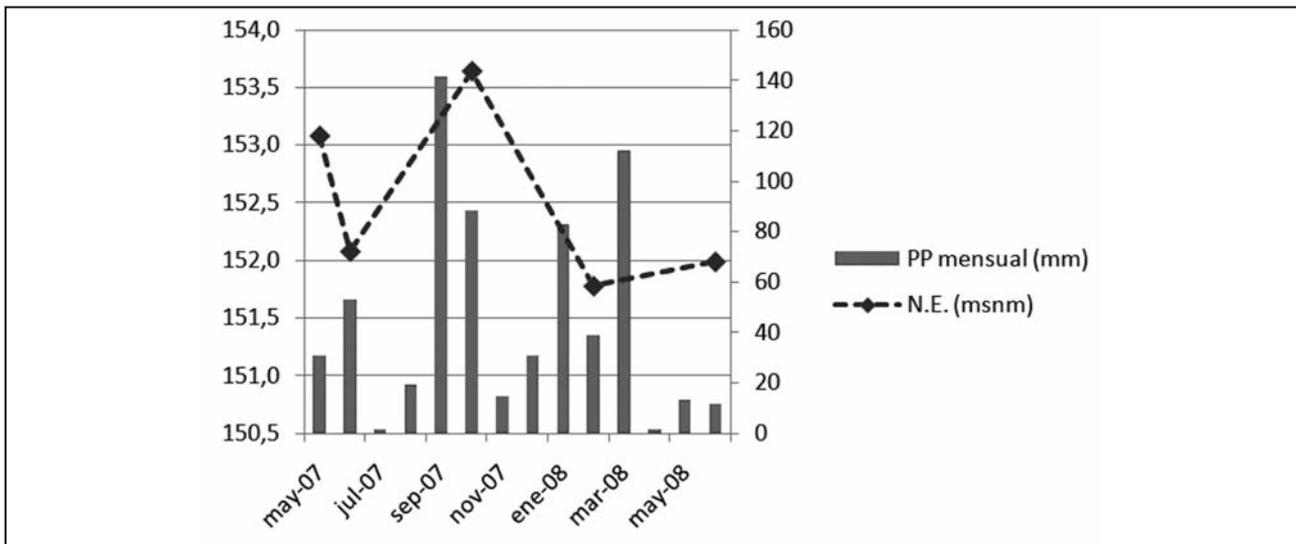


Figura 4. Evolución del NE en perforación 52.

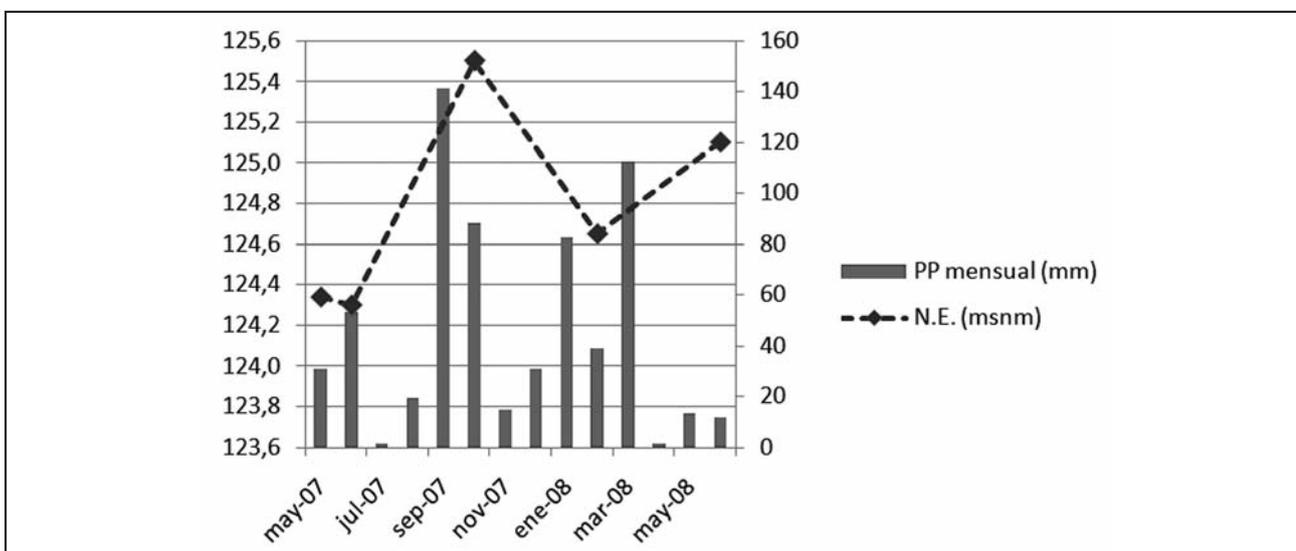


Figura 5. Evolución del NE en perforación 54.

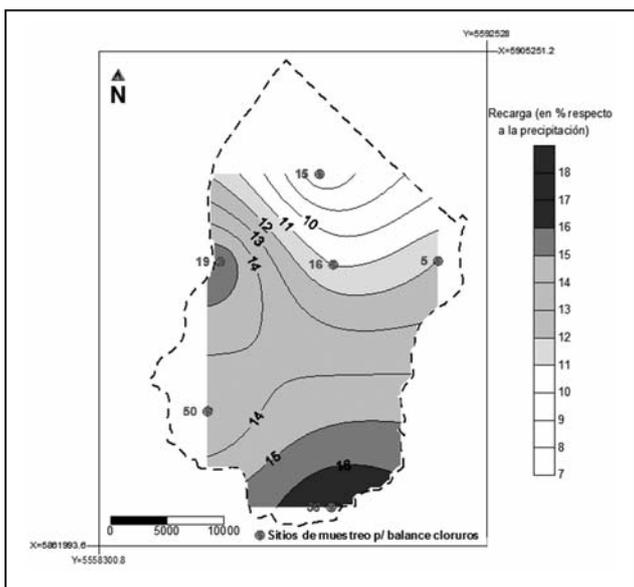


Figura 6. Variación espacial del porcentaje de recarga obtenido con el método de balance de ión cloruro.

Tabla 6. Valores de precipitación, recarga en mm y porcentaje de recarga para cada balance de agua en el suelo.

POZO	SECTOR	PRECIPITACIÓN (en mm)	RECARGA (en mm)	RECARGA (%)
39	Serranías	800	236	29,5
19	Piedemonte	800	183	22,9
54	Llanura	800	153	19,1

En la figuras 7, 8 y 9 se presentan los gráficos de los niveles medidos respecto a los calculados a través del balance en los pozos 39, 19 y 54. Sólo se analizan los resultados de los pozos 19 y 54 en los cuales se han obtenido errores aceptables.

Como puede observarse en la Tabla 6 del balance realizado con los parámetros calculados para la perforación 19, se obtiene que la recarga es de 22.9 % de la precipitación ocurrida en el período junio 2007 a junio 2008. Se ha logrado un ajuste aceptable entre los niveles medidos y los calculados, con un error medio cuadrático de 6.6 cm (Figura 8).

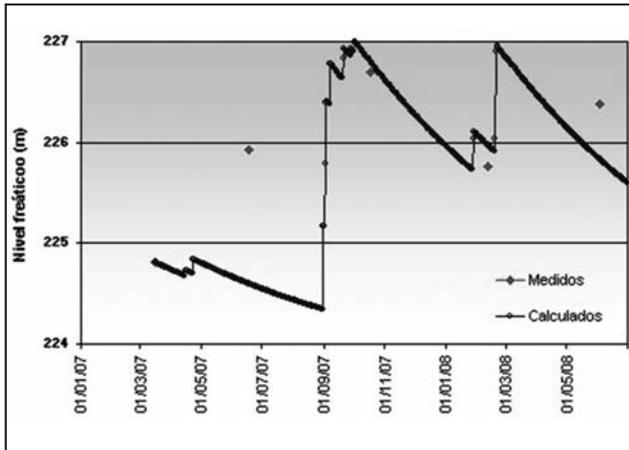


Figura 7. Gráfico de niveles medidos y calculados en la perforación 39.

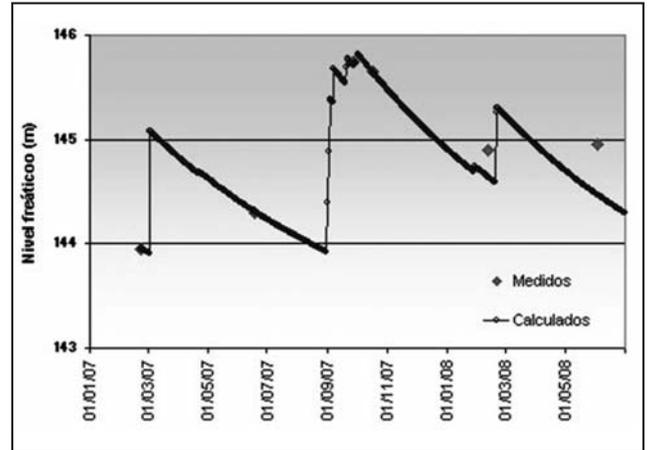


Figura 8. Gráfico de niveles medidos y calculados en la perforación 19.

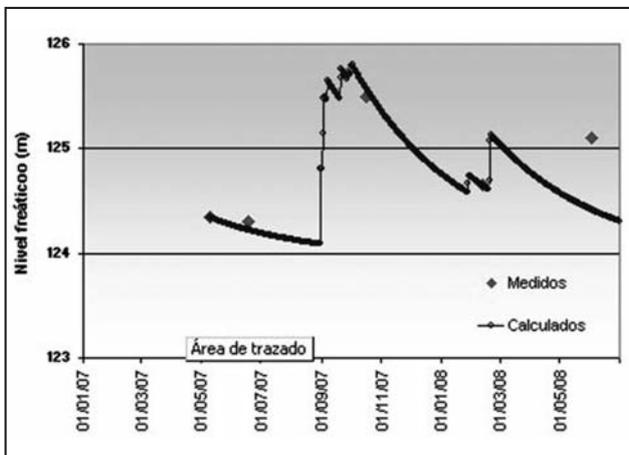


Figura 9. Gráfico de niveles medidos y calculados en la perforación 54.

En el caso de la perforación 54, ubicada en el sector de llanura, se obtiene un valor de recarga de 19.1 % del total precipitado para el período considerado. El ajuste de los niveles medidos respecto a los calculados es bueno, con un error medio cuadrático de 3.9 cm (Figura 9).

Los resultados de este balance, si bien estarían indicando que la recarga es de mayor magnitud que la que se ha obtenido con el balance de cloruros, resulta coherente con este último en cuanto a la distribución espacial. La recarga presenta una magnitud mayor en el sector de serranías y disminuye hacia la zona de llanura.

Debe tenerse en cuenta que aunque las muestras para determinar las concentraciones de cloruro se tomaron en los mismos momentos en que se midieron los niveles utilizados para ajustar el balance de agua en el suelo, el balance de cloruro involucra valores medios de recarga de un lapso considerablemente mayor, por lo que, dada la variabilidad temporal de la recarga, no correspondería compararlas en este caso.

CONCLUSIONES

La cuenca del arroyo Langueyú no es una zona típica con concentración de aguas en toda el área de estudio, sino que sólo posee estas características en el sector de serranías, produciéndose la dispersión y/o ausencia de definición del drenaje en su área restante.

El sistema presenta comportamientos netamente diferenciados de acuerdo a los sectores definidos por características geológicas y geomorfológicas (serranías, piedemonte y llanura). En el sector serrano se produce la concentración del escurrimiento, en el periserrano la dispersión del flujo y en el ámbito de llanuras, el drenaje es poco definido y pobremente integrado. Esta configuración superficial tiene su correlato con el flujo subterráneo, que muestra gradientes en franca disminución en el mismo sentido.

Las diferencias antes citadas quedan también plasmadas en la magnitud de la respuesta a los eventos de recarga, ya que si bien se tiene una evolución normalizada de los niveles freáticos en el período de estudio en el 75 % de las perforaciones, la magnitud de la respuesta varía según el sector de la cuenca en el que se ubiquen.

La recarga es regionalmente autóctona principalmente por precipitaciones. En el sector de serranías posee una magnitud de entre 17 y 13 % de las precipitaciones según la estimación mediante el balance de cloruro. En el sector de piedemonte la recarga varía entre un 15 % en el quiebre de pendiente aldeaño a las sierras, hasta un 10 % de la precipitación al comienzo del sector de llanura.

Según el balance de agua en el suelo la recarga varía entre un 22.9 % de la precipitación ocurrida en el período considerado en el sector pedemontano, y un 19.1 % en la zona de llanura. Estos valores, aunque mayores a los obtenidos mediante el balance de cloruros, son coherentes con ellos en cuanto a la disminución de la recarga hacia la zona llana.

No se ha logrado el ajuste entre los niveles medidos y calculados en la perforación ubicada aguas arriba de la cuenca. Esto podría deberse a que el modelo de balance de agua en el suelo aplicado no es capaz de representar la combinación de los flujos en los medios fisurado y poroso clásico, presentes en este sector.

Si bien la selección de perforaciones para aplicar el balance de agua en el suelo se basó en la posibilidad de tener datos de precipitación del propio lugar seleccionado, los datos no pudieron recopilarse para su aplicación en este trabajo. Es por esto que se concluye en la necesidad de continuar trabajando en la estimación de la recarga, a partir de la obtención de datos de precipitación del lugar donde se ubica la perforación modelada y con detalles del modelo hidrogeológico definidos a escala más detallada en la zona periserrana.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CUSTODIO, E., 1997.
Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos.
En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica. AIH-GE, pp. 83-109. Las Palmas de Gran Canaria.
- FIDALGO, F.; F. DE FRANCESCO Y R. PASCUAL, 1975.
Geología superficial de la Llanura Bonaerense.
En: Relatorio Geología Provincia de Buenos Aires. VI Congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca, Pcia. de Bs. As., pp. 104-106.
- FUNDACIÓN CENTRO INTERNACIONAL DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA, 2009.
Hidrogeología. Conceptos básicos de Hidrología Subterránea.
Editor: Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. 768 pp.
- KRUSE, E., 1992.
Estimación de escurrimientos subterráneos en la cuenca del Arroyo Azul (Buenos Aires).
En: Situación Ambiental de la Provincia de Buenos Aires, A. Recursos y rasgos naturales en la evaluación ambiental, López, H.L. y Tonni, E.P. (Coord.). CIC, Año 2, No. 15.
- MARCHETTI, A., 1968.
Estudios hidrológicos de la zona sud de la Prov. de Buenos Aires.
Dirección General de Geología y Minería. Inédito. Carp. 578. Buenos Aires
- OCAMPO, D.; R. RIVAS Y J. SCHIRMBECK, 2009.
Aptitud de diferentes métodos de estimación de la evapotranspiración: aplicación en una zona de clima subhúmedo-húmedo.
En Actas del VI Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea Tomo II. Santa Rosa, La Pampa. pp. 437-446.
- RUIZ DE GALARRETA, A. Y R. BANDA NORIEGA, 2005.
Geohidrología y evaluación de nitratos del Partido de Tandil, Buenos Aires, Argentina.
IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Octubre 2005. UNCR. Río Cuarto, Córdoba. pp. 99-108.
- RUIZ DE GALARRETA, A. 2006.
Geohidrología y Balance Hidrológico en Zona no Saturada en la cuenca alta del arroyo Tandileofú, Provincia de Buenos Aires.
Tesis doctoral. Inédita. Universidad Nacional de La Plata, 181 p.
- RUIZ DE GALARRETA, A.; M. VARNI; R. BANDA NORIEGA Y R. BARRANQUERO, 2007.
Caracterización geohidrología preliminar en la cuenca del arroyo Langueyú, Partido de Tandil, Buenos Aires.
En Díaz, E.L., Tomás, J.R., Santi, M., D'Elía, M. y DallaCosta, O., (Compiladores) V Congreso Argentino de Hidrogeología, Asociación Internacional de Hidrogeólogos. ISBN 978-987-23936-3-2. pp. 119-128.
- RUIZ DE GALARRETA, A. Y M. VARNI, 2010.
Análisis de la recarga del acuífero freático en la cuenca del arroyo Tandileofú, partido de Tandil.
Capítulo de libro, "Estudios Ambientales II" (CINEA - FCH - UNCPBA). Enviado para su publicación en diciembre del 2008 "en prensa".
- SALA, J.M.; KRUSE, E. Y AGUGLINO, R. 1987.
Investigación hidrológica de la Cuenca del Arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires.
Informe 37, CIC, 235 p.
- SAXTON, K. Y RAWLS, W., 2007.
USDA-Agricultural Research Service. USDA-ARS, Hydrology & Remote Sensing Laboratory.
In cooperation with Department of Biological Systems Engineering. Washington State University. Homepage: <http://www.ars.usda.gov/balanri/hrsl/ksaxton>
- THORNTHWAITE, C. W. Y J. R. MATHER, 1957.
Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance.
Laboratory of Climatology, Publication núm. 10. Centertown, N. J.
- USDA SCS, 1985.
National Engineering Handbook, Section 4.
U.S. Govt. Printing Office, Washington, DC.
- VARNI, M. 2005.
Evaluación de la recarga al acuífero del Azul: Valores medios y variaciones temporal y espacial.
Universidad Nacional de Rosario. Tesis Doctoral: 185 pp. y anexos (inédita).



Evaluación de los cambios en la morfología y tamaño de fibras de crisotilo de mina La Bélgica (Calamuchita, prov. de Córdoba, Argentina) simulado en ensayos de laboratorio

Lescano, Leticia ¹⁻² ✉ - Marfil, Silvina ¹⁻³ - Maiza, Pedro ¹⁻⁴ - Sfragulla, Jorge ⁵⁻⁶ - Bonalumi, Aldo ⁵⁻⁶

Recibido: 12 de mayo de 2011 • Aceptado: 05 de noviembre de 2011

Resumen

El crisotilo es un mineral del grupo de la serpentina que se desarrolla a partir de la alteración de olivinos, piroxenos y anfíboles. Posee una estructura en donde las capas de silicato se disponen en forma de tubos o cilindros concéntricos o enrollados. Esto genera el hábito característico de los minerales asbestiformes.

El crisotilo se ha utilizado en numerosos productos industriales. Sin embargo a su gran utilidad hay que considerar su alta toxicidad ya que puede producir enfermedades pulmonares, tales como mesotelioma o asbestosis, de forma directa o indirecta. La exposición al asbesto puede ser de tres fuentes conocidas: laboral, doméstica y ambiental. Las fibras pueden pasar al aire o al agua no sólo debido a la degradación de los productos manufacturados sino también por la movilidad de estos minerales desde los depósitos naturales.

El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación de los cambios morfológicos y de tamaño de las fibras de crisotilo muestreadas en campo, simulando en laboratorio condiciones naturales. A partir de los resultados obtenidos se evaluó la degradación del mineral en el tiempo en condiciones variables y se analizó cómo las fibras modifican su tamaño y morfología hasta alcanzar las condiciones críticas para la salud humana.

Palabras clave: *asbestos, degradación, salud humana.*

1 Departamento de Geología-UNS. San Juan 670, Bahía Blanca. C.P.8000.TE. 54-291-4595101 int. 3021

2 Becaria Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Bs. As.

✉ leticia.lescano@uns.edu.ar

3 Investigador Principal CONICET-INGEOSUR.

4 Investigador Independiente. Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Bs. As - INGEOSUR.

5 Secretaría de Minería, Provincia de Córdoba, Hipólito Yrigoyen 401, 5000, Córdoba, Argentina.

6 Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Av.Vélez Sársfield 1611, 5016, Córdoba, Argentina.

Abstract

Chrysotile is the fibrous mineral of the serpentine group, which is developed from the alteration of magnesium silicates, olivine, pyroxene and amphibole especially. The sheet structure is curved into scrolls or hollow cylinders that form individual fibers, which are responsible for its properties as asbestos.

Chrysotile has been used extensively in industrial materials, however, asbestos inhalation can cause lung diseases such as mesothelioma and asbestosis.

Exposure to asbestos can be from three different sources: laboral, domestic and environmental. Asbestos fibers can be introduced into the air or natural water from the erosion of rocks rich in asbestos, manufactured materials, or disposal of industrial asbestos wastes.

The purpose of this paper is to study morphologic and size changes of fibers, simulating exogenous conditions in laboratory. To determinate the degradation of the mineral in natural conditions in the course of time and to analyze how the fibers modify their size and morphology until the critical for human health are reached.

Keywords: asbestos, degradation, human health.

INTRODUCCIÓN

Dentro del grupo de la serpentina se reconocen tres silicatos hidratados de magnesio que poseen fórmula química similar ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) pero diferente estructura cristalina: lizardita, antigorita, y crisotilo (Winchell 1933; Hurlbut 1974; Anthony et al. 1995; Ross 1981; Wicks 1979). Este último presenta características asbestiformes con fibras flexibles, elongadas y curvadas. Se forma a partir de la alteración de olivinos, piroxenos y anfíboles. Este mineral, también conocido como asbesto blanco debido a su color, posee una estructura en donde las capas se disponen en forma de tubos o cilindros concéntricos o enrollados (Wicks y Whittaker 1975), generando el hábito característico de los minerales asbestiformes del grupo de la serpentina.

En cuanto a sus propiedades se destacan la resistencia al calor, al desgaste, a los álcalis y ácidos y su flexibilidad, que lo hacen un material adecuado para ser empleado como aislante en numerosas industrias. Debido a estas propiedades fue mundialmente utilizado en una gran variedad de productos, sin embargo, a su gran utilidad, hay que añadir su peligrosidad ya que puede producir enfermedades de forma directa o indirecta, en especial a largo plazo, pues tiene una latencia superior a veinte años (Abú-Shams et al. 2005). La penetración del asbesto en las vías respiratorias hace que las fibras se acumulen en los pulmones y puedan desarrollar cáncer o asbestosis. (Battista et al. 2006). Los numerosos estudios que se han realizado en relación a los asbestos están relacionados a la morfología y tamaño de los mismos y a las implicancias que esto genera en la salud humana.

La exposición al asbesto puede ser: laboral, doméstica o ambiental. Desde el punto de vista ambiental afecta principalmente a las personas que residen cerca de un punto de emisión de asbesto e inhalan el polvo disperso en el aire. Las fibras pueden pasar al aire o al agua no sólo por la degradación de los productos manufacturados sino también por la erosión de depósitos naturales. El agua potable puede contener asbesto procedente de fuentes naturales o de tuberías de fibrocemento que lo contienen. Las fibras y las partículas de diámetro pequeño pueden permanecer suspendidas en el aire durante largo tiempo y ser transportadas grandes distancias por el viento y el agua antes de depositarse. No pueden movilizarse a través del suelo permaneciendo inalteradas durante largo tiempo dado que no son degradadas a otros compuestos (Luis, G. et al. 2009).

En proximidades a la mina La Bélgica (Calamuchita, Prov. de Córdoba) se encuentra la villa turística Yacanto de Calamuchita. Esta localidad ha comenzado a expandirse en los últimos años y dado la fácil movilidad que presenta el crisotilo, tal como pudo reconocerse en el campo y se comprobó a partir de los

ensayos de simulación realizados en laboratorio, se considera importante evaluar la posible exposición ambiental de asbesto, de tamaño crítico para la salud, de las personas que residen en la localidad.

Durante 30 años, mina La Bélgica fue explotada por amianto y sus productos han sido industrializados y comercializados. En la actualidad existen numerosos productos que aún contienen este material y se los considera perjudiciales para la salud humana. La degradación de los mismos es uno de los factores por los que las fibras penetran con mayor facilidad en las vías respiratorias relacionado a su cambio morfológico y reducción de tamaño. Es indispensable estudiar estos materiales y su degradación en el tiempo relacionado a su influencia nociva de forma directa o indirecta, en especial a largo plazo.

El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación de los cambios morfológicos y de tamaño en fibras del crisotilo de mina La Bélgica, simulando en el laboratorio condiciones naturales. Se determinó la evolución de la degradación del mineral en el tiempo y se analizó cómo las fibras modifican su tamaño y morfología hasta alcanzar tamaños críticos para la salud humana.

MARCO GEOLÓGICO

El crisotilo utilizado fue obtenido en Mina La Bélgica. Se ubica en el Departamento Calamuchita, provincia de Córdoba, Argentina, en el sector oriental de las Sierras Grandes en cercanías de la Estancia San Miguel, entre las localidades de Villa Yacanto y Atos Pampa (Figura 1). Esta mina fue denunciada por amianto en el año 1947 y su explotación a cielo abierto se extendió hasta fines de los años 70'. En la actualidad se encuentra abandonada y ha sido dada de baja como mina por la Secretaría de Minería de la Provincia de Córdoba.

El cuerpo de serpentinita La Bélgica pertenece a la denominada Faja Central de rocas ultramáficas de las Sierras Pampeanas de Córdoba (Villar 1975, 1985) posteriormente llamada Faja Ultramáfica Occidental (Kraemer et al. 1995). Se presenta como una serie de cuerpos aislados que se extienden al sur del Batolito de Achala, desde Los Permanentes por el sur, hasta la localidad de Inti Yaco por el norte. En el sector estudiado, las rocas ultramáficas se presentan emplazadas como lentes dentro de las rocas anatócticas que forman el macizo de Atos Pampa-Cerro Pelado (Bonalumi y Gigena 1987). La geología del cuerpo La Bélgica fue estudiada por Escayola (1994, 1997); dicha autora describe serpentinitas derivadas de harzburgitas y websteritas que han sufrido cuatro episodios metamórficos, el último de los cuales es de tipo retrógrado asociado al dominio frágil, con circulación de fluidos en fracturas y que generó rellenos de crisotilo y talco.

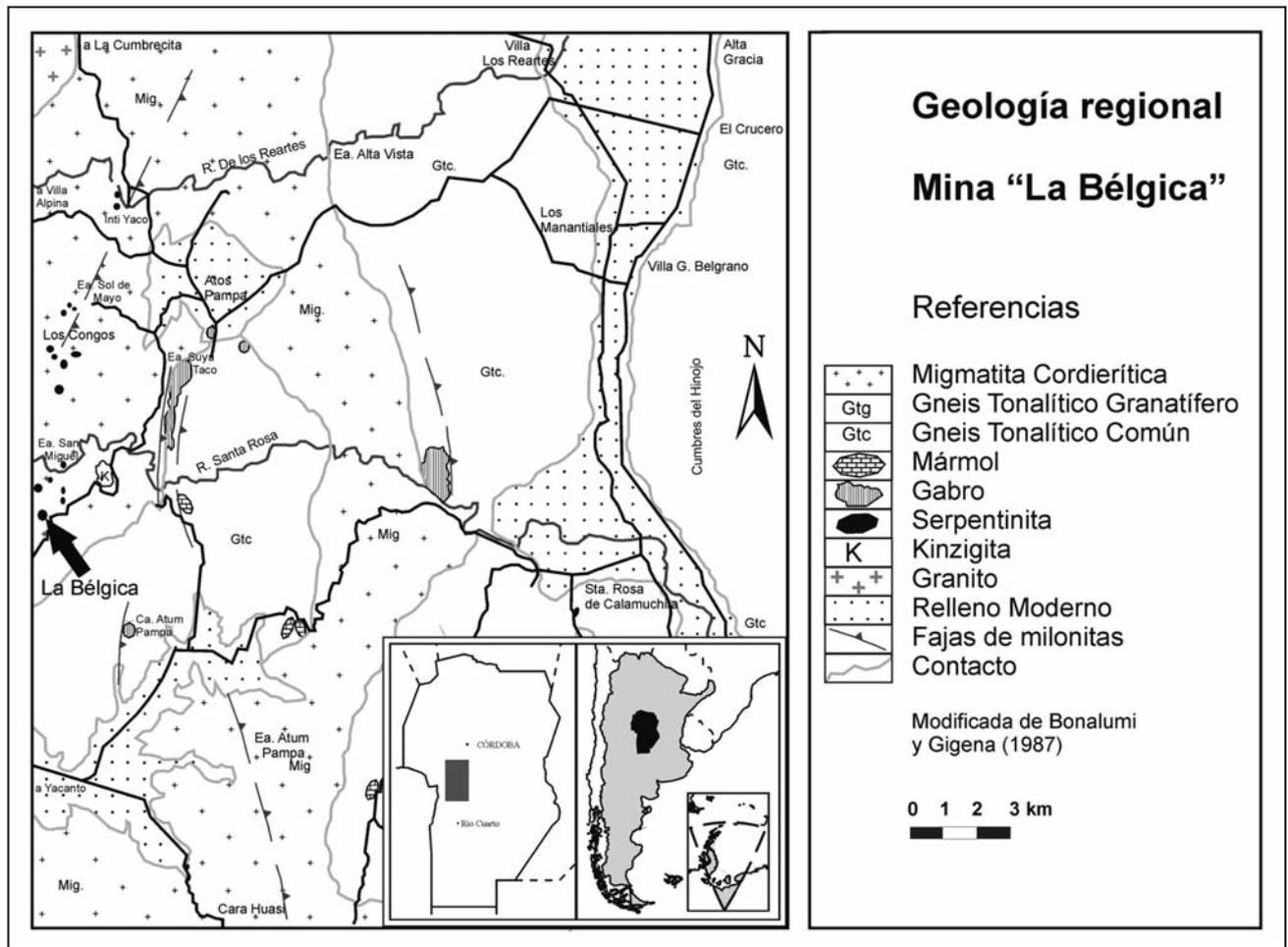


Figura 1. Mapa de ubicación de Mina La Bélgica.

El crisotilo presenta hábito asbestiforme con fibras que superan los 2 cm de largo (Bonalumi y Gigena 1987) y que crecen perpendicularmente a las paredes de las fracturas (asbestos cross-fiber). En el campo se ha podido observar el disgregamiento in situ de las venillas de crisotilo y la volatilidad de las fibras generadas (Figura 2). En la Figura 3 se muestra un corte pulido de la serpentinita donde se reconocen las venillas de crisotilo y su hábito cristalino.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para los ensayos de laboratorio se separaron fibras de crisotilo de las venillas muestreadas. Para interpretar la degradación del crisotilo en función del tiempo simulando las condiciones del ambiente natural, se utilizaron las condiciones del ensayo de envejecimiento de materiales cerámicos (Dominguez y Ullmann, 1996). Consiste en someter al material asbestiforme a 150 °C y 150 atmósferas de presión, en autoclave, durante 24 horas, controlando principalmente la pérdida de peso y las modificaciones de la superficie de las fibras. El medio usado fue agua a pH 7, en una autoclave tipo Morey con tubo portamuestra de vidrio de cuarzo fundido.

También se analizó el comportamiento del mineral sometándolo a ensayo de agitación permanente, para simular condiciones de torrentes de agua que se puedan dar en el medio natural. Se analizaron las fibras de crisotilo, su variación morfológica y de tamaño, en diferentes estadios de tiempo e intensidades de agitación.

Para estudiar el comportamiento de las fibras en el aire se diseñó un equipo, que básicamente consiste en un túnel de acrílico vertical, de longitud variable, a través del cual se hizo circular una corriente de aire a temperatura ambiente con diferentes caudales. Se usaron fibras de crisotilo en distintas condiciones para evaluar principalmente la evolución de la degradación del mineral. Si bien no es posible obtener conclusiones cuantitativas, se evaluaron las modificaciones morfológicas y de tamaño de las fibras hasta alcanzar el tamaño crítico que afecta la salud.

Para la caracterización del mineral y determinar su morfología y tamaño se utilizó un sistema microscópico, con procesador de imágenes integrado con un estereomicroscopio Olympus trinocular SZ-PT; microscopio petrográfico Olympus trinocular B2-UMA, con una cámara de video Sony 151A incorporada, monitor de alta resolución, procesador de imágenes Image Pro Plus versión 3.1 y programas computarizados para tratamiento de imágenes; microscopio electrónico de barrido, JEOL JSM 35 CP equipado con una sonda EDAX para el análisis químico cualitativo de microáreas sobre muestras metalizadas con oro y se utilizó un difractor Rigaku D-Max III - C con radiación de Cu K α y monocromador de grafito, con 35 KV y 15 mA. El contenido de elementos mayoritarios se analizó mediante ICP en Activation Laboratories Ltd. (AC-TLABS, Canadá).



Figura 2. Fibras sueltas de crisotilo en venillas "cross fiber" en mina La Bélgica.

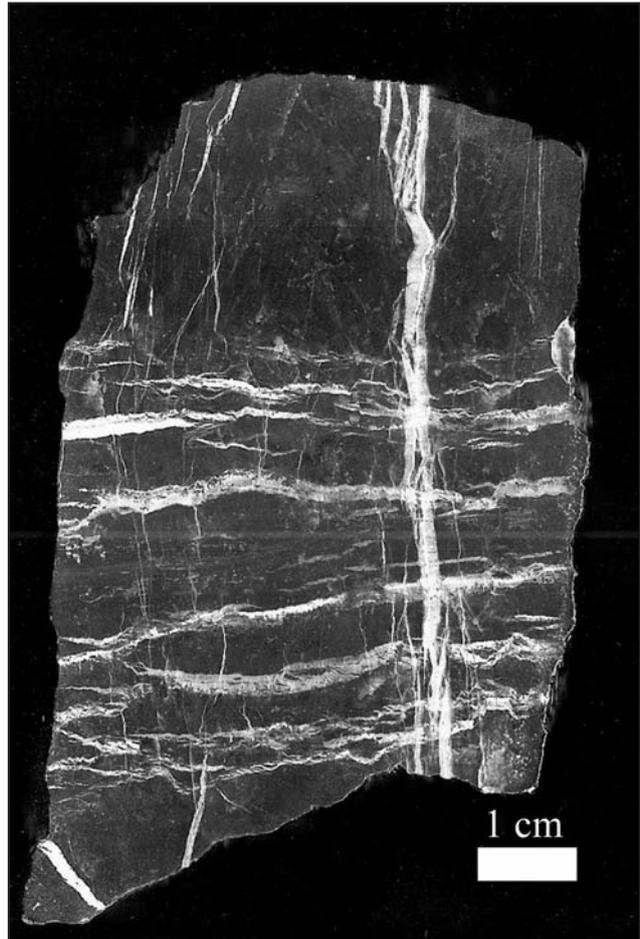


Figura 3. Corte pulido de la serpentinita con varias venillas de crisotilo cortadas por una perpendicular, de mayor desarrollo.

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

El crisotilo de mina La Bélgica fue analizado por DRX, previo al tratamiento, para su caracterización mineralógica. En la Figura 4 se muestra el difractograma obtenido donde se identifica claramente la estructura del crisotilo con sus máximas reflexiones en 7.32 y 6.64 Å, comparables con la ficha ICDD 31-808 (ICDD, 1986). Revela muy buena cristalinidad y elevada pureza.

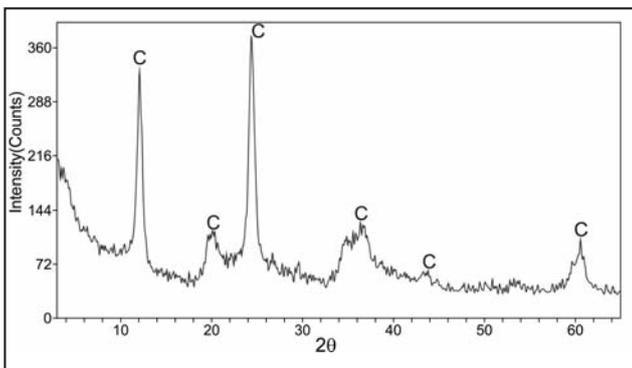


Figura 4. Difractograma de crisotilo natural. Mina La Bélgica (C: crisotilo).

Sobre secciones delgadas en la serpentinita de mina La Bélgica, se reconocen venillas con texturas no-asbestiformes de crisotilo, bandeadas, paralelas a los contactos y asimétricas. También se puede distinguir un crecimiento en pulsos, venillas de carbonatos paralelas y oblicuas a la principal de crisotilo. En los bordes del carbonato se reconocen oxidados de hierro. En la serpentinita se observa una textura no pseudomórfica entrelazada, con minerales opacos (Figura 5). Las descripciones de las texturas se hicieron en base a la clasificación de O' Hanley y Wicks, 1988.

En la Tabla 1 se muestra el análisis químico de elementos mayoritarios del crisotilo de mina La Bélgica. Los resultados son comparables con los valores teóricos para este mineral. Además se observan contenidos relativamente altos de Fe₂O₃ (T), relacionado con impurezas.

Tabla 1. Análisis químico de elementos mayoritarios del crisotilo de mina La Bélgica, Córdoba.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total
42,7	0,38	3,26	0,08	40,2	0,04	0,02	0,03	0,01	0,03	13,96	100,7

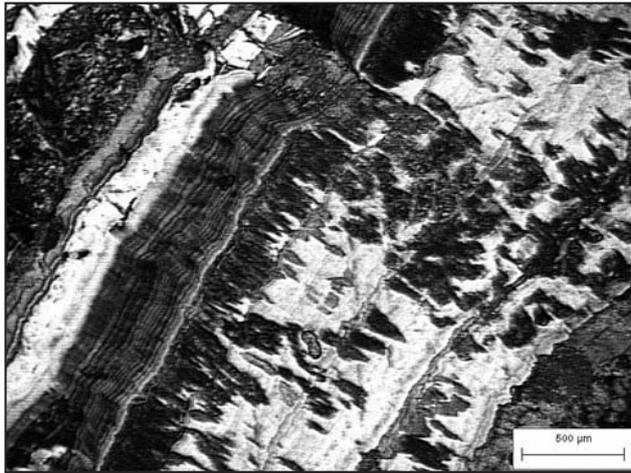


Figura 5. Venilla no-asbestiforme de crisotilo, bandeada paralela a los contactos

DISGREGACIÓN EN MEDIO ÁCUEO

Microscopía

Se estudió el comportamiento de las fibras de crisotilo en medio ácuo con turbulencia variable similares a las que se desarrollaran en torrentes de agua. El análisis fue realizado con 1 gr de muestra. La Figura 6 muestra la evolución del tamaño y forma provocada por la agitación a través del tiempo. En la Figura 6.a se muestran las fibras luego de 5 minutos de agitación a 250 RPM. Se puede comprobar que en un tiempo relativamente corto de exposición comenzaron a cambiar su morfología con una incipiente disgregación de las mismas. Con el mismo intervalo de tiempo pero con una mayor intensidad de agitación (500 RPM), las fibras mayores además de separarse entre sí, comenzaron a disgregarse en fibras del orden del micrón. A 20 minutos de agitación y 250 RPM las fibras redujeron aún más su tamaño y comenzaron a aglutinarse formando un incipiente mullado (Figura 6.b). En el mismo tiempo con una mayor intensi-

Tabla 2. Tabla de variaciones de tamaño de las fibras durante el tratamiento ácuo.

Tiempo de exposición /RPM	Naturales		5' a 250 RPM		20' a 250 RPM		3 hs a 250 RPM		6 hs a 250 RPM	
Largo-Ancho (mm)	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho
Promedio	6,5	0,64	4,6	0,3	4,12	0,18	3,14	0,11	1,07	0,03
Desvío Estándar	1,2	0,15	1,1	0,12	1,3	0,08	0,72	0,04	0,3	0,019

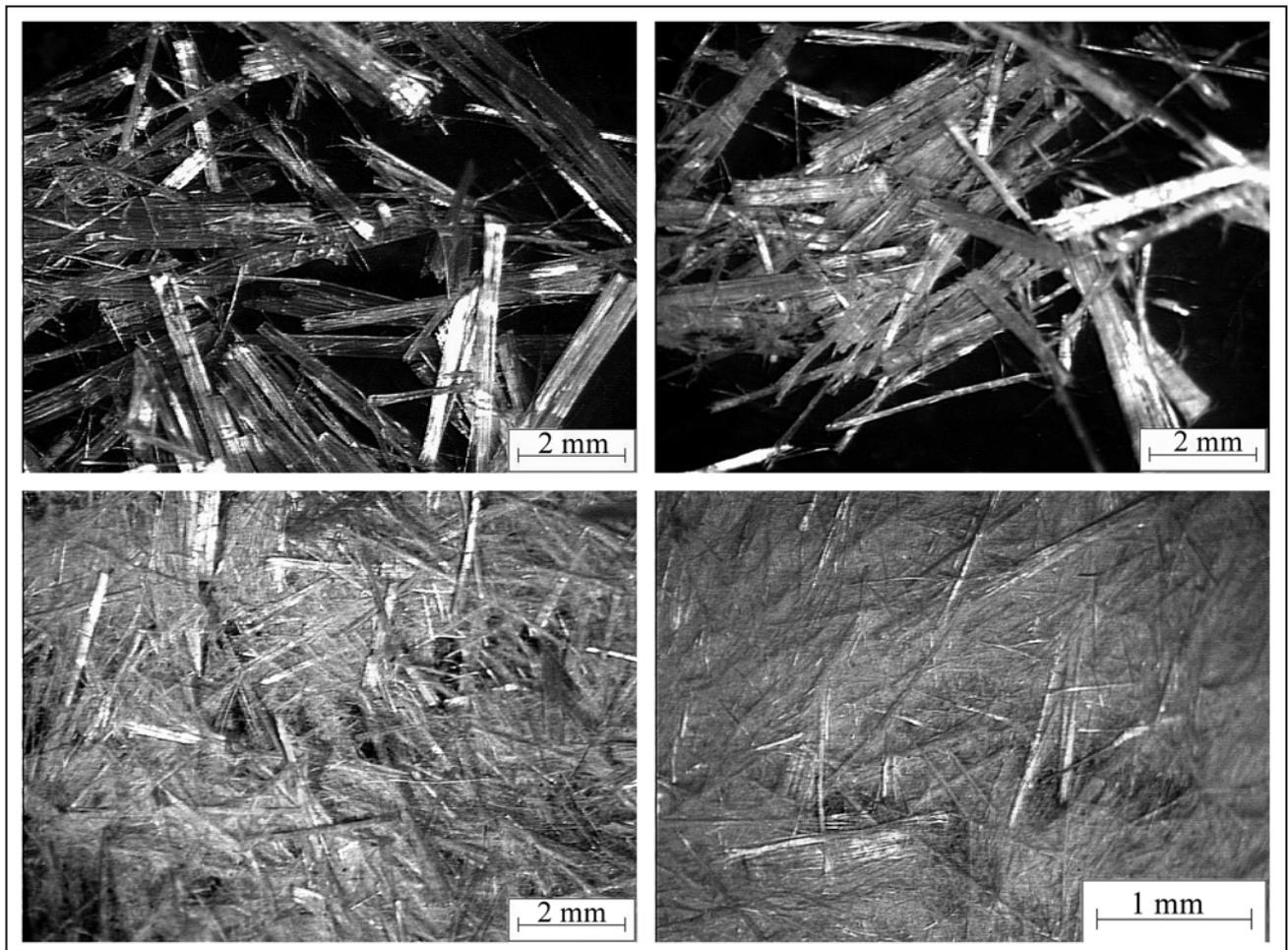


Figura 6. Evolución del tamaño y forma. Degradación por agitación. 6.a: 5 minutos de agitación a 250 RPM. 6.b: 20 minutos de agitación y 250 RPM. 6.c: 3 hrs. de agitación a 250 RPM. 6.d: 6 hrs. de agitación a 250 RPM.

dad (500 RPM), la aglutinación persiste pero ya las fibras de mayor tamaño pierden la "rigidez" inicial y comienzan a flexibilizarse en fibras menores. Pasadas las tres horas del ensayo de agitación a 250 RPM, la Figura 6.c, muestra un cambio sustancial en el tamaño y la morfología. El mallado de fibras del orden de los micrones se ha incrementado, las mismas se entrelazan de manera natural haciéndose muy difícil su separación. En la Figura 6.d, se muestra el comportamiento de las fibras luego de 6 horas de ensayo a 250 RPM. En este caso las fibras del orden del mm son escasas, el mallado de fibras micrométricas es casi total, siendo su tamaño imperceptible para el ojo humano.

En la Tabla 2, se muestra las variaciones de tamaño que se produjeron durante el tratamiento ácuco. Con el aumento de tiempo de exposición, la longitud promedio de las fibras se vio reducida en un 37% luego de 20' de tratamiento. Además, al comenzar a disgregarse, redujeron la densidad de los paquetes, observándose una disminución en el ancho de los mismos. Cabe destacar que en las muestras obtenidas luego de 3 y 6 hs de exposición, el promedio de fibras medibles no supera el 40% del total de la muestra. Esto se debe a que se genera un mallado milimétrico que no permite distinguir las fibras, como se muestra en la Figura 6.d.

Microscopía electrónica de barrido

Las fibras de crisotilo ensayadas se observaron con microscopio electrónico de barrido. Se analizó el proceso de

degradación de las mismas por agitación (Figura 7). En la Figura 7.a, se muestran las fibras de crisotilo en estado natural; son rígidas y sus extremos se encuentran fracturados. Presentan un quiebre incipiente y se separan entre sí a lo largo del eje cristalográfico "a". Luego de 20 minutos de agitación a 500 RPM, (Figura 7.b) se pudo distinguir el cambio morfológico, la reducción de su tamaño y la flexibilidad para entrelazarse de manera natural. Las de mayor tamaño aún persisten, pero se puede reconocer un incipiente fracturamiento de las mismas. A 3 hrs. de agitación, la aglutinación es mayor y el tamaño de las fibras disminuye considerablemente. La Figura 7.c muestra claramente la flexibilidad de las fibras al ser sometidas durante 6 hrs. a la agitación semejante a la de un torrente de agua, observándose que las mismas son finas, largas, flexibles y elásticas. En la Figura 7.d, con mayor magnificación se pudo reconocer como de una misma fibra se separan una gran cantidad de fibras menores.

DISPERSIÓN POR AIRE

Las fibras de crisotilo presentan un bajo peso específico, y en el aire se comportan de manera muy volátil. El ensayo se realizó con fibras calcinadas a 300° y 600°, con el objetivo de obtener un material de características físicas semejantes a las que se presentan en revestimientos de tuberías de calderas. En la dispersión se separaron unas de otras y se observó como las de mayor tamaño se separaron en fibras menores. Cabe destacar la facilidad que tienen para elevarse con una corriente de aire de bajo caudal y moverse en zonas de corrientes de aire.

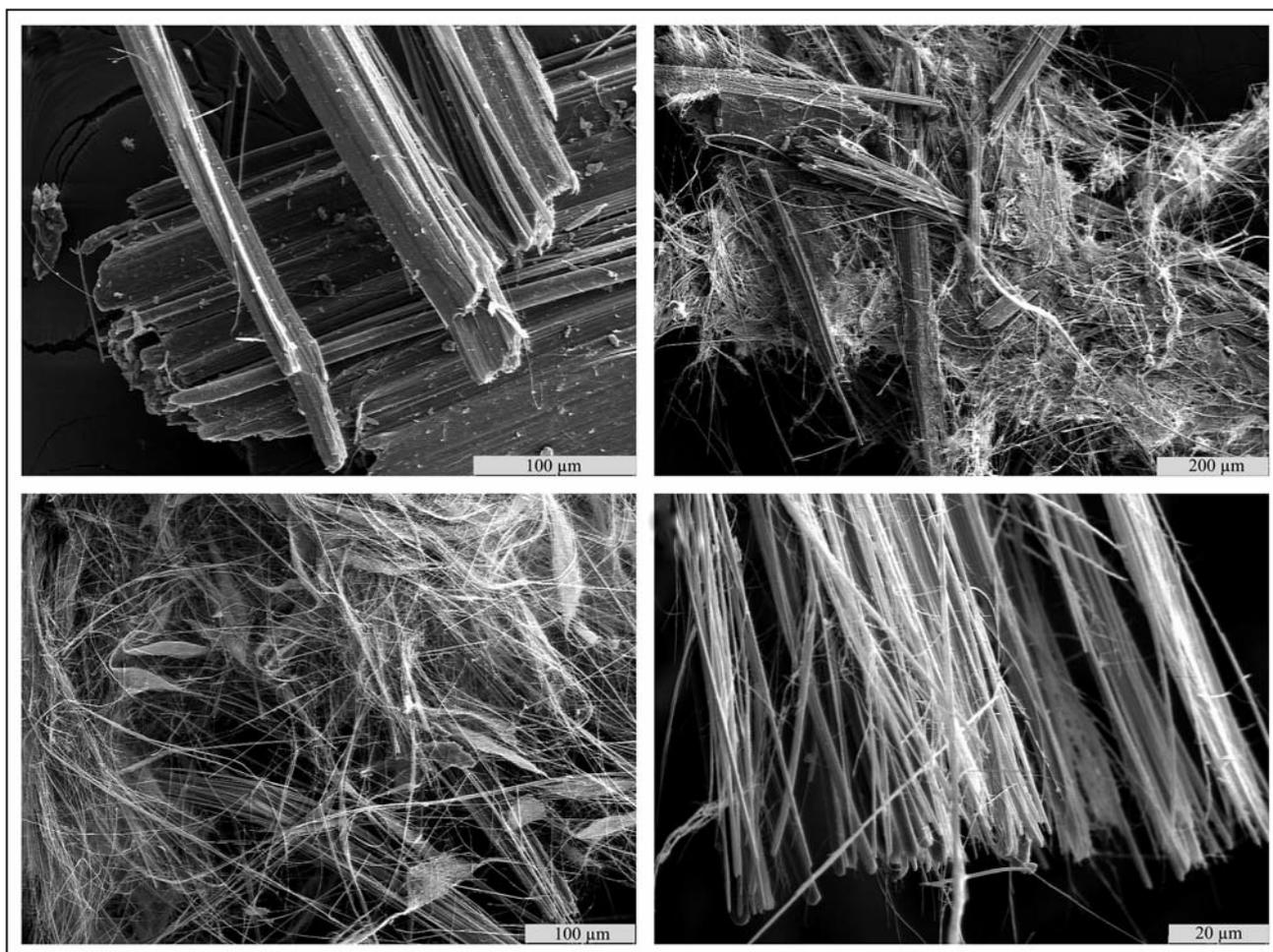


Figura 7. SEM. Degradación por agitación. 7.a: Fibras en estado natural. 7.b: 20 minutos de agitación a 500 RPM. 7.c: 6 hrs. de agitación a 250 RPM. 7.d: Detalle de las fibras de la Figura 7.c.

Por difracción de rayos X se comprobó que la composición mineralógica no se vio afectada, pero en la morfología hay un cambio sustancial de rigidez y tamaño.

En la Tabla 3, se observa las variaciones de tamaño durante la dispersión por aire. Al finalizar la experiencia, las fibras se redujeron, en promedio, un 52% en su longitud y un 80% en su ancho. Esta variación está relacionada al cambio en la rigidez inicial antes mencionado, que permite el desmenuzamiento de los paquetes naturales del crisotilo.

En la Figura 8.a se muestran los paquetes densos y rígidos de las fibras naturales pre tratamiento. En la Figura 8.b las fibras se encuentran calcinadas a 300°C, luego de una exposición a la dispersión por aire de 20'. Se observa diferentes tamaños, aglutinación y separación. En la Figura 8.c, se reconocen a las fibras previamente calcinadas a 600°C, y expuestas a 20' de aire. Es destacable la pérdida de agua y la disminución de su peso específico. Esta propiedad está íntimamente ligada a una mayor capacidad de las fibras de movilizarse en el aire. Las mismas se dispersaron fácilmente en el interior del túnel del aire y se separaron en fibras menores. Los resultados cuantitativos de la experiencia y las imágenes permitieron reconocer las modificaciones morfológicas y de tamaño alcanzando rápidamente el crítico que afecta la salud.

DEGRADACIÓN POR ENVEJECIMIENTO

Ensayo en autoclave

El crisotilo en ambiente natural se degrada con el tiempo debido a la acción de diferentes agentes que se desarrollan en la corteza terrestre. El ensayo de envejecimiento que se utilizó en esta etapa, es similar al aplicado a los materiales cerámicos. Permite observar los cambios morfológicos desarrollados durante un prolongado espacio de tiempo en el mineral, simulando las condiciones del ambiente exógeno. Las muestras se ensayaron a pH neutro, alcalino y ácido.

A pH neutro, y luego de ser sometidas al ensayo de autoclave, las fibras mostraron cambios morfológicos relacionados con fracturas perpendiculares a la elongación de las mismas (Figura 9.a), reducción de tamaño y cambios en la resistencia, generando un enlace natural de diferentes tamaños. Finalizado el ensayo se observó una leve acidificación del líquido. Como resultado de este cambio se pudieron reconocer residuos férricos (Figura 9.b), generados por la movilización del hierro contenido como impureza en las fibras de crisotilo, principalmente hematita y goetita. Estos minerales fueron determinados por DRX.

En pH alcalino, al igual que en el ensayo anterior, las fibras modificaron su morfología, observándose disgregaciones (Figura 9.c) y reducciones de tamaño. A su vez no se reconocieron cambios mineralógicos o de coloración de las fibras, ni residuos generados durante todo el tiempo de ensayo.

En medio ácido, las fibras presentaron signos de corrosión y modificaciones en la morfología. El cambio de coloración fue significativo y adoptaron tonalidades amarillentas-rojizas. Esto es debido a la lixiviación del hierro presente como impureza en el crisotilo que da lugar a la formación de hidróxidos de hierro. La disminución del tamaño de las fibras fue sustancial, llegando al orden de los micrones, aunque un pequeño porcentaje de fibras mayores resistieron al ensayo y mantuvieron tamaños que superan el mm. A su vez la morfología de las fibras se modificó, no presentaron la rigidez inicial, se curvaron y entrelazaron de manera natural (Figura 9.d).

En la Tabla 4, se muestra la variación de los tamaños de las fibras. Los tamaños en los tres ensayos se redujeron tanto en longitud como en ancho. El desvío estándar supera en algunos casos los valores promedios, relacionado a la heterogeneidad de tamaños de las fibras. A pH ácido adquieren valores muy pequeños no superando 0,5 mm en promedio. A pH neutro las fibras redujeron su longitud promedio un 83 % con respecto a las naturales.

Tabla 3. Tabla de variaciones de tamaño de las fibras durante el tratamiento de dispersión por aire.

Tiempo de exposición/T (°C)	Naturales		20' (300°)		20' (600°)	
Largo-Ancho (mm)	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho
Promedio	6,5	0,64	3,11	0,13	3,63	0,13
Desvío Estándar	1,2	0,15	1,06	0,06	1	0,09

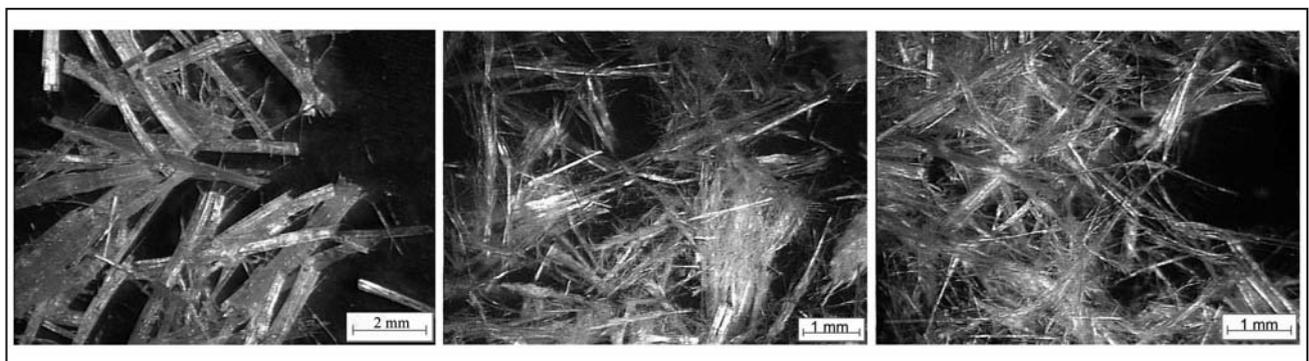


Figura 8. Dispersión por aire. 8.a: Paquetes de fibras naturales de crisotilo, pre tratamiento. 8.b: Fibras calcinadas a 300° y 20' y 8.c: 600° y 20'. Se observa separación de fibras a partir de los paquetes densos de las fibras naturales.

Tabla 4. Tabla de variaciones de tamaño de las fibras durante el ensayo de autoclave.

Autoclave	Naturales		pH neutro		pH alcalino		pH ácido	
Largo-Ancho (mm)	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho
Promedio	6,5	0,64	1,06	0,07	0,98	0,06	0,59	0,0051
Desvío Estándar	1,2	0,15	0,71	0,08	0,31	0,08	0,29	0,0028

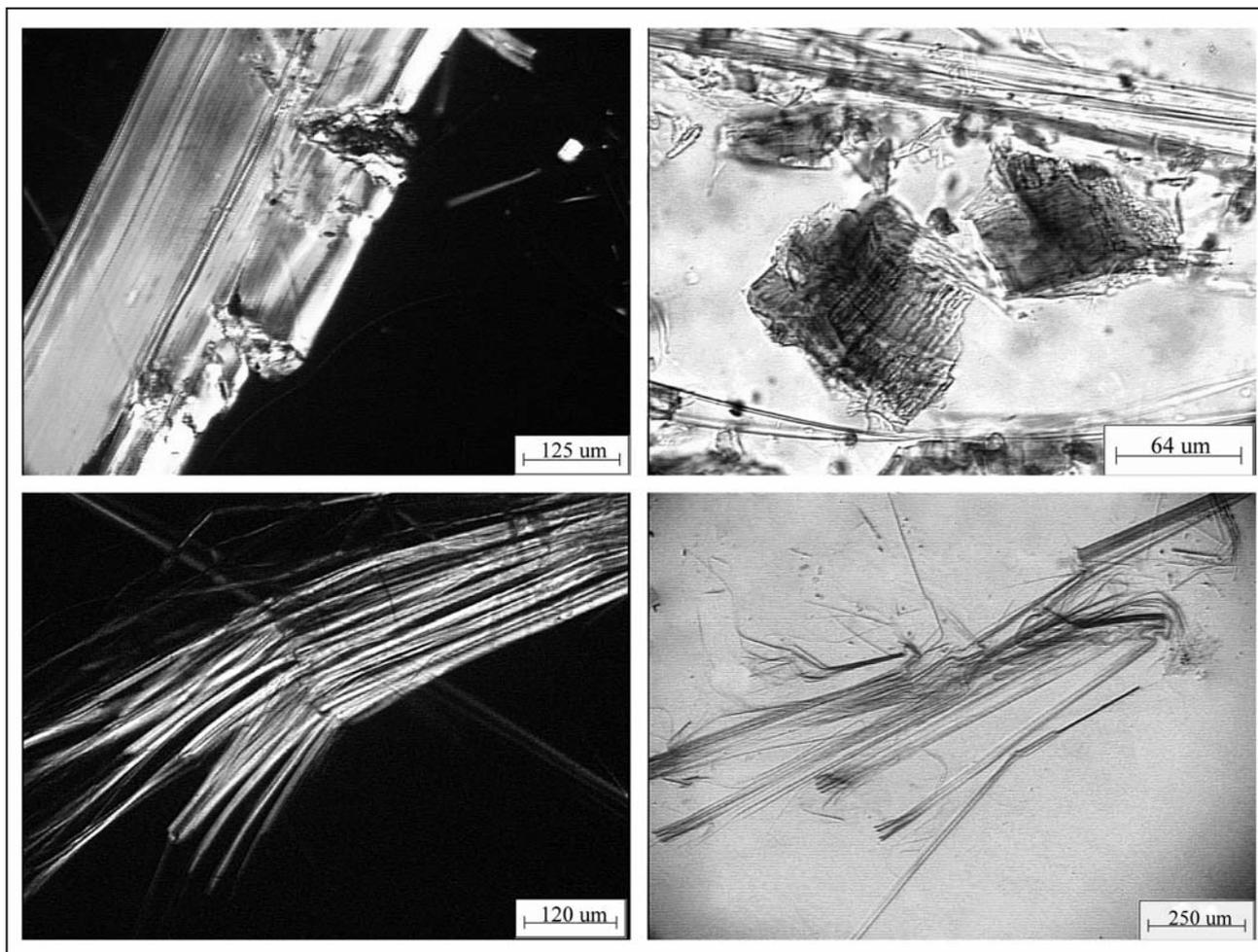


Figura 9. Ensayo en autoclave. 9.a: pH neutro. 9.b: residuo generado a pH neutro. 9.c: pH alcalino. 9.d: pH ácido

En la Figura 10, se observan las fibras sometidas al ensayo de autoclave en pH ácido, analizadas con SEM. Adquieren fragilidad y están corroídas, con un desmenuzamiento de las fibras mayores, generando un material poco homogéneo (Figura 10.a). El mineral se hidroliza y produce una fase no cristalina, que se reconoce como una pátina sobre las fibras y en algunos sectores se distinguen placas íntegramente formadas por este material. En la Figura 10.b se observa en detalle el material generado durante el ensayo en las fibras de crisotilo. En la Figura 10.c, con mayor magnificación, se muestra la fase no cristalina. Esta fue analizada mediante difracción de rayos X, obteniéndose un espectro característico de los materiales amorfos.

En la Figura 11, se comparan los difractogramas del crisotilo en estado natural, sometido al ensayo de autoclave a pH ácido y alcalino. El difractograma A corresponde al mineral en estado natural con las principales reflexiones en 3.64 y 7.32 Å comparables con la ficha ICDD 31-808 (ICDD, 1986).

El difractograma B, a pH alcalino, no presenta variaciones estructurales con respecto al crisotilo original. En el difractograma C (en medio ácido) hay reflexiones no atribuibles al crisotilo, correspondientes al residuo generado durante el ensayo. Estas reflexiones son de muy baja intensidad atribuidas a estructuras poco ordenadas e indefinidas.

CONCLUSIONES

1. A partir de los ensayos realizados, se observó que las fibras de crisotilo presentaron cambios morfológicos y de tamaño.
2. La exposición de las fibras a condiciones ácidas, en un corto período de tiempo, provocaron una modificación en la morfología, reducción del tamaño, pérdida de rigidez y aglutinación. Cuantitativamente,

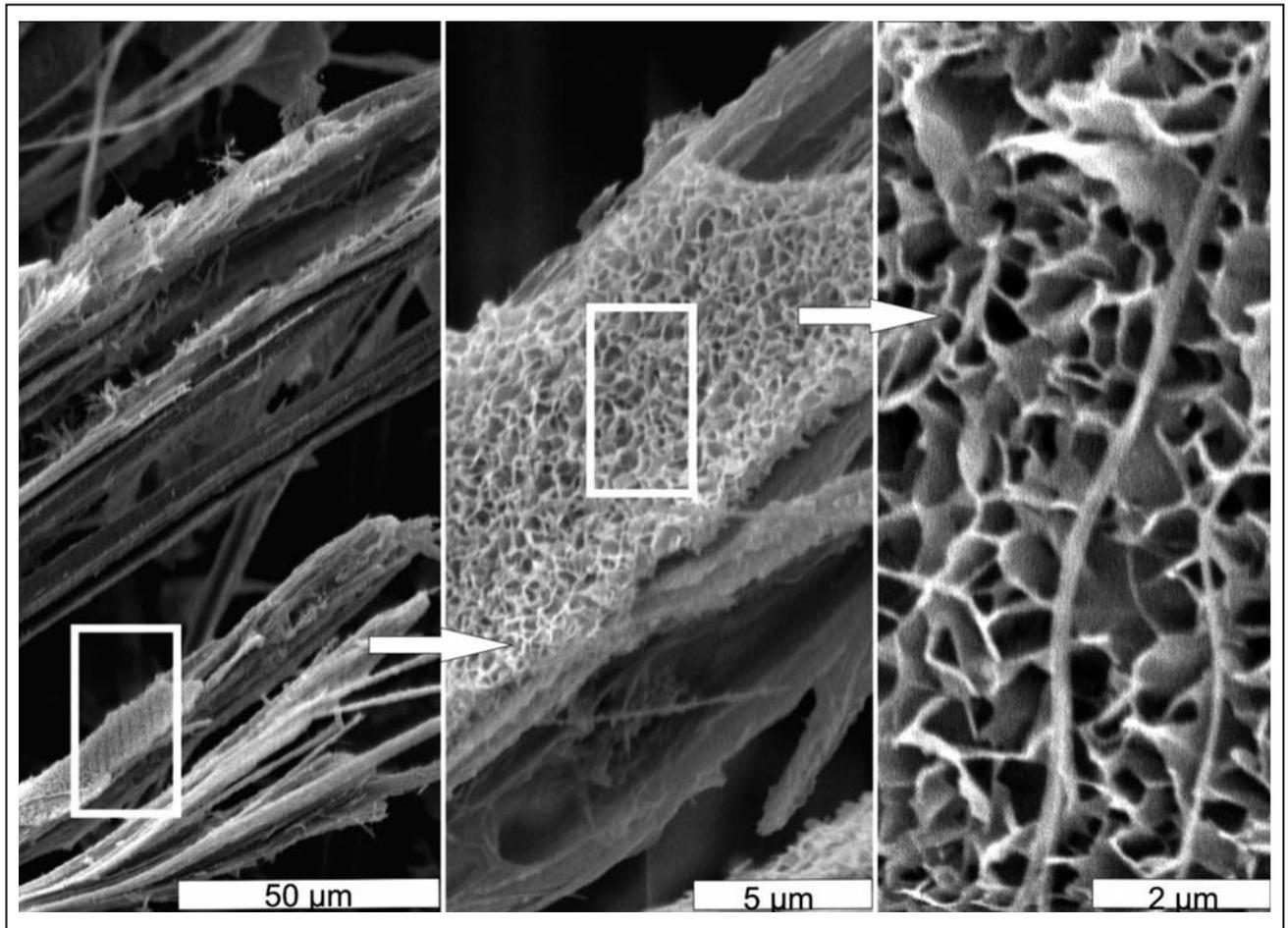


Figura 10. SEM del mineral tratado en autoclave a pH ácido. 10.a: fibras frágiles y corroidas. 10.b: Residuo originado durante el ensayo en la fibras. 10.c: detalle de la fase no cristalina.

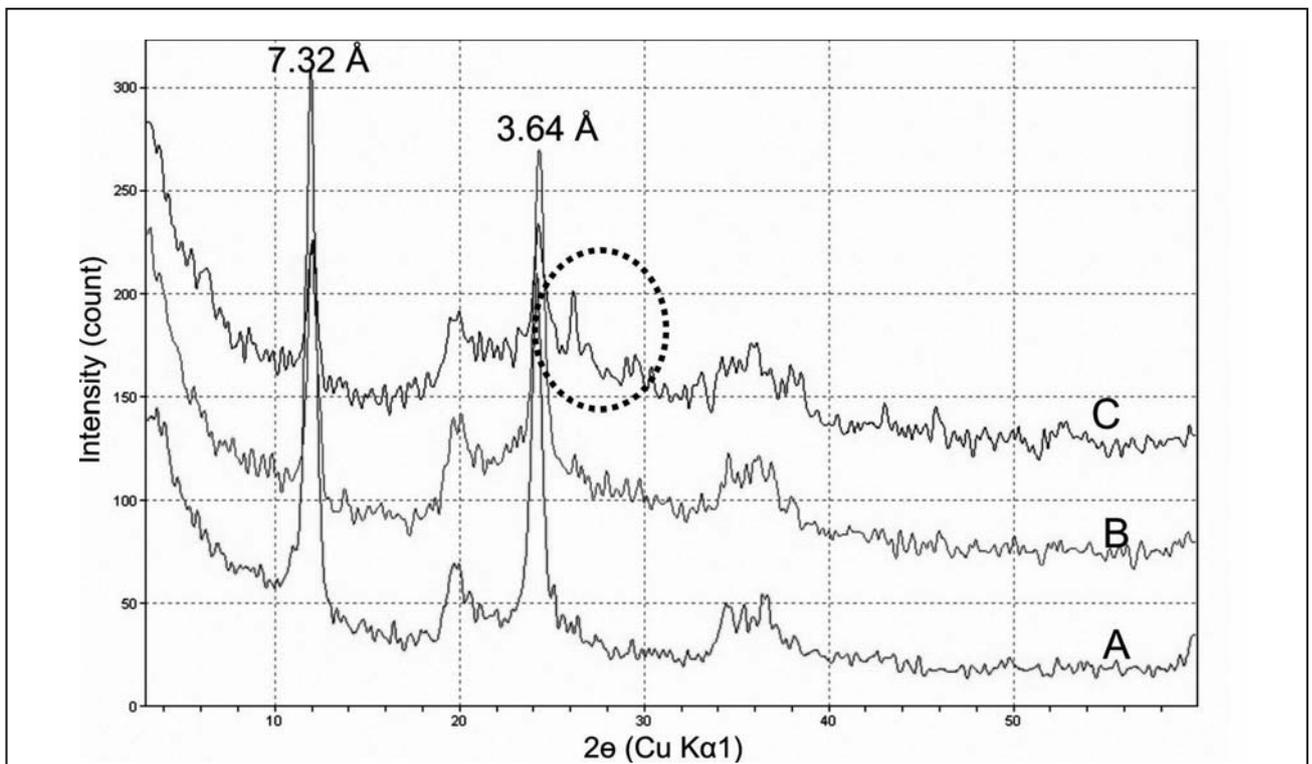


Figura 11. Difractometría de rayos X. A: crisotilo natural. B: pH alcalino. C: pH ácido.

pasadas las 6 hs de ensayo, las fibras redujeron en promedio su largo un 83% y su ancho un 95%.

3. La dispersión en aire cambió la morfología y disminuyó el tamaño de las fibras hasta alcanzar los tamaños críticos que afectan la salud humana. La reducción promedio del largo fue del 52% y 16% de ancho, respecto a las fibras naturales.
4. Al ser sometidas al ensayo en autoclave (simulando una degradación por envejecimiento) se produjeron cambios físicos y químicos. A pH neutro las fibras se fracturaron, redujeron su tamaño hasta llegar a los que son nocivos para la salud humana. A pH alcalino solo se registraron cambios morfológicos. En medio ácido las fibras presentaron signos de corrosión, cambios de tonalidades relacionadas con la desferriización del crisotilo, aumento de la fragilidad y disminución del tamaño. En este último ensayo se

observaron los mayores cambios en cuanto al tamaño, con una reducción en su largo del 83%.

5. Con las técnicas empleadas no es posible estimar un período en el que se producen los cambios en las fibras. Pero el aumento del tiempo, de la temperatura y la rigurosidad de las condiciones químicas generaron transformaciones que sobrepasan los límites de peligrisidad del material analizado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Sur, a la Secretaría de Minería de la Provincia de Córdoba, a la Comisión de Investigaciones de la Provincia de Buenos Aires y al CONICET por el apoyo brindado. Agradecemos también la colaboración del Sr. Rodolfo Salomón en la compaginación de las láminas y en el armado y puesta a punto del túnel de acrílico vertical de circulación de aire.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ABÚ SHAMS, K., BOLDÚ, J., TIBERIO G., TABAR A., FERNÁNDEZ INFANTE B. Y LABARTA N. 2005.
Registro de enfermedades respiratorias de origen laboral en Navarra.
Anales del Sistema Sanitario de Navarra, 28 (1): 135-143.
- ANTHONY, J.W., BIDEAUX, R.A., BLADH, K.W. AND NUCHOLS, M.C. 1995.
Handbook of Mineralogy. Silica, Silicates.
Ed. Mineral Data Publishing. Tucson, Arizona. Vol. II. Part 1 and 2: 904 pp.
- BATTISTA R., SPELTINI C., CHOREN H., SOTA J. Y CARRIZO E. 2006.
Reciclado de residuos conteniendo asbestos. Transformación de fibras de asbestos por sinterizado en matriz cerámica.
Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) y de residuos de procesos (RP).
Universidad Tecnológica Nacional, San Rafael, Mendoza. ISBN 950-42-0056-7
- BONALUMI, A. A. Y GIGENA, A. A. 1987.
Relación entre las metamorfitas de alto grado y las rocas básicas y ultrabásicas del departamento Calamuchita, provincia de Córdoba.
Revista de la Asociación Geológica Argentina. 42 (1-2):73-81.
- DOMINGUEZ E. Y ULLMAN R., 1996.
Ecological Tricks made with clays and steel dust pollutants.
Applied clay science, 11: 237-249.
- ESCAIOLA, M.P. 1994.
Faja Ultramáfica de la Sierra Grande de Córdoba entre Inti-Yaco y Ea. San Miguel, dpto. Calamuchita, prov. de Córdoba.
Tesis Doctoral, Hemeroteca de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (inédita), 277 p, Córdoba.
- ESCAIOLA, M.P. 1997.
Evolución metamórfica de la secuencia ofiolítica de la faja ultramáfica occidental de las Sierras Pampeanas de Córdoba entre los 31° 50' y 32°30' de latitud sur. República Argentina.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, 52(3): 322-332.
- HURLBUT, C.S. 1974.
Manual de Mineralogía de Dana.
Ed. Reverté SA. Barcelona. España: 653 pp.
- INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA (ICDD) 1986.
Mineral Powder Diffraction File Data book: 228-229, Swarthmore, Pennsylvania, U.S.A.
- KRAEMER, P., ESCAYOLA, M. Y MARTINO, R. 1995.
Hipótesis sobre la evolución tectónica neoproterozoica de las Sierras Pampeanas de Córdoba (30°40'LS - 32°40'LS).
Revista de la Asociación Geológica Argentina, 50 (1-4): 47-59.
- LUIS, G., HERNÁNDEZ, C., RUBIO C., FRÍAS I., GUTIÉRREZ A. Y HARDISSON A. 2009.
Toxicología del asbesto.
Cuaderno médico forense, 15(57): 207-213.
- ROSS, M. 1981.
The geological occurrences and health hazards of amphibole and serpentine asbestos.
In: Amphiboles and other hydrous pyriboles - Mineralogy. Ed. Ribbe P.H. Mineralogical Society of America. Chapter 6: 279-320.

- VILLAR, M.L. 1975.
Las fajas y otras manifestaciones ultrabásicas de la República Argentina y su significado metalogénico.
2º Congreso Iberoamericano de Geología Económica, 3: 135-156, Buenos Aires.
- VILLAR, M.L. 1985.
Las Fajas Ultrabásicas Argentinas, tipos de ultramáficas y Metalogenia.
4º Congreso Geológico Chileno, Actas, 4-44: 610-633. Antofagasta, Chile.
- WICKS, F.J. 1975.
Mineralogy, chemistry and crystallography of chrysotile asbestos.
In: Short course in mineralogical techniques of asbestos determination. Mineralogical Association of Canada. Quebec. Ed. Ledoux R.L. Section I. Part B: 35-78.
- WICKS, F.J. AND WHITTAKER, E.J.W. 1975.
A reappraisal of the structures of the serpentine minerals.
The Canadian Mineralogist. 13, 227-243.
- WICKS, F. Y O'HANLEY, D. 1988.
Serpentine minerals: structures and petrology.
En: Bailey S.W (Ed) Hydrous phyllosilicates (exclusive of micas). Reviews in Mineralogy 19: 91-167.
- WINCHELL, A.N. 1933.
Elements of optical mineralogy. An introduction to microscopic petrography. Part. II. Description of minerals.
Ed. John Wiley & Sons, Inc. London: 459 pp.

INSTRUCCIONES PARA AUTORES

La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente publica: Artículos Originales, Artículos Invitados, Comunicaciones cortas, 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 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.
- 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 correo electrónicos 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 Comunicaciones Cortas no deberá superar las 3 carillas y en el resto de las situaciones mencionadas la extensión no deberá superar a 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 $\frac{Sy}{Xm}$
- Aquellas ecuaciones explícitamente referenciadas en el texto deben numerarse sucesivamente al lado derecho, entre paréntesis.
- 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 anteceder a los símbolos, 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, etc., presentes en el texto, las que llevarán numeración arábiga correlativa por orden de aparición. Las mismas 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.
- Las figuras será 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 las deberá enviar como archivos individuales en uno de los formatos aceptables (.tif, .jpg, .pdf o .eps). Se deberán limitar, como máximo, a una caja de 15 x 23 cm, debiendo considerar el espacio ocupado por el epígrafe. No se aceptan archivos incluidos en documentos de otros formatos, como Word o PowerPoint, por ejemplo.

- 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, y tener una resolución mínima de 300 dpi. Deben ser enviadas como archivos .tif o .jpg. 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.
- Las figuras delineadas o dibujos deben ser contrastados, claros y con una resolución mínima de 300 dpi.
- 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.
- Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente después de la misma. 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 tablas deben ser remitidas en páginas separadas, indicando su ubicación dentro del texto.
- 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

- Cuando el autor cite en el artículo enviado un párrafo, frase o contenido de cualquier tipo, procedente del trabajo de otro autor o autores, sea un libro, artículo de revista o cualquier otro documento, el mismo se deberá indicar en itálica y entre comillas y la cita entre paréntesis.
- 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 trabajo 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 tres autores se usará et al. (en itálica, no 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.
- Cuando los autores del trabajo citado en el texto sean más de dos, se indicará Casio et al. (1980).
- En el caso de citar un párrafo o frase de otro trabajo, la cita deberá aparecer entre paréntesis 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. Re-assessing 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) 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 01-11-2011):

Para Argentina: Gastos de envío incluidos.

- Compra de número vigente: **230** Pesos
- Compra de número atrasado: **190** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **90** Pesos por artículo

Para el exterior: Gastos de envío no incluidos.

- Compra de número vigente: **55** Dólares
- Compra de número atrasado: **40** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **25** Dólares por artículo

PRECIOS DE SUSCRIPCIÓN (Desde 01-11-2011):

Para Argentina: Gastos de envío incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **230** Pesos
- Suscripción Instituciones: **920** Pesos
- Compra de número atrasado: **190** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **90** Pesos por artículo

Para el exterior: Gastos de envío no incluidos.

- Suscripción anual: un número.
- Suscripción normal: **55** Dólares
- Suscripción Instituciones: **220** Dólares
- Compra de número atrasado: **40** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **25** Dólares por artículo **1**

Envíos fuera de Argentina: se añadirán gastos de envío a los precios anteriormente señalados. Ver tarifas de correos en: www.correoargentino.com.ar

Se pueden enviar los números completos de la Revista por correo electrónico en formato .pdf en cuyo caso, no se cobran gastos de envío.

Quienes quieran asociarse a la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería encontrarán información a tal efecto en www.asagai.org.ar

Los Socios de ASAGAI reciben gratuitamente y sin cargo alguno la revista.

10^o Simposio de Geología Aplicada
a la Ingeniería y al Ambiente

CORDOBA
Carlos Paz. 15, 16 y 17 de agosto de 2012




Más información en
www.asagai.org.ar
simposio@asagai.org.ar



ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

La Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería (ASAGAI), Grupo Nacional Argentino de la Internacional Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), se complace en invitarle a participar del Simposio que tendrá lugar los días 15, 16 y 17 de agosto de 2012 en la Ciudad de Villa Carlos Paz. El mismo permitirá el intercambio de ideas y experiencias así como tomar conocimiento sobre el estado del arte en los diversos temas que se abordarán durante su realización.

Además se ha previsto la entrega del Premio Horacio V. Rimoldi, máxima distinción otorgada por la Asociación.

Temario

- Agua subterránea
- Aspectos geológico ingenieriles en la construcción de obras
- Cartografía temática
- Casos de obras
- Conservación de la roca ornamental
- Contaminación y degradación de recursos naturales
- Enseñanza de la geología aplicada a la ingeniería
- Estudios geotécnicos
- Evaluación ambiental de planes, proyectos y obras.
- Geoindicadores.
- Geología ambiental.
- Geoquímica aplicada
- Gestión integrada de recursos hídricos
- Hidrología superficial
- Materiales de construcción.
- Ordenamiento territorial.
- Peligros geológicos.
- Recuperación de espacios degradados.



ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA



CONFERENCIA SOBRE PROBLEMAS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS Y ASPECTOS AMBIENTALES RELACIONADOS CON EL PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS DE MONTAÑA

San Miguel de Tucumán, 16 al 18 de mayo de 2012

La Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería (ASAGAI), Grupo Nacional Argentino de la Internacional Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), y la Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica (SAIG), Grupo Nacional Argentino de la Internacional Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), y de la International Society for Rock Mechanics (ISRM) se complacen en invitarle a participar de la Conferencia que tendrá lugar los días 16, 17 y 18 de mayo de 2012 en la ciudad de San Miguel de Tucumán, Argentina.

La misma permitirá el intercambio de ideas y experiencias así como tomar conocimiento sobre el estado del arte en los diversos temas que se abordarán durante su realización.

TEMAS

- Aspectos ambientales e integración paisajística
- Caídas de roca y suelo
- Deslizamientos en masa
- Estabilización de taludes naturales y artificiales
- Estudios de campo
- Flujos
- Monitoreo de deslizamientos
- Obras de estabilización de excavaciones y terraplenado
- Peligros asociados
- Proyectos de estabilización

DIRECCIÓN ELECTRÓNICA DE CONTACTO

conferenciadeslizamientosmt@gmail.com

PROGRAMA

El programa de actividades tiene previsto que los días miércoles 16 y viernes 18 se desarrollen actividades en sala, mientras que el jueves 17 tendrá lugar una excursión técnica a Taquí del Valle.

PRESENTACIÓN DE TRABAJOS

Se recibirán hasta el 9 de abril trabajos relacionados con la temática de la Conferencia, los que junto con las presentaciones de los conferencistas especialmente invitados integrarán el CD del evento.

INSTRUCCIONES PARA AUTORES

Se deberán consultar la sección Publicaciones de la página Web de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería (www.asagai.org.ar)

Copyright
© Editorial ASAGAI. 2011
Printed in Argentina

Se terminó de imprimir en Noviembre de 2011