

Número 20 • 2004

ISSN 0326-1921

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



Publicación Oficial de la

ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

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



Publicación Oficial de la

ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

Número 20 • 2004

ISSN 0326-1921



0326-1921

COMISIÓN DIRECTIVA

PRESIDENTE	<i>Carlos Alberto Di Salvo</i>
VICEPRESIDENTE	<i>Horacio V. Rimoldi</i>
SECRETARIO	<i>Maria Beatriz Ponce</i>
PROSECRETARIO	<i>Jorge Eduardo Caló</i>
TESORERO	<i>Alfredo N. Del Mónaco</i>
PROTESORERO	<i>Ricardo DuBois</i>
VOCAL TITULAR	<i>Maria Alejandra González</i>
VOCAL TITULAR	<i>Roberto Kokot</i>
VOCAL TITULAR	<i>Rubén O. Cuesta</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Adrián A. Silva</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Martín Guichón</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Ángel Marcos</i>
REVISORES DE CUENTAS	<i>Jorge J. C. Colombo</i> <i>José Luis Guerrero</i> <i>Guillermo E. Turazzini</i> <i>Fernando Díaz</i>

REVISTA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA Y AL AMBIENTE

DIRECTOR *Dr. Horacio V. Rimoldi*

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Jorge O. Codignotto
Dr. Jorge Eduardo Caló
Ing. José Luis Guerrero
Dr. Armando C. Massabie
Dr. Ricardo Mon
Dr. Felipe Rivelli
Dr. Jorge Santa Cruz
Ing. José Speziale
Ing. Oscar Vardé
Dr. Bernardo Zakalik

DELEGADOS REGIONALES (2003 - 2005)

REGIÓN NOROESTE	Titular: <i>Felipe Rivelli</i> Suplente: <i>Juan Carlos Valoy</i>
REGIÓN CENTRO NORTE	Titular: <i>Eliseo Popolizio</i> Suplente: <i>Roberto Torrá</i>
REGIÓN MESOPOTAMIA	Titular: <i>Luis Muñoz</i> Suplente: <i>Eduardo Díaz</i>
REGIÓN LITORAL	Titular: <i>Oscar Albert</i> Suplente: <i>Carlos Canoba</i>
REGIÓN CUYO	Titular: <i>Bernardo Zakalik</i> Suplente: <i>Rodolfo Cantarelli</i>
REGIÓN CENTRO	Titular: <i>Alberto E. Rusculleda</i> Suplente: <i>Juan Carlos Malecki</i>
REGIÓN PATAGONIA SUR	Titular: <i>Nestor Hirtz</i> Suplente: <i>Mario Grizinik</i>



EDITORIAL

Razones de organización motivan cambios en la estructuración de la Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente que indudablemente contribuirán a mejorar la misma.

El cambio principal es la constitución de un nuevo Comité Editorial, formado por distinguidos colegas, con más facultades para asesorar a la Dirección de la Revista única responsable de la conducción. Con este cambio se espera lograr que los distintos temas publicados cuenten con una revisión autorizada y exhaustiva, que esté en plena concordancia con la especialización de cada artículo.

También se han modificado algunos párrafos de las Instrucciones a los Autores frente a limitaciones impuestas anteriormente por algunos de sus artículos, razón por la que se sugiere tomar en cuenta dichas variaciones que habrán de facilitar la edición de los trabajos a ser publicados en los próximos números de nuestra Revista.

Cabe señalar que debido a los cambios mencionados y al hecho de que la Revista se edita y se imprime en un nuevo taller gráfico, ésta presenta algunos cambios que esperamos que los señores asociados sepan apreciar. Este cambio de edición e

impresión, decidido por la Comisión Directiva de ASAGA, fue impuesto por razones del alto costo que la misma presentaba anteriormente. Esperamos, asimismo con estas decisiones, que en lo sucesivo se pueda ampliar la capacidad de publicación de los trabajos.

Descontamos la comprensión de los asociados a los argumentos invocados dado que indudablemente habrán de redundar en beneficio de todos

Queremos aquí agradecer a todos los socios que nos acompañan durante tantos años y los nuevos que se han incorporado en 2004. La Revista es un medio de difusión muy importante en nuestro medio, ya que por ella muchos especialistas: geólogos e ingenieros que trabajan en la práctica de la actividad puedan hacer conocer nuevos proyectos y apartes; asimismo docentes investigadores dedicados a la actividad académica, canalizan sus urgentes necesidades de publicar, en definitiva todos los asociados en general se benefician con los aportes que la misma realiza.

Instamos en definitiva a sostener este esfuerzo, esperando un mejor año 2005 para todos Ustedes

El Director

Las opiniones vertidas en los trabajos son de exclusiva responsabilidad de los autores.

INSTRUCCIONES PARA AUTORES

En atención al procedimiento de arbitraje, se solicita a los autores leer y seguir estrictamente las siguientes instrucciones:

- La versión original, en dos (2) ejemplares, se enviará en papel blanco tamaño A4 (21 x 29,7 cm) y en disquetes o CD, editados en **Microsoft Word**.
- El título del artículo debe ser conciso, informativo e indicativo del contenido del mismo y escrito sin utilizar abreviaturas; impreso en letra Times New Roman punto 12, mayúscula, negrita y centrado, sin subrayar.
- La dirección postal y electrónica del autor al que se deberá dirigir la correspondencia seguirá a continuación del nombre, separado por una interlínea. Dicho autor deberá ser identificado con un superíndice.
- Es obligatorio el uso del sistema métrico decimal.
- Se debe incorporar, en forma consecutiva, el Resumen, el Abstract, en inglés, francés o portugués, y las Palabras Clave en un número entre 3 y 5.
- 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 espacios entre párrafos. Se conservarán, no obstante, 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 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.
- En el caso que el idioma del trabajo no sea español, la primera sección será el abstract, en el idioma del que trate, a continuación el resumen en español y tras ello el desarrollo.
- Cuando una abreviatura aparezca en el texto por primera vez, deberá ser aclarada en forma completa entre paréntesis. No se deben utilizar notas al pie.
- Las expresiones matemáticas deben ser elaboradas con el procesador de texto y formar parte del mismo. Las ecuaciones deben estar centradas y deben estar 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:)}}).
- 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 caja. En el texto se citarán como (Fig.), o (Figs.) en plural.
- En los ejemplares impresos que se remitan para ser sometidos al proceso de arbitraje, se deberá indicar la posición de las figuras en el texto e incluirlas por separado a continuación del mismo. Se deberán limitar, como máximo, a una caja de 15 x 23 cm, debiendo tener en cuenta el espacio ocupado por el epígrafe. No se aceptarán plegables. Las figuras no se deben incluir como parte del archivo de texto. Se deben remitir en un archivo separado formato TIF, JPEG, DWG o EPS.
- En el caso que los autores incluyan mapas y/o gráficos que requieran ser plegables para el tamaño de la revista, los costos derivados de su impresión correrán por cuenta de él o los autores.
- Las tablas deben ser remitidas en páginas separadas, indicando su ubicación dentro del texto.
- En el caso de mapas, los mismos incluirán las coordenadas geográficas, escala gráfica y norte. Deberán tener referencias adecuadas a los símbolos, rastras, etc. utilizados.
- Las fotografías, incluidas como figuras, deberán ser pancromáticas, de buena resolución y contraste debiendo ser enviadas como archivos TIF o JPEG. No se aceptarán fotografías en color. Las fotografías en color serán reproducidas en escala de grises salvo que el o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos. Los originales deben ser enviados con la versión final del trabajo. Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente después de la misma. Se usará letra punto 12, a un interlineado. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos. Se recomienda que las leyendas sean cortas y concisas.
- 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 las citas totalmente entre paréntesis no se usará coma para separar el autor del año (Caminos 1956). 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: CARRANZA TORRES, C.M., 1991. Cálculo analítico de redes de filtración. Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería Volumen VI: 250-267.
- Los artículos en textos: MATEOS RUIZ, R.M. Y M. FERRER GIJÓN, 1994. Methodology for landslides hazard map 1:1 0,000 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, Volume III: 2059-2064, Rotterdam.
- Los libros de textos: DEARMAN, W.R., 1991. Engineering geological mapping. Butterworth-Heinemann Ltd, 387 pp. Oxford.

El Director no se hará responsable por ilustraciones, tanto figuras como fotografías, que no se ajusten a estas normas o cuya calidad sea deficiente



EVALUACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS MEDIANTE UNA APROXIMACIÓN PARAMÉTRICA EN EL PARTIDO DE GENERAL PUEYRREDON, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA.

del Rio, J. L. ^(1,4), Cionchi, J. L. ^(1,2), González, J. ⁽¹⁾, Martínez Arca, J. ^(1,3) y Bó, M. J. ⁽¹⁾

Resumen

El presente trabajo aborda la implementación de una metodología de corte paramétrica para el análisis y evaluación regional del riesgo de contaminación de los acuíferos del Partido de General Pueyrredon. El objetivo primario de este estudio es aportar herramientas de decisión a los programas de protección del recurso.

Este estudio, de corte predominantemente metodológico, ensaya un modelo de generación de criterios y mapeo del riesgo de contaminación de acuíferos basado en el Sistema de Mapeo de Santander, en el cual distintos parámetros relevantes para la definición de vulnerabilidad o de la peligrosidad son mapeados y ponderados, y sus unidades valoradas, clasificadas en función del mayor o menor grado de afectación potencial del acuífero.

Así se construyen mapas de vulnerabilidad, peligrosidad y riesgo cuyas unidades presentan una gradación de cinco categorías, de mayor a menor susceptibilidad. El modelo resultante ha sido validado contrastándolo con datos emergentes de 409 pozos de captación con resultados convincentes.

En particular se advierte que el mapa de vulnerabilidad resulta de suma utilidad para el desarrollo de políticas preventivas mientras que los de peligrosidad y riesgo para la implementación de programas correctivos.

Palabras clave: Peligrosidad, Vulnerabilidad, Riesgo, Contaminación, Agua Subterránea

Abstract

This work deals with the development, at regional scale, of a methodology to analyse and evaluate the pollution risk of groundwater in the County of General Pueyrredon. The aim is to contribute to the protection programs for water resources.

Entregado: 29 de Agosto de 2003 • Aceptado: 15 de Diciembre de 2003

⁽¹⁾ Grupo de Geología Ambiental, CGCyC, UNMDP

⁽²⁾ OSSE

⁽³⁾ CONICET

⁽⁴⁾ Centro de Geología de Costas y del Cuaternario, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata, Funes 3350, Nivel + 1,80, 7600, Mar del Plata. Correo electrónico: jldr@mdp.edu.ar

The scope of this paper is mainly methodological and the applied parametric methodology is an adaptation of the Santander Map System methodology. The variables or units used represent the mapping parameters. They reflect the relative degree of susceptibility of underground water to pollution, allowing a scale standardization.

Five qualitative categories were generated for vulnerability, hazard and risk maps. These maps constitute a helpful tool for planners, decision-makers and managers of water resources. The vulnerability map is in itself a suitable tool for preventive policies development. Hazard and risk maps are valuable to corrective programs.

1. INTRODUCCION

El presente trabajo aborda desde una perspectiva regional (Escala 1:50.000), el análisis y evaluación de los procesos que concurren para la generación de un riesgo de contaminación del agua subterránea en el partido de General Pueyrredón (Fig. 1). Esta zona ha sido el asentamiento permanente de pobladores y actividades económicas cada vez más complejas, desde antes del año 1874, fecha formal de fundación de la ciudad de Mar del Plata.

Desde aquel momento un estilo de desarrollo económico creciente ha sido el signo predominante de la región, en sus orígenes con la preponderancia de las actividades ganaderas e industrias relacionadas, seguidas luego por una villa balnearia junto a actividades pesqueras, hasta la urbe actual con actividades ampliamente diversificadas y una población estable del orden de 650.000 habitantes.

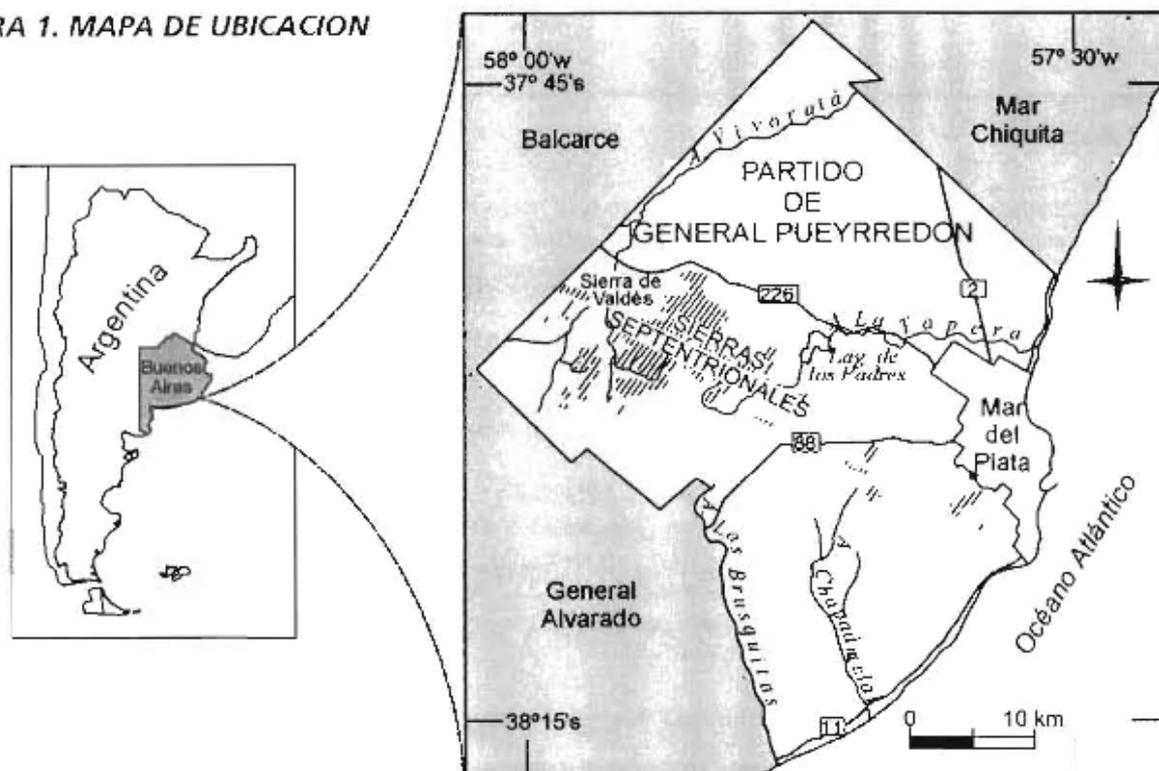
Acompañando este desarrollo la explotación de las aguas subterráneas, única fuente de provisión de este recurso,

ha estado signada por distintas crisis. En los años 50' y '70 y como producto de la sobre-explotación del acuífero, lo que originó una intrusión marina con la consecuente pérdida de pozos y calidad de aguas, lo que obligó a la construcción de nuevos pozos y sistemas de distribución.

En la actualidad los riesgos de contaminación de las aguas subterráneas, como resultado de malas prácticas en la construcción de pozos de explotación (domiciliarios, agrícolas, industriales), el aporte de agroquímicos y biocidas y la disposición "in situ" de residuos sólidos urbanos, son los desafíos a resolver.

En este sentido el presente trabajo, de corte paramétrico, intenta un aporte metodológico y conceptual que culmine en la presentación de un mapa operacional, cuyo propósito es contribuir al planeamiento, uso y elaboración de programas de protección del recurso hídrico subterráneo.

FIGURA 1. MAPA DE UBICACION



2. MARCO CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES

Según Vrba y Zaporozec (1994) el concepto de "vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación" habría sido introducido por Margat en 1968. En Sudamérica es innegable la influencia de los trabajos de Foster et al. (1987), Lewis et al. (1988), Foster e Hirata (1991) y los trabajos de la escuela catalana de Custodio (1996).

Foster et al. (1987) definen el riesgo de contaminación como "la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial para la Salud (OMS) para la calidad del agua de consumo humano".

Este riesgo es resultado de la concurrencia del peligro que es, será o probablemente sea impuesto al subsuelo como consecuencia de las actividades humanas y de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero ante la contaminación. Una vulnerabilidad que será definida como la posibilidad de infiltración de eventuales contaminantes a través de la zona no saturada.

En tal sentido dos parámetros adquieren principal importancia: la recarga y la potencia de la zona no saturada. El primero por tipo, calidad, y cantidad del aporte y el segundo por los procesos de atenuación y/o retardación del acceso de contaminantes al acuífero. Estos dos factores interactúan entre sí en términos de movilidad y persistencia.

En la última década en Argentina se han sumado numerosos aportes con diferentes aproximaciones metodológicas que merecen destacarse como los trabajos realizados por Blarasin et al. (1995), Fernández y Arensburg (1994), Tineo et al. (1995), Castro Rocha et al. (1996) y Stampone (1997). En la provincia de Buenos Aires pueden mencionarse los aportes de Lexow et al. (1994), Hernández et al. (1995), González Arzac y Barbaggio (1996), y González et al. (1997).

3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Ubicación y Clima

La zona de estudio se encuentra situada en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, entre los paralelos 37° 41' 55" y 38° 14' 47" Sur, y los meridianos 58° 2' 48" y 57° 31' 1" Oeste. Abarca una superficie de 1453 km², que corresponde a la jurisdicción del Partido de General Pueyrredon cuya ciudad principal es Mar del Plata.

El clima es de tipo "templado-húmedo", según el esquema de Köppen o del tipo "subhúmedo-húmedo, mesotermal, con pequeña o nula deficiencia de agua", según el método de Thornthwaite (en Burgos y Vidal 1951).

Los registros hidrometeorológicos de una decena de localidades ubicadas dentro del Partido de General Pueyrredon y zonas adyacentes, indican que el período más lluvioso coincide con el primer trimestre del año, mientras que el más seco resulta esencialmente julio-agosto y en menor proporción agosto-setiembre (Cionchi 1997).

En cuanto a las temperaturas, los valores se caracterizan una relativa homogeneidad regional, con una media anual entre 13 y 14 °C, con un leve decrecimiento desde el litoral marítimo hacia el interior.

La resolución de los balances hídricos, mediante el método de Thornthwaite, ha permitido estimar que el "exceso de agua" promedio, destinado a la recarga de los acuíferos y al escurrimiento fluvial resulta aproximadamente el 17 % del total de las lluvias, que para el caso de la Estación Mar del Plata-Mar del Plata Aero (período 1951-1990) alcanzaría a unos 153 mm anuales (Cionchi 1997).

Aspectos geológico-geomorfológicos del área de estudio

El área presenta un esquema estratigráfico sencillo, conformado por un basamento cristalino aflorante en la Sierra de Valdés, sobre el que se apoyan en discordancia estratos eopaleozoicos cuarcíticos de la Fm. Balcarce (Dalla Salda e Iñiguez 1978), y finalmente cubriendo toda la región se disponen, en relación discordante, sedimentitas terciarias y cuaternarias.

Las Sierras Septentrionales constituyen un sistema de montañas de bloques, separados por fallas que se intersectan entre sí (rumbos NO-SE; NE-SO y E-O) con predominio de fracturación directa, desplazamiento vertical dominante y basculación suave (Icruggi et al. 1974).

Al norte del eje serrano se encuentra la denominada llanura eólico-fluvial (del Río et al. 1995), comprendiendo mayoritariamente el interfluvio entre los arroyos La Tapera y Vivoratá, que presentan valles apenas pronunciados. Este ambiente se caracteriza por incluir numerosos bajos alargados a subredondeados, que en general se interconectan en épocas de lluvia.

En la zona sur predominan las lomas con control tectónico y la llanura ondulada (del Río et al. 1995). Los flancos de los valles son de pobre expresión. Los cauces suelen ser angostos y poco profundos, en algunos casos con bajos elongados en sus nacientes. Las divisorias son amplias.

Marco hidrogeológico regional

La región se caracteriza por la presencia de las unidades hidrogeológicas Basamento Impermeable y Complejo Clástico Permeable diferenciadas por Sala (1975).

El Basamento Impermeable aflora esencialmente en coincidencia con las Sierras Septentrionales, en una franja de ancho variable con orientación ONO-ESE. Está conformado por rocas del basamento cristalino y las sedimentitas eopaleozoicas de la Fm Balcarce.

El Complejo Clástico Permeable, está representado, esencialmente por la Sección Epiparaniana, ya que de las restantes sólo se tienen algunas referencias aisladas y de carácter indirecto (Ruiz Huidobro 1975, Sala 1975).

La sección Epiparaniana, por sus características hidrogeológicas puede definirse como un sistema unitario multicapa con marcadas anisotropías verticales, determinadas por la alternancia de niveles, en su mayoría lenticulares, con distinta permeabilidad relativa. Las diversas capas no funcionan como verdaderos niveles confinados, pudiéndose reconocer claras interconexiones entre todos ellos. Configura una sucesión medianamente acuífera con intercalaciones acuitardas cuyo comportamiento regional puede ser considerado como homogéneo.

La recarga del sistema acuífero se produce en forma autóctona, a partir de los excesos hídricos generados por las lluvias, parte de los cuales se incorporan por infiltración a través de la zona no-saturada, estando el resto disipado por escurrimiento fluvial.

Características de los procesos de producción, distribución y consumo de agua en la zona de estudio

La ciudad de Mar del Plata cuenta con una población estable de aproximadamente 650.000 habitantes, número que llega a triplicarse en la temporada estival y que condiciona la infraestructura y servicios brindados. Por encontrarse en una zona carente de cursos aprovechables, el agua para consumo, riego e industrias se obtiene del recurso subterráneo. La misma se suministra por medio de redes de distribución sin tratamiento previo, salvo la adición de cloro para mantenerla libre de bacterias y otros organismos durante su recorrido por los conductos.

La red oficial (Obras Sanitarias Sociedad de Estado, OSSE) abastece a más del 75% de la población, el

porcentaje restante se aprovisiona principalmente mediante pozos domiciliarios, especialmente en barrios periféricos, donde además de no contar con el servicio de agua corriente no poseen servicios de cloacas, derivando sus aguas servidas a pozos ciegos ubicados en los mismos predios. Existen otros sistemas locales operados por cooperativas de servicios, y que suministran agua potable a pequeños sectores. El nivel de consumo de agua en la ciudad es actualmente de 400 lt/hab/día, valor que está por encima de la media mundial (estimada en 300 lt/hab/día).

4. METODOLOGIA

El análisis del riesgo de contaminación de acuíferos se evaluó mediante la aplicación de un método paramétrico otorgando pesos y valoraciones. La selección de esta metodología se hizo en función del tipo, características y formato de los datos disponibles.

El esquema metodológico aplicado es una adaptación del Sistema de Mapeo de Santander (Cendrero y Díaz de Terán 1987), que fuera implementado con resultados satisfactorios en distintas propuestas y proyectos de planificación ambiental (del Río et al. 1995). Se utilizó un modelo de datos espaciales raster con celdas de 200 m de lado, utilizando el programa MAC (Bó y Martínez Arca 1993).

El procedimiento general se inicia con la selección de rasgos del ambiente (parámetros) que se juzgan más

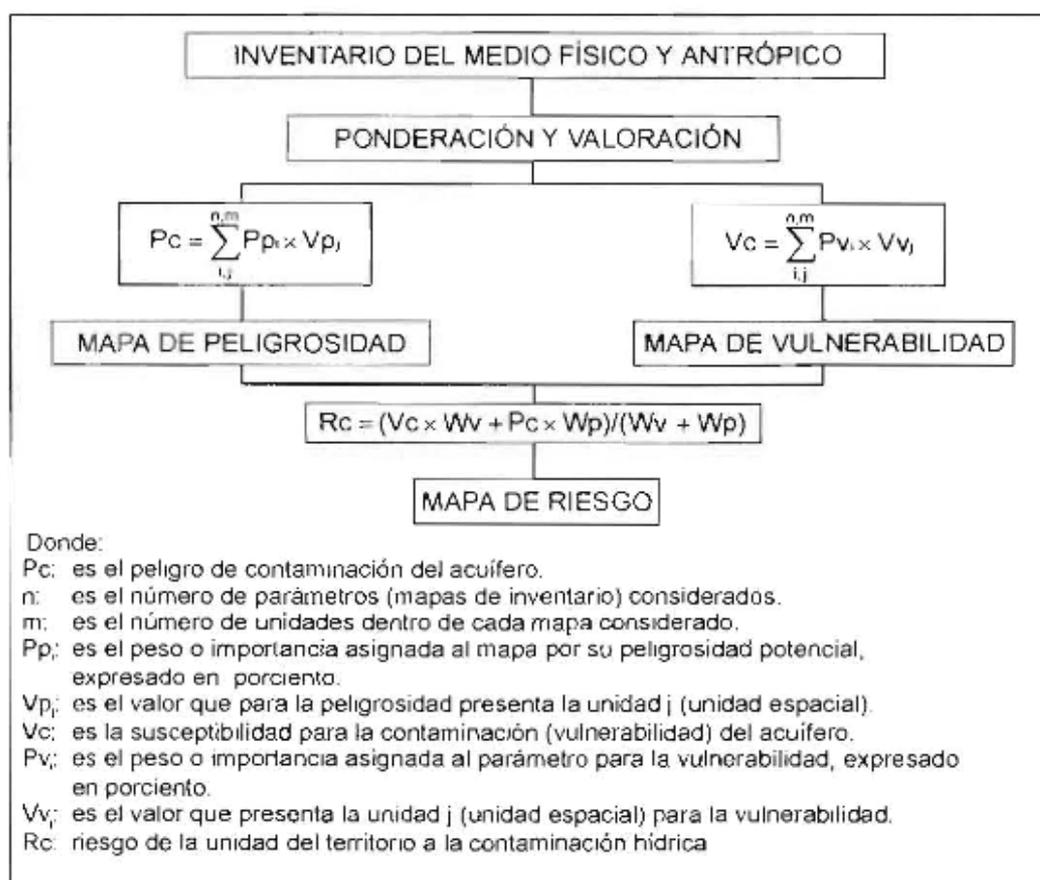
significativos para el estudio de la vulnerabilidad y peligrosidad del agua subterránea. A diferencia de otros métodos paramétricos, en la evaluación se asigna a los factores un multiplicador (identificado con un peso) que refleja su importancia relativa para el análisis de la vulnerabilidad o la peligrosidad (Fig. 2)

A cada intervalo de las variables o unidades temáticas que representan los parámetros mapeados se le asigna un valor (entre 1 y 5) que por un lado refleja el grado relativo de susceptibilidad a la contaminación, y por otro permite la estandarización de las distintas escalas; siendo el 5 el valor más susceptible y el 1 el menor. Se aplica un criterio de exclusión para aquellas unidades donde por diferentes cuestiones no sean esperables procesos de peligrosidad y/o vulnerabilidad.

Posteriormente, los valores son multiplicados por el peso del parámetro, y los productos son sumados para obtener el puntaje numérico final. Este último provee una medida relativa de la vulnerabilidad o peligrosidad, según el caso, de un área comparada con otras, siendo el mayor de los puntajes el que representa al área más vulnerable o peligrosa, según corresponda.

Por último, se establecen coeficientes de ponderación que reflejan la importancia relativa de la peligrosidad y la vulnerabilidad en la determinación del riesgo potencial de contaminación. Este último se obtiene al multiplicar los valores de los primeros por sus respectivos pesos, sumar los productos generados y el resultado dividirlo por la suma de los pesos (ambos deben sumar 100).

FIGURA 2. Esquema Metodológico



Parámetros y criterios de valoración para la peligrosidad y la vulnerabilidad.

Si bien no existe concordancia absoluta entre los distintos autores para la inclusión de los parámetros necesarios para el análisis de la vulnerabilidad, en

general se observa, una mayor aceptación sobre aspectos tales como recarga, cobertura superficial, características de la zona no saturada y saturada, geomorfología, relación agua superficial - agua subterránea. A cada uno de ellos se adjudicaron pesos y valores de acuerdo con su importancia relativa (Tabla 1).

Tabla 1. Pesos y valores para la peligrosidad de contaminación de acuíferos.

Servicios e Infraestructura		Densidad Poblacional		Uso del Suelo	
Peso: 15		Peso: 5		Peso: 80	
UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	VALOR
Sin Recolección de Residuos	5	< a 1 Hab/ha	1	Ganadería	1
Con Recolección de Residuos	4	1 a 5 Hab/ha	1	Agr. Extensiva	3
Recolección de Residuos + Agua Corriente	3	5 a 10 Hab/ha	1	Tur.-Rec.-Pais.	1
Rec. De Residuos + Agua Corriente + Cloacas	Exclusión	10 a 50 Hab/ha	3	Conservación	1
Todos los servicios	Exclusión	50 a 100 Hab/ha	4	Sin Actividad	2
		100 a 200 Hab/ha	5	Residencial	3
		> a 200 Hab/ha	5	Equip.-Com.-Serv.	3
		Escolleras	Exclusión	Industria	4
				Agr. Intensiva	5
				Min. de Suelos	5
				Min. de Rocas	5

De modo semejante se analizaron las acciones humanas potencialmente peligrosas para los acuíferos, resultantes

fundamentalmente del uso del territorio, la cobertura de servicios o la densidad poblacional (Tabla 2).

Tabla 2. Pesos y valores para la vulnerabilidad de contaminación de acuíferos.

Litología		Geomorfología		Esp. No Saturado		Red de Drenaje		Salinidad Agua Sub.	
Peso: 16		Peso: 15		Peso: 60		Peso: 7		Peso: 3	
Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor
Basamento	1	Bajos	5	0 - 5 mbnt	5	1º orden	1	< 500mg/l	5
Ortocuarcitas	2	Llan. Eólico-fluv.	3	5 - 10 mbnt	4	2º orden	2	500-750mg/l	5
Ar.Lim.-Lim.Ar.	5	Valles/Cauces	4	10 - 20 mbnt	3	3º orden	3	750-1000mg/l	5
Fangos	4	Lagunas	5	20 - 30 mbnt	2	4º orden	4	1000-1250mg/l	5
Arenas	5	Lomas	2	30 - 40 mbnt	2	5º orden	5	1250-1500mg/l	5
Escolleras	Exclusión	Frete Serrano	1	> 40 mbnt	1	6º orden	6	> 1500mg/l	4
		Cumbres Planas	2			Interfluvio	1	Escolleras	Exclusión
		Delta	5			Bañado	5		
		Acantilado	1			L. Perm.	5		
		Llan. Ondulada	2			Lag.Temp.	5		
		Médanos	5						
		Playas	1						
		Med-Acan-P.Bol	1						
		Paleoacantilado	1						
		Escolleras	Exclusión						

La vulnerabilidad, peligrosidad y el riesgo son representados por medio de mapas, elaborados teniendo en consideración los factores individuales que determinan la homogeneidad de las áreas estudiadas. Cada uno de los mapas generados está construido sobre la base de cinco categorías: Muy alta, Alta, Moderada, Baja y Muy Baja.

La información disponible, en tipo, contenido y formato

digital, correspondió en gran medida a mapas originados en estudios regionales para planificación ambiental previos (del Río et al. 1995, con actualizaciones efectuadas en 1998).

Los parámetros de vulnerabilidad considerados fueron: espesor de la zona no saturada, geomorfología, litología superficial, salinidad del agua subterránea y red de drenaje.

a) **Zona no saturada:** el criterio general seguido ha sido que a mayor potencia de la zona no saturada menor es la posibilidad de compromiso del acuífero por posibles contaminantes.

b) **Geomorfología:** aquellas unidades geomorfológicas con mayor incidencia en la vulnerabilidad son las que presentan mayor vinculación con la recarga del acuífero.

c) **Red de drenaje:** a menor escurrimiento superficial aumenta la posibilidad de infiltración y eventual transporte vertical de posibles contaminantes. En ambas vertientes, los cursos principales se comportan, en general, como efluentes.

d) **Salinidad del agua subterránea:** habida cuenta que la finalidad de este trabajo es aportar a la preservación de un recurso, se consideraron más vulnerables las aguas de mejor calidad para consumo humano, tomando como indicador primario su contenido salino.

e) **Litología superficial:** el criterio sustentado se basa en que el agua que infiltra al subsuelo es naturalmente descontaminada en algún grado cuando atraviesa el suelo y otros materiales de grano fino de la zona no saturada, aumentando su vulnerabilidad cuando la infiltración se realiza a través de la permeabilidad secundaria de las ortocuarcitas o sedimentos de muy alta permeabilidad (Vrba y Zaporozec 1994).

Por su parte los parámetros utilizados para el análisis de la peligrosidad fueron: uso del suelo, densidad poblacional y servicios e infraestructura.

a) **Uso del suelo:** Se ha considerado en general las actividades hortícolas intensivas, minería e industria presentan los valores más altos peligrosidad.

b) **Servicios e infraestructura:** respondiendo a una lógica lineal a menor cantidad y calidad de servicios e infraestructura aumenta la peligrosidad. En las zonas con todos los servicios y especialmente donde existen infraestructuras para la provisión de agua y cloacas se ha aplicado un criterio de exclusión que implica que la contaminación en estos sectores reflejaría condiciones del pasado y no la concreción de amenazas actuales.

c) **Densidad poblacional:** el criterio seguido es que la amenaza aumenta con la densidad poblacional.

5. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO

El producto del modelo paramétrico para la peligrosidad aplicado muestra que las zonas con más alta peligrosidad (muy alta y alta) potencial de contaminación se localizan en una franja desde el centro al SE del partido y en áreas pequeñas distribuidas en el NE y el SO del área de estudio. Todas ellas coincidentes con usos agrícolas intensivos, zonas de localización de rellenos sanitarios y carentes de servicios (Fig. 3a).

Por el contrario las zonas de menor peligrosidad (muy bajas y bajas) se ubican principalmente en el N y el O del partido, destinadas a la ganadería, el turismo y la recreación (playas y sierras) y áreas de reserva, con baja densidad poblacional (< de 5 hab/ha). Las áreas excluidas corresponden al ejido de la ciudad de Mar del Plata y a la ciudad Batán donde los procesos de peligrosidad actuales se encuentran inhibidos por existir una amplia cobertura de todos los servicios sanitarios (Fig. 3a).

Los sectores de más alta vulnerabilidad resultantes de la aplicación de los criterios previamente expuestos se ubican principalmente en el N del partido coincidente con la llanura eólico-fluvial, a los que se suman los arroyos, las lagunas y los bajos y bañados, donde la profundidad del agua subterránea no supera los 10 m (Fig. 3b).

Las áreas potencialmente menos vulnerables se desarrollan tanto en el O del partido, representadas por las cumbres planas y los frentes serranos, como en una franja paralela a la costa. En ambos casos la profundidad del agua subterránea supera los 20 m (Fig. 3b).

El modelo de riesgo, construido otorgando pesos iguales a cada uno de los mapas antes mencionados, revela como áreas de mayor riesgo potencial de contaminación los cauces de los arroyos, una zona al norte del eje definido por las sierras, el centro del partido y al sudoeste del ejido urbano. En tanto que las áreas de menor riesgo se encuentran representadas por las cumbres planas de las sierras en el O del partido (Fig. 3c).

La validación de estos resultados se realizó sobre 409 pozos, que releva periódicamente la empresa OSSE, distribuidos en toda la extensión del área de estudio. Se ha tomado como indicador de contaminación la presencia de nitratos con tenores superiores a 45 ppm.

Del total de pozos analizados 130 se encuentran en esta condición, de ellos 4 caen en la categoría de Muy Alto Riesgo del modelo, 30 en la categoría Alta, 78 en la Moderada, 17 en la clase Baja y sólo 1 en la clase Muy Bajo Riesgo. De este modo casi el 85% de los pozos con presencia de nitratos superiores al límite que impone la normativa de la OMS se encuentran en los campos de las tres categorías superiores que predice el modelo aplicado (Fig. 4).

Se considera que para mejorar la precisión y eficiencia del mismo se debe aumentar la discriminación de las unidades de agricultura extensiva en función del tipo de producción y la tecnología aplicada. En ese sentido muchos de los casos que caen en la categoría moderada y presentan niveles relativamente altos de nitratos, se corresponden con parcelas en las que se registran sembradíos de papa, la que, en general se considera como una actividad que genera altos lixiviados de

6. CONCLUSIONES

El método paramétrico empleado resulta un medio expeditivo, aplicable y dinámico, si se disponen los datos para su actualización. El tipo de información necesaria para su aplicación no presenta dificultades técnicas ni económicas mayores, estando en general disponibles en los municipios.

La obtención de mapas de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo se constituye, entonces, en una herramienta importante para asistir a planificadores, tomadores de decisiones y administradores del recurso hídrico.

Este sistema de evaluación resulta útil para priorizar esfuerzos en la protección, monitoreo y restauración de acuíferos.

Los mapas de vulnerabilidad son en sí mismo una herramienta idónea para el desarrollo de políticas

FIGURA 3. a) Mapa de peligrosidad, b) Mapa de vulnerabilidad, c) Mapa de riesgo

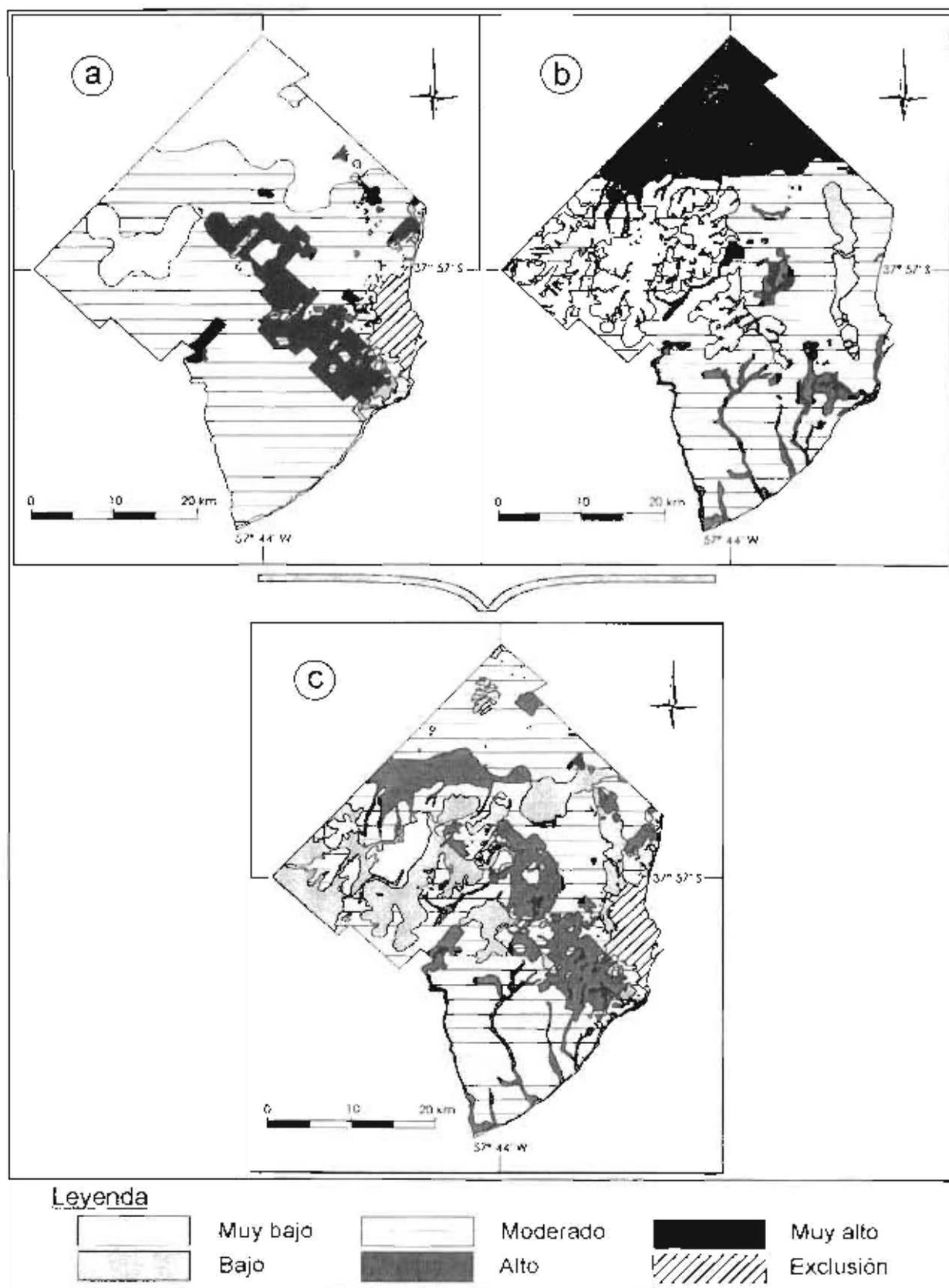
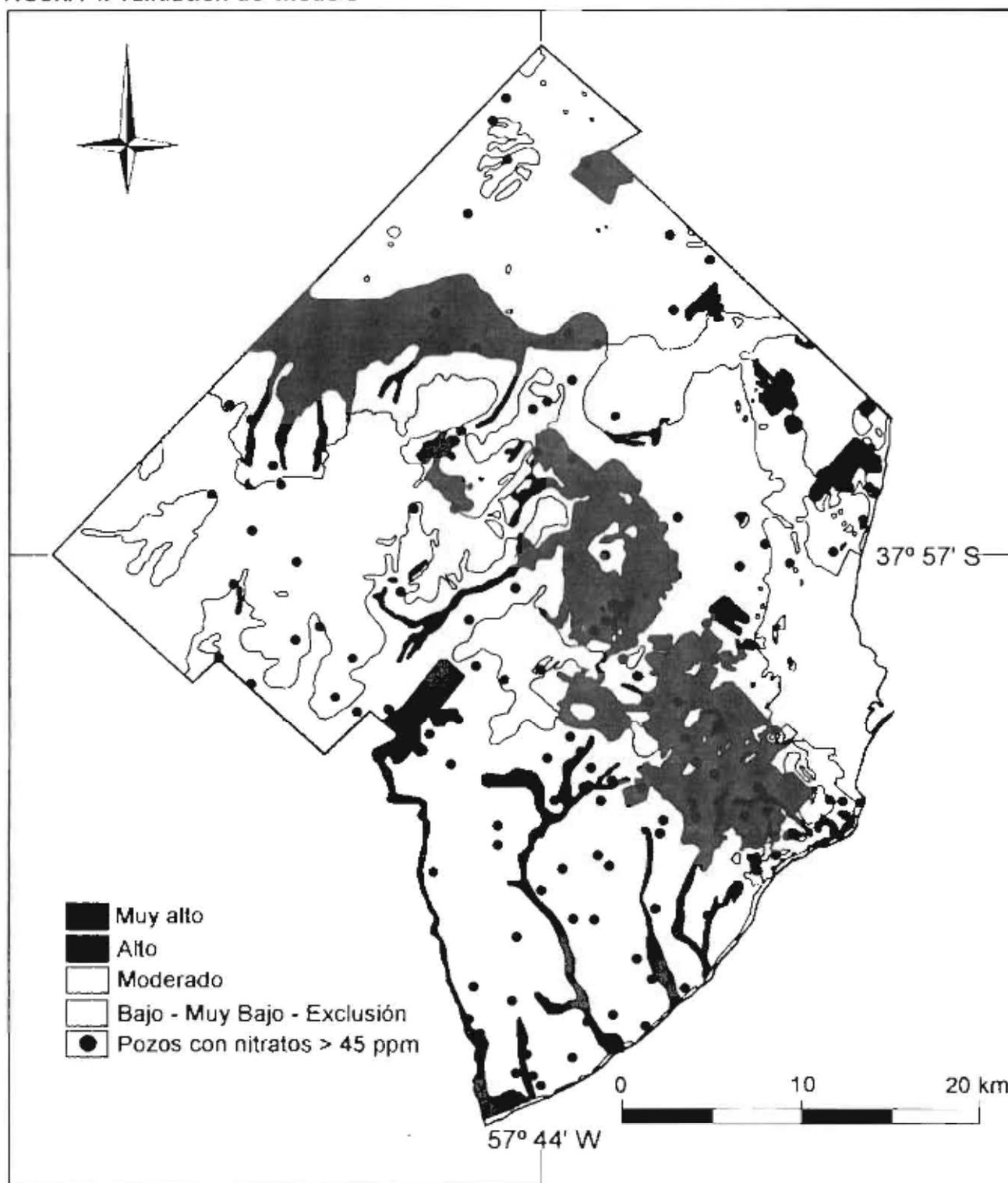


FIGURA 4. Validación del modelo



6. CONCLUSIONES (Continuación)

preventivas a fin de minimizar los riesgos en áreas susceptibles a la contaminación de aguas subterráneas, particularmente de tipo no puntual.

Resultan eficaces en procesos de educación pública, a la vez que para informar a planificadores y tomadores de decisiones acerca de la protección del recurso, del riesgo y la prevención de contaminación.

Para que estos mapas alcancen su máxima potencialidad,

a fin de intentar superar la habitual distancia entre los científicos y la comunidad en general, deben ser consistentes, entendibles y estandarizados con leyendas simples y adecuadas para su lectura por el ciudadano común.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las críticas, aportes y sugerencias realizadas por el Dr. Mario Hernández.

8. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ABRIL, F., J.M. DE PAZ Y C. RAMOS, 1998.

El riesgo de lixiviación de nitrato en las principales zonas hortícolas de la comunidad valenciana. Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente, AIII-GE, Actas: 65-71, Valencia.

BLARASIN, M., A. CABRERA, C. ERIC Y J.L. VILLEGAS, 1995.

Mapa de riesgo a la contaminación del acuífero libre por uso de agroquímicos en la hoja 3363-19-1, Río Cuarto, Dpto. Río Cuarto, Provincia de Córdoba, Argentina. Publicación Especial de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, N° 3: 115-134.

BÓ, M.J. Y J. MARTÍNEZ ARCA, 1993.

MAC: Un programa para la generación y visualización de Mapas de Actividades. En N. B. Bejerman, J. C. Malecki, A. E. Ruscalleda y J. A. Zanabria (eds.) Primera Reunión sobre preparación y uso de Mapas Temáticos, Publicación Especial de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, N° 1:166-179.

BURGOS, J. L. Y A. L. VIDAL, 1951.

Los climas de la República Argentina según la nueva clasificación de Thornthwaite. Rev. Meteoros, Año 1(1):3-32.

CASTRO ROCHA, E. J. DEL RIO ALECHA Y C. SCHULZ ALTAMIRANO, 1996.

Vulnerabilidad del acuífero de Intendente Alvear (La Pampa), Argentina. Riesgo de contaminación por actividades agropecuarias. III Congreso Latinoamericano de Hidrología subterránea, Actas Sección 4:37-50, México.

CENDRERO A. AND J. R. DÍAZ DE TERAN, 1987.

The environmental map system of the University of Cantabria, Spain. En Arndt, P. and G. Lüttig (eds.) Mineral resources extration, environmental protection and land-use planning in the industrial and developping countries,4.8: 149-181, Stuttgart.

CIONCHI, J. L., 1997.

Las reservas de agua subterránea disponibles en el Partido de General Pueyrredon (Prvincia de Buenos Aires). Obras Sanitarias Mar del Plata SE, Informe Inédito MGP-OSSE - 1/97. 15pp, Mar del Plata.

CUSTODIO, E., 1996.

Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la polución. II Seminario Hispano-Argentino de Hidrología Subterránea. En Tineo, A. (ed.) Serie Correlación Geológica, N° 11: 99-122, Tucumán.

DALLA SALDA, L. E. ÑIGUEZ, 1978.

"La Tinta", Precámbrico y Paleozoico de Buenos Aires. VII Congreso Geológico Argentino, Actas I: 539-550.

DEL RÍO J.L., M. J. BÓ, J. MARTÍNEZ ARCA Y V. BERNASCONI (eds.), 1995.

Carta Ambiental del Partido de General Pueyrredon. Universidad Nacional de Mar del Plata - Municipalidad del Partido de General Pueyrredón, Tomo 1 y 2, 225pp. Mar del Plata.

FERNÁNDEZ, A. Y L ARENSBURG, 1994.

Grados de vulnerabilidad del sistema acuífero del Gran Buenos Aires. Criterios para su determinación. II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Actas Vol. I : 17-30, Chile.

FOSTER, S. Y R. HIRATA, 1991.

Determinación del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas. Una metodología basada en datos existentes, CEPIS, 81pp. Lima.

FOSTER, S., L. VENTURA Y R. HIRATA, 1987.

Contaminación de las Aguas Subterráneas; un enfoque ejecutivo de la situación en América latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable, CEPIS, 38pp. Lima.

GONZÁLEZ ARZAC, R. Y J BARBAGALLO, 1996.

Vulnerabilidad del acuífero freático por vertido superficial de desechos farmacéuticos, Provincia de Buenos Aires, República Argentina. III Congreso Latinoamericano de Hidrología subterránea, Actas Sección 4:1-13, México.

GONZÁLEZ, J., E. BOCANEGRA, J. MARTÍNEZ ARCA Y M. J. BÓ, 1997.

Determinación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas en el sector periurbano y rural de Mar del Plata, I Congreso Nacional de Hidrogeología, Actas: 377-392. Bahía Blanca.

HERNÁNDEZ, M.A., N. GONZÁLEZ, A. RUÍZ DE GALARRETA Y L.F. MINGHINELLI, 1995.

Geohidrología aplicada en un sector del Partido de Zárate (Provincia de Buenos Aires). En N. González (ed.) IV Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses, Actas II:255-264, La Plata.

LEWIS, W. J., S. D. FOSTER Y B. S. DRASAR, 1988.

Análisis de Contaminación de Aguas Subterráneas por sistemas de saneamiento básico, CEPIS, 88pp. Lima.

LEXOW, C., J. CARRICA Y G. BONORINO, 1994.

Vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero freático de la cuenca superior del arroyo Naposta Grande, Provincia de Buenos Aires. Utilización del método DRASTIC y DIOS. II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Actas Vol. 1: 67-80, Chile.

RUIZ HUIDOBRO, O., 1975.

Informe Final referente a convenio O.S.N. – Fac. Cs. Exactas y Naturales (UBA), Informe inédito, 10pp. Buenos Aires.

SALA, J.M., 1975.

Recursos Hídricos (Especial mención de las aguas subterráneas). VI Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 169-194, Bahía Blanca.

STAMPONE, J., 1997.

Vulnerabilidad y riesgo de contaminación por plaguicidas de las aguas freáticas del Valle inferior del Río Chubut. I Congreso Nacional de Hidrogeología, Actas: 393-402, Bahía Blanca.

TERUGGI, M.E., J. KILMURRAY Y L. DALLA SALDA, 1974.

Los dominios tectónicos de la región de Balcarce. Revista de la Asociación Geológica Argentina, Tomo 29(3):265-276.

TINEO, A., G. RODRÍGUEZ, J. GARCÍA, C. DÚRSO Y C. FALCÓN, 1995.

Evaluación del riesgo de contaminación del agua subterránea, en la ciudad de Concepción, provincia de Tucumán. En M. P. Cantú (ed.) I Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio, Tomo I: 13-22.

VRBA, J. AND A. ZAPOROZEC, 1994.

Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Association of Hydrogeologists. Series Editorial Board. Verlag Heinz Heise. Vol. 16 – 131pp. Hannover.



GEOLOGÍA Y GEOTÉCNIA PRELIMINAR DEL SUBSUELO DEL ÁREA GRAN RESISTENCIA Y ZONAS ALEDAÑAS, PROVINCIA DEL CHACO, ARGENTINA

Torra, Roberto ⁽¹⁾

Resumen

La presente contribución ofrece los resultados interpretados de un estudio realizado sobre las características geológicas y geotécnicas específicas de mecánica de suelos de las capas de sedimentos horizontales del subsuelo del área del Gran Resistencia y zonas aledañas. Los análisis geotécnicos realizados fueron: Límite líquido (LL), Límite plástico (LP), Índice plástico (IP) correspondientes a muestras seleccionadas dentro del área bajo estudio. El estudio sedimentológico correspondió a la definición de facies y litofacies. En el área de trabajo fue reconocida en la sección superior una sucesión de materiales arcillo-limosos, con un poco de arena muy fina, que serían atribuibles al Pampeano y/o Post-Pampeano sensu lato los cuales yacen sobre capas horizontales de materiales más densos correspondientes a litofacies de areniscas supermaduras blanquecinas finas y muy bien redondeadas, con algunas intercalaciones de arcillas macizas castaño verdoso, correlacionables con las Formaciones Paraná y/o Formación Ituzingó (Mioceno medio hasta Mioceno superior). El estudio compara los resultados de los ensayos mecánicos con las distintas facies y litofacies sedimentológicas como así también se integra con los resultados encontrados en registros de perforaciones disponibles en la zona de estudio, lo que es interpretado de acuerdo con literatura moderna

1. INTRODUCCIÓN

El Conurbano del área Gran Resistencia se encuentra localizado en un sitio geomorfológico que a la fecha posee pocos estudios de investigación básica interpretada sedimentológica-geotécnica del subsuelo poco profundo considerando a éste en una profundidad media de

alrededor de 100 m de profundidad. Las características superficiales geomorfológicas del área de estudio fueron definidas como una gran planicie fluvial periódicamente inundable correspondiente al valle fluvial del Río Paraná (Mauro et al. 1998; Popolizio, 1982, 1996, Popolizio et al., 1980, Schums, 1977; Torra, 1994).

Cabe destacar que existen investigaciones regionales sobre los suelos superficiales de tipo arcillosos presentes en esta comarca y que fueran realizados por el PEA (Programa Estratégico de Acción para la Cuenca del Bermejo), estudios que han sido plasmados en sucesivos informes técnicos de carácter inédito hasta la fecha (PEA El. 1.1. 1999a; PEA El. 2.5. 1999b; PEA El. 1.1. 1999c). Asimismo, el PEA también elaboró varios informes

Entregado: 20 de Diciembre de 2003 • Aceptado: 18 de Marzo de 2004

⁽¹⁾ Departamento de Geociencias, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Avda. Las Heras 727, H3500COI Resistencia, Chaco, Argentina. Email: roberto_torra@arnet.com.ar

inéditos relacionados con el potencial social y humano de la región, cartografía multitemática medioambiental y cartografía de suelos entre los que podemos destacar los siguientes: PEA El. 2.6. (1999d); PEA El. 6.1. (1999e); PEA El. 6.1. (1999f).

Por otra parte merecen citarse los estudios de subsuelo realizado durante la etapa de estudio y del subsuelo en la zona de emplazamiento del Puente interprovincial Gral. Manuel Belgrano en la Década de los años 60. Los principales son: el Estudio de Suelos de la Dirección Nacional de Vialidad en colaboración con la Société d'Etudes et d'Equipements D'Enterprises (1966). Un segundo estudio corresponde a la S.E.O.P.-DNV del año 1973.

Los mismos abordaron el estudio de los materiales y sedimentos presentes en el subsuelo del valle fluvial del Río Paraná mediante clasificaciones estándares de ingeniería civil logrando obtener información precisa y gran valor para la obra realizada.

En este trabajo nos referiremos solamente a las características del subsuelo del sitio correspondiente al Conurbano del área Gran Resistencia y sus alrededores. El tipo de relieve que presenta el mencionado sitio está caracterizado por constituir una amplia planicie de muy baja pendiente regional emplazada en el valle fluvial del Río Paraná (Popolizio, 1980, 1996).

Un objetivo principal de la presente contribución fue correlacionar las características geotécnicas más significativas de los resultados encontrados en ensayos de suelos realizados en muestras de destapes artificiales en las capas de sedimentos del Cuaternario y/o Terciario superior sensu lato con interpretación sedimentológica y estratigráfica de uso actual. Los métodos empleados fueron el estudio de registros de perforaciones, análisis y mediciones de laboratorio de muestras especialmente coleccionadas para este fin y observaciones adicionales en cortes artificiales próximos a la ciudad de Resistencia con levantamiento de perfiles sedimentológicos. También corresponde destacar que el autor empleó datos y extrapolaciones relacionados con un estudio regional previo (Torra, 2001).

En las capas superficiales existe una aparente variabilidad de suelos y/o capas de litofacies pelíticas y psamíticas que puede ser detectada en los primeros -0,30 a -15 mbbp de profundidad en las perforaciones estudiadas. Luego de alcanzada esta última profundidad, se sucede una monótona secuencia de capas de areniscas finas a muy finas blanquecinas, algunas veces amarillentas aunque siempre supermaduras y muy bien seleccionadas (elevada densidad desde el punto de vista geotécnico) e intercalaciones de capas de arcillas macizas castaño verdoso que varían desde pocos centímetros hasta 1-3 metros de espesor hasta los 130 mbbp. Esta última profundidad corresponde a la perforación más profunda estudiada en este trabajo y perteneciente al ex Ferrocarril Francés. La misma data del año 1906 siendo su descripción litológica de rigurosa precisión textural y composicional.

Se analiza la posibilidad de realizar correlaciones en las distintas capas de sedimentos en los primeros -15 mbbp de profundidad, hecho factible en caso de disponer de un número significativo de perforaciones lo que sin embargo no invalida un buen nivel de correlación, con un reducido número de perforaciones, empleando sólo

relación -y extrapolación- de las propiedades texturales, composicionales, tonales y mecánicas. Esto se debe a la disposición horizontal de las capas y a la similar composición de las areniscas y pelitas como así también a sus propiedades texturales, granulométricas y faciales.

Por debajo de esta profundidad (~ 15 mbbp), se presenta una secuencia homogénea en la constitución litológica caracterizada por la presencia de litofacies horizontales psamítica (arenisca supermadura fina blanquecina muy bien seleccionada) y capas de pelitas macizas castaño verdoso. Esta secuencia, en cierto modo escapa al alcance de las fundaciones de ingeniería civil rutinarias (edificios de mediano o gran porte, algunas torres de transmisión eléctrica, puentes pequeños, etc.). A pesar de esta circunstancia, sería conveniente estudiar con mayor detalle las capas dispuestas por debajo de los ~ 15 mbbp debido a que un adecuado conocimiento resultaría de significativa importancia en la estimación del cálculo preliminar de la profundidad del pilotaje en obras de ingeniería de mediano o gran porte. Por ejemplo puede ser citado el segundo puente ferroviario en etapa de anteproyecto entre las ciudades de Corrientes y Resistencia y otros tres probables sitios de emplazamiento de un viaducto de similares características (anteproyecto), situado sobre el valle fluvial del Río Paraná un poco más al sur del área estudiada, entre las Provincias de Corrientes y Santa Fé.

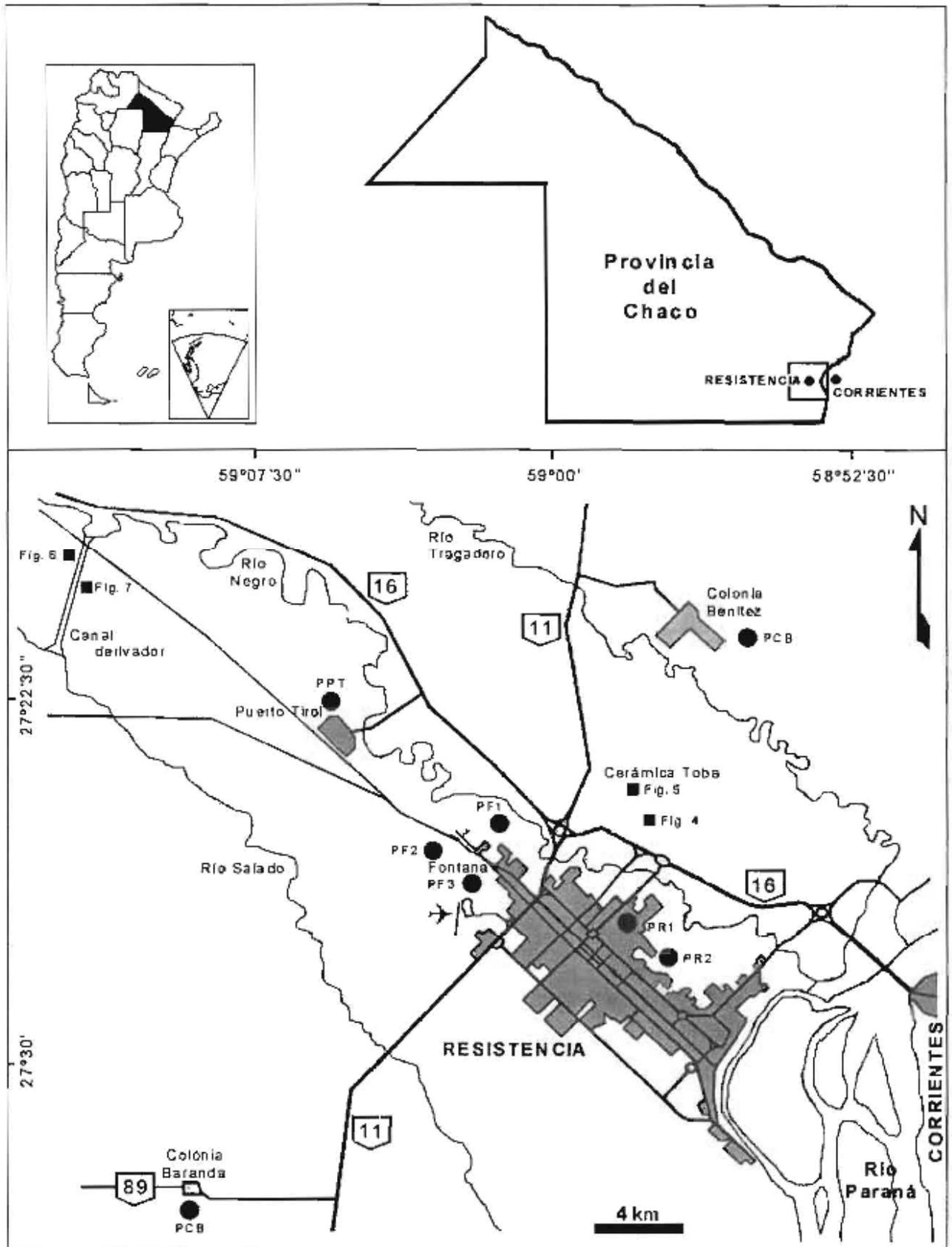
2. METODOLOGÍA

Para el estudio previsto se tomaron siete muestras seleccionadas. En los destapes artificiales próximos a la Cerámica Toba se coleccionaron las muestras III-HS-CH-01-98 y HI-HI-CH-02-98 (Figs. 4, 5). En un destape artificial en el centro de la ciudad de Resistencia se tomaron las muestras RI-PYP-CII-01-99 y TI-ELF-CII-01-99. Finalmente, en el corte artificial generado por el Canal Derivador del Río Negro hacia el Río Salado se coleccionaron las muestras CD-LB-CH-01-98, CD-LB-CH-02-98 y CD-LB-CH-03-98 (Figs. 1, 6, 7).

La metodología para la clasificación mecánica de las muestras empleada en laboratorio fue la que figura en la bibliografía clásica (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1982; Lambe y Whitmann, 1976; Terzagui y Peck, 1978). Las muestras se prepararon convenientemente para los ensayos y los resultados finales fueron volcados de acuerdo con las tablas de clasificación de suelos del Highway Research Board (HARB) y Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). En todos los casos fue necesario la obtención de los parámetros de plasticidad, a saber: límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, curva granulométrica y el lavado sobre tamiz N° 200 de cada una de las muestras, siguiendo procedimientos normalizados.

Los registros de perforaciones estudiados fueron los denominados como Perforación Resistencia N° 1 y N° 2 pertenecientes al ex Ferrocarril Francés, Perforación Escuela Benítez, Perforaciones Fontana N° 1, 2 y 3, Perforación Colonia Baranda y Perforación Puerto Tirol (Fig. 1). Los registros originales y/o fotocopias de los mencionados perfiles se encuentran en los archivos de la sección Hidrogeología de la Administración Provincial del Agua de la Provincia del Chaco.

FIGURA 1: Ubicación del área de estudio. PCB: Perforación Colonia Benítez; PR1-2: Perforaciones Resistencia 1 y Resistencia 2; PF1-2-3: Perforaciones Fontana 1, 2 y 3; PPT: Perforación Puerto Tirol; PCB: Perforación Colonia Baranda.



3. RESULTADOS

El análisis de los ocho registros de perforaciones estudiados mostraron en forma consistente un sector de capas superior, compuesto mayormente por materiales limo arcilloso, con un poco de arena muy fina (~ 10 %), hasta una profundidad promedio de 15 metros. A partir de dicha profundidad se puede distinguir un sector inferior compuesto por capas que se toman francamente arenosas, correspondiendo a una arenisca media, fina o muy fina supermadura, generalmente blanquecina y/o ligeramente amarillenta, con intercalaciones de capas de arcillas macizas castaño verdoso hasta el final de la perforación más profunda (Figs. 2, 3).

El análisis de las siete muestras coleccionadas para el estudio mecánico también mostró resultados coherentes. Los materiales de granulometría fina (predominio de limo sobre arcilla) de color castaño claro siempre resultan ser suelos de tipo CL mientras que los materiales de granulometría fina, predominando la arcilla, resultan ser suelos de tipo CH. Los materiales clasificados en los perfiles como SM corresponden al sector intermedio entre las areniscas supermaduras sensu stricto y los materiales suprayacentes (Figs. 2, 3).

En las Tablas 1a, 1b y 2 pueden observarse los parámetros encontrados para las muestras estudiadas que muestran un predominio de suelos de tipo CL. La Tabla 3 muestra la correlación aproximada entre litofacies sedimentológicas y parámetros mecánicos.

Tabla 1a. CÁLCULO LÍMITE PLÁSTICO

Muestra	Nº golpes	PF. Nº	Pf+sh	Pf+sh	Tara	w%	L. correg	x
HI-HS-CH-01-98	23	109	31,25	22,19	5,44	54,1	53,6	0,990
HI-HI-CH-02-98	30	108	29,11	20,90	5,45	53,0	54,2	1,022
TI-ELF-CH-01-99	24	14	32,15	25,86	5,82	31,4	31,2	0,995
RE-PYP-CH-01-99	27	159	36,24	28,53	5,48	33,4	34,1	1,022
CD-LB-CH-98-01	29	18	33,92	24,92	5,73	46,9	47,7	1,018
CD-LB-CH-98-02	25	111	32,33	23,73	5,41	47,0	47,0	1,000
CD-LB-CH-98-03	21	126	32,82	24,04	5,51	47,4	46,4	0,979

Tabla 1b. CÁLCULO LÍMITE PLÁSTICO

Muestra	PF. Nº	Pf+sh	Pf+sh	Tara	LP
HI-HS-CH-01-98	146	22,69	19,76	5,45	20,5
HI-HI-CH-02-98	126	18,13	15,93	5,36	20,8
TI-ELF-CH-01-99	11	20,37	18,23	5,89	17,3
RE-PYP-CH-01-99	192	25,25	22,25	4,40	17,8
CD-LB-CH-98-01	124	20,66	18,25	5,40	18,8
CD-LB-CH-98-02	184	20,79	18,10	5,37	21,1
CD-LB-CH-98-03	131	22,96	20,27	5,44	18,1

Tabla 2. LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO Y CLASIFICACIÓN

Muestra	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice Plástico	Tamiz Nº 200	S.U.C.S	HRB
HI-HS-CH-01-98	53,6	20,5	33,1	86,6	CH	A-7-6 (31)
HI-HI-CH-02-98	54,2	20,8	33,4	92,2	CH-MH	A-7-6 (33)
TI-ELF-CH-01-99	31,2	17,3	13,9	75,6	CL	A-6 (8)
RE-PYP-CH-01-99	34,1	17,8	16,3	93,1	CL	A-6 (15)
CD-LB-CH-98-01	47,7	18,8	28,9	92,3	CL	A-7-6 (27)
CD-LB-CH-98-02	47,0	21,1	25,9	92,1	CL	A-7-6 (24)
CD-LB-CH-98-03	46,4	18,1	28,3	91,6	CL	A-7-6 (26)

FIGURA 2: Perforaciones Fontana 1, 2, 3; Perforación Puerto Tirol; Perforación Colonia Baranda.

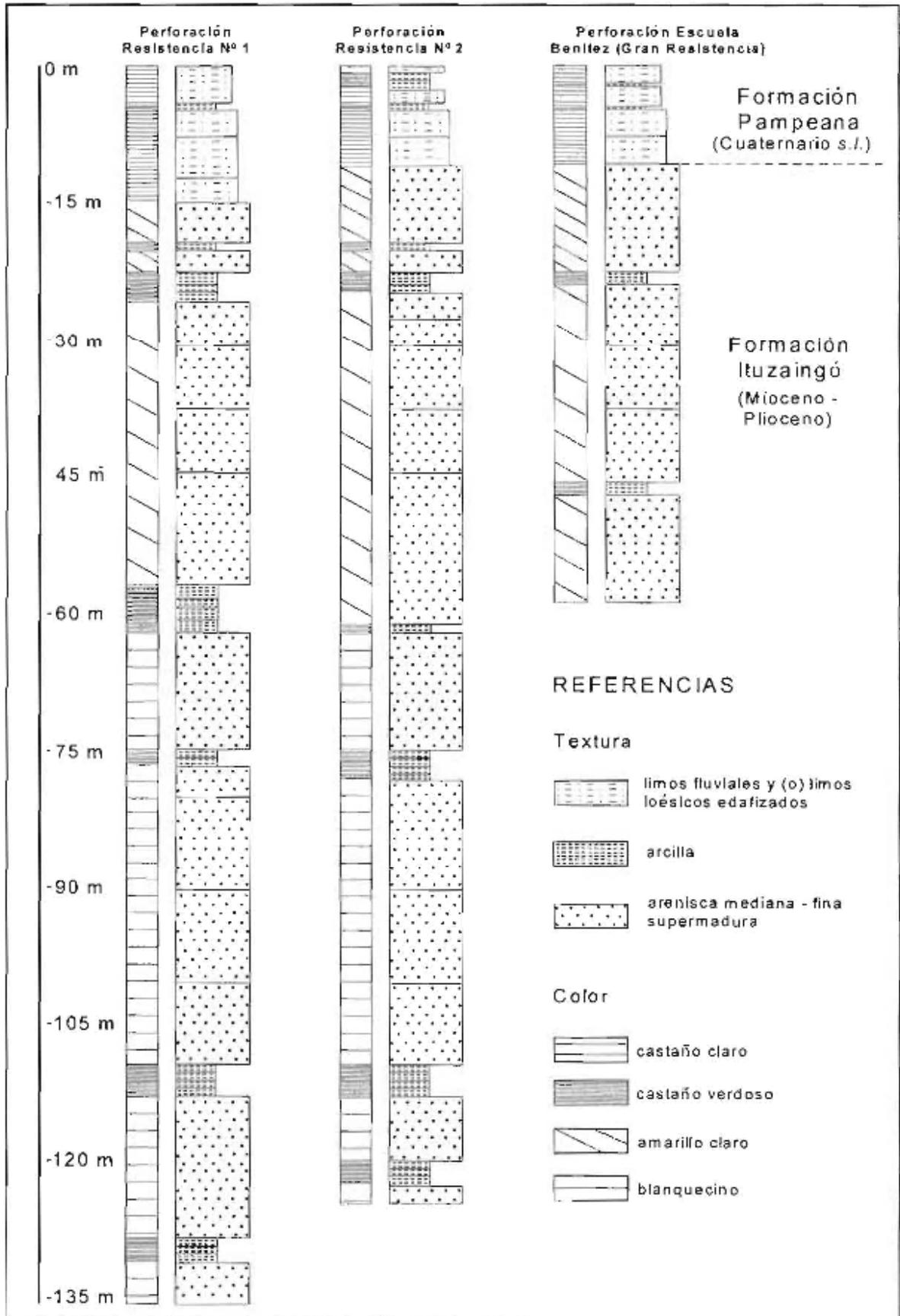
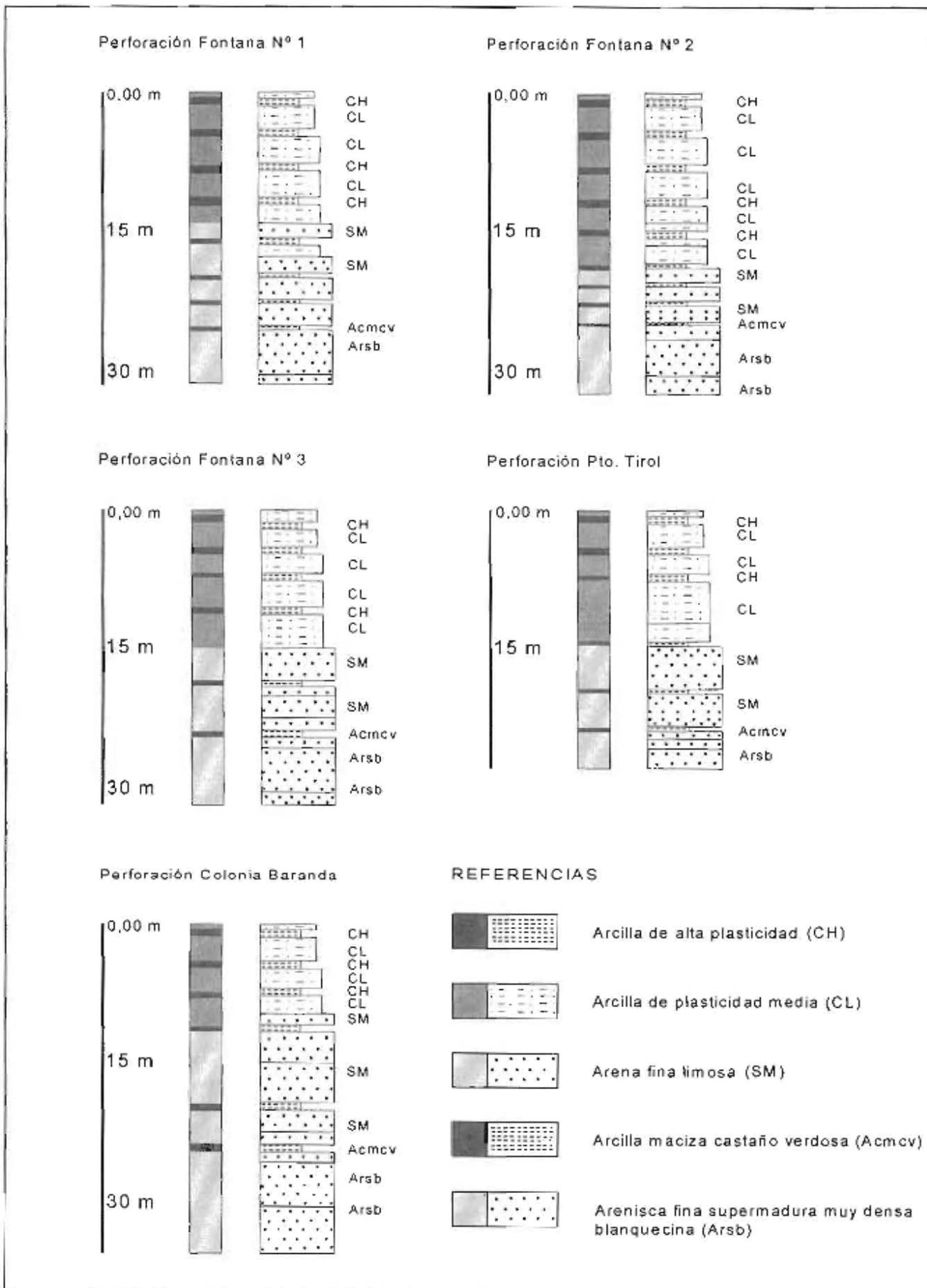


FIGURA 3: Perforaciones Resistencia 1, 2; Perforación Escuela Benítez



4. INTERPRETACIÓN

La Formación Pampeana fue definida como un conjunto de capas de sedimentos limo-arcillosos, predominando los limos gruesos y/o finos (Frenguelli, 1945) desde los tiempos de Florentino Ameghino (Ameghino, 1981; Cardoso, 1911; Cortelezzi y Lerman, 1969; Frenguelli, 1950, 1955).

En el presente estudio correspondiente a la zona aquí tratada (Conurbano del Gran Resistencia) se muestra que los sedimentos superficiales y/o poco profundos, es decir hasta una profundidad promedio de 15 m aproximadamente, corresponden a tal facies sedimentaria (litofacies franco limosa más litofacies arcillosa subordinada, con escasa participación de

fracción arena muy fina, siempre inferior a un 10%).

A mayor profundidad de 15 m, en promedio, se desarrolla una sucesión heterolítica de capas horizontales de areniscas supermaduras finas blanquecinas con algunas delgadas intercalaciones de arcillas macizas castaño verdoso en relación con el espesor de las areniscas supermaduras blanquecinas (Figs. 2, 3). Esta sucesión podría corresponder a las capas de las Formaciones Ituzaingó y/o Paraná de acuerdo con recientes estudios de Torra (1997, 1998a,b,c,d, 1999; Torra y Miño, 1999).

Para una mayor claridad de lo expuesto se esboza una correlación de los materiales estudiados desde los puntos de vista sedimentológicos y mecánico interpretados en este trabajo (Tabla 3).

Tabla 3. MATERIALES Y LITOFACIES DEFINIDAS

Proporciones de materiales	Sedimentología	Mecánica de suelos HRB
arcilla >>> limo grueso y/o fino	litofacies de arcilita maciza	suelo CH
limo >>> arcilla >> arenisca muy fina	litofacies de limolita maciza	suelo CL
arenisca > limo > arcilla	litofacies de areno-limosa	suelo SM
arenisca fina y/o muy fina supermadura blanquecina	litofacies de arenisca supermadura	arena fina y/o muy fina característicamente muy densa
arcilla maciza castaño verdoso	litofacies de arcilita maciza	arcilla

Los materiales estudiados presentan una muy buena homogeneidad y correlación horizontal como puede verse en las Figs. 6, 7, lo que descarta una influencia significativa de los procesos geomorfológicos producidos dentro del valle fluvial del Río Paraná. Asimismo, la escasa presencia de arena fina o muy fina resulta otro elemento muy significativo en el sentido expresado (Torra, 2001).

De acuerdo con Sayago (1999), las características de estos depósitos corresponderían a aquellos de tipo lagunares y lagunares hidro-eólico, es decir sedimentos acumulados en zonas con ligera depresión de relieve en los cuales el aporte fluvial y/o eólico fue el proceso predominante. Asimismo, las secciones superiores sufrieron un proceso de retrabajamiento por acción fluvial (paleolagunas) y/o pluvial lo que puede conllevar a un importante enriquecimiento en la fracción limo por lavado de arcillas erodibles (Prothero, 1990; Prothero y Schwab, 1998; Pye, 1995).

Los procesos mencionados ocurrieron especialmente en la parte superior del Pleistoceno y Holoceno (Iriondo, 1999), período en el cual se habrían producido varias oscilaciones climáticas entre las que hay que destacar etapas más húmedas con un consecuente aumento en las precipitaciones pluviales. Bajo estas condiciones, la regolitización y los procesos de pedogénesis asociados son significativamente activos (Prothero, 1990; Tucker, 1991; Wright, 1986, 1991).

Las capas mecánicamente clasificadas como CL (litofacies franco limosa) se correlacionarían con la

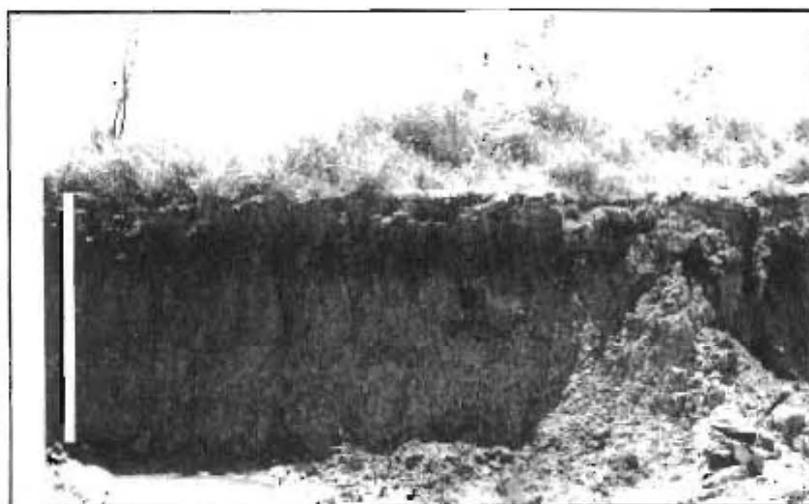
Formación La Plata y los suelos CH (litofacies arcillo-limosa) con la Formación Luján (Cortelezzi y Lerman, 1969).

5. CONCLUSIONES

En base a los resultados encontrados con los análisis llevados a cabo se pueden realizar las siguientes conclusiones relacionadas con las capas que integran el subsuelo poco profundo del área estudiada:

- Presencia de suelos de tipo CL (franco limoso) hasta aproximadamente -15 mbbp.
- Presencia de suelos de tipo CH (arcillo-limoso) hasta aproximadamente -15 mbbp intercalados en los suelos CL (franco-limoso) en proporción subordinada (3:1).
- Un espesor promedio de aproximadamente 15 metros para el cuerpo sedimentario correspondiente a la Formación Pampeana. Geometría de disposición horizontal y conforme sin ninguna presencia de discordancia de erosión ni otra clase de truncamientos erosivos.
- Contacto transicional largo (2-5 m) con las unidades infrayacentes mediante capas arcillo-arenosas inconsolidadas de tipo SM (capas areno-limosas).
- Areniscas supermaduras blanquecinas (areniscas de alta densidad), con intercalaciones de arcillas macizas castaño verdoso que corresponden a litofacies marinas de mar abierto y/o facies litorales de la Formación Ituzaingó (Torra, 1998a, Torra, 2001).

FIGURAS 4 y 5. Destapes artificiales en las cercanías de la Cerámica Toba



← suelo CL
← suelo CH
← suelo CL

FIGURA 4

Escala: 2 m



← suelo CL

FIGURA 5

Escala: 2 m

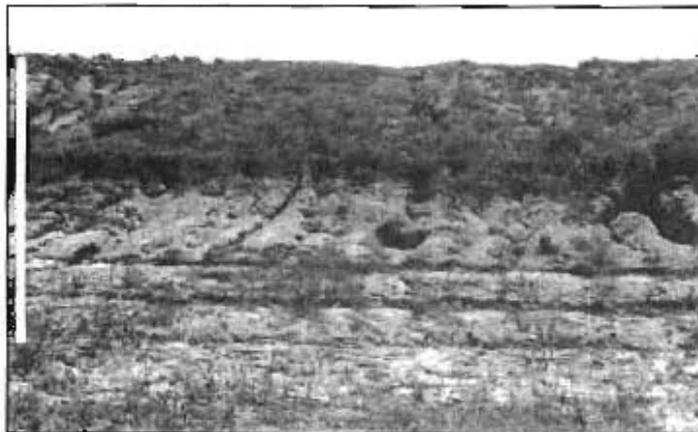
FIGURAS 6 y 7: Vistas del canal Derivador del Río Negro.



← vista panorámica
talud canal derivador

FIGURA 6

Escala: 6 m



← suelo CL
← suelo CH
← suelo CL

FIGURA 7

Escala: 6 m

5. CONCLUSIONES (continuación)

- Los suelos y/o materiales inconsolidados de tipo CL y CH presentes en la Formación Pampeana son considerados correlacionables con las Formaciones La Plata (suelos CL) y Luján (suelos CH) (Cortelezzi y Lerman, 1969) respectivamente. Las Formaciones La Plata y Luján que se encuentran definidas en la Provincia de Buenos Aires son correlacionadas aquí con los sedimentos de la Formación Pampeana (suelos CL y CH de la sección superior de la columna). Esto se debe a su inequívoca igualdad textural, estructural y composicional como así también al marco geológico y geomorfológico regional (Torra, 2001). Asimismo, estas formaciones presentan un perfil geoquímico de elementos mayoritarios y trazas completamente similar (Torra, 2000, Torra, 2004, en prep.).
- En lo relacionado con las tareas de fundaciones para obras civiles (diques, represas, puentes, terraplenes, alcantarillas), especial atención debería tenerse en cuenta al momento de las decisiones estratégicas, como por ejemplo si las mismas quedarán empotradas en suelos de tipo CL o atravesarán largas secciones de éste tipo de material. Este hecho se vincula con la significativamente alta posibilidad de lavado y erodabilidad de arcillas expansibles en dichos suelos lo que ocasionaría

posteriores problemas en las estructuras ingenieriles tales como asentamientos y hundimientos lo que podría producir el colapso de las estructuras. Este fenómeno de erodabilidad y posterior asentamiento debería ser analizado cuidadosamente en la etapa previa a la realización de proyectos de obras civiles de mediano o gran porte.

- Finalmente sería conveniente estudiar con mayor detalle las capas dispuestas por debajo de los -15 mbpp debido a que un exacto conocimiento de la sucesión psamítica-pelítica resultaría de significativa importancia en la estimación del cálculo preliminar de la profundidad del pilotaje en obras de ingeniería de mediano o gran porte. Podemos citar como ejemplo la fundación de represas de gravedad de hormigón armado. También puede ser citado el segundo puente ferroviario en etapa de anteproyecto entre las ciudades de Corrientes y Resistencia y otros tres probables sitios de emplazamiento de viaductos con similares características (anteproyectos), localizados sobre el valle fluvial del Río Paraná un poco más al sur del área estudiada (300 km) entre las Provincias de Corrientes y Santa Fé. Las condiciones geológicas y geomorfológicas de estas zonas son completamente iguales a las presentes en el área estudiada por lo cual este trabajo podría ser empleado como un estudio piloto básico de consulta.

6. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

AMEGHINO, F., 1881.

La Formación Pampeana o estudio de los terrenos de transporte de la cuenca del Plata. Buenos Aires-Paris. 371 p.

CARDOSO, A., 1911.

Buenos Aires en 1516. Anales del Museo Nacional de Buenos Aires. XXI. Buenos Aires. pp. 309-372.

CORTELEZZI, C. R. y LERMAN, J. C., 1969.

Estudio de las Formaciones Marinas de la Costa Atlántica de la Provincia de Buenos Aires. VIII Congreso Mundial del INQUA. Paris. pp. 135-164 (reimpresión del LEMIT, La Plata).

FRENGUELLI, J., 1945.

El Piso Platense. Revista del Museo de La Plata. Geología. II. 287-311. La Plata.

FRENGUELLI, J., 1950.

Rasgos generales de la morfología y la geología de la Provincia de Buenos Aires. LEMIT. Serie II. N° 33. La Plata.

FRENGUELLI, J., 1955.

Loess y Limos Pampeanos. Facultad de Ciencias Naturales y Museo de La Plata. Serie Técnica y Didáctica. N° 7. La Plata.

IRIONDO, M. H., 1999.

Climatic changes in the South American plains: Records of a continent-scale oscillation. Quaternary International. 57-58: 93-112

JUÁREZ BADILO, E. y RICO RODRÍGUEZ, A., 1982.

Mecánica de Suelos. Editorial Limusa, 2da. Edición. 387 pp. Madrid.

LAMBE, W. y WHITMANN, R., 1976.

Mecánica de Suelos. Editorial Limusa. 436 pp. Madrid.

MAURO, M., PELLEGRINO, A., RAMONDINI, M. y URCIOLI, G., 1998.

A contribution to the geotechnical characterization of large areas for landing planning. pp. 195-201. En: Geotechnical site characterization, Robertson & Moyano (eds.). Balkema. Rotterdam.

PEA El. 1.1., 1999a.

Instituto de Suelos. INTA (Coord.). Universidad Nacional de Jujuy, Universidad Nacional de Salta, EEA Cerrillos-INTA. Cartografía Temática Digital del Territorio Argentino de la Alta Cuenca del Río Bermejo; (mapa base, geología, geomorfología, hidrología, suelos, vegetación, población e infraestructura, uso de suelos). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires. Informe inédito

PEA El. 2.5., 1999.

Administración Provincial del Agua (Coord.), Centro de Geociencias Aplicadas (UNNE), Departamento de Hidráulica (UNNE), INTA E.E.R.A. Saénz Peña, INTA E.E.R.A. C. Benítez, Dirección de Suelos y Agua Rural de la Subsecretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Pcia. del Chaco. Cartas Temáticas Digitalizadas de la Cuenca Inferior del Río Bermejo. Elemento 2.5: Uso de la Tierra en la Cuenca del Río Bermejo. Chaco. Informe inédito

PEA El. 1.1., 1999b.

Brea, D. Generación y Transporte de Sedimentos en la Alta Cuenca del Río Bermejo. Impacto en la Hidrovia, Delta del Paraná y Río de la Plata. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente. Elemento 1.1.: Movimiento Transfronterizo de Contaminantes. Buenos Aires. Informe inédito

PEA El. 2.5., 1998.

Arrieta, J.; Pastor, C. Relevamiento Socioeconómico y Ambiental de las Comunidades del Tramo Medio e Inferior de la Cuenca del Río Bermejo. Informe y Anexos. Elemento: 2.5: Uso del Suelo en la Cuenca del Río Inferior. Buenos Aires. Informe inédito

PEA El. 2.6., 1999d.

Cardozo, J. Manejo del Estrato Forrajero Mediante el Uso del Agua en Esteros, Bañados y Cañadas y Recuperación Productiva de Tierras Invasadas por Vinal. Elemento 2.6: Manejo de Forrajes. Chaco Húmedo. Chaco. Informe inédito

PEA El. 6.1., 1999e.

Laurelli E; Vaghi A. La Cuenca del Río Bermejo en el Contexto Regional Elemento 6.1: Formulación del Programa Estratégico de Acción. Buenos Aires. Informe inédito

PEA El. 6.1., 1999f.

Diagnóstico Ambiental de la Cuenca del Río Bermejo. El. 6.1 Formulación del Programa Estratégico de Acción Ambiental. Buenos Aires. Informe inédito

POPOLIZIO, E., 1982.

Geomorphology of the Argentina Northeast. Water International. Vol. 7, pp. 162-177. Lousanne.

POPOLIZIO, E., 1996.

Las unidades geomorfológicas del Nordeste Argentino. Anales del Simposio Nacional de Geomorfología. Uberlandia MG. Brasil.

POPOLIZIO, E., SERRA, P. y HORTT, G., 1980.

Bajos Submeridionales: Grandes Unidades Taxonómicas del Chaco. Centro de Geociencias Aplicadas. Universidad Nacional del Nordeste. Serie C Investigación, Tomo 3. 208 p. Resistencia.

PROTHERO, D. R., 1990.

Interpreting the Stratigraphic Record. W. H. Freeman & Company. New York. 410 p.

PROTHERO, D. R. y SCHWAB, F., 1998.

Sedimentary Geology. W. H. Freeman & Company. New York. 575 p.

PYE, K., 1995.

The nature, origin and accumulation of loess. Quaternary Science Review. 14: 653-667

SAYAGO, J. M., 1999.

Aproximación regional al Loess subtropical Argentino. Actas. I Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. La Pampa. pp 159-175

SCHUMS, S. A. (1977)

The fluvial system. John Willey & Sons, Inc. Nueva York. 388 p.

S.E.O.P. - DIRECCIÓN NACIONAL de VIALIDAD, 1973.

Puente General Manuel Belgrano. Dirección Nacional de Vialidad. Editorial Región S. R. L. 20 p.

SOCIETÉ D' ETUDES et D' EQUIPEMENTS D' ENTERPRISES-DNV, 1966.

Estudio de Suelos. Conexión Terrestre entre las Provincias de Chaco y Corrientes. Puente sobre el Río Paraná y Acceso a la Ruta 11 y 12. Informe inédito. 31 p. 13 perfiles geotécnicos, 1 perfil geológico ingenieril, 1 mapa de ubicación de sondeos.

TERZAGHI, K. y PECK, R., 1978.

Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica. Editorial El Ateneo. 2da. Edición. 784 pp. Buenos Aires.

TORRA, R., 1994.

Algunas manifestaciones de la litología en las formas del relieve del área Resistencia-Corrientes y sus alrededores. Tesina inédita. Departamento de Geografía. Facultad de Humanidades. Universidad Nacional del Nordeste. Resistencia 103 p.

TORRA, R., 1997.

Genesis and Age of the Ituzaingó Formation sands, northeastern Argentina: a preliminary note. 18th Regional European Meeting of Sedimentology. GAEA Heidelbergensis Abstracts. p. 340. Heidelberg.

TORRA, R., 1998a.

Estructuras sedimentarias marinas diagnósticas en las arenas de la Formación Ituzaingó (Mioceno medio), entre Itati y Empedrado, Provincia de Corrientes, Mesopotamia de Argentina. Revista del Instituto de Geología y Minería. 12 (1): 75-86.

TORRA, R., 1998b.

A Brief Stratigraphy and Paleogeography of the Miocene Sea at the Mesopotamia Region, Northeastern Argentina, South America. Geocongress 98. Geological Society of South Africa. pp. 79-82. Pretoria.

TORRA, R., 1998c.

Detección de Antiguos Cauces del Río Paraná mediante el empleo de Imágenes Satelitales. III Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Universidad Nacional del Nordeste. Actas. 4: 181-184. Resistencia.

TORRA, R., 1998d.

El Estudio de los Sedimentos del Cuaternario de la Provincia del Chaco y Regiones Aledañas. III Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Universidad Nacional del Nordeste. Actas. 4: 197-200. Resistencia.

TORRA, R., 1999.

Geología del subsuelo del Gran Resistencia y Regiones aledañas. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 1999. Tomo VII Ciencias Tecnológicas. pp. 169-172. Corrientes.

TORRA, R., 2000.

Geochemistry of a Tidal Transgressive Heterolithic Succession: The Ituzaingó Formation (Middle Miocene), Argentina. Chinese Journal of Geochemistry. 19 (1): 52-57.

TORRA, R., 2001.

Sedimentología de la Formación Ituzaingó (Mioceno medio), en los sectores norte y oeste de la Mesopotamia, Argentina. Tesis Doctoral inédita. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo. Instituto de Estratigrafía y Geología Sedimentaria Global (IESGLO). Universidad Nacional de Tucumán. II Tomos. 417 p.

TORRA, R., 2004.

Geoquímica preliminar del subsuelo del Gran Resistencia y zonas aledañas. En preparación.

TORRA, R. y MIÑO, F. D., 1999.

Propiedades Mecánicas de las Pelitas de la Formación Ituzaingó (Mioceno medio), en la localidad de Empedrado, Provincia de Corrientes, Argentina. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 1999. Tomo VII Ciencias Tecnológicas. pp. 173-176. Corrientes.

TUCKER, M. E., 1991.

Sedimentary Petrology. An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks. Blackwells Scientific Publications. Oxford. 260 p.

WRIGHT, V. P., 1986.

Paleosols, their recognition and interpretation. Blackwells Scientific Publications. Oxford. 315 p.

WRIGHT, V. P., 1991.

Estimating rates of calcrete formation and sediment accretion in ancient alluvial deposits. Geology Magazine. 127: 273-276.



TRAZADORES MULTIELEMENTALES EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL PARTIDO DE ESCOBAR, BUENOS AIRES, ARGENTINA

Silva Busso, Adrián¹, Santa Cruz, Jorge¹, Heredia, Olga²

Resumen

En la zona delimitada por las cuencas inferiores de los ríos Luján, Escobar y Garín, en el partido de Escobar -Provincia de Buenos Aires, Argentina - se ha estudiado la afectación ambiental de las aguas subterráneas, incluyendo los factores de origen antrópico que la condicionan. Se analizaron muestras de aguas y suelos, y se hizo un relevamiento del uso de la tierra. Se realizó un análisis multivariado, para establecer las asociaciones y los orígenes de los elementos traza presentes en el agua subterránea. En la Sección Epiparaneana la concentración de Cr detectada en el agua fue de 0,6 a 50 mg/L y la de Cd 3 a 18 mg/L. El Cu presentó una concentración entre 4 y 160 µg/L, el Fe entre 0,11 y 177 mg/L y el Mn entre 0,03 y 1,44 mg/L. Para el As los valores se encuentran entre 0,002 y 0,041 mg/L y para el F entre 0,1 y 1,5 mg/L. El Zn en el acuífero Pampeano presentó valores entre 200 y 800 µg/L y en el acuífero Puelches de 20 a 160 mg/L. Los valores de D y 18O son similares en ambos acuíferos, tanto en perfiles verticales como arealmente, y permiten establecer una relación hidrodinámica entre ambos, así como definir su vínculo con el ciclo hidrológico actual. Los valores de Tritio presentan una clara disminución en profundidad. Los suelos dominantes en la zona son Argiudoles. Se identificaron asociaciones de elementos traza y usos de suelo que conforman ciclos hidrogeoquímicos urbanos. La asociación natural del F y del As se relacionó con la litología de los Sedimentos Pampeanos; el contenido en nitratos de las aguas subterráneas y los valores de coliformes totales presentan una elevada correlación entre ambos parámetros ($r = 0,85$); ambos se relacionan con la existencia de sectores urbanos sin servicios de saneamiento. La presencia de valores relevantes de ciertos microelementos (Fe, Mn, Cu y Zn) se ha relacionado con el uso agrícola intensivo, mientras que la de otros (Pb, Co, Ni y Cr), muestra una estrecha vinculación con el uso industrial del suelo. El riesgo potencial de contaminación se ha definido, no en términos de una traza, sino mediante una asociación hidrogeoquímica de trazas.

Palabras clave: Hidrogeología, Hidrogeoquímica, Uso de la tierra, Contaminación, Riesgo.

Abstract

The study area, the lower basin of Luján, Escobar and Garín Rivers in Escobar County, Buenos Aires Province in Argentina, has been chosen for a methodological development in a regional environmental study. The environmental affectation in groundwater includ

natural and antropic factors. This characteristics have influence on the regional aquifers system in Escobar County. This work analysed and detected contamination problems on groundwater in zones of several land use, contaminations from heavy metals and other relational causes. The making and use of thematic cartography permitted the analysis of such relations. This work proposes a methodological base for pollution study and the risk contamination analysis in groundwater resources. Samples of water and soil were taken and analyzed, multivariate analysis were make to evaluate the relationship between trace elements and land use. In the Epiparancana section, Cr concentration was 0.6 to 50 µg/L and Cd: 3 to 18 µg/L, Cu: 4 to 160 µg/L, Fe: 0.11

Entregado: 10 de Enero de 2004 • Aceptado: 16 de Marzo de 2004

¹ Instituto Nacional del Agua, Ruta Ezeiza Cañuelas Km 1,620 Ezeiza pntsas@ina.gov.ar

² Facultad de Agronomía, UBA, San Martín 4453 Buenos Aires heredia@mail.agro.uba.ar

$\mu\text{g/L}$ and Cd: 3 to 18 $\mu\text{g/L}$, Cu: 4 to 160 $\mu\text{g/L}$, Fe: 0.11 to 177 $\mu\text{g/L}$, Mn 0.03 to 1.44 $\mu\text{g/L}$, As: 0.002 to 0.041 mg/L and for F were between 0.1 to 1.5 mg/L . In the Pampeano aquifer the Zn concentration was 200 to 800 $\mu\text{g/L}$ and in the Puelches aquifer was 20 to 160 $\mu\text{g/L}$. D and ^{18}O isotopes were similar in vertical profiles and regional distribution, this evaluation establish a hydrodynamic relationship between Epipelches-Puelches section. T values presented a vertical decrease in depth. The dominant soils in the area were Argiudoll, the relationships between land use and trace elements in water conform an urban hydrochemical cycles. The natural association between F and As was related to Pampeano silt. Nitrates and Total coliforms had a high correlation ($r=0.85$) and related to urban use without sanitation services. Fe, Mn, Cu, Zn were related to intensive agricultural use, while Pb, Co, Ni and Cr showed a narrow linking with industrial soil use.

Keywords: Hydrogeology, Hydrogeochemistry, Pollution, Risk, Land Use

1. INTRODUCCIÓN

La región estudiada se encuentra ubicada a orillas del Delta del río Paraná, a 50 km al NO de la ciudad de Buenos Aires, Argentina. Abarca 317 km^2 y tiene una población de 150000 habitantes (Figura 1).

La región presenta un clima húmedo, con una precipitación media de 1020 mm/año , una temperatura media anual de 16°C y una evapotranspiración potencial de 795 mm/año . Se estima un exceso hídrico de 225 mm/año , distribuido de abril a noviembre y repartido entre el escurrimiento superficial y la infiltración. Corresponde a la unidad fisiográfica denominada "Pampa Ondulada" (Frnguelli, 1950) y donde se ubica la cuenca inferior del Río Luján y subcuencas afluentes del mismo. Los arroyos más importantes son el Burgueño y el Pinazo que, en su confluencia, dan origen al arroyo Escobar y al arroyo Garín, ambos afluentes del río Luján en su margen derecha. El Partido de Escobar presenta un uso de la tierra muy diverso, fundamentalmente industrial, comercial, agropecuaria y urbano.

La denominada Subregión hidrogeológica Río Paraná (Santa Cruz y Silva Busso, 1999) se extiende desde la Cuenca del Río Salado al sur y sudoeste, hacia el norte hasta al menos el meridiano $33^\circ30'$ o lo bajos submeridionales, al este el Río Paraná y al oeste hasta aproximadamente el paralelo $62^\circ30'$. Los principales acuíferos de esta región se caracterizan por la estratigrafía e hidroestratigrafía reflejada en la tabla 1. Hidrogeológicamente, se diferencian en el área tres grandes unidades, considerando la definición del EASNE, (1972) aunque redefinido en sucesivos trabajos (Sala et al., 1983; Santa Cruz y Silva Busso, 1999) es aceptada actualmente y se considera apropiada para este

FIGURA 1. Mapa de ubicación del área de estudio y puntos de muestreo.

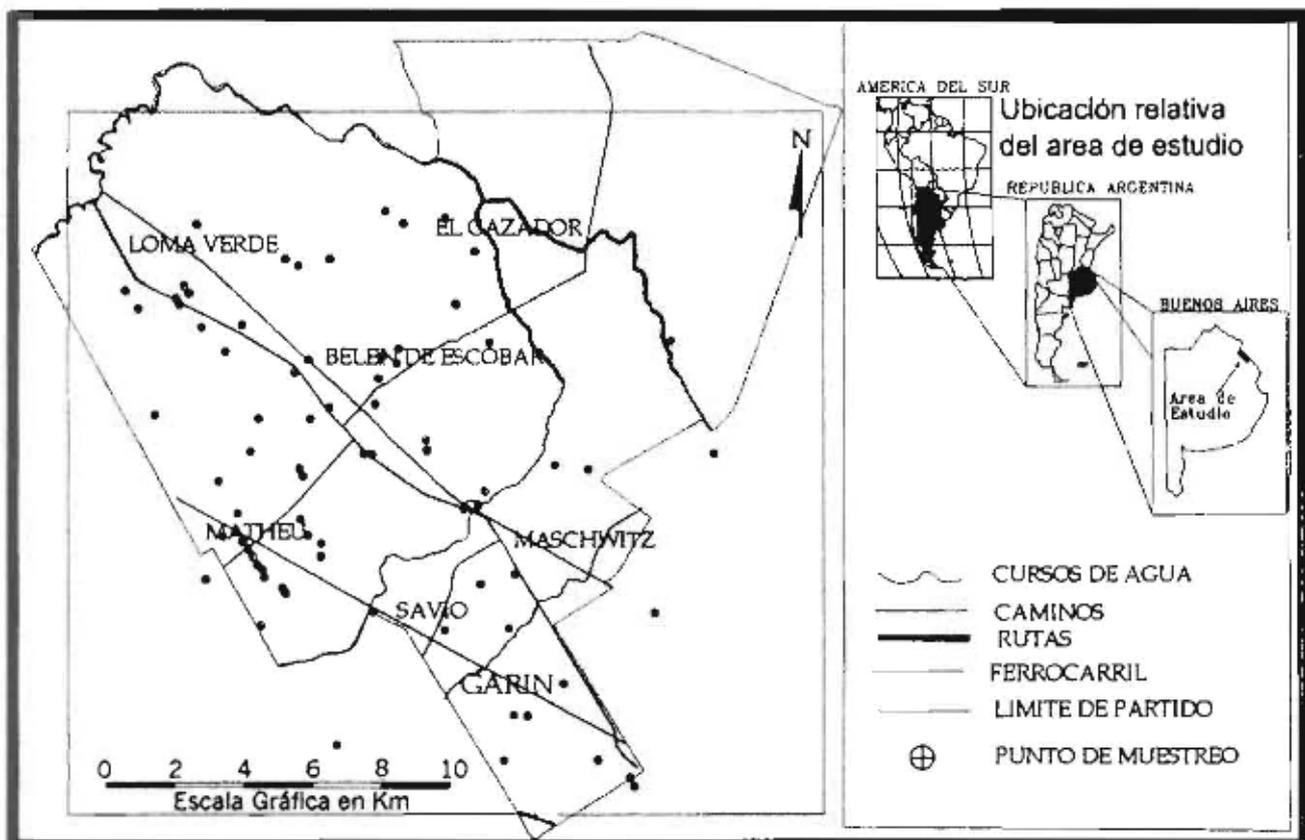


Tabla 1. ESTRATIGRAFÍA E HIDROESTRATIGRAFÍA DE LOS ACUÍFEROS MÁS IMPORTANTES DE LA SUBREGIÓN HIDROGEOLÓGICA I RÍO PARANÁ.

Estratigrafía	Hidroestratigrafía	Acuíferos Principales
Sedimentos Pampeanos	Epiparaneano	Acuífero Pampeano
Formación Puelches	Epiparaneano	Acuífero Puelches
Formación Paraná	Paraneano	Acuífero Paraná
Formaciones Olivos y/o Mariano Boedo	Hipoparaneano	Acuitardo
Basamento Cristalino	Basamento Hidrogeológico	Acuífugo

estudio. En términos generales, la secuencia estratigráfica de la región puede resumirse en una serie de paquetes de sedimentos, continentales de origen eólico (González Bonorino, 1965) y fluvial (Santa Cruz, 1972) considerados como la primera Sección Epiparaneana, que contiene los acuíferos Pampeano y Puelches (Sala et al., 1983)

La unidad superior corresponde a los acuíferos representados por los Sedimentos Pampeanos, cuya litología es de limos arcillosos de origen eólico (loess) y los Post-Pampeanos, fundamentalmente arenas y arcillas marinas, deltaicas y fluviales. Es la unidad hidrogeológica media y corresponde a los acuíferos de la Formación Puelches (Santa Cruz, 1972), arenas medias a finas de origen fluvial, situados a profundidades que varían entre 35 m.b.b.p. y 56 mb.b.p.

En la Sección Epiparaneana se distinguen hidráulicamente estos dos acuíferos. El superior es semilibre (Acuífero Pampeano), con valores de transmisividad entre 150 y 200 m²/día y coeficiente de almacenamiento del orden de 10⁻² (Santa Cruz y Silva Busso, 1999). El inferior es semiconfinado (Acuífero Puelches) y posee conexión hidráulica vertical con el anterior, permitiendo la recarga del acuífero y eventualmente el paso de los contaminantes. Los valores de transmisividad varían entre 300 y 400 m²/día y el coeficiente de almacenamiento es del orden de 10⁻³ (Santa Cruz y Silva Busso, 1999).

Los valores freáticos regionales oscilan entre 10 a 5 m.s.n.m. y las cotas topográficas varían entre 2.5 m.s.n.m. y 25 m.s.n.m. coincidiendo principalmente las áreas de recarga con los sectores topográficamente más elevados y las zonas de descarga con los cauces de los ríos y arroyos (Figura 2).

En general el medio urbano puede definirse como un dominio geoquímico abierto, donde los elementos traza se comportan de igual forma que lo harían en el medio natural, es decir, siguiendo ciclos hidroquímicos (De Miguel et al., 2002). Muchos de los trabajos relacionados con ciclos geoquímicos se relacionan con el material particulado sedimentado, suelos y polvo urbano, donde en muchos casos se ha intentado cuantificar y determinar las potenciales fuentes de contaminación (Wilken et al., 1995). En el caso de los elementos traza este tipo de análisis es más complicado cuando se trabaja con elementos traza.

Las asociaciones hidrogeoquímicas en el agua subterránea en ambiente natural han sido estudiadas en

Argentina por diversos autores. Nicolli et al (1985) relacionaron las asociaciones naturales de As, F y Vd con la presencia de vidrio volcánico en los Sedimentos Pampeanos; Merino (1995) estableció la relación entre el presente en litología y los recursos hídricos en el Se Valle de Calamuchita; Fresina (2002) apuntó las asociaciones entre parámetros físicos hidrodinámicos e hidroquímicos a nivel de cuenca. Pero es escasa la bibliografía en ejemplos de asociaciones hidrogeoquímicas en áreas urbanas, ya que posee los mismos inconvenientes que los relacionados con el material particulado.

El objetivo de este trabajo es determinar las agrupaciones y asociaciones hidrogeoquímicas naturales y antrópicas en el agua subterránea de la Sección Epiparaneana para, con el apoyo de cartografía temática, relacionar dichas asociaciones con el uso de la tierra en la zona de estudio y establecer criterios para los estudios de riesgo de contaminación.

En este trabajo también se pretende establecer una correlación del uso de la tierra con la presencia de elementos traza determinados en el suelo, teniendo en cuenta que la recarga vertical es el principal mecanismo de recarga de los acuíferos regionales de la región Pampeana (Sala y Auge, 1970; EASNE, 1972).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio utilizó la metodológica propuesta por Santa Cruz et al. (2000), con las siguientes adaptaciones:

Muestreo de agua

Se tomaron muestras de la sección Epiparaneana (Acuíferos Puelches y Pampeano) de perforaciones preexistentes (ASTM, 1981). La densidad de muestreo fue de una muestra de agua por cada 3 km², cuya ubicación puede observarse en la Figura 1. Si bien se ha muestreado independientemente en perforaciones preexistentes ambos acuíferos independientemente, en este estudio la información de elementos traza se analizará en conjunto para la Sección Epiparaneana.

Las muestras de agua se tomaron con una celda de aislamiento de flujo continuo, a fin de evitar el flujo turbulento, con la consecuente disolución o escape de gases. Dicha celda es adecuada para obtener las mediciones de temperatura, conductividad eléctrica y pH, lo más cerca posible a los valores

dentro de sus reservorios naturales, ya que dentro de la celda es mínima la interacción del agua con la atmósfera, y por lo tanto la oportunidad de escape e intercambio de gases. Durante el muestreo se utilizaron procedimientos especiales, que incluyen el agregado de HNO_3 (1 ml/l. a 0,1N), el uso de envases esterilizados para las muestras destinadas a bacteriología, y la conservación de las muestras a 4° C.

Los análisis químicos realizados fueron: pH, Conductividad eléctrica (CE), cationes: Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na) y Potasio (K); aniones: Cloruros (Cl^-), Sulfatos (SO_4^{2-}), Carbonatos (CO_3^{2-}), y Bicarbonatos (HCO_3^-), Nitratos (NO_3^-); elementos traza: Cobre (Cu), Zinc (Zn), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Arsénico (As), Flúor (F), Cromo (Cr), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Plomo (Pb). También se llevaron a cabo análisis bacteriológicos y de isótopos: Oxígeno (^{18}O), Deuterio (D) y Tritio (T), según la metodología establecida por la EPA (1986).

Muestreo de suelos

Para la descripción de los suelos del Partido de Escobar se realizaron calicatas sobre transectas desde las curvas de nivel de 25 a 5 m.s.n.m. en las localidades de Garín, Maschwitz, Belén de Escobar, Matheu y Loma Verde. La clasificación se realizó siguiendo la metodología de la Soil Taxonomy (USDA, 1998) y se tomaron muestras de suelos de cada uno de los horizontes descriptos.

En la antigua traza de la Ruta Nacional N° 9 se realizó un muestreo de reconocimiento del suelo para metales pesados. Las muestras fueron tomadas, con barreno plástico, en cinco puntos diferentes, con tres repeticiones, a una profundidad de 0-5 cm de suelo. Las muestras fueron llevadas al laboratorio, secadas al aire y tamizadas para su posterior evaluación. Los análisis realizados fueron: capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, porcentaje de arcilla, limo y arena para determinar la clase textural, y metales pesados: Cromo (Cr), Níquel (Ni), Cadmio (Cd), Zinc (Zn) y Plomo (Pb).

Usos de la tierra

Para la discriminación del uso actual de suelo se sintetizaron datos de las fotos aéreas de la Dirección de Geodesia de la Provincia de Buenos Aires en escala 1/20000, cartografía IGM escala 1/50000, y trabajo de campo. El uso urbano se ha identificado de acuerdo al concepto de aglomeración según el cual se definen áreas con calles, manzanas y construcciones de cualquier tipo. El uso agropecuario con insumos se considera cuando existe una práctica agrícola frecuente en parcelas menores de 3 ha, donde se utilizan maquinaria, sistemas de riego, agroquímicos y pesticidas. Las parcelas se ven ordenadas y puede haber intercultivo. El uso de suelo relacionado a la agricultura extensiva sin insumos consiste en parcelas de más de 3 a 5 ha en las que se realiza monocultivo, sin técnicas avanzadas ni uso de fertilizantes y agroquímicos. Las zonas de actividad industrial se definieron a partir de la categorización industrial y de la observación en el terreno, estableciéndose dos variantes: las industrias individuales y los parques industriales. Se han incluido aquí grandes galpones para el procesamiento de materias primas, plantas automotrices y fábricas proveedoras de materiales de construcción. Posteriormente se realizó una

selección de industrias por categoría de riesgo ambiental y por localidad en el partido de Escobar de acuerdo a la reglamentación provincial vigente.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis multivariado, de agrupamiento y factorial para establecer asociaciones y orígenes de los elementos traza. El análisis de agrupamiento de variables fue realizado sobre el total de las muestras de la Sección Epipampeana, empleándose el método de unión Ward y correlación Pearson (Davies y Wixson, 1987; Sánchez Gómez y Ramos, 1987).

3. RESULTADOS

Caracterización hidrogeológica

Se determinó que las aguas de los acuíferos Pampeano y Puelches, presentan facies hidroquímicas bicarbonatadas sódicas en casi toda la región estudiada, evolucionando a cloruradas sódicas hacia las áreas de descarga, que corresponden a las planicies de inundación de los cursos fluviales. En la zona de estudio el pH del agua subterránea oscila entre 7.04 y 8.03, y los valores de la conductividad eléctrica entre 800 y 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los resultados de los análisis isotópicos han permitido corroborar la relación hidrodinámica entre las diferentes unidades acuíferas, discriminando las muestras de agua subterráneas provenientes de las Secciones Acuíferas Epipelches y Puelches. Los valores de relación isotópica (expresados en unidades delta, respecto al patrón VSMOW) de deuterio (D) y oxígeno 18 (^{18}O), son similares en ambos acuíferos, tanto en perfiles verticales como arealmente. Los valores, para ^{18}O (en ‰), han oscilado entre -5.6 y -5.0 (+/-0.1) y para D (‰) variaron entre -29 y -33 (+/-1.0), estableciendo una relación hidrodinámica de la Sección Epipelches-Puelches y su conexión con el ciclo hidrológico actual. Solo se han analizado 5 muestras de cada acuífero como una primera aproximación en función del acceso a la captación. Los valores de Tritio (T) presentan una clara disminución en profundidad, pasando de 5.7- 6.6 UT (unidades tritio) en el Acuífero Pampeano a 2.1 - 4.0 UT en el acuífero Puelches. Los valores actuales de Tritio de la recarga actual son de entre 6 y 9. Esto indica la existencia de recarga vertical del acuífero Puelches desde el acuífero Pampeano, con el correspondiente retardo a causa de la diferencia de permeabilidad entre ambos.

Caracterización edafológica y de elementos traza en suelos

De la descripción de los suelos se deduce que la mayor superficie del partido se encuentra cubierta por suelos Argiudoles típicos, ubicados sobre las curvas de nivel de 25 a 20 m.s.n.m. Presentan un horizonte A (HA) cuya profundidad varía de 20 a 40 cm, rico en materia orgánica (2-3%) y con un contenido de arcillas del 30%, seguido de un horizonte B argílico (HBI) potente, con un 35 a 50% de arcillas, de espesor variable, siendo menor a medida que se descende en la cota, los valores de CIC (capacidad de intercambio catiónico) varían de 15 a 20 cmolc kg^{-1} . En las zonas bajas (5 m s.n.m. y márgenes de arroyos) los suelos son Fluvacuents, que presentan discontinuidades litológicas.

En las zonas altas del paisaje los suelos son Hapludoles y presentan una textura franca a franco arenosa, con un HA profundo y un contenido de MO (materia orgánica) del 5%, descendiendo rápidamente en profundidad. En Maschwitz, sobre la cota de 5 m.s.n.m el perfil presentó escasa profundidad, presentando, en la época muestreada, la capa freática a 60 cm de profundidad; son suelos salinos y sódicos. En el punto más cercano a la ruta nacional N° 9, el Pb presentó valores altos (244 ppm), referenciado en el mismo punto que los altos niveles de Zn (máximo 219 ppm), cuyo valor puede ser considerado como fitotóxico según Kabata-Pendias y Pendias (1992). Con respecto al resto de los elementos y puntos muestreados los valores encontrados se hallan por debajo de los límites considerados tóxicos.

Relaciones y asociaciones hidrogeoquímicas

Las concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas del Acuífero Pampeano reflejan una amplia dispersión, entre 5 y 125 mg/L. En el Acuífero Puelches también existe la misma tendencia, con valores entre 10 y 120 mg/L y aún superiores, respondiendo a una distribución regional similar a la anterior. Los análisis bacteriológicos del acuífero Pampeano han revelado que en el 80% de las muestras se detecta presencia de *Escherichia Coli* y en el 40% de *Pseudomonas* s.p. En el acuífero Puelches se ha encontrado que el 10% de las muestras acusan presencia de *Escherichia Coli* y el 20% de *Pseudomonas* sp. La contaminación bacteriológica aún se encuentra en estudio, pero estos datos son muy significativos, por su relación con los centros urbanos y con las concentraciones de NO₃.

Se han analizado los resultados de los elementos minoritarios correspondientes a los metales pesados que presentan mayor concentración y persistencia en el área estudiada. Se detectaron concentraciones de Cr en las aguas subterráneas con valores entre 0.6 a 50 mg/L y de Cd entre 3 a 18 mg/L en la Sección Epiparaneana. La concentración de Zn pudo observarse en la misma sección, donde en el acuífero Pampeano presentó valores entre 200 y 800 µg/L y en el Puelches entre 20 y 160 mg/L, de igual modo esta información se analizó en el contexto de la Sección Epiparaneana. El Cu presentó un rango de concentración entre 4 y 160 µg/L en toda la sección. Las concentraciones de Fe y Mn en la Sección Epiparaneana presentaron valores muy dispersos, entre 0.11 y 177 mg/L para el Fe, y entre 0.03 y 1.44 mg/L para el Mn.

Para el As, los valores fueron entre 0.002 y 0.041 mg/L y el F presentó valores entre 0.1 y 1.5 mg/L.

En cuanto a la asociación natural de As y F los valores, si bien no muy elevados para la región pampeana, son significativos por tratarse de la única relación natural caracterizada y tipificada; además su presencia indica aguas relacionadas hidrogeológicamente con el Acuífero Pampeano, ya que el Acuífero Puelches originalmente no presenta esta asociación. (Nicollí, et al., 1979). En las Figuras 3 y 4 puede observarse el agrupamiento de componentes principales para las variables analizadas.

En el análisis de agrupamiento y factorial no se han incluido los valores de Nitratos y los resultados bacteriológicos ya que correlacionan negativamente con

los metales pesados, por lo que en sí mismo constituyen una Asociación Hidrogeoquímica característica, esta se denominará Asociación II.

En base al resultado del análisis se han identificado cuatro asociaciones en el agua subterránea de la Sección Epiparaneana de Escobar. Las mismas están representadas en las Figuras 3 y 4; denominaremos como Asociación I la que vincula al As y F, Asociación III aquella que agrupa al Fe, Mn, Cu y Zn, la Asociación IV agruparía a Pb, Co, Ni, Cr y es probable que incluya al Cd aunque el muestreo no es lo suficientemente representativo. Además se ha considerado como Asociación II, que se ha correlacionado independientemente, la relación entre Nitratos y Coliformes totales, dado que poseen una elevada correlación ($r = 0.85$).

Los mapas de isoconcentraciones de contaminantes individuales se han combinado en función de las asociaciones definidas a partir del análisis de agrupamiento, determinando zonas de concentración baja, media, alta o muy alta en algunos casos, con el objeto de poder observar la distribución regional de los contaminantes y relacionarlos con la discriminación de usos de suelo. Los resultados se presentan en las Figuras 6, 8, 10 y 12.

Usos de la tierra

En el conurbano Bonaerense el uso de suelos posee una diversidad que responde a dos factores diferentes: la distribución actual de actividades y la evolución histórica de las mismas. Es decir, la discriminación actual del uso de suelo define la situación y distribución espacial inmediata, pero raramente puede definirse la evolución histórica de su uso, que en muchas localidades ha sido muy variado en los últimos 100 años. En el área de estudio el uso de la tierra ha tenido un crecimiento en un periodo muy corto de tiempo a partir de áreas que originalmente eran naturales, o de uso ganadero extensivo que no habían involucrado cambios históricos importantes del mismo.

Para lograr una mejor apreciación de las relaciones territoriales y las asociaciones hidrogeoquímicas propuestas, los mapas de usos de suelo se han discriminado como se indica en las referencias de la Figura 5. Inicialmente se ha realizado el mapa de áreas de afloramiento de los Sedimentos Pampeanos (Figura 7). Si bien este no es un mapa de usos de suelo, es útil en cuanto que esta unidad conforma una región geomorfológica muy diferenciada, siendo importante porque el 90% de las actividades antrópicas se concentran allí. Además debe considerarse que la relación de la Asociación I (As, F de origen natural) se relaciona con el vidrio volcánico contenido en dichos sedimentos (Nicollí et al, 1985).

4. DISCUSIÓN

Los ambientes urbanos son ambientes complejos, donde la asociación de uno o varios elementos traza con determinado proceso es difícil de determinar. Por ello, en ciertos trabajos se ha recurrido a emplear un conjunto de

elementos traza para caracterizar las asociaciones y determinar sus posibles origen (De Miguel et al., 2002 ; Wilken et al., 1995).

Por ejemplo, se han determinado asociaciones de Zn, Cu, Pb y Ba para el material particulado de los suelos Madrid (España), como consecuencia del tránsito vehicular y proveniente de los combustibles, lubricantes y desgaste de neumáticos. La corrosión de estructuras metálicas galvanizadas puede también relacionarse con asociaciones de Fe, Zn y Cd y eventualmente se asocia el Pb, como también se ha estudiado sobre el material particulado de Oslo (Noruega) y Madrid, España (De Miguel, 2002) . Estas asociaciones no son siempre las mismas; el Pb en Oslo, se asocia con la remodelación edilicia y no con el tránsito vehicular, en tanto que en Madrid se cita un ejemplo de enmascaramiento de la concentración de Zn atribuible al tránsito vehicular por efecto de una fuente mayor de contaminación industrial. Además existen asociaciones naturales que también se identifican sobre el material particulado (De Miguel et al., 2002).

En el caso de las aguas subterráneas se han empleado técnicas estadísticas para correlacionar o relacionar usos de suelo y contenido en sales totales (Silva Busso y Olivares, 1998; Silva Busso et al., 1999), relaciones entre especies iónicas mayoritarias disueltas en el agua y geomorfología de la cuenca (Santa Cruz et al., 1998), variables físicas de cuencas con su hidroquímica (Fresina, 2002) y asociaciones naturales entre litología y los contenidos en ciertos elementos traza (As, F y Vd) en aguas subterráneas, o Se en el caso de aguas superficiales (Nicolli et al., 1985; Merino, 1995).

El agua subterránea posee características hidrogeoquímicas específicas y de cierta forma las asociaciones de elementos traza que pueden encontrarse en ella, excepto las naturales relacionadas con la litología, son consecuencia de la migración vertical a través del suelo y la zona no saturada, o bien por contaminación en captaciones, inyección de contaminantes al acuífero libre y conexión hidráulica con recursos hídricos superficiales.

Esto ha permitido la inclusión en este análisis de especies iónicas que si bien no son elementos traza, son citadas en la bibliografía como típicas de los ambientes urbanos, como es el caso de los Nitratos (Díaz, 1986; Petcheneshsky, 1988; Augé, 1990; Heredia y Pascale, 2000) el fósforo disuelto (Heredia et al., 2000) y la presencia de ciertas bacterias patógenas en los acuíferos. A partir del análisis de los usos de la tierra se concluyó, como han señalado previamente diversos autores, la afectación sobre el sistema acuífero puede deberse a un uso específico del suelo, o, lo que es más frecuente, a la combinación de varios usos relacionados (Silva Busso et al., 1995; Silva Busso y Olivares, 1998).

Estas asociaciones hidrogeoquímicas demuestran ser específicas de cada región. Las asociaciones propuestas en Madrid, Ostrava u Oslo (De Miguel et al., 2002) sobre material particulado no posee los mismos componentes en cada caso, sino que es determinada en función del uso de suelo y tipo de afectación antrópica. Es decir que las asociaciones no son extrapolables a todas las áreas urbanas y, aún menos, al agua subterránea.

Asociaciones hidrogeoquímicas y usos de la tierra

La relación entre las asociaciones hidrogeoquímicas definidas y el uso de la tierra queda determinada por la comparación de la distribución areal de las concentraciones de las diferentes asociaciones y la discriminación de uno o más usos del suelo. La Asociación Hidrogeoquímica I (As y F) ha sido definida como característica de los Sedimentos Pampeanos y la hidroquímica del acuífero contenido en él (Nicolli et al., 1985). Como puede comprobarse en base a los mapas de las Figuras 6 y 7, la distribución de las concentraciones medias y altas de esta asociación coinciden espacialmente con la distribución de las áreas de afloramiento de dicha formación geológica; las zonas topográficamente más bajas poseen valores muy pequeños y puede deberse a los cambios litológicos relacionados con el Postpampeano y la hidrodinámica regional. Es de aclarar que esta relación puede considerarse como natural, siempre que se trate de análisis en el Acuífero Pampeano semejantes a los de este estudio.

La Asociación Hidrogeoquímica II (Nitratos y Coliformes Totales), Figuras 8 y 9, la distribución de las concentraciones medias y altas de esta asociación coinciden espacialmente con los sectores de zonas urbanizadas, en su mayoría sin red de saneamiento y con inadecuada eliminación de aguas residuales.

Esta asociación posee una gran dispersión areal de los valores bajos de concentración, que probablemente se deba a que el uso de la tierra a la que se relaciona es el más antiguo en el área de estudio, lo que coincide con el descrito por otros autores para el Acuífero Pampeano (Augé, 1990; Heredia y Pascale, 2000), y a la migración vertical y horizontal del mismo en función de las perturbaciones hidrodinámicas del medio acuífero, particularmente en el acuífero Puelches (Díaz, 1986).

Debe considerarse además que los nitratos poseen cierta correlación positiva no solo con los Coliformes Totales, sino también con el F y As ($r = 0.7$) como característica de los Sedimentos Pampeanos. Esto es consecuencia de la existencia de sumideros de excretas sin aislamiento ("pozo ciego"), en contacto con dicho acuífero a consecuencia de un sistema de saneamiento inadecuado. La Asociación Hidrogeoquímica III (Fe, Mn, Cu y Zn) y la relación con los usos del suelo puede observarse en los mapas de las Figuras 10 y 11. En los mismos se verifica que la distribución de las concentraciones medias y altas de la Asociación III coinciden espacialmente con los sectores en los que predominan las zonas de agricultura intensiva y extensiva.

Durante el censo de usos de la tierra se encuestó y verificó el uso invariable de productos funguicidas con elevados contenidos de Cu y Zn y productos fertilizantes en la floricultura con contenidos de Fe y Mn, por lo que consideramos esta como la causa más probable de contaminación del acuífero.

Sin embargo, es importante no descartar otras asociaciones vinculadas con la corrosión de estructuras metálicas (sobre todo estructuras de hierro muy empleadas en la agricultura intensiva). Esta asociación con la corrosión ha sido mencionada por otros autores para estudios sobre material particulado (De Miguel et al., 2002; Wilken et al. 1995). Si bien en función del estudio de metales en suelos parecería haber relación del

Zn con el tránsito vehicular (cercano a la vieja traza de la Ruta N° 9), esto no excluye otros orígenes posibles, ya que por migración a partir de la infiltración vertical hacia el acuífero el Zn puede tener origen en diversos procesos o usos de la tierra. Tendencias semejantes a lo encontrado en los suelos sobre la Ruta N° 9 han sido encontradas en suelos urbanos de La Plata (Villegas com.pers.).

La Asociación Hidrogeoquímica IV (Pb, Co, Ni y Cr) y el uso de la tierra puede observarse en base a los mapas de las Figuras 12 y 13. En los mismos se verifica que la distribución de las concentraciones medias y altas de la Asociación IV coinciden espacialmente con los sectores en los que predominan las zonas industriales, algunas completamente industriales y otras de uso mixto urbano-industrial.

La diversidad de procesos industriales hace muy difícil determinar los ciclos hidrogeoquímicos urbanos que interactúan con el agua subterránea a esta escala de estudio. Aún así es visible que las zonas de Garín, Maschwitz y Belén de Escobar presentan las concentraciones mayores de esta asociación y muestran también una fuerte presencia de actividad industrial. Se ha agregado en la Figura 13 la posición de las industrias más importantes (categorías 2 y 3 según la Ley de la Provincia de Buenos Aires 11459), donde se observa que éstas se sitúan prácticamente sobre las zonas de alta concentración para esta asociación.

5. CONCLUSIONES

La zona de estudio presenta un intenso, aunque desordenado, desarrollo urbanístico, industrial y agropecuario, unido a un notable déficit de equipamiento para el tratamiento de efluentes urbanos e industriales, lo que provoca la aparición de sectores donde las aguas subterráneas utilizables ven afectadas su calidad natural. La metodología empleada en este trabajo, comúnmente utilizada en el estudio de material particulado, ha demostrado que puede ser aplicada en estudios de contaminación de agua subterránea con buenos resultados, permitiendo complementar las ya propuestas para caracterizaciones hidrogeoquímicas de medios urbanos, considerándolas como un conjunto interrelacionado de suelo, polvo y partículas en suspensión, anexando también en esta interrelación el agua subterránea. Se ha verificado que al menos a una escala regional es posible relacionar asociaciones hidrogeoquímicas con grandes grupos discriminados de usos del suelo consecuentes de la actividad antrópica en la forma presentada en este estudio, constituyendo un avance frente a estudios previos donde solo se mencionaba la posibilidad verificando la asociación a partir de las variaciones de salinidad total o relacionándolo con características naturales. Se han detectado y verificado trazadores multielementales que relacionan asociaciones de elementos traza y usos del suelo, conformando ciclos hidrogeoquímicos urbanos y discriminando las asociaciones naturales (As y F y litología de los

Sedimentos Pampeanos (Asociación I)) de las antrópicas, como las áreas con altos valores de nitratos y coliformes totales (Asociación II) relacionadas con sectores urbanos sin servicios de saneamiento. La asociación III y el uso agrícola intensivo y extensivo (subordinado) o la Asociación IV y su estrecha vinculación areal con el uso industrial del suelo. A su vez, si bien algunas asociaciones hidrogeoquímicas como la representada por el Pb, Cu y Zn son típicas de áreas urbanas en material particulado atmosférico y suelos, también se verifica dicha relación en este estudio, con algunas variaciones.

En los suelos se determinó la presencia de Pb y valores anómalos de Zn en puntos aledaños a la antigua Ruta Nacional N°9; sin embargo, se ha demostrado que en los acuíferos de la Sección Epiparaneana esta relación puede ser más difusa u obedecer a diversas causas hidrodinámicas que pueden acumular o dispersar los mismos. En este sentido, deberá tenerse en cuenta en futuros estudios la realización de análisis de las aguas superficiales y de sedimentos fluviales de cauces actuales, que también pueden presentar asociaciones similares a las obtenidas. Debe considerarse además, que el uso de los suelos en el área de estudio, si bien es muy diverso no ha tenido variaciones significativas a lo largo del tiempo. En áreas que han tenido cambios importantes en el uso del suelo durante al menos los últimos cien años es muy probable que estas asociaciones sean más difíciles de interpretar de la forma propuesta en este trabajo.

Concluyendo, este estudio ha permitido correlacionar áreas contaminadas del recurso agua subterránea con los diferentes usos de la tierra. Por lo tanto puede considerarse que en regiones donde se realicen estudios de vulnerabilidad y usos de suelo sería posible definir mapas de riesgo potencial de contaminación concordante con las asociaciones aquí propuestas, siempre que la región tenga similitudes geológicas y poca variación de sus usos antrópicos del suelo a lo largo del tiempo. Es así que el riesgo potencial definido se referiría no a un elemento traza, sino a una asociación hidrogeoquímica de elementos traza.

FIGURA 2. Mapa Piezométrico Acuífero Pampeano (Santa Cruz et.al., 1999).

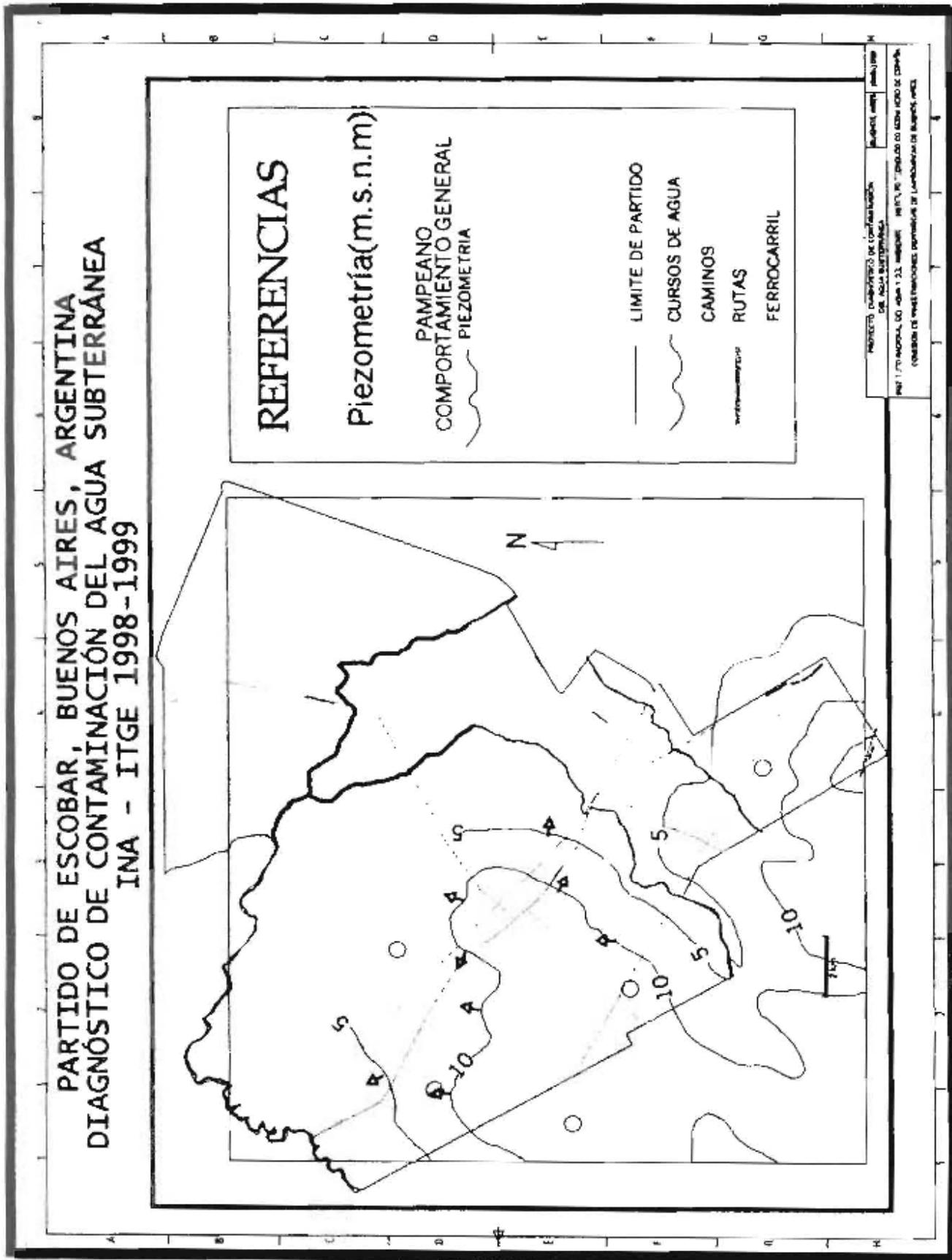


FIGURA 3. Análisis de Agrupamiento de Variables, Sección Epiparaneana, Escobar, Bs. As.

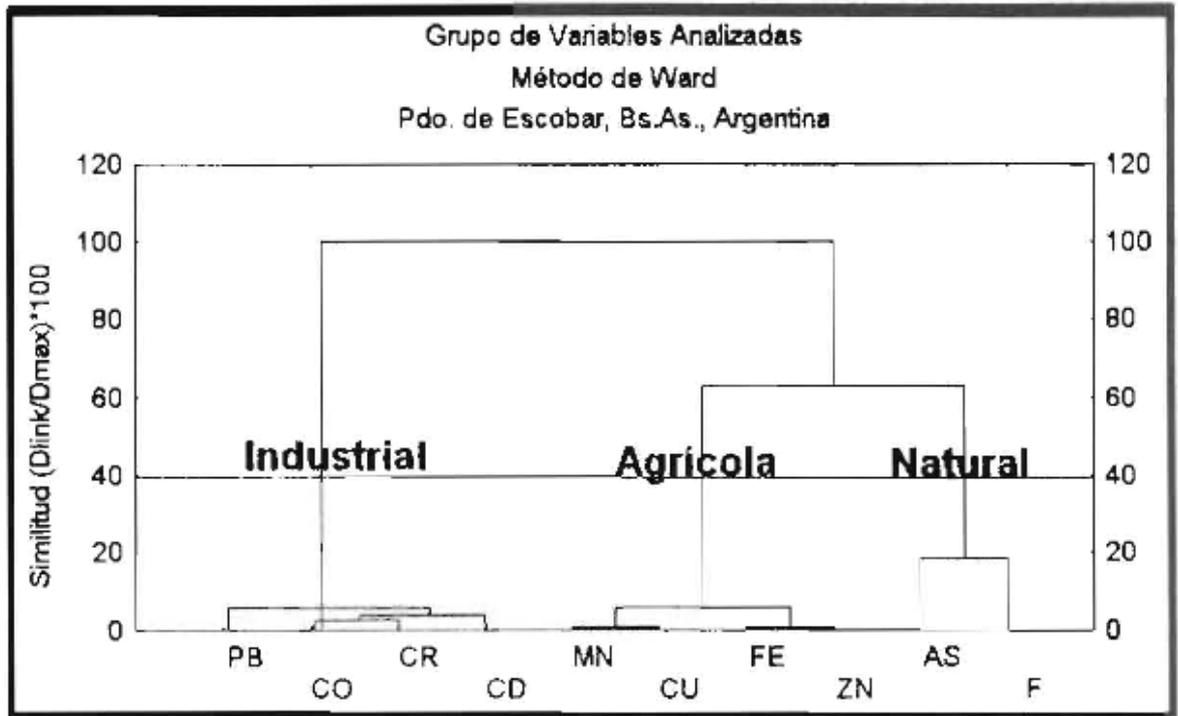


FIGURA 4. Análisis de Componentes Principales, Sección Epiparaneana, Escobar, Bs.As.

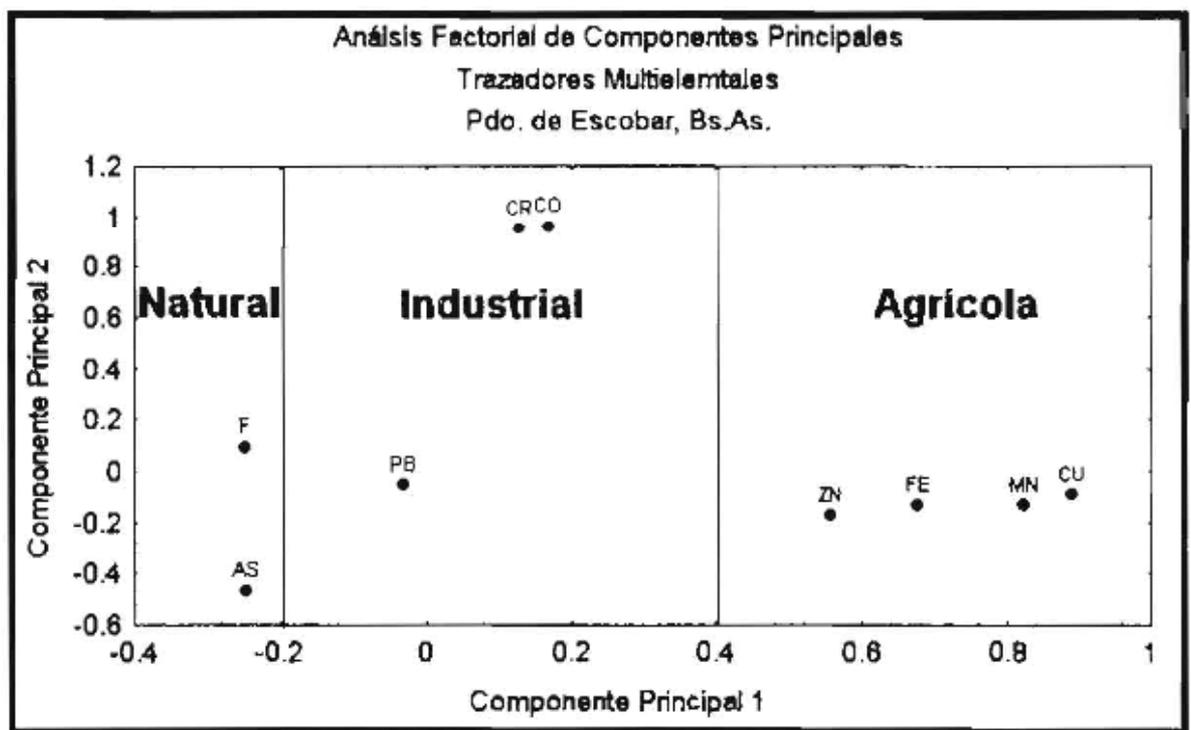


FIGURA 5. Usos de la tierra en el Partido de Escobar (Santa Cruz et al., 1999).

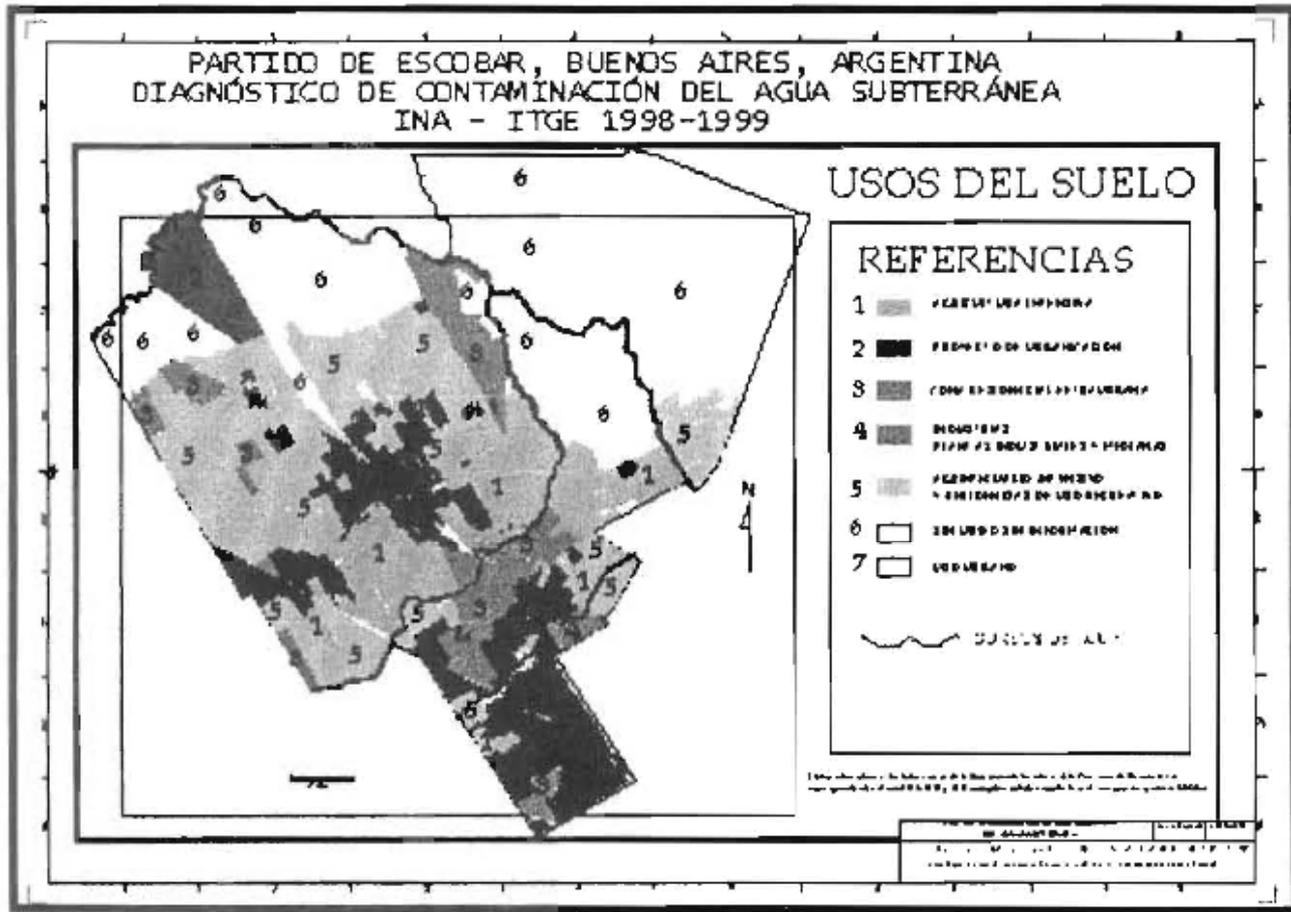


FIGURA 6. Distribución de la Asociación I en el Partido de Escobar.

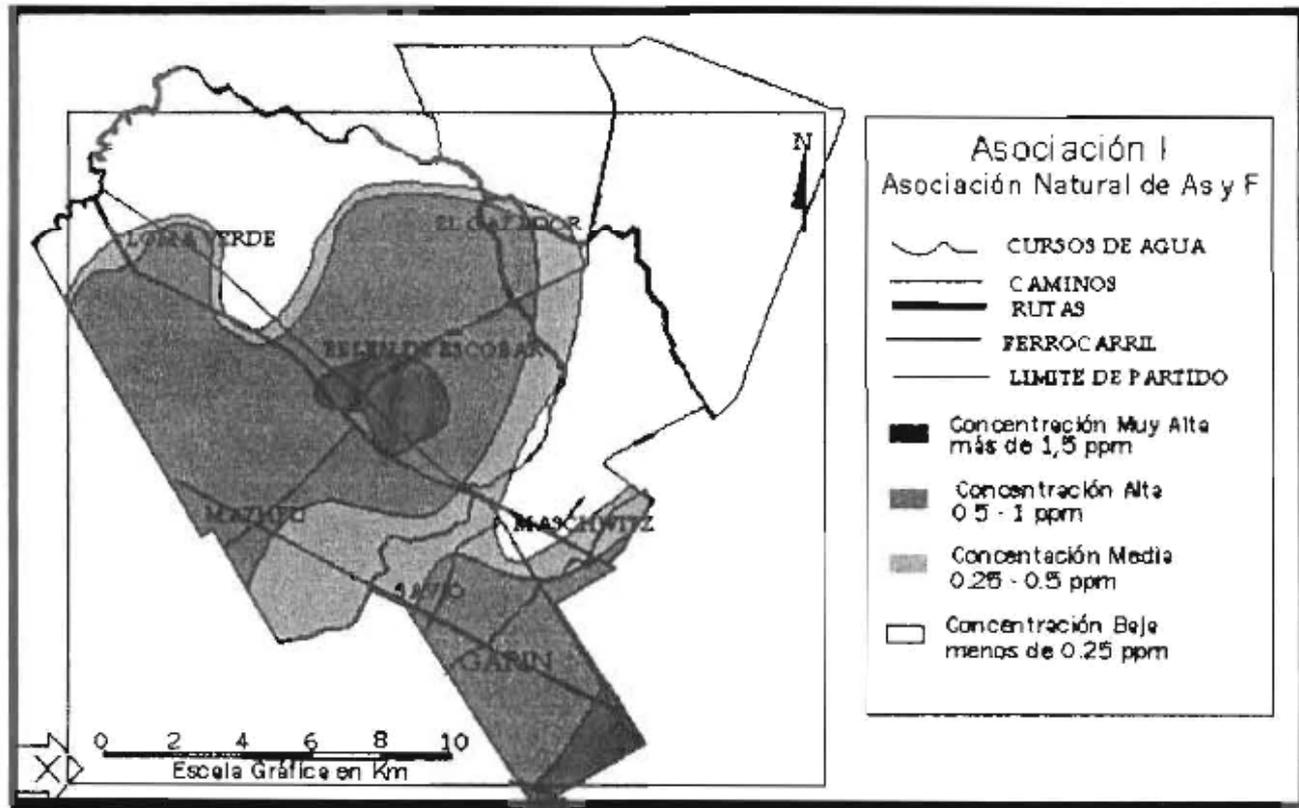


FIGURA 7. Afloramientos de Sedimentos Pampeanos en el Partido de Escobar.

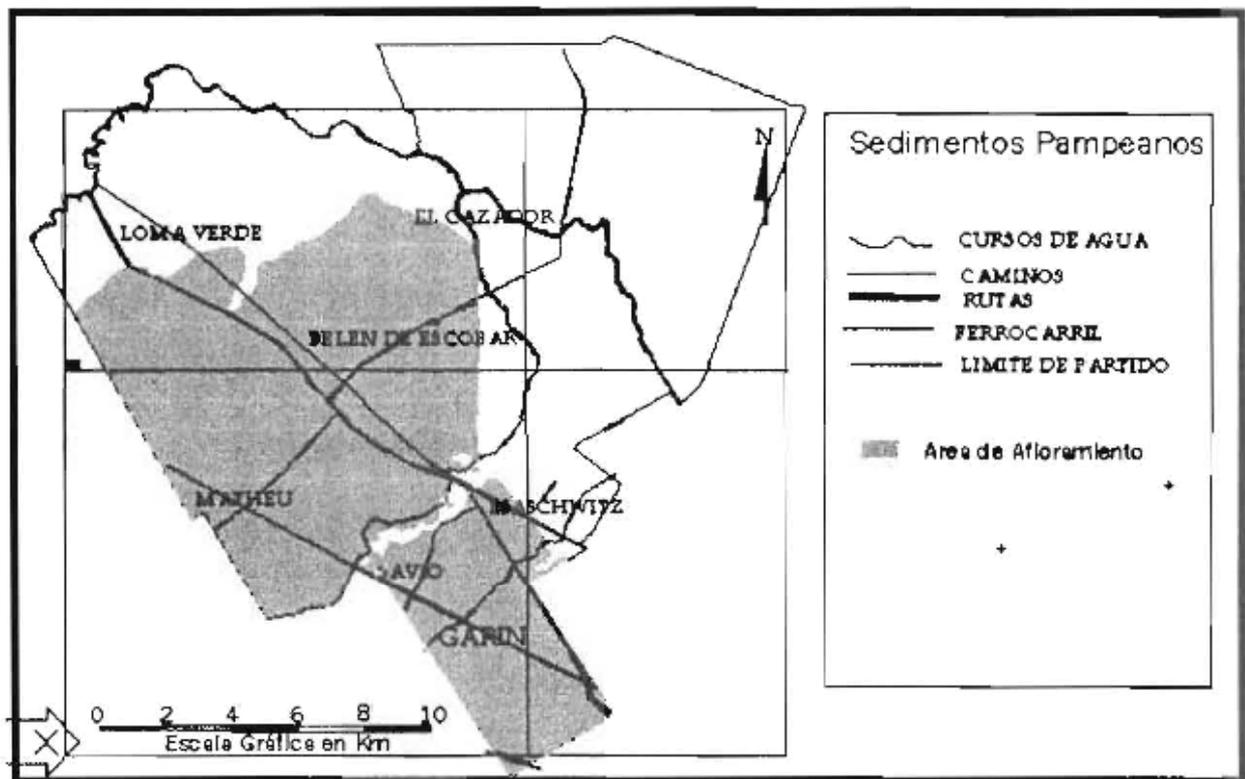


FIGURA 8. Distribución de la Asociación II en el Partido de Escobar.

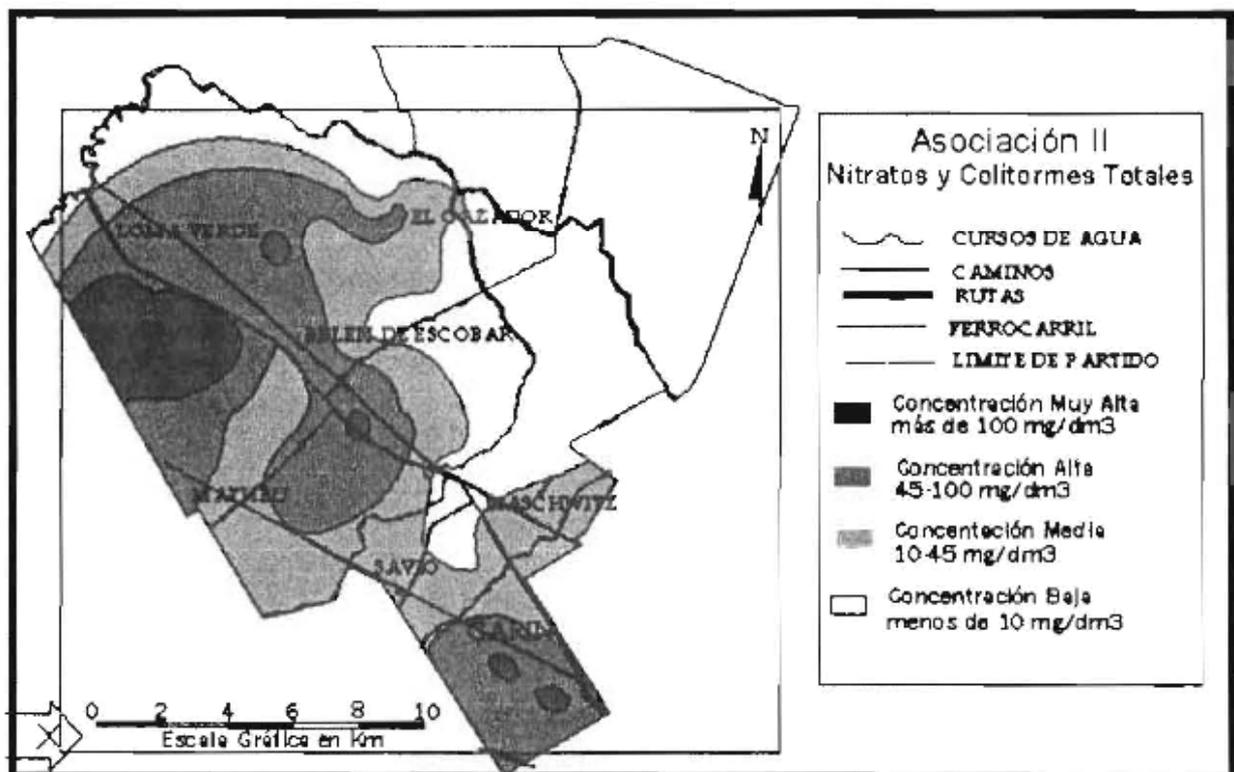


FIGURA 9. Usos de suelo relacionados con la Asociación II.

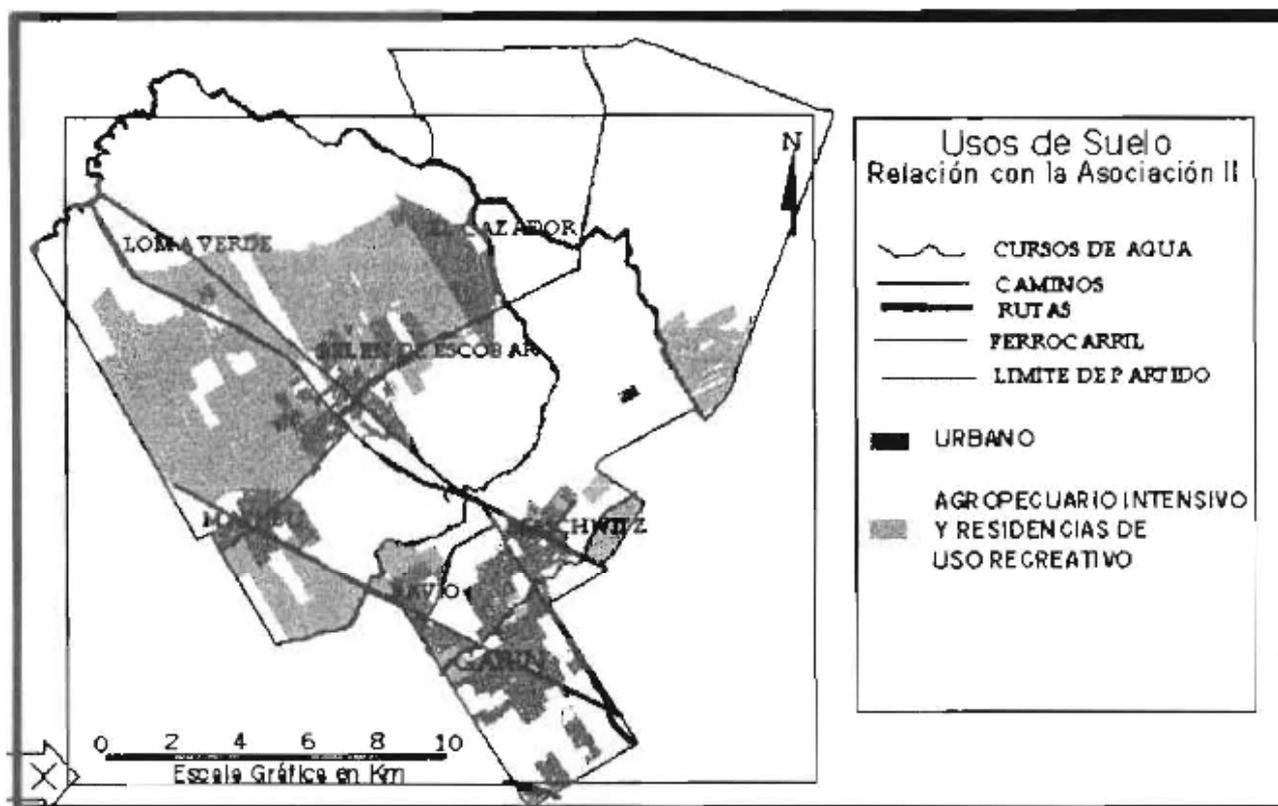


FIGURA 10. Distribución de la Asociación III en el Partido de Escobar.

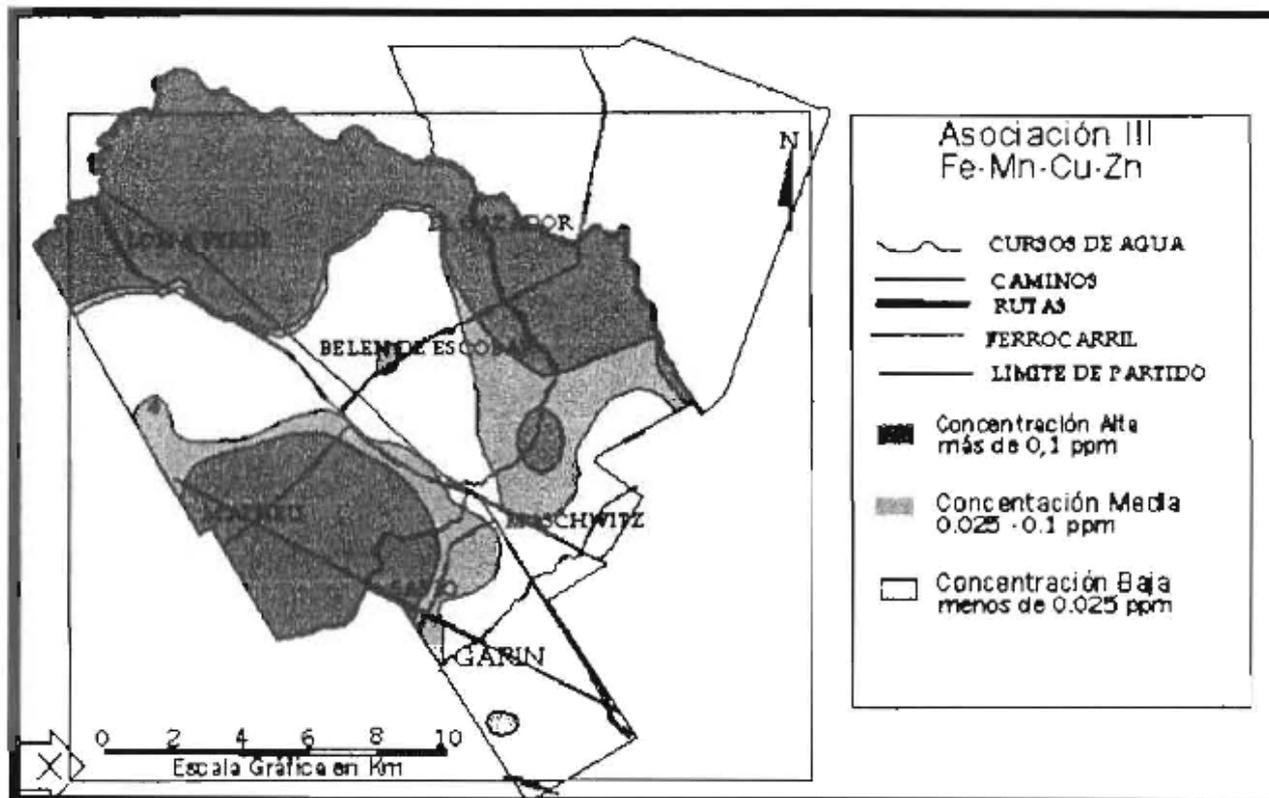


FIGURA 11. Usos de suelo relacionados con la Asociación III.

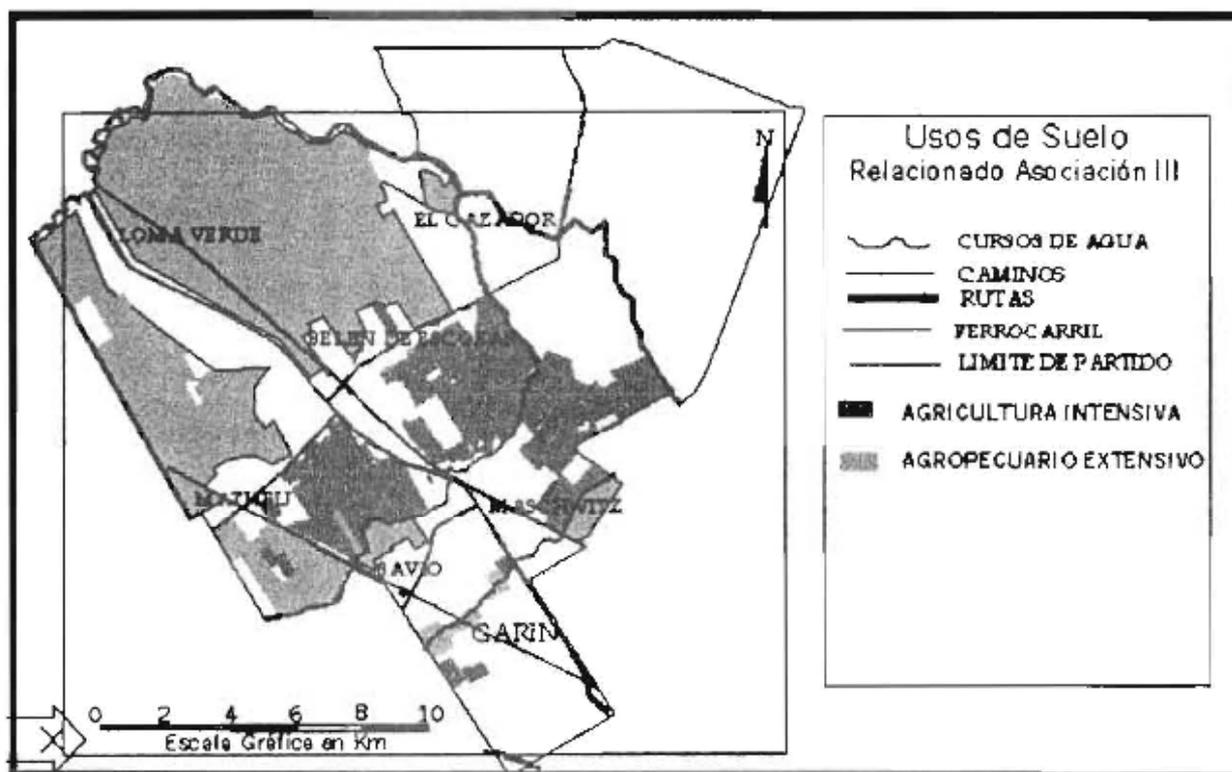


FIGURA 12. Distribución de la Asociación IV en el Partido de Escobar.

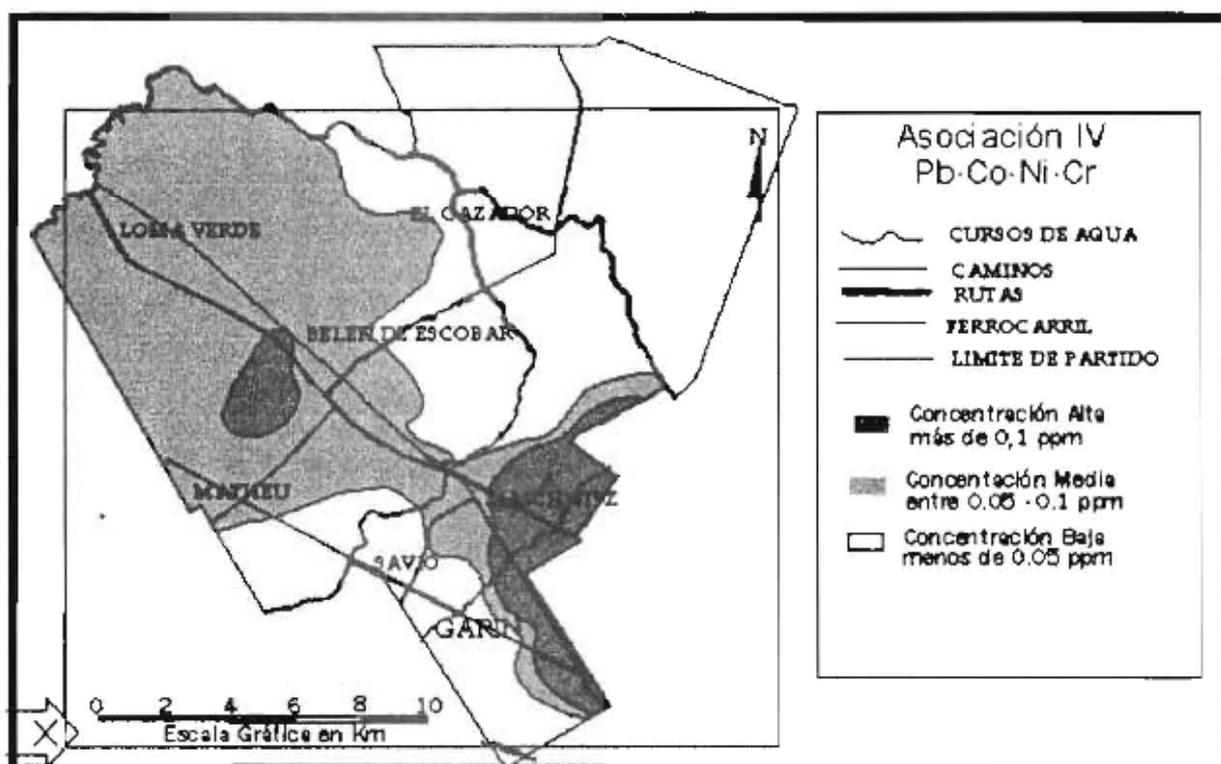
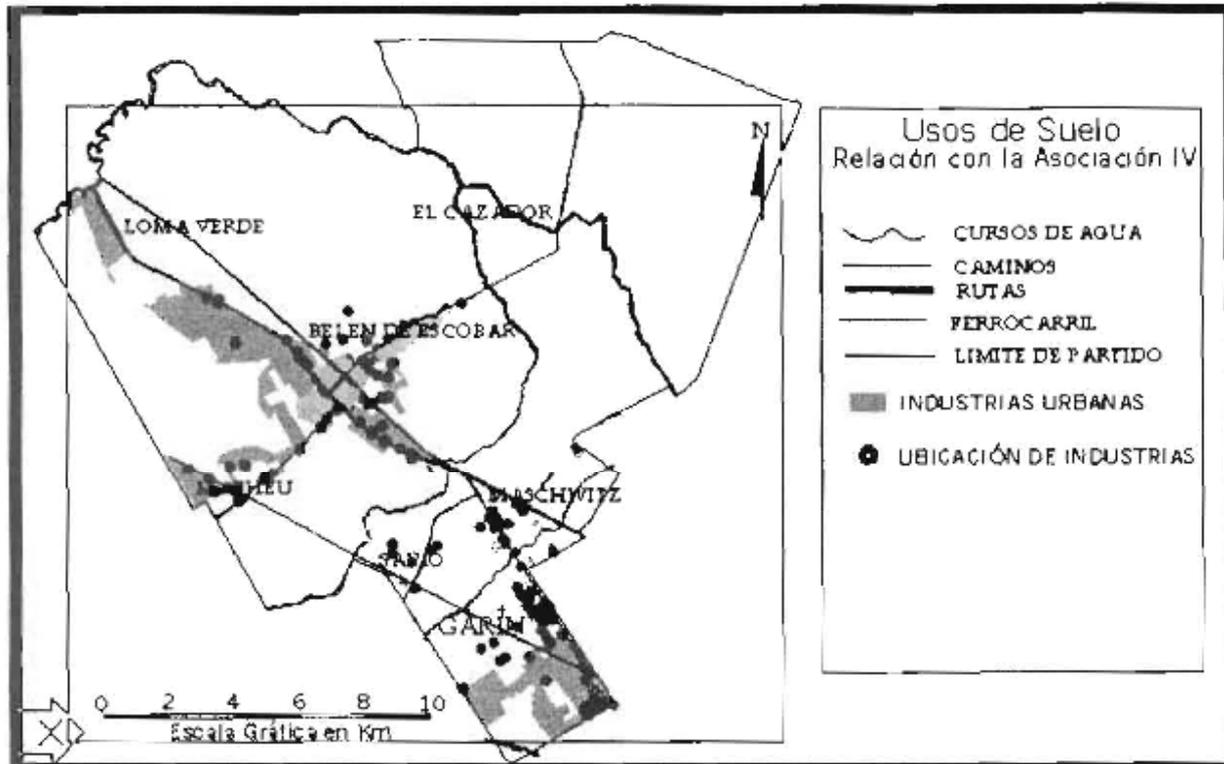


FIGURA 13. Usos de suelo de la Asociación IV en el Partido de Escobar.



6. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ASTM, 1981.

Draft Standard Guide for Sampling Ground Water Monitoring Wells, p. 14

AUGE M. P. 1990.

Aptitud del Agua Subterránea en La Plata, Argentina. Seminario Latinoamericano sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Bariloche, Argentina. Actas Tomo I pag 191-201.

GONZÁLEZ BONORJINO, F., 1965.

Mineralogía de las fracciones arcilla y limo del Pampeano en el área de la Ciudad de Buenos Aires y su significado estratigráfico y sedimentológico. Asociación Geológica Argentina, Rev. Tomo 20 (1): 67-148. Buenos Aires.

CAMILION M., M. HURTADO, A. ROCA Y M. DA SILVA. 1998.

Estado ambiental de suelos del gran Buenos Aires afectados por emisiones vehiculares. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: 337-338.

DAVIES B. E. AND B. G. WIXSON 1987.

Use to factor analysis to differentiate pollutants from other trace metals in surface soils of the mineralized area of Madison Country, Missouri, USA. Water, Air and Soil Pollution, 33 pag:339-348

DÍAZ, F. 1986.

Presencia de Nitratos en el Acuífero Puelches en las cercanías del Predio de Ezeiza del INCyTH. Informe Inédito.

DE MIGUEL E., J. F. LLAMAS, E. CHACÓN, C. FERNÁNDEZ ARROJO, A. ORDÓÑEZ, A. CALLADA, S. LARSEN Y S. CHARLESWORTH. 2002.

Caracterización Geoquímica de los ciclos de elementos traza en ambientes urbanos. Boletín Geológico y Minero. IGME. Madrid, España. 133(1):35-43.

EASNE. 1972.

Estudio de Aguas Subterráneas del Noreste de la Provincia de Buenos Aires. Consejo Federal de Inversiones. Provincia de Buenos Aires.

- EPA. 1986.
Quality Criteria for Water: Office of Water Regulations and Standards, Criteria and Standards Division. EPA, Washington, D.C., USA.
- FRENGUELLI J. 1950.
Rasgos generales de la Morfología y Geología de la Provincia de Buenos Aires. MOP. LEMIT. Serie 62. La Plata.
- FRESINA M. 2002.
Comportamiento Hidrogeológico - Hidroquímica del Acuífero Pampeano de la Cuenca Inferior del Río Carcaraña. Prov. de Córdoba y Santa Fe. Tesis Doctoral. Dpto. de Cs. Geológicas. FCEyN. UBA (Inédito).
- HEREDIA O. S., PASCALE C. 2000.
Calidad de aguas de bebida en algunas localidades urbanas de Buenos Aires. Rev. de la Facultad de Agronomía. UBA. 20 (2): 193-199.
- HEREDIA O. S., FRESINA M., SANTA CRUZ J. N., SILVA BUSO A. 2000.
Nitratos y Fósforo de un área antropofizada de la Región Pampeana. Buenos Aires. Argentina. 1st Joint World Congress on Groundwater. Fortaleza (Brasil). Abstracts: 315. trabajo completo en soporte CD.
- KABATA-PENDÍAS A. AND PENDÍAS H. 1992.
Trace elements in Soils and Plants. 2nd ed. CRC Press.. Boca raton. Fla. USA.
- MERINO. M. 1995.
Geoquímica del Selenio en las Aguas Subterráneas de la Cuenca del Río Ctalamochita. Provincia de Córdoba Argentina. Tesis Doctoral FECEyN. UBA (Inédita)
- NICOLLI. H. B., T. O'CONNOR, J. SURUNO, M. L. KOUKHARSKY, M. A. GOMEZ PERAL, L. M. BERTINI, I. M. COHEN, L. I. CORRADI, O. A. BALEANI. 1985.
Geoquímica del Arsénico y otros Oligoelementos en Aguas Subterráneas de la Llanura sudoriental de la Provincia de Córdoba. Academia Nacional de Ciencias. Miscelánea 71. Córdoba. Argentina.
- EPA. 1986.
Quality Criteria for Water: Office of Water Regulations and Standards, Criteria and Standards Division. EPA, Washington, D.C., USA.
- FRENGUELLI J. 1950.
Rasgos generales de la Morfología y Geología de la Provincia de Buenos Aires. MOP. LEMIT. Serie 62. La Plata.
- FRESINA M. 2002.
Comportamiento Hidrogeológico - Hidroquímica del Acuífero Pampeano de la Cuenca Inferior del Río Carcaraña. Prov. de Córdoba y Santa Fe. Tesis Doctoral. Dpto. de Cs. Geológicas. FCEyN. UBA (Inédito).
- HEREDIA O. S., PASCALE C. 2000.
Calidad de aguas de bebida en algunas localidades urbanas de Buenos Aires. Rev. de la Facultad de Agronomía. UBA. 20 (2): 193-199.
- HEREDIA O. S., FRESINA M., SANTA CRUZ J. N., SILVA BUSO A. 2000.
Nitratos y Fósforo de un área antropofizada de la Región Pampeana. Buenos Aires. Argentina. 1st Joint World Congress on Groundwater. Fortaleza (Brasil). Abstracts: 315. trabajo completo en soporte CD.
- KABATA-PENDÍAS A. AND PENDÍAS H. 1992.
Trace elements in Soils and Plants. 2nd ed. CRC Press.. Boca raton. Fla. USA.
- MERINO. M. 1995.
Geoquímica del Selenio en las Aguas Subterráneas de la Cuenca del Río Ctalamochita. Provincia de Córdoba Argentina. Tesis Doctoral FECEyN. UBA (Inédita)
- NICOLLI. H. B., T. O'CONNOR, J. SURUNO, M. L. KOUKHARSKY, M. A. GOMEZ PERAL, L. M. BERTINI, I. M. COHEN, L. I. CORRADI, O. A. BALEANI. 1985.
Geoquímica del Arsénico y otros Oligoelementos en Aguas Subterráneas de la Llanura sudoriental de la Provincia de Córdoba. Academia Nacional de Ciencias. Miscelánea 71. Córdoba. Argentina.
- PETCHENESHKY, T., 1988.
Evaluación del Nivel de Nitratos en Agua de Bebida en los partidos del Gran Buenos Aires". Dirección Nacional de Calidad Ambiental. Ministerio de Salud y Acción Social. Buenos Aires.

SALA, J. M. Y AUZE, M. 1970-

"Algunas Características Geohidrológicas del Noreste de la Prov. de Bs. As." Actas IV Jorn. Geol. Arg. 321-336. Bs. As.

SALA, J.M.; GONZÁLEZ, N. Y KRUSE, E. 1983.

Generalización Hidrológica de la Provincia de Bs. As. Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras. Comité Nacional para el Programa Hidrológico Internacional. Olavarría. Argentina.

SÁNCHEZ GÓMEZ M. L. Y RAMOS MARTÍN M.C. 1987.

Application of cluster analysis to identify sources of airborne particles. Atmospheric Environments. 21:1521-1527.

SANTA CRUZ, J. 1972.

Estudio sedimentológico de la Formación Puelches en la provincia de Buenos Aires. Asociación Geológica Argentina Revista 27(1): 5-62. Buenos Aires

SANTA CRUZ, J., A. SILVA BUSSO E I. ÁLVAREZ DÍAZ. 1998.

Particularidades hidrogeoquímicas de los acuíferos de la formación pampeano en el área de Castex Montes Nuevas. La Pampa. Argentina. Actas X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica. Vol. III. pag 348-355.

SANTA CRUZ, J. Y A. SILVA BUSSO. 1999.

Escenario hidrogeológico General de los Principales Acuíferos de la Llanura Pampeana y Mesopotamia Septentrional Argentina. II Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano Argentino sobre Temas Actuales en Hidrología Subterránea. Actas. Tomo I. pag 461-471.

SANTA CRUZ, J., M. FRESINA, A. SILVA BUSSO, O. OLIVARES. 2000.

Metodología Ajustada del Diagnóstico de Afectación Ambiental de las Aguas Subterráneas Pdo. de Escobar. Buenos Aires. ASAGA. N 14. pag 137-146.

SILVA BUSSO A., S. AMATO, M. M. GUARINO, O. OLIVARES Y D. VILLEGAS. 1995.

Vinculación entre el uso del suelo y las perturbaciones del acuífero libre. Primera reunión sobre uso de Suelos y organización de territorio. UNRC. Córdoba. Tomo I. Pg.:111-126.

SILVA BUSSO, A.; OLIVARES O. Y FRESINA M. 1999.

Afectación del Acuífero Freático por Uso del Suelo en un Área del Conurbano Bonaerense, Prov. Buenos Aires, Argentina. Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, México. Vol: 3 N°1, pag 32-45

SILVA BUSSO A.; OLIVARES O. 1998.

Implicancias Ambientales del Uso del Suelo sobre el acuífero Freático de la Cuenca del Arroyo Conchitas, Provincia de Buenos Aires, República Argentina. Actas Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente N° 12- pag. 141-154.

USDA 1998.

Keys to Soil Taxonomy. Eighth Ed. NRCS, Washington, DC, USA. 326 pp.

WILKEN R.D., U. FÖRSTNER, A. KNÖCHEL, 1995.

Heavy metals in the environmental. Vol I Hamburg: CEP Consultants Ltd.



EL COMPORTAMIENTO DE LA TOSCA EN EL PROCESO DE INFILTRACIÓN

Santiago B. Giai¹, Graciela Visconti² y Pablo M. Ribero Luciaga³

Resumen

El trabajo trata sobre el comportamiento de la tosca ante el agua de infiltración que se pone en contacto con ella. Para el abordaje del tema se consideran las presentes en tres localidades de la provincia de La Pampa (Realicó, Eduardo Castex y Perú), que poseen encostramientos calcáreos típicos. De los diversos tipos de éste material que han sido descriptos, las estudiadas aquí corresponden a las denominadas laminares o bandeadas.

En primer término se expone una síntesis de la hidrogeología de cada localidad, considerando la composición del subsuelo, la morfología de la superficie freática y las condiciones hidrometeorológicas de cada lugar. Seguidamente se describen la forma de presentación de la duricostra y cortes delgados de la roca, particularizando en sus poros. Finalmente se discute la posibilidad de que el agua de infiltración la atraviese. En este sentido, la roca por su aspecto megascópico aparenta ser impermeable, no obstante lo cual hay evidencias de que a través de ella puede producirse recarga directa del acuífero freático. Entre ellas se cuenta la fluctuación del nivel del mismo y su estabilidad ante extracciones de volumen importante durante periodos prolongados, del orden de las decenas de años, más allá de su descenso hasta una nueva posición de equilibrio dinámico. Finalmente se demuestran tres modalidades de tránsito a través de ella y se estima el valor de su permeabilidad vertical.

Palabras clave: infiltración / tosca / permeabilidad.

Abstract

The paper deals about behavior of calcretes ("tosca") with infiltration waters that take contact with them. To broach the subject are considered three locations in La Pampa province (Realicó, Eduardo Castex y Perú), that

have typical calcretes. There are different types of them. In this locations they are of types denominates laminated or banded.

First, an hydrogeologic synthesis is exposed for each location, that contain subsoil composition, water table morphology and hydrometeorological conditions. After this, the modality of presentation of calcretes and some thin sections are described. Finally, possibilities that infiltration waters crossed down them, are discussed. About this, it should be said that megascopical appearance of calcrete look as impervious, although there are evidences that through them can take place recharge of phreatic aquifer. Three ways of infiltration pattern are demonstrated and vertical permeability is estimated.

Key Words: infiltration / calcrete / permeability

Entregado: 31 de Marzo de 2004 • Aceptado: 23 de Agosto de 2004

⁽¹⁾ UN de La Pampa y Administración Provincial del Agua de La Pampa, Cnel. Gil 353 (6300) Santa Rosa (LP). sgia@cpenet.com.ar

⁽²⁾ UN de La Pampa. Av. Uruguay y Perú (6300) Santa Rosa (LP). na.co@cpenet.com.ar

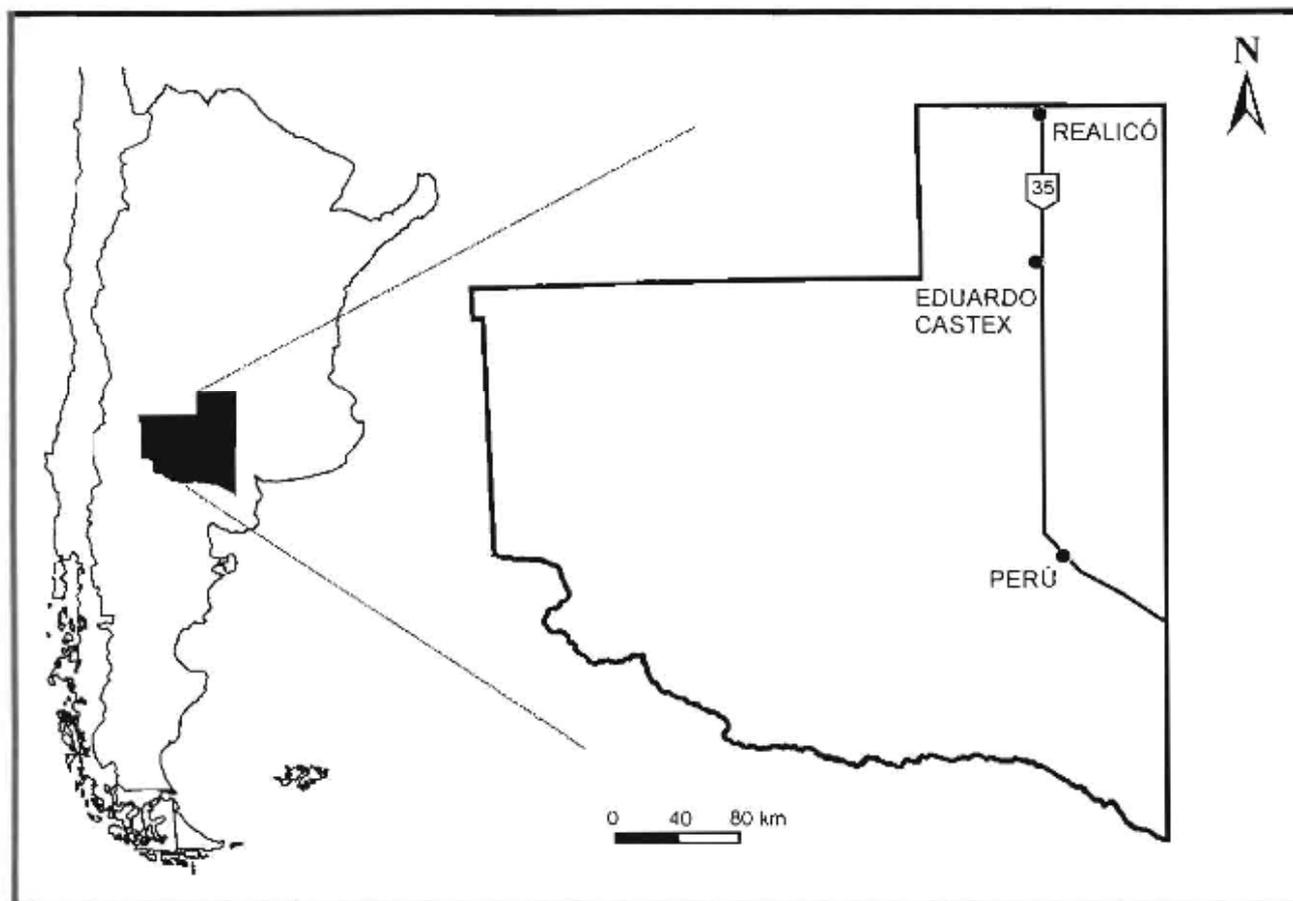
⁽³⁾ UN de La Pampa. Av. Uruguay y Perú (6300) Santa Rosa (LP). pavior@mixmail.com

1. INTRODUCCIÓN

En trabajos anteriores se abordó este tema, restringido a la localidad de Eduardo Castex (provincia de La Pampa) comunicando resultados obtenidos en un proyecto de investigación en marcha (Giai y Visconti 2002 y Giai

al. 2003). En la presente comunicación se completa el análisis del comportamiento de la tosca en E. Castex, a la vez que se refiere a otras dos localidades (Realicó y Perú, ambas en la provincia de La Pampa), que poseen conspicuos encostramientos de este tipo. La ubicación de las localidades mencionadas, puede verse en la figura 1.

FIGURA 1. CROQUIS DE UBICACIÓN



Acerca del significado y alcances del término tosca, en uno de los trabajos citados (Giai y Visconti op. cit.), se pasa revista a una serie de comunicaciones sobre esta caliza, por lo cual es innecesario repetirlo aquí. Sin embargo vale recordar que por tosca, en la República Argentina se individualiza a una caliza epigénica, impura, desarrollada sobre materiales clásticos preexistentes, de la que se han descrito varios tipos texturales.

Una sistemática de las mismas se encuentra en Lorenz y Sotorres (2001) y Lorenz (2002). En éste se consignan desde un suelo calcáreo, poco o nada cementado, con carbonato de calcio pulverulento, los suelos calcificados, calcretas pulverulentas, calcretas pedotubulares, calcretas nodulares, calcretas parcialmente endurecidas, calcreta tipo hardpan y finalmente, calcretas laminares. Estas últimas consisten en capas delgadas de carbonato de calcio, y suelen presentarse (aunque no siempre), por arriba de las anteriores.

Las toscas cuyo comportamiento frente al agua de infiltración se indaga en este artículo, corresponden al tipo laminar del trabajo que se comenta, también denominado bandeado por Mauriño y Nadeo (1971).

2. GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO

Realicó

En la localidad de Realicó no existen perforaciones o trabajos de geofísica que indiquen la posición del basamento hidrológico. Con respecto al mismo se infiere que se encuentra alrededor de los 660 m de profundidad, a su vez basada en sísmica de refracción y perforaciones alejadas (De Elorriaga y Tullio 1998). Sobre tal basamento se apoyan 500 m de sedimentitas paleozoicas y cretácicas (?), y a continuación unos 160 m de sedimentos limo arenosos, conocidos informalmente como Pampeano, que se describen con más detalle para la localidad de Eduardo Castex, con el que es equiparable. En esta ubicación, alrededor de los 40 m de profundidad, presenta un nivel arcilloso que hace las veces de piso del acuífero freático.

Como en las otras dos localidades estudiadas, esta formación es cubierta por el encostramiento calcáreo, que se encuentra aflorando o hasta profundidades de

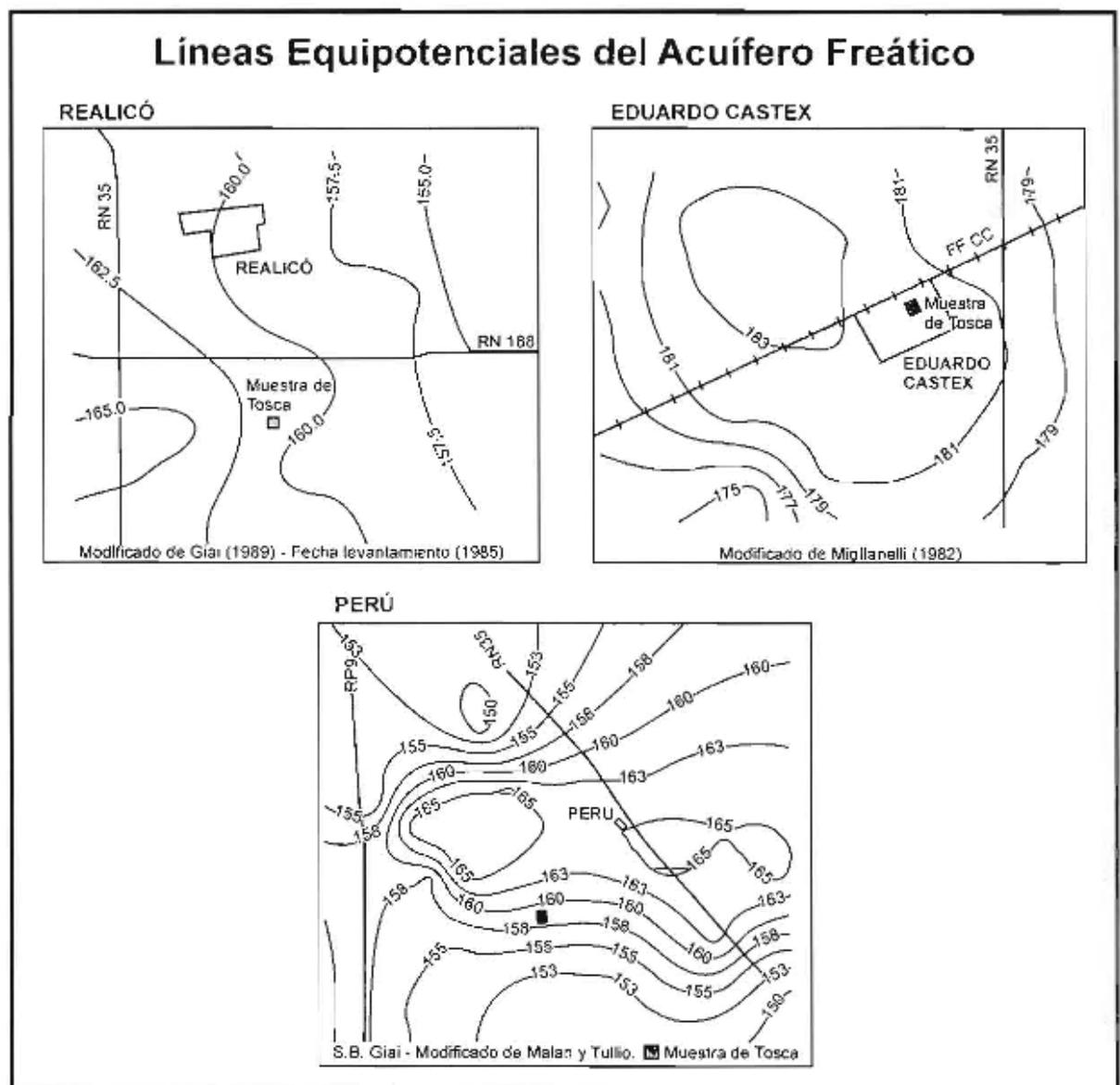
alrededor de 3 m como máximo. En estos casos se sobrepone al encostramiento un estrato arenoso, edafizado en su parte más superficial.

Las perforaciones en la zona solamente captan al acuífero freático, el que se aloja en los limos arenosos del pampeano. En las líneas equipotenciales de la superficie freática (figura 2), puede verse que al sur de la planta urbana, entre las líneas de 165 msnm y 157.5 msnm, se presenta una inflexión convexa hacia el este noreste, que pone en evidencia un área de recarga. Hacia los 155 msnm, tal convexidad desaparece, encontrándose en coincidencia con un bajo topográfico elongado en sentido norte noroeste - sur sureste, que actúa como área de descarga local. El nivel freático en esta zona se encuentra a profundidades comprendidas entre 1 y 6 m. No obstante ello, se ha comprobado que a continuación de precipitaciones importantes, sobre el encostramiento calcáreo se forma una falsa capa freática.

Las precipitaciones en Realicó alcanzan un valor medio de 718,7 mm (años 1921 / 2002). Con el fin de tener una idea de la magnitud de la infiltración, se corrieron dos balances hídricos seriados (BHS), de paso diario, con la metodología de Thornthwaite y Matter (1955), para dos años singulares: 1996 y 1997. En el primero de ellos la precipitación alcanzó a 715,0 mm, prácticamente el valor medio histórico, y en el segundo a 1452,2 mm, más del doble de la media histórica. En la Tabla 1 se presenta el resumen de estos BHS, junto a los de las otras localidades consideradas en este trabajo.

Para el año 1996 se verifica una lámina de agua gravitacional de 39,9 mm en el mes de diciembre, mientras que para el segundo tal lámina supera los 500 mm, y se distribuye en todos los meses, aunque los valores más significativos se producen en noviembre, marzo, octubre y diciembre.

FIGURA 2. LÍNEAS EQUIPOTENCIALES DEL ACUÍFERO FREÁTICO DE LAS LOCALIDADES ESTUDIADAS.



Eduardo Castex

Geológicamente, desde abajo hacia arriba, se reconocen tres unidades estratigráficas. El basamento hidrológico, compuesto por rocas graníticas se encuentra a 180 m de profundidad. Sobre el mismo se dispone una formación limo arenosa de color castaño, conocida informalmente como "pampeano", la que por similitud litológica es correlacionable con unidades asignadas al Mioceno Superior. Este conjunto, alrededor de los 100 m de profundidad en la localidad misma, presenta un nivel arcilloso de unos 10 m de espesor. Le sigue por arriba, culminando la columna, un nivel de arenas finas, grisáceas, de origen eólico, cuyo espesor varía entre 0 y 3 m. Entre ambos se encuentra la duricostra objeto de este trabajo, separando los limos arenosos de las arenas superiores. Típicamente tiene un espesor de unos 40 cm, aunque su límite inferior suele ser transicional.

Las líneas equipotenciales del acuífero en la zona (figura 2), muestran curvas cerradas con flujo radial divergente, indicadora de recarga, dentro de las cuales se encuentra la localidad de Eduardo Castex.

Las precipitaciones en Eduardo Castex tienen una media de 667.1 mm (período 1921/2000), concentrándose en primavera - verano. En las últimas décadas se ha verificado un aumento de las mismas, ubicándose el punto de inflexión a principios de la década de 1970. En efecto, si tomamos las precipitaciones medias anuales entre 1921 y 1971 y entre 1972 y 2001, se obtienen valores de 575.9 mm y 848.0 mm, respectivamente.

Tabla 1. RESUMEN DE LOS BHS DE LAS LOCALIDADES ESTUDIADAS.

Mes	REALICO		E. CASTEX		PERU	
	1996	1997	1990	2001	1994	1992
Ene	0	99.7	0	0	4.1	99.9
Feb	0	0	0	190.5	0	0
Mar	0	20.9	0	216.6	0	37
Abr	0	121.9	0	49.5	0	0
May	0	0	0	0	0	38
Jun	0	15.2	0	0	0	17.1
Jul	0	4.5	0	0	0	0
Ago	0	0	0	0	0	11.9
Set	0	0	0	1.7	0	51.4
Oct	0	111	0	205.6	0	0
Nov	0	0	0	96.7	0	0
Dic	39.9	172.2	41.7	0	0	0
Año	39.9	545.4	41.7	760.6	4.1	255.3

Al igual que para la localidad anterior, para Eduardo Castex se corrieron dos BHS de paso diario: para los años 1990 y 2001. En 1990 la precipitación alcanzó a 669,0 mm, de manera que puede considerarse un año típico. Para el 2001, alcanzó a 1446,0 mm, más del doble de la media. En la Tabla 1 se encuentran los datos respectivos.

Puede verse allí que en el año típico se genera agua gravitacional en el mes de diciembre, con un valor del orden de los 40 mm, valores y momentos de ocurrencia prácticamente idénticos a los de Realicó. Para el año húmedo los excesos de agua que gravitan por debajo del metro, tienen un valor que supera los 700 mm y se concentra en dos periodos: febrero - abril y octubre - noviembre.

Perú

La localidad de Perú se encuentra en el sureste de la provincia de La Pampa (figura 1). En esta zona el basamento hidrológico se ha alcanzado mediante perforaciones en varios puntos. Es de tipo granítico y se encuentra a profundidades del orden de los 150 a 200 m. Su parte superior está alterada, presenta porosidad secundaria, y contiene un acuífero que guarda continuidad hidráulica con el superior.

Por arriba del basamento se encuentra el ya descrito pampeano, en esta zona correlacionable con la formación Cerro Azul (Linares et al. 1980), por continuidad espacial. Como en las otras dos localidades esta formación está cubierta por el encostramiento calcáreo, del tipo de las calcretas laminares. Por sobre el mismo puede encontrarse un estrato de arenas muy finas, con espesores de hasta 2 m, con cierta frecuencia ausente, ya que es común que la tosca aflore o subaflore.

Geomorfológicamente en la zona pueden distinguirse dos unidades principales. Por una parte depresiones elongadas de rumbo general oeste suroeste a este noreste, denominadas valles, y por la otra llanuras de escasa pendiente separando a los anteriores, conocidos localmente como planicies. Cabe señalar que dentro de los valles no se encuentra la duricostra, la que si es típica de las zonas planas intermedias. El área estudiada se encuentra en una de estas planicies, enmarcada por los valles de Maracó Grande al norte y el de Hucal por el sur. En cuanto al NF, al suroeste de la localidad de Perú se encuentra entre 50 y 80 m de profundidad. De acuerdo con las líneas equipotenciales del acuífero freático (figura 2), la recarga se opera a la latitud de Perú elongándose en sentido oeste este, y hacia el sur de la misma la superficie freática adopta un gradiente uniforme, con líneas isofreáticas aproximadamente paralelas con escurrimiento de rumbo sur.

La precipitación media de Perú (período 1921 - 2002) alcanza a 571,7 mm. Para esta localidad los BHS se calcularon para los años 1994 y 1992, en los que ocurrieron precipitaciones de 558,0 y 992,0 mm, a los que se consideró año típico y año húmedo, respectivamente.

En la Tabla 1 puede verse que para el primero el exceso de agua alcanza a 4,1 mm y se verifica en enero, mientras que para el año húmedo supera los 250 mm, y se ubica temporalmente en enero, marzo, mayo - junio, y agosto - septiembre.

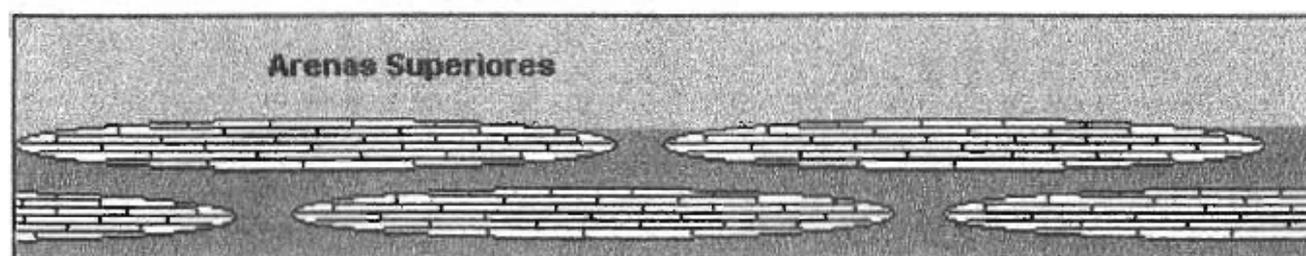
3. FORMAS DE PRESENTACION DE LA TOSCA.

El tipo de encostramiento objeto de este estudio, se caracteriza, entre otras particularidades, por presentar un límite superior neto, mientras que el inferior suele ser transicional. En los casos analizados, su espesor es de unos 40 o 50 cm. Asimismo, cuando se presenta aflorando, puede notarse que es afectado por meteorización (Lorenz y Sotorres, op. cit.), la que se manifiesta por la presencia de un material pulverulento blanquecino, removible por el viento, lo cual provoca que en casos extremos los ooides que lo componen queden casi separados, tomando el aspecto de un conglomerado, sin que, obviamente, lo sea.

Por otra parte se han encontrado evidencias de que se

presenta en más de un nivel, al menos dos, discontinuos, separados por entre 1 o 2 m del sedimento base sin cementar. Dichas evidencias son, por una parte, la observación directa de afloramientos en contadas ocasiones. En segundo término, durante el relevamiento de su techo mediante barrenos, suele encontrarse con cierta frecuencia que dos sondeos separados escasos metros entre sí, la encuentran a profundidades disímiles, lo cual indica que se trata de dos niveles. Finalmente, cronogramas de avance de perforaciones, correlacionados con la observación del cutting de las mismas, indican al menos 2, en ocasiones 3, horizontes endurecidos ricos en carbonato de calcio (Giai et al. 2003). De manera que puede idealizarse su forma de presentación areal como se esquematiza en la figura 3.

FIGURA 3. PERFIL ESQUEMÁTICO MOSTRANDO LA FORMA DE PRESENTACIÓN DE LA DURICOSTRA.



En cuanto al relieve del techo del encostramiento, se estudió con cierto detalle en dos de los casos (Eduardo Castex y Realicó), mediante la medición de su profundidad y cota con barrenos manuales separados unos 200 m entre sí. Trazando perfiles de la superficie del encostramiento, puede verse una ondulación suave, con alternancia de lomas y bajos que puede o no copiar el relieve de la superficie del terreno.

La roca vista en corte delgado se presenta como una caliza impura, con una fracción clástica de los tamaños arena fina y muy fina y clastos escasos y aislados de arena gruesa y limo. De acuerdo a la clasificación de Hay et al. (1978), las texturas son del tipo bandeada, pisolítica, oolítica y pelletal en el caso de Eduardo Castex, mientras que en las de Perú y Realicó están ausentes las pisolitas y oolitas.

Mineralógicamente, en todos los casos se observa el predominio de calcita, seguida por agregados arcillosos,

cuarzo (mono y policristalino), feldespatos y en quinto lugar, vidrio y líticos volcánicos. Completan la composición mineralógica escasos minerales pesados, entre los que se cuentan piroxenos, anfíboles y opacos. La calcita se presenta en su mayor parte como micrita, y como esparita cuando dispuso de espacio suficiente para el desarrollo de estos cristales. Los agregados arcillosos componen la matriz de la roca y aparecen formando bandas y agregados del tamaño arena gruesa. El cuarzo es limpio, mientras que los feldespatos, el vidrio volcánico y los líticos volcánicos, están alterados, en particular los volcánicos.

En cuanto a la porosidad, se obtuvo (al igual que la composición mineralógica), por conteo de 300 puntos en cada corte delgado. Para cada muestra se practicaron dos: uno paralelo a la estratificación, y el restante perpendicular a la misma. Los valores obtenidos en cada caso se consignan en la Tabla 2.

Tabla 2. POROSIDADES DE LAS MUESTRAS ESTUDIADAS.

LOCALIDAD	CORTE A	CORTE B	MEDIA
E. Castex	2.7	1.7	2.2
Realicó	1.0	1.3	1.2
Perú	1	7.3	4.2

NOTAS: Corte A, paralelo a la estratificación; B, perpendicular a la misma. Valores en porciento

La forma y disposición de los poros es distinta. En las muestras correspondientes a E. Castex y Realicó son de un tipo, diferente de los presentes en la de Perú. En este último caso se trata de mesoporos pequeños (0,062 a 0,5 mm) siguiendo la nomenclatura de Choquette y Pray (1970), y lo más importante es que se encuentran desconectados entre sí. Por el contrario en las toscas de E. Castex y Realicó, se alinean a lo largo de las venillas de color blanco sucio que se disponen subparalelamente a la estratificación, y están tapizados por calcita micrítica. Evidentemente estas venillas fueron la vía de entrada de la solución que movilizó la micrita, de manera que están interconectados. De acuerdo a la clasificación que se sigue (Choquette y Pray, op. cit.), es del tipo aplanada ("platy"), y por su tamaño son mesoporos. En el caso de Perú estas venillas casi no tienen poros, ya que están totalmente rellenas con micrita y esparita.

4. INFILTRACION A TRAVÉS DE LA TOSCA

La compacidad del material, su extensión areal y su aspecto en general, dan la impresión de que se trata de una roca impermeable. No obstante ello existen argumentos que abogan en contrario.

En efecto, en dos de los casos estudiados (E. Castex y Realicó), se encuentran las baterías de perforaciones que abastecen con agua a ambas localidades, las que extraen volúmenes importantes de agua desde el acuífero freático (2000 m³/d y 1000 a 1300 m³/d, respectivamente) desde hace 30 años, sin que se halla verificado un descenso de los niveles. Ello, junto a la morfología de la superficie freática, está indicando que el acuífero recibe recarga. El problema a elucidar es cómo logra atravesar la duricostra el agua de la misma.

En primer lugar, las discontinuidades laterales del encostramiento que se describen en el apartado anterior, son una posible vía de ingreso del agua de recarga al acuífero, siguiendo una trayectoria en zig zag que sortee las lentes de duricostra.

En segundo término, en contadas ocasiones es posible observar hoyos de aproximadamente 40 cm de diámetro que atraviesan la calcreta. Estos huecos poseen sus paredes muy lisas, sobre la que se ha depositado una película de algunos milímetros de espesor, de carbonato de calcio hialino o blanuzco, lo cual hace pensar que se generaron por un proceso de disolución. Estos huecos son, evidentemente, una vía de comunicación hidráulica entre el techo y el piso de la calcreta.

Finalmente, se ha comprobado que sobre la tosca se forma una falsa capa freática (Giar y Visconti, op. cit. y Giar et al. op. cit.) en ocasión de precipitaciones importantes. Para el tramo comprendido entre la superficie y el techo de la tosca, referido al esquema de la figura 4, puede plantearse:

$$P = Evt + Ip \pm DS$$

en la que P = precipitación, Evt = evapotranspiración, Ip = infiltración que percola la tosca y DS = variación de almacenamiento en el tramo de suelo entre la superficie del terreno y la tosca. Con respecto al almacenamiento en tal tramo, es evidente que tiene dos componentes: (i) la humedad retenida en forma pelicular por el suelo, S1, y (ii) la contenida en la zona saturada correspondiente a la falsa freática, S2.

Cuando se dan ciertas condiciones, esto es, suficiente almacenamiento en S1 para mantener la Evt y profundidad del falso nivel freático suficiente para mantenerse fuera del alcance de las raíces, toda el agua almacenada en la falsa freática percolará la tosca. De no darse estas condiciones, parte de S2 percolará y parte repondrá S1, o directamente será absorbida por la vegetación.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, en el monitoreo del falso nivel freático en Eduardo Castex (figura 5), puede observarse que se dan tres períodos en los cuales se formó una falsa freática sobre la tosca, que se extienden entre el 20/9 y el 20/11/00, entre el 15/3 y el 25/6/01 y entre el 15/9 y el 7/11/01, y dado que se acumuló agua sobre la duricostra, puede aceptarse que el almacenamiento S1 estaba en la capacidad de campo al principio de cada período. Asimismo, corriendo un BHS de paso diario con la metodología de Thornthwaite y Matter (op. cit.), se verifica que durante toda la extensión de los períodos en que se formó la falsa capa freática, el almacenamiento S1 tuvo valores superiores a la evapotranspiración potencial. Más aún, los montos precipitados en los tres períodos generaron agua gravitacional que formó la falsa capa freática.

En estas condiciones, la curva de descenso del falso nivel freático, está indicando la cuantía del agua que atraviesa la tosca. Teniendo en cuenta el equivalente en agua del espesor de la falsa capa freática, cuya porosidad efectiva está en el orden del 10%, se obtiene una permeabilidad vertical para esta roca comprendida entre 2 y 4 x 10⁻³ m/día.

FIGURA 4. COMPONENTES DEL BALANCE.

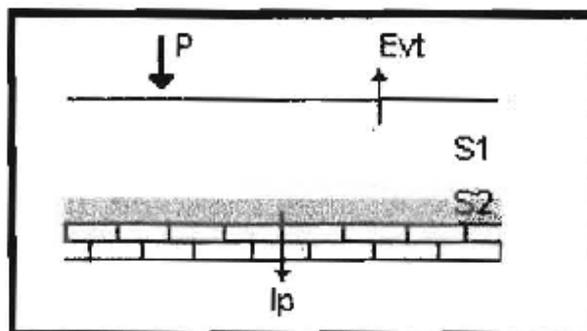
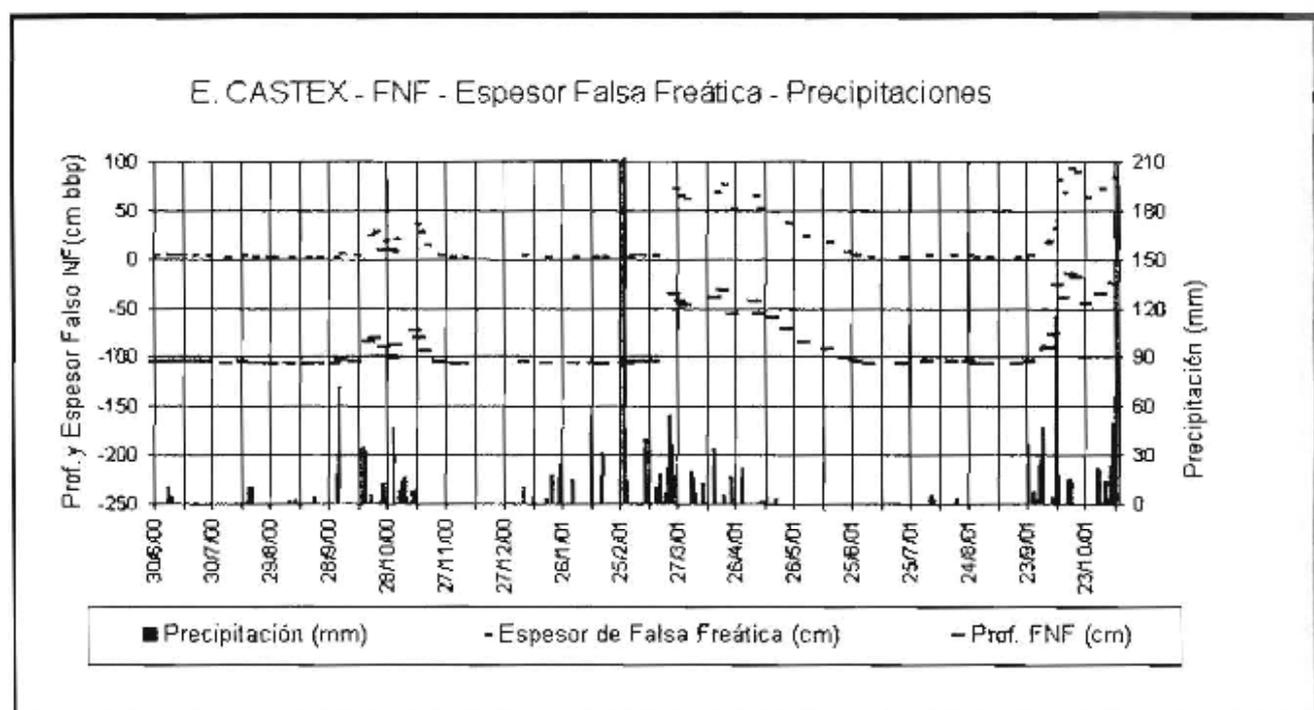


FIGURA 5. ESPESOR DE LA FALSA FREÁTICA, PROFUNDIDAD DEL FALSO NIVEL FREÁTICO Y PRECIPITACIONES EN EDUARDO CASTEX.



5. CONCLUSIONES.

Las duricostras estudiadas en las tres localidades, caben dentro del tipo de las conocidas como laminares (Lorenz y Sotorres op. cit. y Lorenz op. cit.) o bandeadas (Mauriño y Nadeo op. Cit.). En todos los casos se trata de un material compacto, de aspecto impermeable.

La observación de sus afloramientos, así como el relevamiento de su techo y el cronograma de avance de perforaciones, demuestran que se presenta formando lentes que se solapan en sus extremos, de manera que en una misma ubicación pueden existir más de una capa.

En superficies pulidas puede verse que se trata de lentes yuxtapuestas separadas entre sí por venillas de alrededor de 1 mm de espesor, de color blancuzco. En cortes delgados estas venillas se presentan rellenas por carbonato de calcio bajo la forma de micrita y esparita, están interconectadas y, en algunos casos prácticamente rellenas por este material. Cuando ello no es así, conforman un tipo de porosidad aplanada ("platty").

Las texturas observadas son bandeada, oolítica, pisolítica y pelletal, de acuerdo a la nomenclatura de Hay et al. (op. cit.). Hay diferencias entre la de Eduardo Castex, que presenta todos estos tipos texturales, y las de Realicó y Perú, en las que están ausentes las oolitas y pisolitas.

En dos de los casos estudiados (Eduardo Castex y Realicó), hay evidencias que abogan a favor de que se produce recarga, a pesar de la apariencia impermeable del material, mientras que en el tercero (Perú), ello no ocurre. Tal recarga, cuando existe, se produce por tres vías.

Por un lado, siguiendo un camino en zig zag que sorteé las lentes de la duricostra. En segundo término, circulando por las venillas que presenta el material, cuando los poros dentro de las mismas están interconectados y su tamaño permite la circulación. Finalmente, penetrando por los hoyos kársticos. El orden en que se enumeran estos mecanismos de infiltración, aparenta ser de importancia decreciente en el proceso de recarga.

No obstante lo anterior, como ha sido demostrado (Malán y Mariño, op. cit.), la presencia de la duricostra, disminuye la tasa de infiltración. Ello se debe a que en algunas circunstancias retiene el agua de recarga formando una falsa capa freática, que en parte o totalmente queda disponible para evapotranspirar.

6. AGRADECIMIENTOS.

Los trabajos que dieron base a esta comunicación fueron financiados por la UNLpan. El ing. H. Brizio de la Cooperativa de Servicios Públicos de Eduardo Castex, suministró información y apoyo logístico. El Dr. Mario Hernández aportó oportunas sugerencias. A todos ellos, nuestro reconocimiento.

7. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

CHIOQUETTE, P. W. y L. C. PRAY, 1970.

Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 54(2):207-250.

DE ELORRIAGA, E. y TULLIO, J.O., 1998.

Estructuras del subsuelo y su influencia en la morfología en el norte de la provincia de La Pampa. X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de geología Económica. Actas III: 499-506. Buenos Aires.

GIAL, S. B. y G. VISCONTI, 2002.

Notas sobre el comportamiento hidrogeológico de la tosca. XXXII Congreso International Association of Hydrogeologist y VI Congreso Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo, Actas, p 645-651. Mar del Plata.

GIAL, S.B., G. VISCONTI y H. PEINETTI, 2003.

La formación de falsa capa freática en Eduardo Castex, provincia de La Pampa. Revista Huellas Nº 7, p 65-82. Santa Rosa.

HAY, R. y R. REEDER, 1978.

Calcretes of Olduvai Gorge and Ndolanya Beds of northern Tanzania. Sedimentology, 25:649-673.

LINARES, E., E.J. LLAMBIAS y C.O. LATORRE, 1980.

Geología de la provincia de La Pampa, República Argentina, y geocronología de sus rocas metamórficas y eruptivas. Rev. Asociación Geológica Argentina, XXXV:1, p 87-146. Buenos Aires.

LORENZ, W., 2002.

The "Calcreta Principal" ("tosca") at the border of the provinces of La Pampa and Buenos Aires. Z. Angew. Geol., 1/2002, p44:51.

LORENZ, W. y E. S. SOTORRES, 2001.

Sobre la distribución de las calcretas mesetiformes en el sureste de la provincia de La Pampa, Argentina. Serv. Geol. Min. Argentino, Contribuciones Técnicas 14. Buenos Aires.

MALAN, J. M. Y E. MARIÑO, 1999.

Impacto de las características geomorfológicas sobre la infiltración eficaz y la calidad del agua en un sector del sureste pampeano. Actas Primer Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, 35-38. Santa Rosa.

MAURIÑO, V. E. y J. R. NADEO, 1971.

Condiciones del subsuelo en la traza del acueducto Paso de las Piedra - Bahía Blanca. Memorias Primera Reunión Argentina de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, 43-52. La Plata.

MIGLIANELLI, C. H., 1982.

Cartografía temática del Plan Norte - Zona II. Inédito. Administración Provincial del Agua. Santa Rosa.

THORNTHWAITE, C.W. y J.R. MATTER, 1955.

The waters balance. Publications in climatology, Laboratory of Climatology, Vol. VIII, 1, 104 p.



CONTRIBUCIÓN A LA EVALUACIÓN GEOTÉRMICA DEL SUDESTE DE TUCUMÁN, ARGENTINA

G. A. Vergara¹, R. Mon^{2,3} y A. A. Gutiérrez³

Resumen

Se incluye la evaluación geotérmica de los acuíferos termales surgentes del sudeste de Tucumán, Argentina. En una extensa cuenca intermontana en ambiente de Sierras Pampeanas noroccidentales, se definieron temperaturas de descarga superiores a 50° C y condiciones de equilibrio máximas promedio de 193° C. Hay notorio aporte de bicarbonatos y potasio endógenos en el sector central de la cuenca, particularmente en la charnela de anticlinales que afectan sedimentos plio-pleistocénicos.

Abstract

It had been realized the geothermal evaluation of the upwelling groundwater reservoir located at the southeastern of Tucumán province, Argentina. In an extended intermountain alluvial plain it had been detected discharges temperatures upper to 50° C, and maximum equilibrium average conditions of 193° C. There are evident apportation of bicarbonate and potassium, of endogenous hydrothermal sources, to the groundwater. The continent of the geothermic resources, of important areal distribution, are folded pliocenic sands.

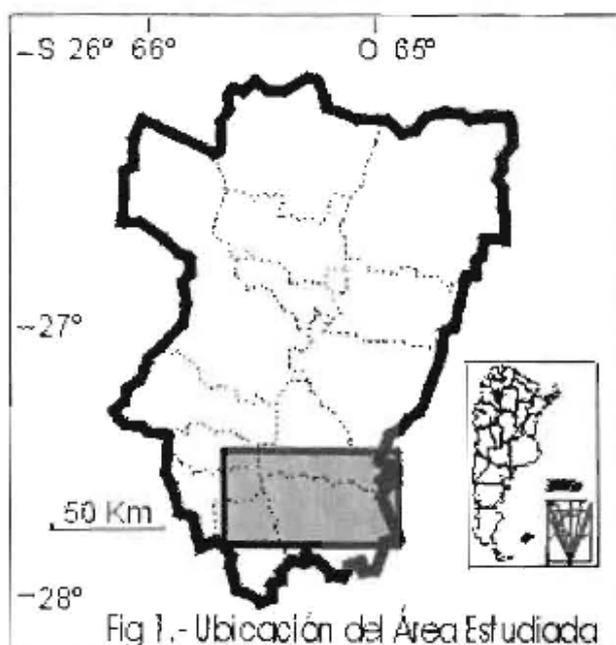
Key Words: Geothermal. Groundwater. Alluvial plain. Pliocenic reservoirs.

1. INTRODUCCION

La cuenca de Tucumán es una depresión tectónica marginada al oeste por el Sistema del Aconquija y al este

por una estructura neógena formada al sur por la sierra de Guasayán y al norte por la dorsal de Mujer Muerta (Vergara et al. 1990). El área (Fig. 1) forma parte de las Sierras Pampeanas septentrionales de la provincia de Tucumán.

FIGURA 1. UBICACION DEL ÁREA ESTUDIADA



Entregado: 5 de Mayo de 2004 • Aceptado: 25 de Agosto de 2004

¹ Dirección Provincial del Agua, Miguel Lillo 645, (4000), San Miguel de Tucumán

² CONICET - Lola Mora 147 (YB) - (4000) San Miguel de Tucumán - moni@satlink.com

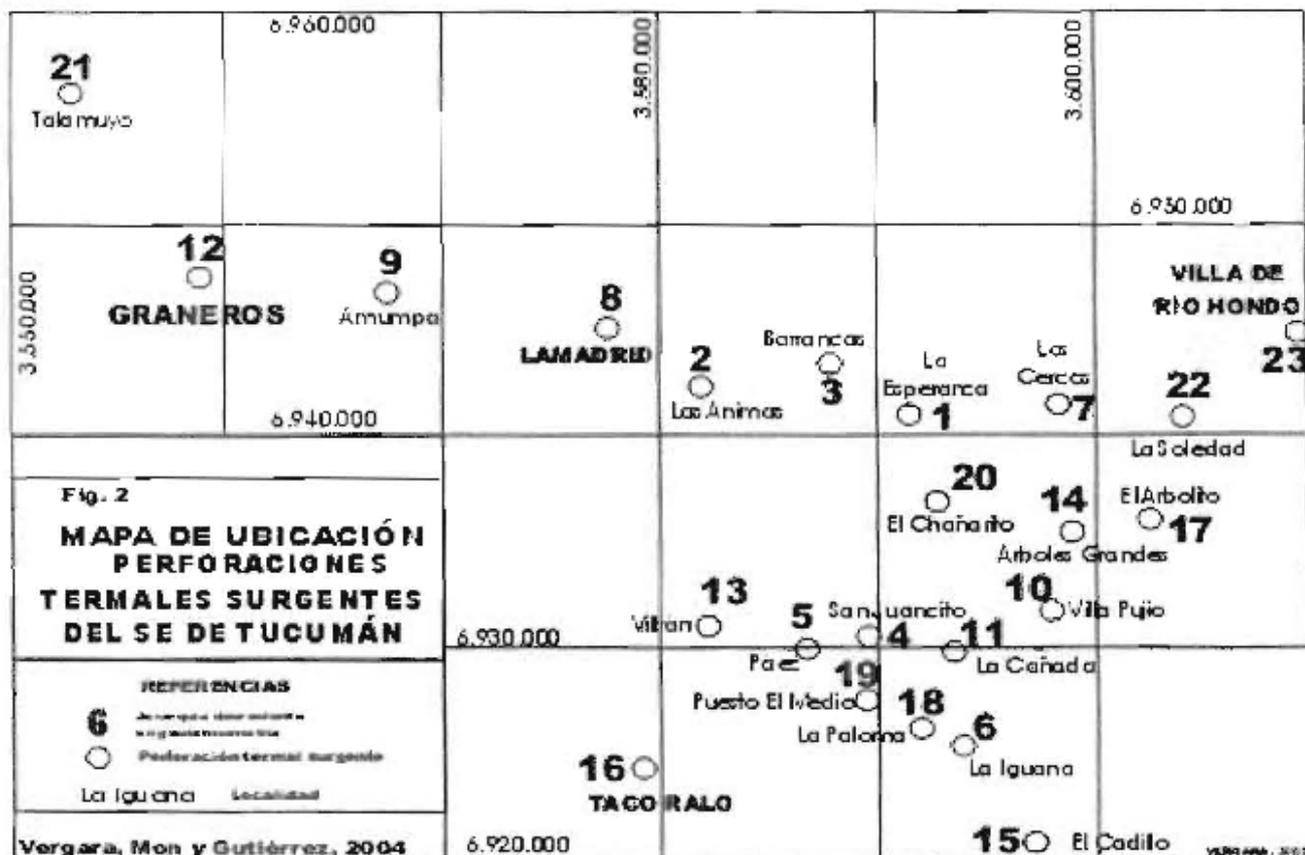
³ Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Naturales e I.M.L. - Miguel Lillo 205, (4000) San Miguel de Tucumán - terres@csnat.unt.edu.ar

Los acuíferos estudiados se atribuyen al "Puelchense" (Vergara et al. 1998) y son de probable edad pliocena. Afloran en la sierra de Guasayán donde fueron denominados Formación Las Cañas (Battaglia 1982). Están cubiertos por loess datados por fósiles en numerosas localidades de la región como Pleistoceno superior (Powel, comunicación verbal). Como antecedentes cabe mencionar los estudios de Jurio &

Méndez (1975), Baldi et al. (1983), Mon y Vergara (1987), Iglesias et al. (1989), Vergara et al. (1990), Balegno y Vergara (1990) y Vergara et al. (1998).

El objeto de este trabajo es continuar la evaluación geoquímica, geológica y geotermométrica del sector de la cuenca con información obtenida de las perforaciones graficadas en la Fig. 2.

FIGURA 2. MAPA DE UBICACION PERFORACIONES TERMALES SURGENTES DEL SE DEL TUCUMAN



2. GEOQUÍMICA

Aniones

El Sistema Acuífero Termal Surgente (SATS) del SE de la provincia de Tucumán está alojado en sedimentos permeables atribuidos al Plioceno (Vergara et al. 1998). Estos reservorios se alimentan desde el oeste en el piedemonte oriental del Sistema del Aconquija, fluyendo hacia el este, al área de descarga en la periferia de Villa de Río Hondo en la provincia de Santiago del Estero. La cubierta confinante es el loess impermeable del Pleistoceno superior, cuyo espesor es variable entre 160 y 430 metros por razones inherentes al sustrato.

Deben descartarse los fenómenos de dilución ó salinización por aporte supergénico, por la potencia y aislamiento hidráulico de su cubierta. Por ello, el quimismo de las aguas (Tabla 1) está condicionado por su evolución geoquímica y, eventualmente los iones aportados deberían ser producto de la interacción con los sedimentos que los contienen y el sustrato.

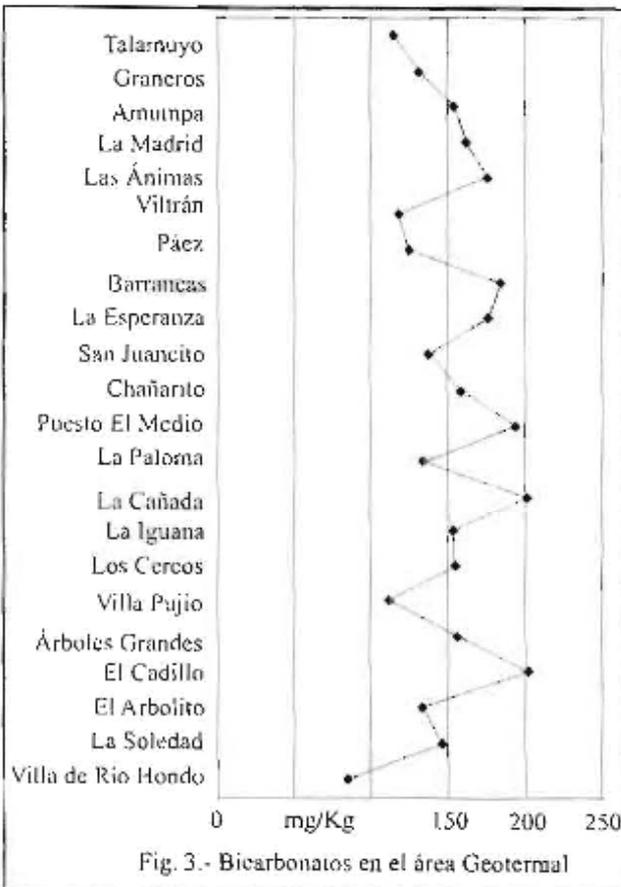
La evolución geoquímica "normal" del agua subterránea propone bicarbonatación en áreas de aporte, sulfatación en sectores intermedios y cloruración distal. El agua subterránea del SATS del sureste de Tucumán tiene una evolución anómala en el citado contexto y su quimismo es respuesta a dos procesos definidos:

- sulfatación, por contacto con sedimentitas yesíferas miocenas (Fm. Río Salí) en ambas márgenes de la cuenca (Sistema del Aconquija al oeste y sierra de Guasayán al este, mucho más acentuada en esta última).
- bicarbonatación, (Fig. 3) generada por aportes endógenos en el sector central de la cuenca (Graneros, Lamadrid, Las Ánimas y Barrancas) ó en parajes aislados (Puesto El Medio y el Chafarito).

Tabla 1. ANÁLISIS QUÍMICOS DE LAS AGUAS DEL S.A.T.S..

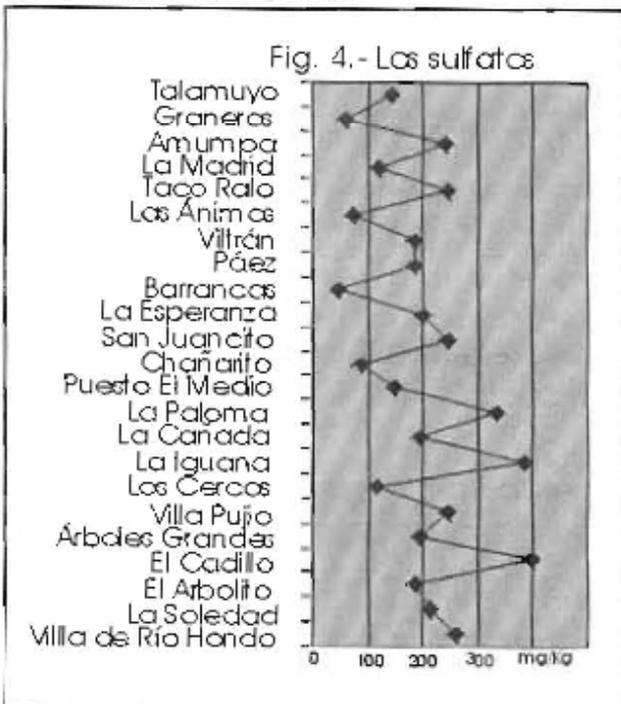
DESIGNACIÓN	Densidad °C	Residuo mg/L	Bicarbonatos mg/L	Cloruros mg/L	Sulfatos mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	K mg/L
21.- Talamanuyo	38,4		117	63,3	144	7,6	133	1,6
12.- Grameros	40,6		134	24,8	62,4	29,8	49,4	4,7
9.- Amampa	36,2		157	74,9	242	40	132	12,9
8.- La Madrid	37	464	166,16	65,6	139,07	35,87	109,87	7,94
16.- Taco Raio	38		136,27	141,63	245,62	29,44	148,96	5,47
2.- Las Ánimas	37,6	416	178,17	78,91	73	32,06	16,94	8,93
13.- Vilhón	40,6	641,86	120,81	88,85	189,47	19,03	2,43	7,81
5.- Páez	47	573,74	126,31	88,85	164,43	15,83	4,37	12,12
3.- Barrancas	40	780	187	14,8	45,6	10,4	1	7,4
1.- La Esperanza	34		176	84,8	197	34,4	155	18,4
4.- San Juanito	62	744	138,61	147,16	243,61	19,23	11,42	17,98
20.- El Chañarito	41	692	159,87	74,56	82,85	16,43	4,74	2,34
19.- Puesto El Medio	51	637,56	186,48	103,15	146,87	14,82	2,43	5,08
18.- La Paloma	41	860,54	134,89	136,8	334,76	30,86	4,74	7,03
11.- La Cañada	34	770,22	203,19	141,84	196,46	21,04	6,36	12,9
6.- La Inguana	40	1.030,26	154,99	187,93	343,27	25,95	1,82	22,67
7.- Los Cercos	41	473	155,6	70,92	115,27	21,84	5,22	6,6
10.- Villa Pujio	37	556	112,27	38,71	246,39	21,6	2,67	10,16
14.- Árboles Grandes	36,6	817	168,82	99,29	193,56	28,25	6,8	7,42
15.- El Cardillo	44	1.030	203,74	132,93	396	18,4	34,75	10,14
17.- El Arbolito	44	660	133,93	140,86	163,47	7,81	3,285	7,03
22.- La Soledad	36		146	44	215	4	0	2,7
23.- Villa de Río Hondo	37	528	83,59	99,71	281,28	5,01	3,28	1,78

FIGURA 3. BICARBONATOS EN EL ÁREA GEOTERMAL



Estos fenómenos han impedido la cloruración normal del agua subterránea comparativamente saturada en los otros aniones. Presuntamente por estas razones no hay aguas cloruradas en la cuenca termal del sureste tucumano.

FIGURA 4. LOS SULFATOS

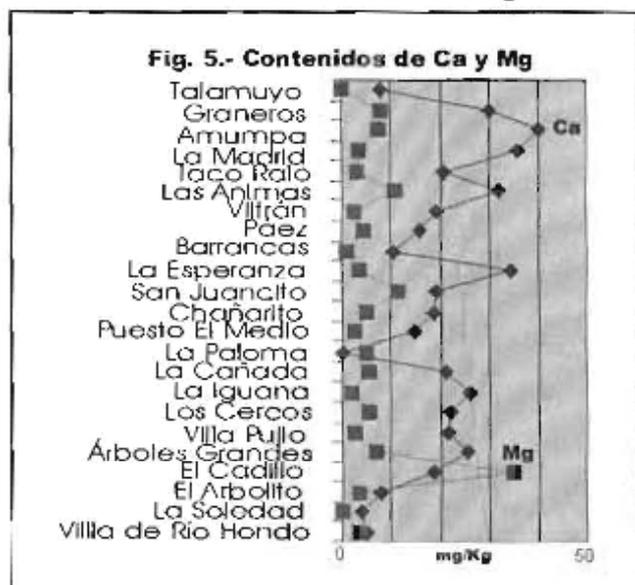


En lo referente a los sulfatos (Fig. 4), su contenido deriva del contacto de los acuíferos pliocenos con el Terciario yesífero (Fm. Río Salí). Su mayor contenido absoluto entonces, se localiza en las localidades de La Iguana y El Cadillo, parajes donde el SATS está generalmente interrumpido por la sierra de Guasayán que impide su flujo normal hacia el este. En el sector septentrional de la cuenca donde la circulación del agua subterránea hacia oriente es normal, es reducido el tenor de sulfato, en particular en las localidades de Las Ánimas, Barrancas, Los Cercos y El Chañarito donde hay aporte de bicarbonato endógeno. La sulfatación promedio de oeste a este va desde 150 hasta 300 mg/Kg.

Cationes

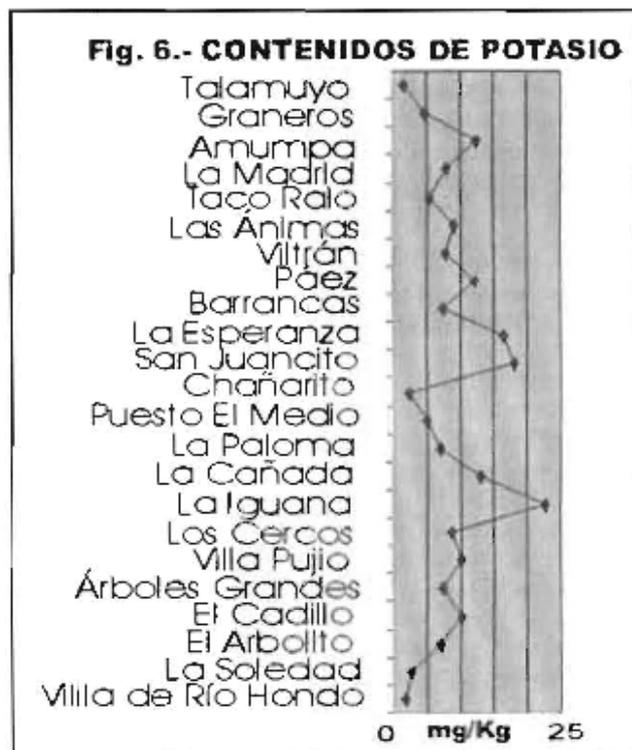
Calcio y Magnesio. El Ca²⁺ muestra una distribución muy irregular (Fig. 5). Su mayor contenido relativo coincide con el área de bicarbonatación localizada entre Graneros y Barrancas. El Mg²⁺ tiene distribución aleatoria, en ocasiones se incrementa en forma solidaria con el Ca²⁺, en otras este comportamiento se invierte. Entre El Cadillo y La Paloma hay un área de enriquecimiento magnésico donde su contenido absoluto supera al calcio.

FIGURA 5. CONTENIDOS DE Ca Y Mg



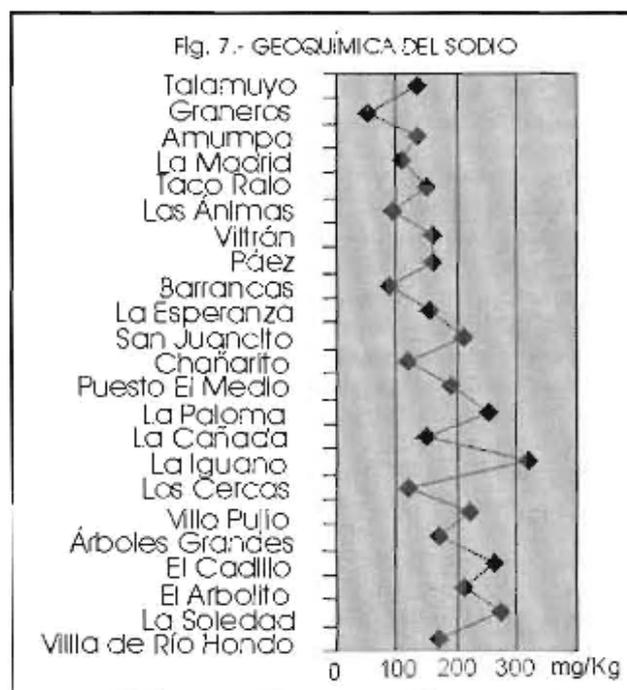
Potasio. Al igual que el bicarbonato su origen es endógeno, presuntamente filomagmático. Se supone producto de alteración de micas y feldespatos alcalinos en condiciones hidrotermales. Su mayor contenido absoluto se registra en La Iguana (Fig. 6) con 22,67 mg/Kg, coincidiendo con la mayor mineralización total del agua subterránea. No obstante la irregularidad puntual de su patrón, es notable la tendencia a disminuir el contenido de K⁺ en los bordes de cuenca. En Río hondo (al este) hay 1,78 mg/Kg y en Talamuyo (al oeste) brindó 1,6 mg/Kg. En las áreas de interés geotermométrico su contenido más frecuente supera los 10 mg/Kg.

FIGURA 6. CONTENIDOS DE POTASIO



El aporte epigenético endógeno de K⁺ es, junto a la bicarbonatación, prueba concluyente de las condiciones hidrotermales del sistema. En aguas subterráneas normales el potasio es retenido por las arcillas por intercambio de bases con el Na⁺, por lo que en reducido tránsito por el subsuelo el K⁺ tiende a disminuir en solución.

FIGURA 7. GEOQUÍMICA DEL SODIO



Sodio. En las localidades de Graneros, Las Ánimas, Barrancas y Los Cercos hay disminución de sodio (Fig. 7) coincidente con mayores temperaturas de equilibrio. Posiblemente la fuente endógena es potásico-cálcica, deficiente global en sodio. En promedio de oeste a este asciende de 100 a 200 mg/Kg. El máximo coincide con la mayor mineralización del agua en La Iguana, superando los 300 mg/Kg. La evolución geoquímica normal está obliterada por la mezcla con los fluidos endógenos.

3. GEOTERMOMETRIA

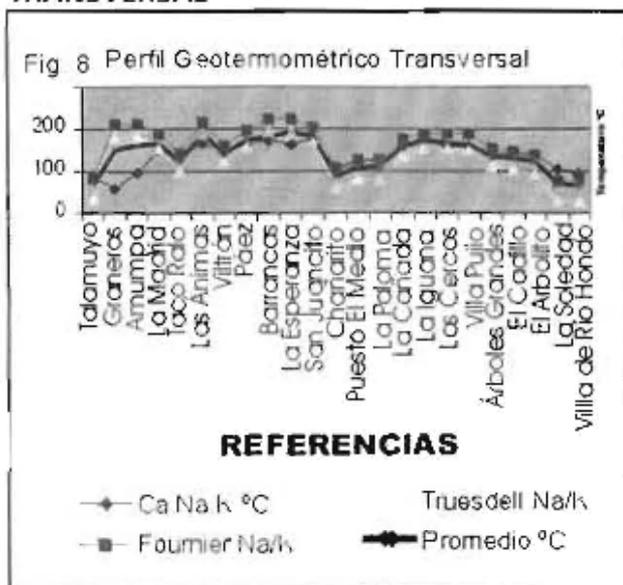
Para obtener información sobre las condiciones de equilibrio térmico de los fluidos endógenos se realizó un promedio de los geotermómetros catiónicos con los métodos empíricos de Fournier (Na/K), Truesdell (Na/K) y Fournier y Truesdell (Ca.Na.K), (1970, 1973, 1974a y 1974b) (Tabla 2).

Tabla 2. GEOTERMOMETRIA

Tabla 2 - Geotermometría				
DESIGNACION	Ca.Na.K °C	Fournier Na/K	Truesdell Na/K	Promedio °C
21.- Talamuyo	88,8	83,21	33,62	58,57
12.- Graneros	58,42	212,48	181,96	150,95
9.- Amumpa	94,4	211,71	181,96	162,89
8.- La Madrid	151,28	189,47	153,58	164,77
16.- Taco Ralo	130,53	143	100,47	124,67
2.- Las Animas	165,64	216,98	187,53	190,05
13.- Viltrán	144,44	162,25	121,57	142,75
5.- Páez	167,16	194,38	159,56	173,7
3.- Barrancas	173,07	221,57	191,85	181,22
1.- La Esperanza	163,25	221,86	193,88	193,03
4.- San Juancito	176,53	204,07	171,42	182,41
20.- El Chañarito	102,71	108,1	60,23	89,98
19.- Puesto El Medio	122,4	125,13	78,95	108,83
18.- La Paloma	123,23	127,99	82,14	111,12
11.- La Cañada	157,25	175,2	136,48	156,31
6.- La Iguana	171,58	169,77	153,95	171,76
7.- Los Cercos	157,01	190,14	154,4	167,18
10.- Villa Pujio	158,25	186,78	150,34	161,12
14.- Árboles Grandes	138,08	154,95	112,78	135,26
15.- El Cadillo	141,67	147,07	104,42	131,05
17.- El Arbolito	136,18	138,27	93,69	123,38
22.- La Soledad	101,93	74,66	28,29	68,29
23.- Villa de Río Hondo	92,11	78,3	26,43	65,61

Se había comprobado (Vergara et al. 1998) que los métodos de la sílice deprimían globalmente las temperaturas obtenidas, presuntamente por precipitaciones durante el ascenso. En esta zona el método Na/K de Truesdell brinda en los bordes de cuenca temperaturas de equilibrio inferiores a las de descarga y el método Na/K de Fournier provee temperaturas de equilibrio más elevadas que los demás geotermómetros. En cuanto al método Ca.Na.K de Fournier y Truesdell genera un diseño de poco contraste entre bordes de cuenca y áreas de interés geotérmico. El método de los promedios catiónicos brinda resultados aparentemente más lógicos y coherentes. Se graficó un método de áreas integradas para los tres métodos y el promedio advirtiéndose que reflejarían eventualmente el termalismo del subsuelo.

FIGURA 8. PERFIL GEOTERMOMÉTRICO TRANSVERSAL



El máximo registro geotermométrico catiónico promedio se obtuvo en La Esperanza (193°C). Está incluido en un "hot point" (Tabla 2 y Fig. 10) que involucra un área aproximada de 72 Km² con una longitud N-S de 16 Km

FIGURA 9. GRÁFICA DE ÁREAS GEOTERMOMÉTRICAS



y 9 Km de ancho a la latitud de 27° 40' S, acuciándose al sur para desaparecer a los 27° 47' S. El gráfico de temperaturas sugiere una morfología suavemente plegada que se corresponde con la morfología del subsuelo que involucra a la cubierta de loess y al sistema acuífero (Figs. 8 y 9). Para ello debe tenerse presente las conclusiones de equilibrio definidas por Jurio et al. (1975) que concluyen un veloz ascenso de los fluidos endógenos a través de fracturas.

Por ese mecanismo la fuente geotermal entraría en contacto con los acuíferos pliocenos que, por su elevada transmisión térmica, enmascararían los focos ascensionales de los fluidos endógenos. El calor se concentraría (Fig. 10) en las localizaciones menos profundas de la estructura (anticlinales) por fenómenos de densidad relativa de los fluidos y sin que ello signifique que, necesariamente, estas áreas estén en contacto directo con las fisuras ascensionales. Un adecuado programa prospectivo previo a la exploración directa, debe incluir una geofísica de detalle para obtener la geometría precisa de la estructura del sustrato. En este contexto es de mayor exactitud la interpretación de la geoquímica que la geotermometría, porque por estos mecanismos se definen los aportes iónicos con precisión puntual.

4. GEOLOGÍA DEL SUBSUELO

Se define con claridad una estructura plegada que afecta a la acumulación plio-pleistocena (Fig. 12). El acortamiento de rumbo NNO-SSE generó un sinclinal adosado a la sierra de Guasayán donde por los datos de las perforaciones se verifican espesores de pleistoceno superiores a los 400 metros (Fig. 13). Para la definición del contacto entre Pleistoceno y Plioceno en el subsuelo se adoptó como nivel de referencia el techo de las arcillas plásticas que yacen sobre los acuíferos termales surgentes, que brinda contraste geofísico en los electroperfilajes de Potencial Espontáneo (SP) y Resistividad (R). El área de máxima subsidencia tectónica incluye los pozos de El Cadillo, La Iguana, La Cañada y El Arbolito, con espesores aparentes de loess superiores a los 400 metros. Las perforaciones de Los Cercos, La Esperanza y Barrancas coinciden con anticlinales donde el espesor de loess es entre 160 y 195 metros, aproximados a los valores reales observados en el resto del territorio. Este fenómeno de incremento de espesor por causas tectónicas en sinclinales plio-pleistocenos, también se observó en el subsuelo de la Llanura Oriental del departamento Buruyacú, donde la máxima potencia de loess se detectó en las perforaciones de Las Chacras y La Fortuna (Vergara et al. 1990; Balegno y Vergara 1990), en el centro de un sinclinal. Por lo expuesto puede proponerse que el máximo espesor del loess de la Formación Tucumán es de aproximadamente 160 metros, y que sus aparentes engrosamientos son debidos al plegamiento, por perforarse en sectores oblicuos ó subparalelos a la superficie de contacto plio-pleistoceno. Además, éste es el espesor más frecuente detectado en zonas eventualmente no perturbadas de la llanura oriental.

FIGURA 10. ÁREAS GEOTERMOMÉTRICAS CATIONICAS PROMEDIO DEL SE DE TUCUMAN

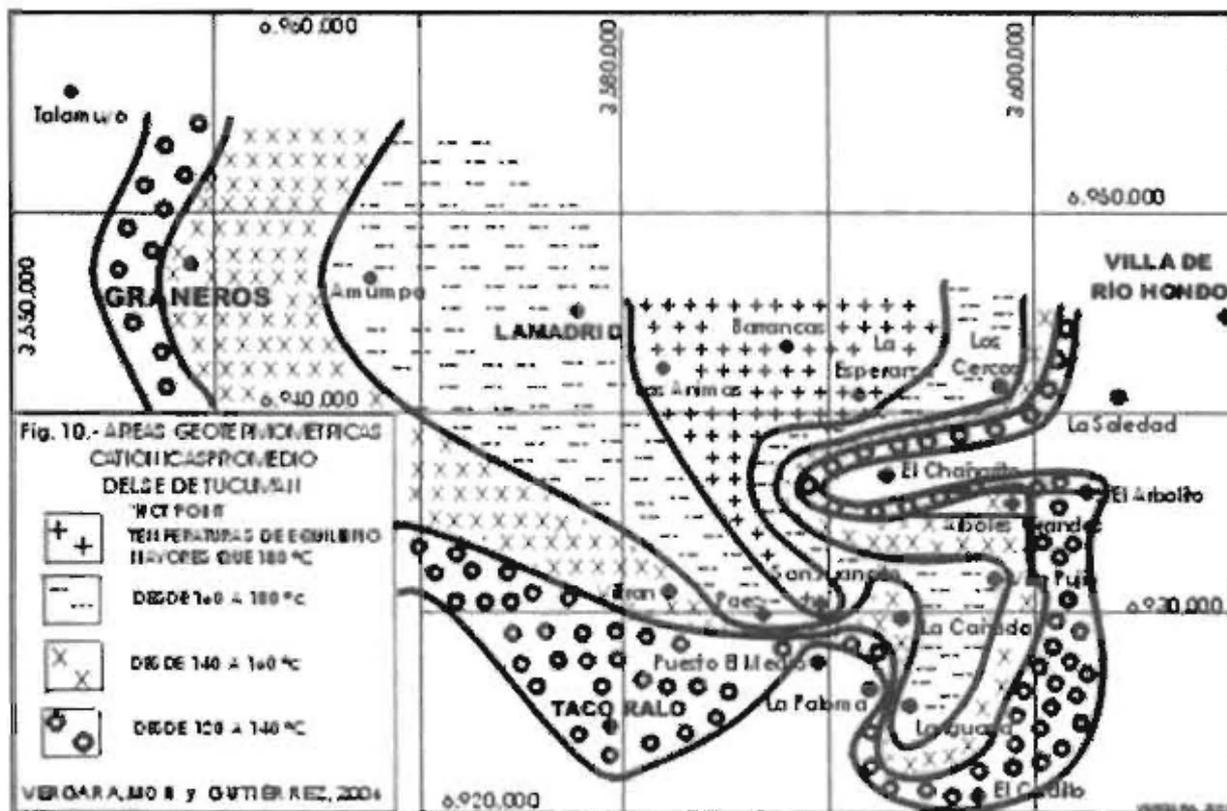


FIGURA 11. TEMPERATURAS DE DESCARGA

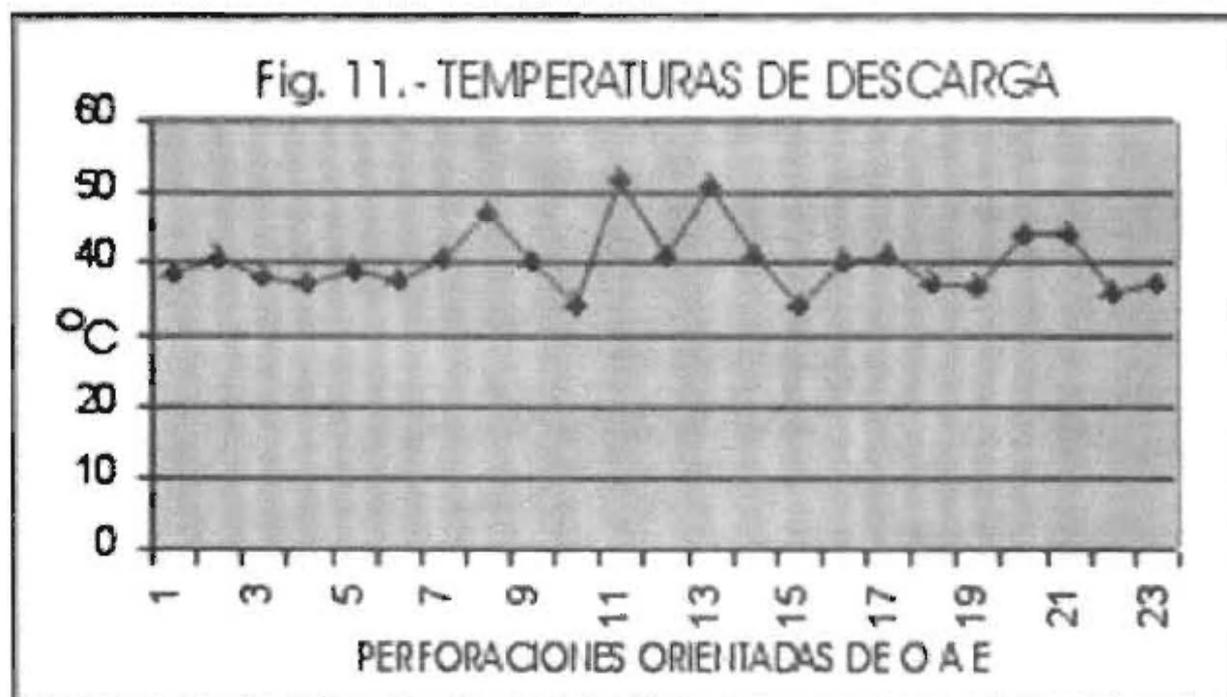


FIGURA 12. MAPA DE ESPESORES DEL PLEISTOCENO SUPERIOR Y ESTRUCTURAS INFERIDAS

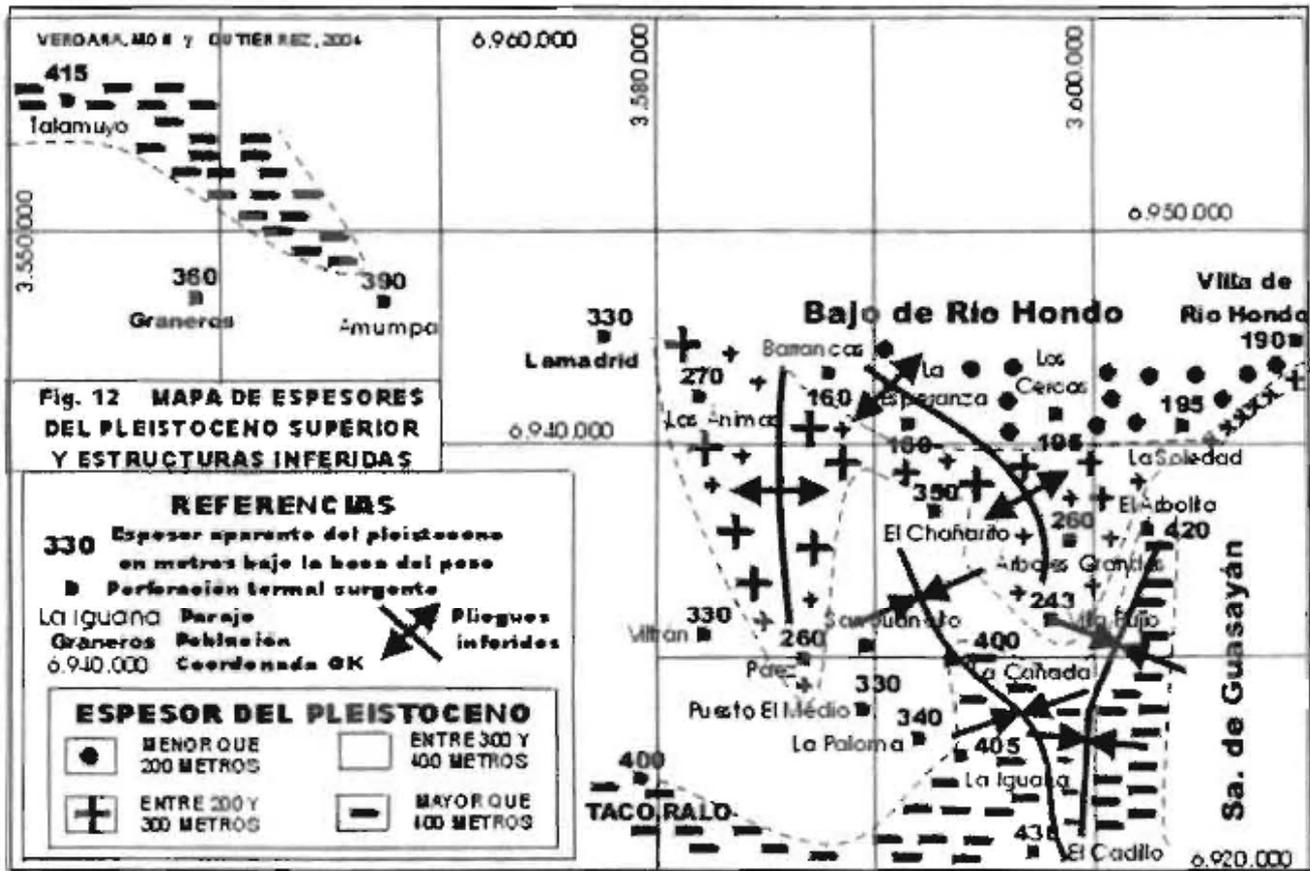
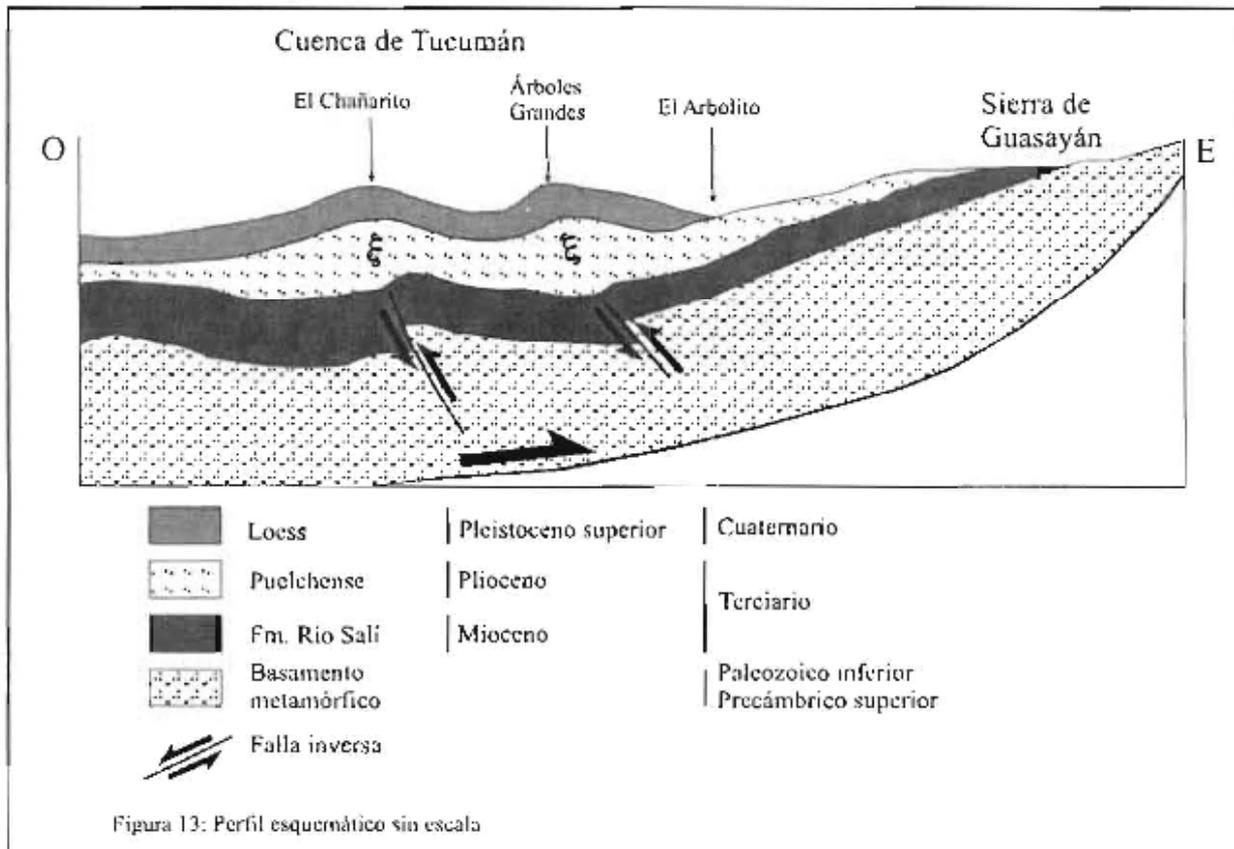


FIGURA 13. PERFIL ESQUEMÁTICO SIN ESCALA



La continuidad geológica de los perfiles de las perforaciones entre Los Cercos y Villa de Río Hondo permite inferir que la estructura sierra de Guasayán-dorsal de Mujer Muerta puede estar interrumpida por fallas transversales que formarían una depresión tectónica entre ambas geformas positivas recientes. Por ello, la elevación de la sierra de Guasayán habría afectado solamente las acumulaciones plio-pleistocenas localizadas al oeste de la misma, en tanto que en la depresión tectónica de Río Hondo eventualmente, hubo una situación estática entre el principio del plioceno y la actualidad. Esta instancia habría facilitado el acomodamiento de la cuenca ante los eventos neotectónicos centralizando el drenaje de la llanura tucumana por esta estrecha franja. En cuanto a la edad del plegamiento sólo puede afirmarse que deforma acumulaciones loésicas cuya datación fosilífera en localidades diversas del área es de edad Pleistocena superior. Por ello, el episodio deformativo puede situarse en el tardío-Pleistoceno al Holoceno.

5. CONCLUSIONES

Se ha delimitado un interesante "Hot Point" geotérmico en el SE de la cuenca de Tucumán. Hay un aparente control estructural de las concentraciones de calor vinculando las anomalías más conspicuas con los altos estructurales generados en plegamiento suave de la cubierta plio-pleistocena. No obstante se infiere que la distribución de las fisuras que facilitan el ascenso de los fluidos endógenos puede tener un diseño en bloques afectando al Mioceno y basamento. Las geotermometrias más notorias se vinculan con aporte endógeno de CO_3H -y K^+ . En los bordes de cuenca, en contacto con las sedimentitas miocenas pelítico-yesíferas de la Fm. Río Salí hay conspicuo aporte de sulfatos al agua subterránea. El 52% de los pozos investigados supera los 140°C de temperatura de equilibrio catiónica promedio.

6. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BALDIS, B., J. DEMICHELI, J. FEBRER, H. FOURNIER, E. GARCIA, J.C. GASCO, M. MAMANI y M.C. POMPOSIELLO, 1983. Magnetoteluric Results along a 1.200 Km. Long Deep Profile with an important Geothermal Area at its Northwest end, at the provinces of Tucumán and Santiago del Estero. Acta Geodaet. Geophys. et Mountainist. Hung. Volume 18 (4). 489-499.

BALEGNO, M. T. y G.A. VERGARA. 1990. Hidrogeoquímica, Termalismo y Geotermometría de la Llanura Oriental del departamento Burruyacú, provincia de Tucumán. XIV Congreso Nacional del Agua, V. 1. 332-347.

BATTAGLIA, A.C., 1982. Hoja Geológica 13F, Río Hondo, Tucumán. Servicio Geológico Nacional Buenos Aires.

FOURNIER, R.D. & A.H. TRUESDELL, 1970. Chemical Indicators of Subsurface Temperature applied to Hot Springs Waters of Yellowstone National Park, Wyoming, U.S.A. U.N. Symposium Development Utilization Geothermal Resources, Pisa, Italia.

FOURNIER, R.D. & A.H. TRUESDELL, 1973. An Empirical Na-K-Ca Geothermometer for Natural Waters. Geochimica et Cosmochimica Acta, V. 37, 1255-1275, Pergamon Press.

FOURNIER, R. D., J. WHITE & A.H. TRUESDELL, 1974a. Geochemical Indicators of subsurface Temperature, Part. 1, Basic Assumptions. Journal of Research U.S. Geological Survey, V. 2 (3). 253-262.

FOURNIER, R.D., J. WHITE, & A.H. TRUESDELL, 1974b. Geochemical Indicators of Subsurface Temperature, Part 2. Estimation of Temperature and Fraction of Hot Water mixed with Cold Water. Journal of Research U.S. Geological Survey. V. 2 (3). 263-270.

IGLESIAS, E. R., A. TINEO, M. DURAN, M. VERMA, J. GARCIA, R.M. BARRAGAN, y J.C. FALCON, 1989. Geochemical survey of the Llanura Tucumana Geothermal Area, Argentina. Geothermal Resources Council. Transactions, V. 13. 165-171.

JURIO, R., I. MENDEZ y R. MIRO, 1975. Zonación Hidrotermal de Acuíferos del Terciario Superior en las Provincias de Santiago del Estero y Tucumán, Argentina. 2º Congreso Iberoamericano de Geología Económica. V. 4º, Buenos Aires. 495-522.

MON, R. y G.A. VERGARA, 1987. El Área Geotermal del Bordo Oriental de los Andes del Norte Argentino, en la Provincia de Tucumán. 2º International Congress of Engineering Geology. Paris.

VERGARA, G. A., E.M. DE LA VEGA y M.T. BALEGNO, 1990.

Hidrogeología de la Llanura Oriental del Departamento Burruyacú en la Provincia de Tucumán. XIV Congreso Nacional del Agua, V. 1, Córdoba. 312-331.

VERGARA, G. A., M. del V. HIDALGO, M.T. BALEGNO de VERGARA y M.P. MASMUTI, 1998.

Corte Geotérmico Transversal de la Provincia de Tucumán. Perfil Geotermométrico entre Juan Bautista Alberdi y Villa de Río Hondo. Geología de Tucumán, publicación del Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán. 161-178.



EVALUACIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LOS SUELOS PRODUCIDA DURANTE LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO PÓRTLAND

Alicia, Karlsson ¹, Rosa, Ayala ²

Resumen

La contaminación es uno de los problemas ambientales más importantes que afectan a nuestro planeta, y surge por la presencia cuantitativa o cualitativa de alguna materia que produce un desequilibrio ambiental. Este término podemos definirlo también, de una manera más clara, como la adición de cualquier sustancia al medio ambiente, en cantidades tales, que cause efectos adversos en los seres humanos, animales, vegetales o materiales que se encuentren expuestos a dosis que sobrepasen los niveles de los que se encuentran regularmente en la naturaleza. En este trabajo se desarrolla un método determinativo con el fin de evaluar cualitativa y cuantitativamente el aporte externo de sustancias aditivas usadas en la fabricación del cemento Pórtland al medio ambiente, evaluándose la estabilidad de dichas sustancias frente a diferentes micro ambientes químicos. La sustancia contaminante a investigar son materiales utilizados en la fabricación de cementos como cenizas volantes y clinker. Los materiales considerados pertenecen a "Loma Negra" de su planta de Olavarría, Prov. de Buenos Aires y "Corcemar" de su planta de Yocsina, Prov. de Córdoba. Se dispersaron las muestras con "calgon", dado que a textura modal de las sustancias contaminantes es de 100 a 60 µm, las determinaciones mineralógicas se resolvieron en esa fracción por medio de microscopía polarizada sobre un conteo de 1000 granos. Estudiándose la muestra sin tratar y después de someterla a ambientes ácidos y alcalinos por un mes. El hábito que presentan las cenizas volantes es el de micro esferas de óxidos de silicio, comúnmente denominadas "fly ash", muestran dos aspectos, unas totalmente transparentes y superficies lisas y las otras de color blanco con superficies irregulares. El clinker se presenta como liofacto formado por criptocristales de 20µm de longitud, compuestos por silicatos de calcio y óxidos de aluminio con textura holocristalina y placas politáxicas, de índice de refracción de alrededor de 1,65 y birrefringencia baja. Pudiendo cuantificarse en forma eficiente la contaminación por clinker y cenizas volantes de los suelos por medio de estudios mineralógicos. Denotando la destrucción parcial de los clinker en ambiente ácido. Las cenizas volantes de las cementeras están contaminadas con metales pesados.

Entregado: 4 de Agosto de 2004 • Aceptado: 6 de Octubre de 2004

¹ Cátedra de Mineralogía, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Sabattini 1672, Córdoba (5014), Argentina. e-mail: karlsson@arnet.com.ar

² Cátedra de Mineralogía y Recursos Extractivos, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Sabattini 1672, Córdoba (5014), Argentina

1. INTRODUCCION

La contaminación del suelo es el desequilibrio físico, químico o biológico del suelo debido principalmente al inadecuado manejo de residuos sólidos y líquidos. Los elementos tóxicos depositados en el suelo se trasladan a las plantas y animales y con posterioridad a las personas. En este trabajo se desarrolla un método determinativo con el fin de evaluar cualitativa y cuantitativamente el aporte externo de sustancias aditivas usadas en la fabricación del cemento Pórtland al medio ambiente, específicamente a los suelos.

Los contaminantes del suelo considerados en este trabajo son los producidos por las nuevas técnicas aplicadas a la fabricación del cemento, como la utilización de combustibles alternativos y la adición de cenizas volantes.

La importancia de la determinación de contaminación de los suelos con clinker y cenizas volantes radica en que no solo será concomitante en el tiempo con la emisión, si no que la inhalación de las partículas contaminantes se corresponderá con las exposiciones futuras.

El cemento es una mezcla de un 80% de piedra caliza y un 20% de arcilla y esquistos que se quema a una temperatura de unos 850-1020° C. De este proceso se consigue el clinker, que al pulverizarlo se obtiene el cemento.

En la búsqueda de mayor competitividad comercial la industria del cemento utiliza residuos como "combustible alterno" en sus hornos. Empleando actualmente 112 tipos de residuos líquidos, semisólidos y sólidos como combustibles con poder calorífico. Estos provienen principalmente de la industria automotriz, química, electrónica, fabricación de pinturas y refinación de petróleo. Los residuos sólidos comprenden llantas de desecho, cascos de baterías, tierras contaminadas, etcétera, mientras que los residuos líquidos son principalmente disolventes, grasas y aceites usados, residuos de la refinación del petróleo y lodos de destilación. Los metales pesados pueden estar presentes en aceites de desecho, tintas, pinturas y solventes. Los desechos químicos orgánicos, como los hidrocarburos que contienen uno o varios de los halógenos (cloro, bromo, flúor y yodo) se encuentran en residuos como la acetona, benceno, tolueno y xileno que se utilizan como solventes, o tetracloruro de etileno, tricloruro de etileno, freones, etcétera. (Brigden et al 2000)

Esta práctica produce en las emisiones de las troneras nuevos contaminantes, especialmente productos de combustión incompleta como metales pesados dioxinas y furanos. Que son absorbidos por el polvo de los residuos del horno (clinker y cenizas volantes) e incluso el mismo cemento, generando un aumento en el contenido de metales pesados.

Ninguna incineradora, ni aquellas con sistemas de control de la contaminación de tecnología de vanguardia, puede destruir el 100% de los residuos. Los hornos operan a elevadas temperaturas (756 a 1134°C), pero los metales pesados no se destruyen a ninguna temperatura. También se genera un grupo de sustancias químicas denominado "productos de combustión incompleta" (que incluyen dioxinas, furanos y una larga lista de compuestos orgánicos) en los lugares de la instalación donde ocurre un descenso de la temperatura (chimenea de humos, equipos de control de la contaminación o incluso en la atmósfera exterior de la cementera). Normalmente, el 1,35% de estos residuos son metales (cadmio, arsénico, cromo, plomo, mercurio, cinc y talio) que se liberan al medio ambiente. Los hornos que queman este tipo de residuos emiten un 66% más de partículas que aquellos que queman combustible tradicional. Si queman residuos halogenados (con cloro, bromo, flúor o yodo) emiten un 203% más de partículas que las instalaciones que utilizan combustible fósil, (Abou-Taleb et al 1995). Las cenizas volantes de las cementeras se contaminan con metales pesados si se

utilizan residuos tóxicos. Estas cenizas son muy alcalinas, lo que hace que los metales tengan una mayor movilidad en comparación con las incineradoras de residuos industriales, (Yang et al 1996). El polvo de los hornos de las cementeras es un subproducto de la fabricación del cemento y se suele vender a los agricultores para tratar el suelo o se deposita en lugares sin ningún control.

2. MATERIALES ESTUDIADOS

Como "ceniza volante" se consideran a los residuos inorgánicos que resulta después de quemar el carbón pulverizado, estas cenizas volantes son productos de los derivados de la combustión arrastradas con los gases y recolectadas por los precipitadores electrostáticos. Utilizándose las como sustituyente de arcilla, arena, piedra caliza y grava, ahorrando los costos de los materiales reemplazados (típicamente 25 a 30%). La ceniza volante puede ser silíceo o calcárea, presenta una tamaño de 400 a 100 mm (Tarun et al 1997) y tiene propiedades hidráulicas y/o puzolánicas.

La composición química mayoritaria de las cenizas volantes es: (SiO₂) reactivo, (Al₂O₃), (Fe₂O₃) y otros compuestos. Mientras su composición mineral es muy variable, muestra una fase vítrea acompañada de fases cristalinas, considerando como ejemplo: 9.6% Cuarzo, 20.4% Mullita, 4.5% Magnetita, 5.4% Hematita, y 58% vidrio. Los elementos trazas de cenizas volantes en mg/kg son los siguientes: Aluminio 140000, Arsénico 286, Bario 1003, Boro 290, Cadmio <0.5, Cromo 218, Cobre 185, Plomo 114, Litio 270, Manganeseo 290, Molibdeno 46, Níquel 169, Selenio 11, Plata 14, P₂O₅ 3800, Titanio 8500, y Zinc 254, según (Hemmings et al 1987).

El clinker de cemento portland es un material hidráulico que se obtiene por sintetización de una mezcla especificada de materias primas. Su composición química mayoritaria se puede considerar como: CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y otros compuestos, con más detalle se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CLINKER

Nomenclatura	Formulación	% en masa
PRINCIPALES:		
Óxido cálcico	CaO	65.00
Anhidrido silíceo	SiO ₂	21.00
Óxido aluminico	Al ₂ O ₃	6.00
Óxido férrico	Fe ₂ O ₃	3.00
SECUNDARIOS:		
Alcalis	K ₂ O + Na ₂ O	0.80
Trióxido de azufre	SO ₃	1.50
Pérdida al fuego		1.00
Residuo insoluble		1.50
Óxido de magnesio	MgO	0.20
Óxido de manganeso	Mn ₂ O ₃	0.25
Óxido de titanio	TiO ₂	0.10
Óxido de bario	BaO	0.02
Óxido de estroncio	SrO	0.10

El porcentaje en peso de los minerales de las arenas finas de los suelos estudiados es: Cuarzo 34.75%, Feldespato 31.57%, Micas 23.52%, Vidrio 2.82%, Plagioclasa 3.97%, Hornblenda 2.42% y Opacos 0.50%, según (Karlsson et al 1993). La composición química más frecuente de estos suelos se puede apreciar en la Tabla 2. A fin de desarrollar un método cuantitativo y cualitativo de la evaluación de contaminación del suelo por sustancias aditivas del cemento se considera las posibilidades de una comparación química entre los

materiales estudiados, dichos valores se hallan dispuestos en la Tabla 2, y proceden de análisis realizados en clínker por INTI, pertenecientes a las cementeras de Yocina y Olavarría. Los análisis comparativos utilizados para las cenizas volantes fueron realizados por (Sheetz 1987). El análisis químico perteneciente a el suelo, corresponde a una generalidad de cálculos químicos realizados para las arenas de los suelos de la Provincia de Córdoba por (Karlsson et al 2002).

Tabla 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA PORCENTUAL DE ÓXIDOS METÁLICOS MAYORITARIOS PRESENTES EN LOS MATERIALES ESTUDIADOS

Oxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Otros oxidos
Arena de suelo loesico (3)	68.82	10.97	5.12	2.09	5.96	0.15	1.40	5.49
Cenizas volantes (fly ash)	48.80	27.00	2.30	0.20	0.80	1.60	13.40	5.90
SRM 1633 ^a (2)								
Cenizas volantes (fly ash)	55.30	23.30	1.20	0.30	2.50	8.00	5.10	4.30
SRM 2690 (2)								
Clinker Yocina (1)	20.10	6.10	1.17	0.64	-	62.40	3.61	5.98
Clinker Olavarría (1)	21.11	5.18	1.36	0.39	0.68	66.00	3.53	1.7
Referencia Bibliográfica: (1) Analisis químico clínker: Informe técnico final sobre escorias de altos hornos Argentina, 1991 (INTI - CIID). (2)(Sheetz, 1987), (3) (Karlsson et al 2002)								

Los suelos presentes en la llanura cordobesa se han desarrollado sobre sedimentos loésicos, con textura franca y colores pardos de oscuros a claros. La mineralogía de sus arenas indica un origen asociado a secuencias téficas producidas por la actividad explosiva cordillerana, (Karlsson et al 1990), de igual edad que la andícas (Laya 1970).

3. METODOS APLICADOS

Se plantea un estudio microscópico a fin de poder comparar la mineralogía de los materiales en estudio, así como sus texturas superficiales. A tal fin se dispersan las muestras con "calgon" y se tamizan. La textura modal de las sustancias contaminantes es de 100 a 60 µm, por lo que las determinaciones mineralógicas se aplicaron a la fracción de arena fina.

Para determinar el comportamiento del clínker y de la ceniza volante frente a diferentes micro ambientes químicos, se someten las muestras de suelos contaminados a soluciones ácidas (pH 3) y alcalinas (pH 10) durante 30 días. Estudiándose con posterioridad dichas muestras al microscopio.

4. RESULTADOS

Los estudios al microscopio petrográficos muestran características distintivas entre los minerales del suelo, ceniza volante y clínker. Los minerales del suelo muestran una composición y micro texturas superficiales típicas. Los suelos estudiados poseen en general de 10 a 20% del vidrio volcánico, los vitroclastos más abundantes son incoloro con índice de refracción de 1.43, presentan forma de litofisas, placas compactas y láminas fluidales. Los fragmentos líticos varían de 10 a 30 % en los sedimentos de llanura, siendo menor su presencia en los sedimentos de las sierras. La textura de los lititos más frecuente es la granofírica estando su fábrica conformada por Cuarzo y Feldespato. La fracción cristalina está conformada por Cuarzo en granos con bordes redondeados a angulares, su porcentaje es muy variable, de 3 a 30 %. La proporción de Feldespatos es alta en general, llegando a 60%, su mineralogía va de Sanidina a Oligoclasa-andesina. Los minerales féficos se presentan en mínima proporción, siendo los más comunes la Biotita, Hornblenda verde común y opacos. Estos últimos son en su gran mayoría Magnetita y Hematita.

Tanto la ceniza volante como el clínker se diferencian en forma marcada de los minerales del suelo mediante el estudio al microscopio petrográfico (Fig. 1) y (Fig. 2). El hábito que presenta la ceniza volante es el de micro

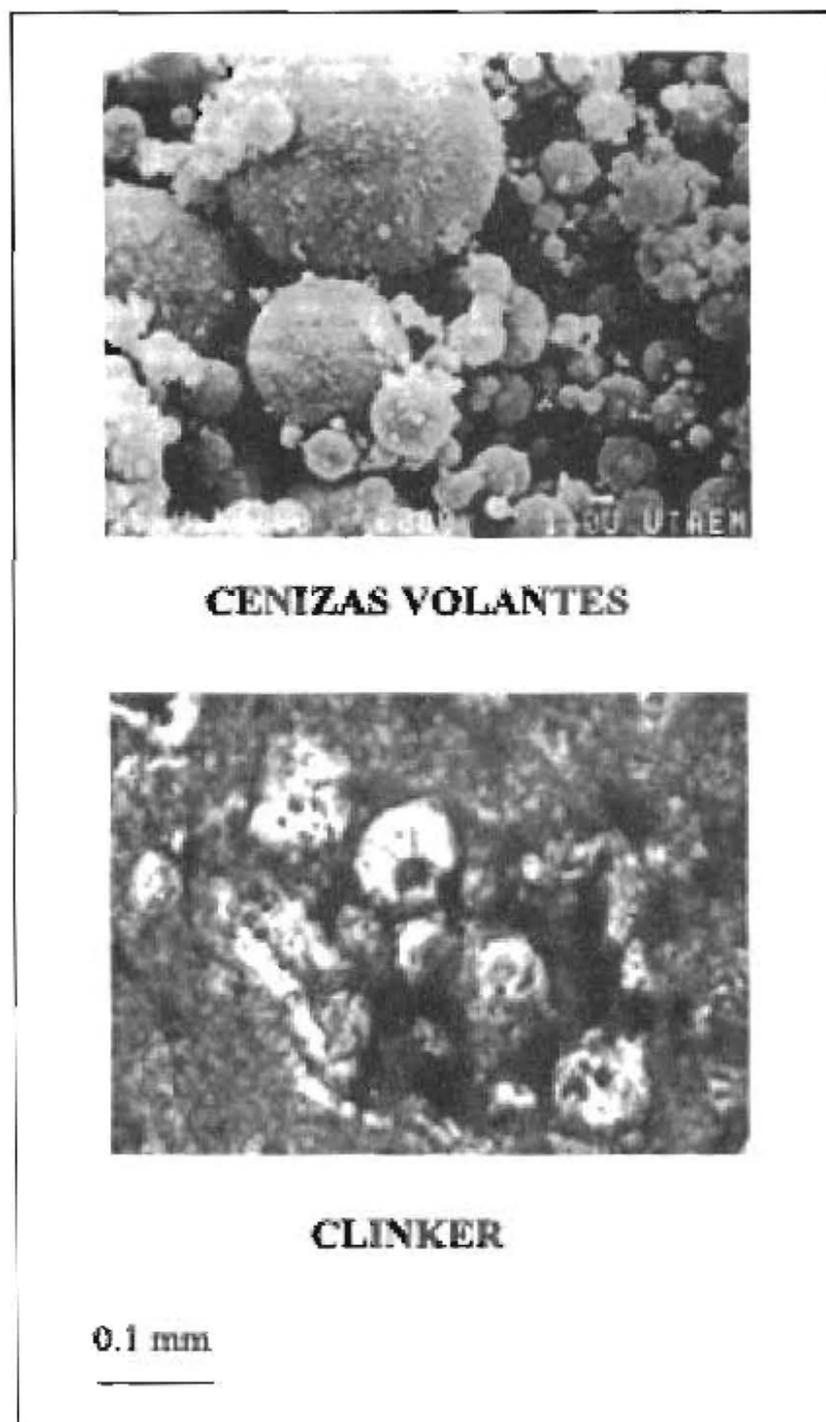
esferas, comúnmente denominadas "fly ash", muestran dos aspectos, unas totalmente transparentes y superficies lisas y las otras de color blanco con superficies irregulares. El clinker se presenta como litofacto compuesto por criptocristales de 20mm de longitud que están conformados por silicatos de calcio y óxidos de aluminio, con textura holocristalina y placas politáxicas, de índice de refracción de alrededor de 1,65 y birrefringencia baja.

Las muestras sometidas a (pH 10) no exhiben cambios en el aspecto de la ceniza volante, denotando solo una leve decoloración de los litofactos de clinker. Las muestras sometidas a (pH 3) manifiestan una disgregación de los litofactos de clinker en los criptocristales constitutivos en un 40% del volumen.

FIGURA 1.
DISEÑO DE LA MINEROLOGÍA
DE LAS ARENAS DE SUELO



FIGURA 2. MICROFOTOS DE CENIZAS VOLANTES Y CLINKER



5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

La dificultad de fundamentar por medio del análisis químico la contaminación del suelo por clinker y ceniza volante, radica en que mayoritariamente estas sustancias presentan los mismos óxidos (Tabla 2). Las diferencias en cuanto a composición químicas entre los suelos, ceniza volante y clinker (Tabla 2) no son muy relevantes. Podemos observar que solo se generaría un aumento del 50% de óxidos de aluminio en detrimento del óxido de silicio para una contaminación con cenizas volantes. El

clinker genera un aumento del 70% de óxidos de calcio en detrimento de los óxidos de aluminio y silicio.

Si bien se aprecian ciertas variaciones en cuanto al porcentaje de los óxidos la dificultad primordial es no contar, en la mayoría de los casos, con los análisis químicos previos del suelo sin contaminar. Además de desconocer el volumen porcentual de la contaminación, tanto de ceniza volante como de clinker. Quedando demostrado que el análisis químico de los suelos contaminados no resulta una herramienta fehaciente para evaluar una contaminación moderada del mismo. A pesar

que la determinación mineralógica de los criptocristales que forman el clinker se ve dificultada por su tamaño, los estudios mediante el microscopio petrográfico resalta la presencia de cenizas volantes y clinker en los suelos. Estas partículas extrañas al material del suelo muestran siempre la misma textura holocristalina con características ópticas muy típicas (Fig. 2), pudiendo cuantificarse en forma eficiente la contaminación de los suelos.

A partir del comportamiento de los litofactos de clinker, podemos inferir que en ambientes ácidos se liberan en

forma masiva las sustancias contaminantes que portan. Es decir que a partir de estos estudios se concluye que los análisis mediante microscopía petrográfica son los más apropiados para la apreciación y evaluación de contaminación de los suelos por clinker y ceniza volante. Considerando importante remarcar que el clinker se degrada en ambiente ácido liberando las sustancias contaminantes que porta, producidas por el agregado de las cenizas volantes y la absorción de sustancias generadas por el uso de combustibles alternativos.

6. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ABOU-TALEB, A., MUSAIGER, A., y R. ABDELMONEIM, 1995.

Health status of cement workers in the United Arab Emirates. *J. R. Soc.* Volumen 115:378-381.

BRIGDEN, K., LABUNSKA, I., STRINGER, R., JOHNSTON, P. SANTILLO, D. y J. ASHTON, 2000.

Identificación de contaminantes orgánicos y metales pesados en muestras recolectadas del incinerador de desechos peligrosos y hospitalarios Trieco, Provincia de Buenos Aires, Argentina, Laboratorios de Investigación de Greenpeace, Departamento de Ciencias Biológicas, Universidad de Exeter, 35pp. Reino Unido.

HEMMINGS, A., BERRY, R., CORNELIUS, J., y G. SHEETZ, 1987.

Speciation in Size and Density Fractionated Fly Ash. Characterization of a Low-Calcium, High-Iron Fly Ash, *Materials Research Society Symposia Proceedings, Fly Ash and Coal Conversion By-Products: Characterization, Utilization and Disposal.* Volumen 86:112-121.

KARLSSON A., 1990. Comparación de los aspectos geológicos y petrológicos de sedimentos loésicos. *Actas XI Congreso Argentino, San Juan.* Volumen 1:430-434.

KARLSSON, A., 1993. Método mineralógico para la tipificación numérica de sedimentos loésicos. *Actas de la IAEG-AIGI.* Volumen VII:21-24.

KARLSSON, A., R. AYALA y L. MANSILLA, 2002.

Método mineralógico para la determinación de contaminación ambiental con sustancias aditivas usadas en la fabricación del cemento pórtland. *XV Congreso de Geología Argentina.*

LAYA, H., 1970.

Unidades litoestratigráficas y paleosuelos asociados en los depósitos piroclásticos del NO de la Patagonia. *V Congreso Geológico Argentino.* Volumen :231-253.

SHEETZ S. 1987.

Speciation in Size and Density Fractionated Fly Ash. Characterization of a Low-Calcium, High-Iron Fly Ash. *Materials Research Society Symposia Proceedings, "Fly Ash and Coal Conversion By-Products: Characterization, Utilization and Disposal"* .Volumen 86:24-31.

TARUN R. y S. SHIW. 1997.

Influence of Fly Ash on Setting and Hardening Characteristics of Concrete Systems. *Materials Journal* Volumen 94:1-6.

YANG C., HUANG, C., CHIU, H., CHIU, J., LAN, S., y Y. KO, 1996.

Effects of occupational dust exposure on the respiratory health of Portland cement workers. *J. Toxicol. Environ.* Volumen 49: 581-588.



EVALUACIÓN DE ANEGAMIENTOS EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES

Paulina E. Nabel¹ y Magdalena Caretti²

Resumen

Las inundaciones y el impacto que producen en la economía y en la calidad de vida de la población, representan las situaciones de mayor riesgo en la región bonaerense, producidas por un fenómeno de origen natural.

El presente trabajo revisa en escala de detalle los aspectos naturales que han intervenido en eventos de inundación durante el periodo 1993-2003, con el fin de detectar las circunstancias disparadoras en cada uno de ellos. Se analiza también la manera en que las características geológico-geomorfológicas, hidrológicas y climáticas interactúan entre sí y con los aspectos construidos, produciendo diversas afectaciones en la población. Por otro lado compara la metodología utilizada por los diferentes organismos involucrados en la identificación y la descripción de los eventos y destaca la falta de continuidad en los registros y el efecto de programas circunstanciales que se discontinúan, los que generan sesgos en la información, que alteran significativamente el reconocimiento de los fenómenos.

Los resultados muestran un patrón complejo de distribución para las áreas afectadas, que se ve influenciado no solo por las geofomas naturales sino también por la red de conductos pluviales.

Los anegamientos son causados en un 72% de los casos por precipitaciones, frente a un 28% causados por sudestada. La disminución del número de eventos observada a partir del año 2001, principalmente en la zona sur de la ciudad, sugiere un efecto positivo causado por las obras estructurales realizadas en la cuenca Matanza-Riachuelo.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo analiza aspectos geomorfológicos y climáticos en los anegamientos que se han producido en la ciudad de Buenos Aires entre 1993 y 2003, como así también los cambios que se han producido a partir de la puesta en funcionamiento de algunas de las obras estructurales inauguradas en este periodo.

Las inundaciones son los eventos de origen natural que históricamente han generado mayores afectaciones y pérdidas en la región. Mucho se ha escrito sobre ellas, pero son escasos los estudios de detalle que caracterizan los eventos pasados, información que consideramos indispensable para la contrastación de cualquier modelo y planificación de obras futuras.

Las estimaciones resultantes de dichos estudios, deben ser necesariamente consistentes con la información conocida y confiable del comportamiento de las inundaciones en la región. Resulta insoslayable analizar los registros documentales de los anegamientos históricos, la información meteorológica, las características del sustrato y sus modificaciones, como así también los registros de las fuentes de información.

Las diferencias existentes en el almacenamiento y tratamiento de la información entre las diferentes jurisdicciones políticas (Ciudad Autónoma de Buenos

Entregado: 10 de Agosto de 2004 • Aceptado: 30 de Setiembre de 2004

¹ C.O.N.I.C.E.T. - Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia, Av. Angel Gallardo 470, C1405DJR Buenos Aires. E-mail: pnabel@gecuat.gov.ar

² G.C.A.B.A. - Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia, Av. Angel Gallardo 470, C1405DJR Buenos Aires. E-mail: magda@gecuat.gov.ar

Aires, Provincia, municipios, partidos, etc) han dirigido el inicio de esta investigación hacia una de ellas, en este caso la CABA (Ciudad Autónoma de Buenos Aires), de manera de lograr una coherencia en el muestreo de la información y en el análisis de los eventos.

2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS

La Ciudad de Buenos Aires se ubica a los 34°40'S y 58°30'O, en la franja latitudinal de climas templados, en la región de la pampa ondulada, en la que se han desarrollado fértiles suelos sobre los espesos depósitos loésicos originados durante el Cuaternario.

El desarrollo de la red de drenaje en la planicie loésica sobre la que se asienta la ciudad, se presenta integrada, con amplias divisorias de dirección aproximada SO-NE. En dichas divisorias suele destacarse la presencia de pequeñas lagunas que colmatan antiguas cubetas de deflación, indicadoras de cambios climáticos ocurridos en el pasado. La presencia de estas pequeñas lagunas tiene un comportamiento particular y destacado en épocas de crecidas, pues se unifican, ampliando el efecto de las inundaciones.

La escasa pendiente del terreno, por otra parte, genera un lento escurrimiento superficial y acentúa los procesos de infiltración, determinando una fuerte interrelación entre el escurrimiento superficial y el subterráneo.

Sin embargo, en las áreas urbanizadas, como la que abarca la Ciudad de Buenos Aires, estas características han sido fuertemente modificadas. Por un lado, la impermeabilización del terreno reduce hasta impedir los mencionados procesos de infiltración, por lo que el agua circula mayoritariamente por la red de canales artificiales. Por el otro, el escurrimiento excedente durante los anegamientos, se ve afectado por la compleja red vial-ferroviaria que provoca endicamientos y su retención en las depresiones.

3. METODOLOGÍA

Con el fin de asegurar una adecuada comparación del muestreo, dadas las diferencias existentes en la información proveniente de las distintas jurisdicciones político-administrativas se acotó la observación al ámbito de la Ciudad de Buenos Aires. Temporalmente se consideraron los eventos ocurridos entre los años 1993-2003, en los que se analizaron las inundaciones catastróficas desencadenadas por eventos climáticos. Asimismo se analizaron los efectos de las obras de remediación realizadas durante el periodo.

La recuperación de las fechas de los eventos de inundación, se realizó a través de la búsqueda sistemática en diferentes organismos oficiales, ONGs y algunas fuentes hemerográficas. Estas fueron: el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el Servicio de Hidrografía Naval (SHN), Defensa Civil de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (DC), la Secretaría de Obras Públicas y el Departamento de Hidráulica de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, la Subunidad Provincial de Coordinación para la Emergencia de Buenos Aires (SUPCEBA), Aguas Argentinas (ex Obras Sanitarias de la Nación), el Centro de Estudios Sociales y Ambientales (CESAM) y los diarios "La Nación", "Clarín" y "El Día" de La Plata.

La búsqueda en las fuentes hemerográficas de eventos anteriores a diciembre de 1995 se realizó sobre la edición en papel del diario "La Nación" mientras que las fechas de eventos posteriores se obtuvieron a partir de los archivos digitales de los diarios antes mencionados. Las áreas afectadas por cada evento de inundación se pudieron recopilar a partir de la información brindada por Defensa Civil de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y la información publicada en los distintos diarios mencionados.

Los datos relacionados con las condiciones meteorológicas en que ocurrió cada evento fueron proporcionados por el SMN y el SHN. En el SMN se obtuvieron datos estadísticos y diarios de precipitaciones acumuladas de la estación meteorológica central de Buenos Aires, ubicada en Villa Ortúzar, datos de precipitaciones diarias de la estación Aeroparque Jorge Newbery, así como alturas diarias del Río de la Plata. La información sobre alturas máximas diarias del Río de la Plata, pleamares y bajamares máximas mensuales y anuales, fue brindada por el SHN.

A su vez, para valorar la calidad de la información recopilada se compararon los datos proporcionados por las diversas fuentes.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De la comparación y el análisis de la información arriba mencionada, se rescataron 64 eventos de inundación que afectaron diversas zonas de la ciudad en los últimos 11 años, con diferente frecuencia e intensidad (tabla 1).

En relación a las diferencias de tipo y calidad, observadas entre las diferentes fuentes consultadas, se privilegió en todos los casos la información proveniente del SMN y el SHN, para la información climática y mareográfica y a DC para la información de las áreas afectadas, ya que estas instituciones son las que producen datos originales.

En relación al número de eventos, se compara en este trabajo la información brindada por DC y el diario "La Nación", ya que de todas las fuentes consultadas, fueron las que proporcionaron la mayor cantidad de información por evento.

En la figura 1 se ha graficado la distribución de los 64 eventos registrados en los once años analizados (1993-2003) sobre la base de las mencionadas fuentes.

FIGURA 1a. EVENTOS REGISTRADOS POR DEFENSA CIVIL

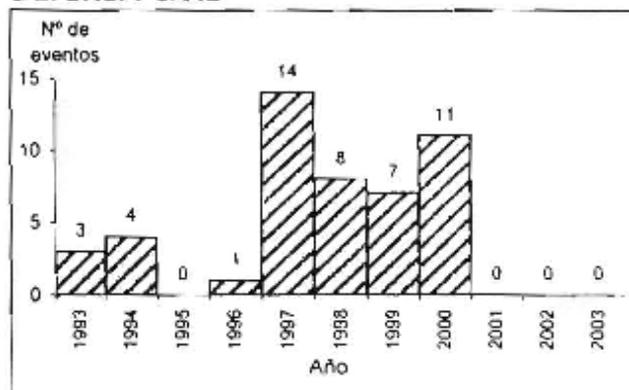


Tabla 1. EVENTOS DE INUNDACIÓN REGISTRADOS EN EL PERÍODO 1993-2003

NºEvento	Fecha	Alt.Max	pp A.J.N	pp V.O	cuencas afectadas	Caracterización
1	7-8/2/93	3,95	77,0	37,0	R,W	S+P
2	20/2/93	3,08	0,0	0,0	R	S
4	3/4/93	3,70	78,0	81,0	R,V,W,M,RA,ME	S+P
5	8-9/6/93	1,22/2,74	s/d	s/d	ME,R	P+S
6	14/6/93	1,15	48,0	37,0	M,RA	P
7	30/8/93	3,70	26,0	41,0	R	S+P
10	26-27/11/93	2,81	108,5	100,0	V,R	P+S
12	15/3/94	1,56	142,0	63,0	R,RA,ME,V,M,W	P
14	3-6/4/94	3,29	157,0	197,0	V,M,W,R,ME,C	P+S
16	12/6/94	1,36	25,0	28,0	M	P
17	13/12/94	1,69	53,0	69,0	M,ME,R,RA,V	P
19	6/11/96	1,49	113,0	95,0	R,M,V,C,RA	P
20	18/5/97	1,01	97,0	88,0	M,R,V,ME,W,RA,C	P
21	21/5/97	1,29	22,0	31,0	R,M	P
22	13/6/97	1,19	24,0	20,0	W,M,V,R,RA,ME	P
23	15/8/97	2,48/2,55	30,0	21,0	M,C,RA,R	S+P
24	31/8/97	2,82	43,0	55,0	M,W,R,C,V	S+P
25	4/10/97	1,00	35,0	36,0	R	P
26	10/10/97	1,19	19,0	34,0	RA,R,M	P
27	14/10/97	2,56	21,8	30,0	M,ME,RA,R,C,V	S+P
28	27/10/97	2,79	15,0	20,0	ME,V,RA,R,M	S+P
29	25/11/97	2,13	38,0	43,0	R,RA,ME,M,C,V	P
30	2/12/97	1,46	24,0	29,0	R,M	P
31	13/12/97	2,19	90,0	102,0	M,C,RA,V	P
32	22/12/97	2,32/2,51	31,0	s/d	M,RA,R	P+S
33	26/12/97	1,37	140,0	101,6	R,M,V,C,RA,ME	P
34	4/1/98	1,80	57,0	60,0	V,RA,M	P
35	14/1/98	1,87	40,0	44,0	R,M,C	P
36	3-6/2/98	2,96	104,0	105,0	W,RA,R,M,V,C,ME	S+P
37	10/3/98	3,20	23,0	31,0	M,V,R,W	S
38	27/4/98	1,89	27,0	36,0	R,V	P
39	11/5/98	1,86	20,0	24,0	M,V,R,C,RA	P
41	5/12/98	3,04	2,0	0,4	W	S
42	13/12/98	2,36	108,4	77,2	R,M,RA,V	P+S
43	16/12/98	2,60	31,0	43,0	R,RA,V,M	S+P
44	28/12/98	1,48	19,0	31,0	R	P
45	23/1/99	1,65	44,0	44,0	M,R,ME,V,W	P
46	28-1/2/99	2,79	163,0	157,0	W,V,M,R,RA,C,ME	P+S
47	6/2/99	1,57	70,0	102,0	M,R,RA,V,ME,C,W	P
48	5/3/99	1,66	24,0	28,0	RA,R,M	P
49	24/3/99	2,16	41,0	35,0	M,R,ME	*P+S
50	28/3/99	2,43	55,6	65,0	R	P+S
51	3/5/99	1,06	20,0	25,0	R	P
52	28-29/6/99	3,40	6,0	7,0	W,V,M,R	S
53	10/1/00	1,31	50,0	54,0	R,V,M	P
54	24/1/00	1,97	16,0	63,0	R,ME,V,M	P
55	6-7/4/00	1,44	88,0	99,0	M,V,R	P
56	1/5/00	1,49	88,0	87,0	R,M,RA,V	P
57	5/5/00	2,40	77,0	79,0	R	P+S
58	14-18/5/00	3,60	167,0	218,7	W,M,R,V	P+S
60	24/6/00	1,46	46,0	46,4	R,V,M	P
61	8/7/00	3,32	1,6	8,0	W	S
62	23/10/00	2,98	0,0	0,3	W	S
63	11/11/00	1,08	34,0	46,0	M,V,R	P
64	24/1/01	1,40	73,0	147,0	ME,M,R,V,W	P
65	1/3/01	1,42	68,0	85,0	V	P
66	16/3/01	2,07	55,0	52,0	V,M,ME,R,W	P
67	20-21/3/01	3,15	93,0	125,0	W,M	S+P
69	20/10/02	3,53	15,0	23,0	W,V,R	S+P
70	29/12/02	1,86	85,0	82,0	M,V,ME	P
71	11/2/03	1,85	95,0	198,0	W,M,V,ME	P
72	10/3/03	1,54/3,11	42,0	59,0	V	P+S
73	10-11/11/2003	2,30	72,0	106,0	M,R	P+S
74	16/6/00	3,02	7,0	10,0	W,V	S

C = Cildañez
M = Maldonado
ME = Medrano

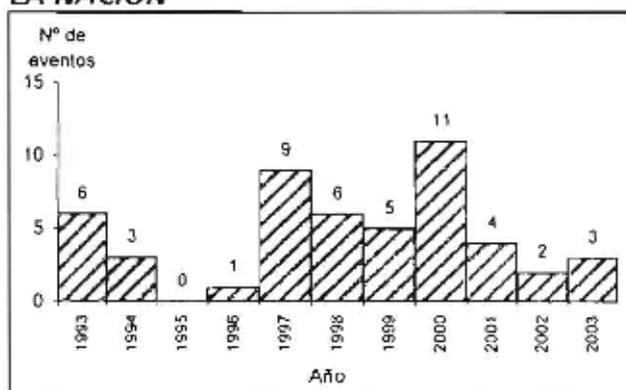
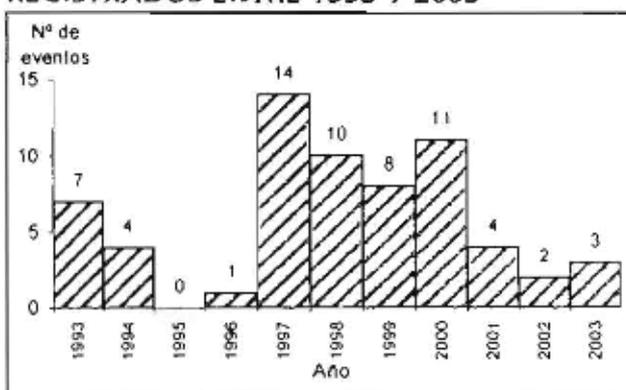
RA = Radio Antiguo
R = Riachuelo
V = Vega

W = White
A.J.N = Aeroparque Jorge Newbery
V.O = Villa Ortuzar

S = Sudestada
P = Precipitaciones

S+P = Sudestada con Precipitaciones
P+S = Precipitaciones con Sudestada

* Sumideros Tapados

FIGURA 1b. EVENTOS REGISTRADOS POR LA NACION**FIGURA 1c. TOTAL DE EVENTOS REGISTRADOS ENTRE 1993 Y 2003**

Es importante aclarar las características y las dificultades que se suscitaron en el muestreo de dicha información. Si bien ambas fuentes registran un mayor número de eventos entre los años 1997 y 2000, la información hemerográfica brindó un registro de eventos que se distribuye a lo largo de los 11 años analizados, mientras que, y a diferencia de aquella, la información suministrada por DC presentó un sesgo muy violento para el año 2001, a partir del cual no ha proporcionado más información. Evidentemente dicho sesgo más que reflejar el fenómeno de las inundaciones, está reflejando un cambio de política en el seguimiento del fenómeno y/o una discontinuidad en los programas de registro y medición de dicha repartición de gobierno. Particularmente entre los años 1997 y 2000, DC había implementado un proyecto de monitoreo que concluyó en un trabajo de publicación interna en el año 2001. En dicho trabajo se brindaron detalles acerca de precipitaciones horarias, alturas del Río de la Plata, zonas anegadas y estados de alerta meteorológica entre otros, para cada uno de los eventos. Este trato detallado de la información se encuentra ausente sin embargo para eventos ocurridos en otros años, donde sólo se especificaron las precipitaciones acumuladas diarias y en algunos casos solamente el pico de precipitaciones. A partir del año 2001, los datos referidos a los anegamientos en la ciudad, fueron suministrados por la Secretaría de Obras Públicas y por SUPCEBA.

Por otra parte, las fuentes consultadas no siempre coinciden en la fecha de inicio del fenómeno e incluso existen eventos registrados por una fuente y no por la otra. En esos casos se amplió la investigación, consultando un mayor número de fuentes y privilegiando la información proveniente de los organismos "productores de información".

Realizadas todas estas consideraciones en relación al muestreo y tomando los respectivos recaudos para su análisis, es posible observar que el período comprendido entre 1997 y 2000 se vio particularmente afectado por eventos de inundación. Por el contrario el período entre 1995 y 1996 registró un único evento. Por último, se observa una disminución en el número de eventos a partir del año 2001 en adelante.

La extensión areal y la delimitación de las zonas anegadas las reconstruye DC señalando los barrios afectados, como así también las consecuencias que las inundaciones producen en la población. Sin embargo, la obtención de estos datos se lleva a cabo utilizando dos metodologías diferentes. Una consiste en relevamientos llevados a cabo por el organismo, lo que asegura una cuantificación más precisa, y la otra se basa en los reclamos realizados telefónicamente por los vecinos. Esta diferencia en la obtención de datos, necesariamente produce distorsiones en la información, pues es diferente el impacto social que el fenómeno produce en los distintos barrios. Si el registro del fenómeno depende de la iniciativa de los vecinos, su valoración se ve afectada entonces por la recurrencia del fenómeno en el barrio y por las características socioeconómicas de la población afectada. Barrios con larga tradición de inundaciones y con población de menores recursos suelen soportar estos eventos con mayor resignación y realizar menores reclamos que aquellos donde el evento es menos frecuente y/o las pérdidas materiales son mayores.

La afectación de las áreas inundadas en la ciudad, su extensión y la reiteración en que estos fenómenos se producen, ya no se encuentra solamente relacionada con la geomorfología y la red de drenaje natural, sino también con todas las obras civiles que la han modificado severamente.

En primer lugar es bien conocido que la urbanización aumenta el pico de crecida, como así también disminuye el retardo del flujo de inundación sobre las áreas afectadas (que están impermeabilizadas). Asimismo, muchas de las obras viales y ferroviarias fueron construidas perpendicularmente al drenaje natural, produciendo verdaderos endicamientos en coincidencia con lluvias torrenciales.

Por otra parte, los cursos fluviales originales de la ciudad (Fig.2), han sido objeto de rellenos, entubamientos y canalizaciones a lo largo de la historia de la ocupación del terreno. Mientras que algunos de ellos han desaparecido, el escurrimiento canalizado por las obras de alcantarillado ha modificado sustancialmente el comportamiento de las aguas superficiales y su derivación hacia las diferentes cuencas hídricas (Fig.3).

La trama de entubamientos, alcantarillados y conductos pluviales que canalizan el drenaje en la ciudad en situaciones normales, debe considerarse conjuntamente con la geomorfología, ya que durante los eventos de inundación, cuando se supera su capacidad de transporte, los excedentes escurren hacia los valles de inundación de los ríos y arroyos primitivos.

FIGURA 2. MAPA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS NATURALES

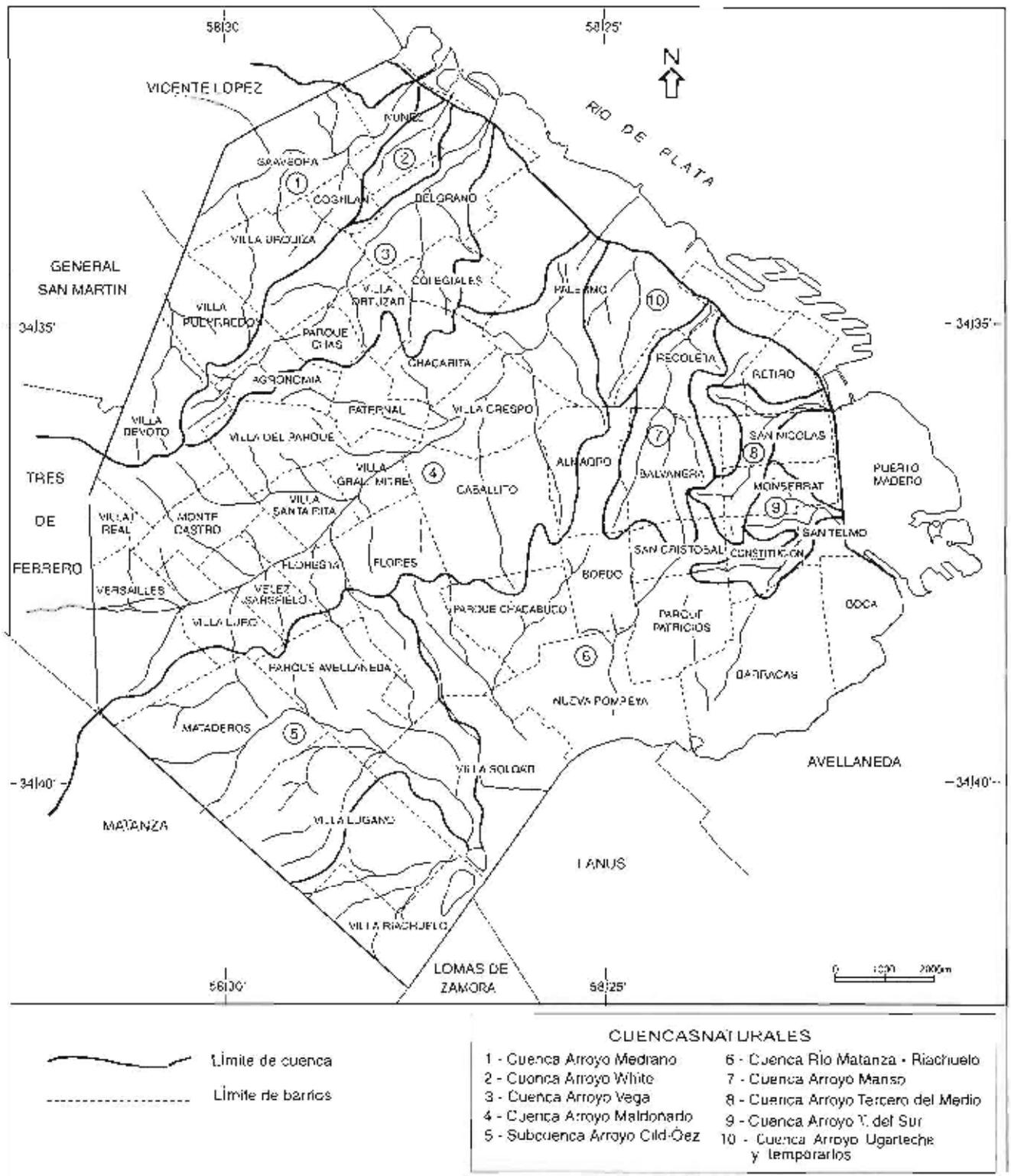
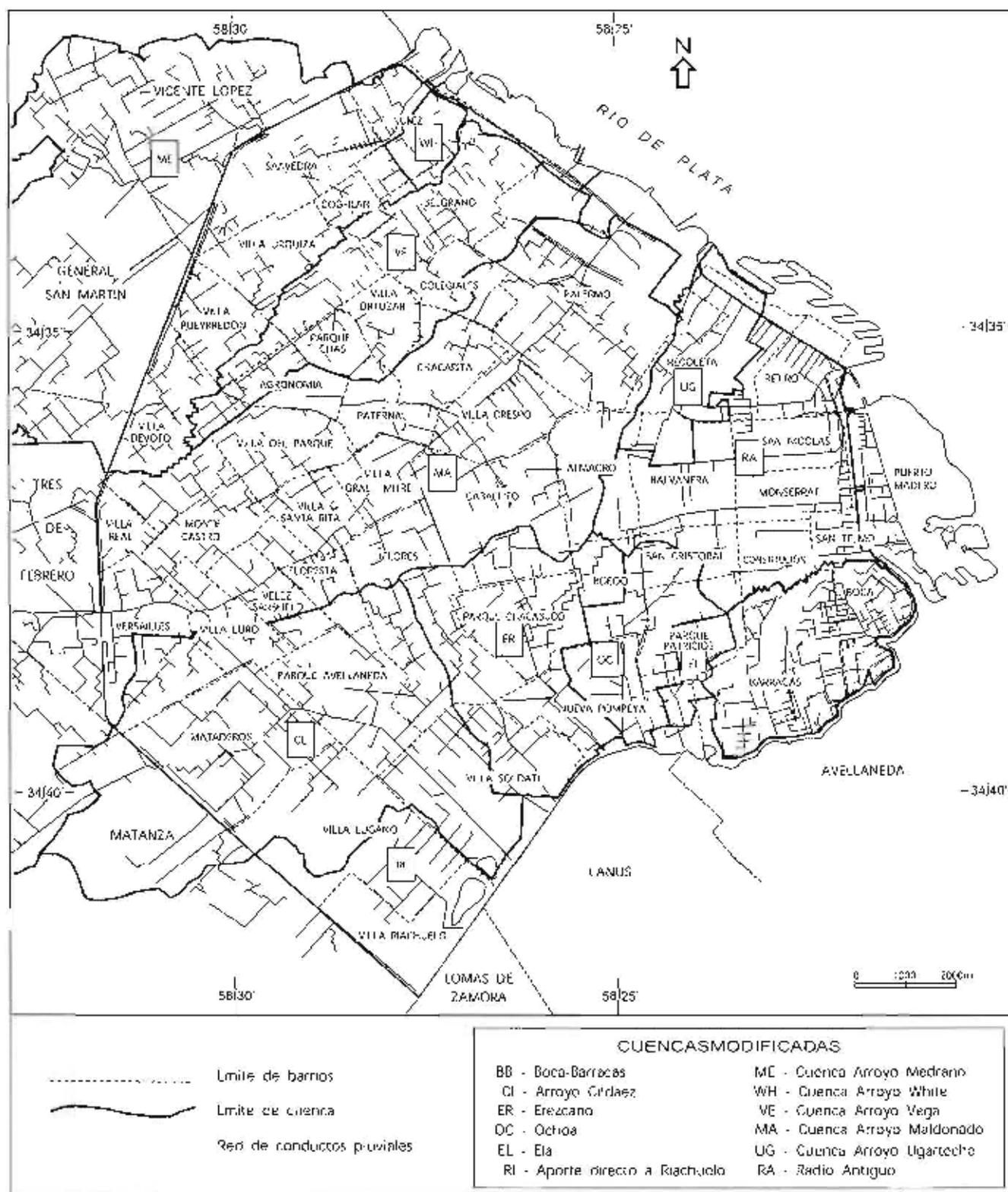
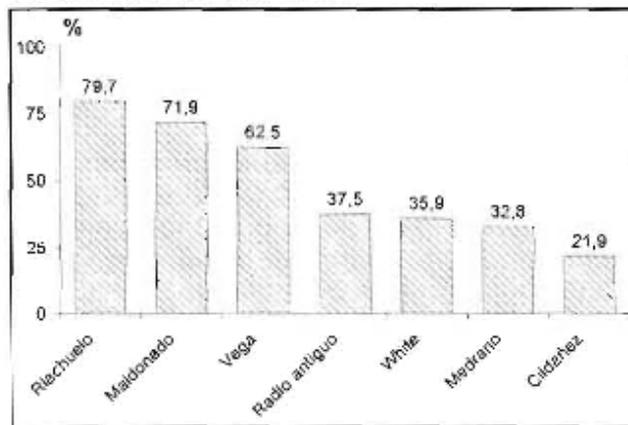


FIGURA 3. MAPA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS MODIFICADAS



El análisis del comportamiento y la dinámica de los eventos ocurridos en el pasado reciente, permiten evaluar la susceptibilidad a las inundaciones de las diferentes cuencas, las diferencias existentes entre ellas, como así también valorar el efecto de las obras estructurales realizadas para mitigar sus consecuencias.

FIGURA 4. GRADO DE AFECTACIÓN DE CADA CUENCA EN LOS EVENTOS DE INUNDACIÓN 1993-2003



En la figura 4 se ha graficado en porcentajes la afectación de cada una de las cuencas, calculada a partir del número de eventos registrados en cada una de ellas, sobre el total de eventos. Las cuencas que se han visto afectadas con mayor frecuencia son la del Riachuelo, el Maldonado y la cuenca del Vega (Figs.2 y 3). Sin embargo el análisis anual de las afectaciones, indica que ésta relación no se ha mantenido constante a lo largo del periodo analizado, exhibiendo diferencias que pueden atribuirse a diferentes orígenes. En la figura 5a y b, se han graficado los valores de afectación de las cuencas para los años 1997 y 2003 los que expresan los cambios registrados entre las diferentes cuencas. Si bien la comparación en este caso se realiza entre un año con muchos eventos de inundación (14) y otro con pocos (3 eventos), en el transcurso de dichos años se realizaron obras estructurales de importancia, como las de la cuenca del Riachuelo, las cuales probablemente han contribuido a la disminución de la vulnerabilidad en dicha cuenca.

FIGURA 5a. GRADO DE AFECTACIÓN DE CADA CUENCA EN 1997

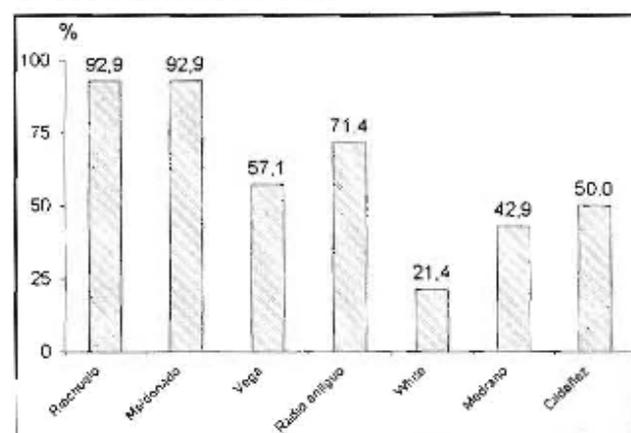
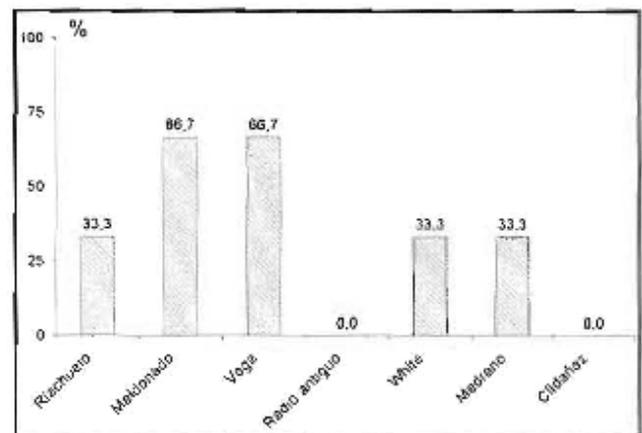
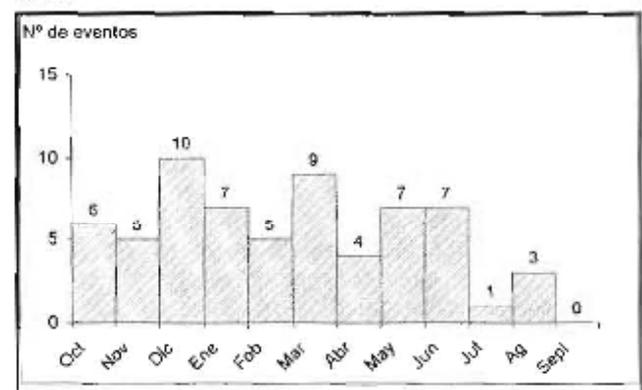


FIGURA 5b. GRADO DE AFECTACIÓN DE CADA CUENCA EN 2003

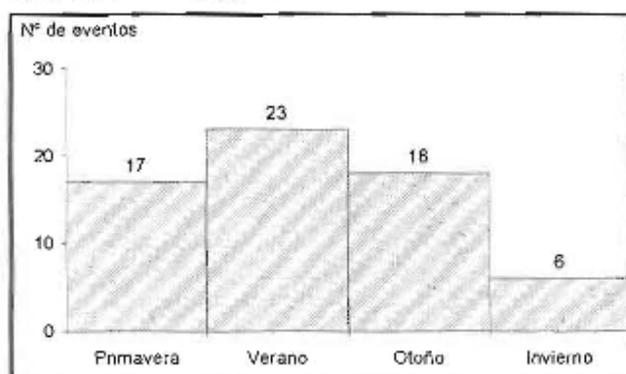


Con el objetivo de reconocer los forzantes de los eventos de inundación y la proporción en que cada uno de ellos ha intervenido o ha resultado desencadenante de un evento, se analizaron los datos de precipitaciones y sudestadas expresadas en altura de marea para cada uno de los eventos, proporcionados por el SMN y el SHN respectivamente, los que fueron volcados en la Tabla 1. En relación a la información referida a las precipitaciones, se analizaron los valores horarios, diarios, mensuales, anuales y decadales, con el fin de distinguir su participación en los eventos de inundación de la ciudad y sus posibles interpretaciones vinculadas a las diferentes escalas temporales.

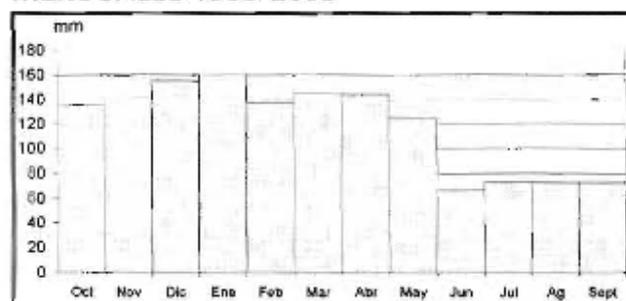
FIGURA 6a. DISTRIBUCION DE EVENTOS POR MES



En la figura 6a, se ha representado la distribución de los eventos a lo largo de los meses. En ella puede observarse que en el período estudiado se han producido eventos de inundación en todos los meses con excepción de septiembre. Los meses que registran mayor número de eventos son diciembre y marzo, con 10 y 9 eventos, seguidos por enero, mayo y junio con 7 eventos. En la figura 6b se presentan los 64 eventos distribuidos por estaciones del año. Aquí se observa una coherencia con lo que muestra la figura 6a, pues la estación donde se produce mayor cantidad de eventos es el verano, mientras que los menores valores corresponden al invierno.

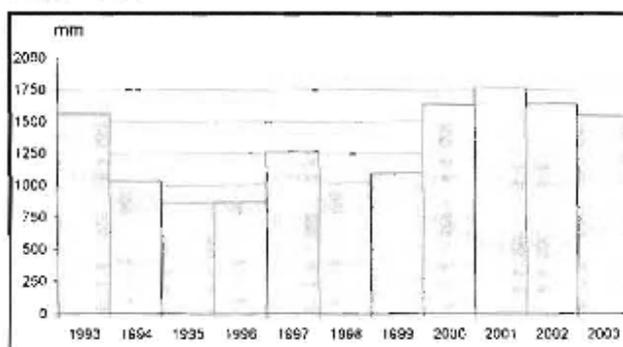
FIGURA 6b. DISTRIBUCION DE EVENTOS POR ESTACION DEL AÑO

En la figura 7 se graficaron los valores de precipitaciones medias mensuales del periodo estudiado. Allí se observa que los meses con valores más bajos de precipitaciones medias son junio, julio, agosto y septiembre, con una media de menos de 80 mm, mientras que el resto de los meses presenta precipitaciones medias de entre 120 y 160 mm.

FIGURA 7. MEDIA DE PRECIPITACIONES MENSUALES 1993-2003

Comparando las figuras 6a y 7 se puede observar que no existe una relación directa entre la media de precipitaciones mensuales y la cantidad de eventos de inundación ocurridos para cada mes. Ejemplo de ello se observa en el mes de junio, donde con valores medios mínimos de precipitación, se registraron 7 eventos (ver valores en la tabla 1), indicando que el efecto de las precipitaciones en los anegamientos tiene una relación más directa con la intensidad de las lluvias producidas por tormentas locales intensas, que con los valores medios. Sin embargo cabe destacar que se observa una correspondencia en la tendencia general, esto es que en los meses de invierno con menores precipitaciones, se verifican un menor número de eventos, mientras que en el verano el número es mayor, coincidentemente con mayores precipitaciones (Fig.6b), sugiriendo que los meses más lluviosos son más proclives a que se produzcan eventos de inundación que los meses menos lluviosos.

Por otra parte, en la figura 8 se han graficado las precipitaciones totales anuales para el periodo considerado. En ella puede observarse que los años menos lluviosos fueron 1995 con 862mm totales y 1996 con 869mm totales, produciéndose un aumento en las precipitaciones a partir del año 2000 con una máxima de 1763,8mm en el 2001.

FIGURA 8. PRECIPITACIONES TOTALES ANUALES

Comparando la cantidad de eventos que se produjeron en el periodo 1993-2003 (Fig.1c) con las precipitaciones para el mismo periodo (Fig.8) se observa que el aumento en las precipitaciones en la región no ha implicado un aumento en el número de eventos de inundación en la ciudad de Buenos Aires. Esta comparación indica la complejidad del fenómeno y la necesidad de considerar el impacto producido por otros fenómenos naturales como así también el de las obras estructurales realizadas, que han debido alterar el efecto que éstas solían producir en la región.

Con el fin de analizar si los eventos de inundación registrados en el periodo que se analiza estuvieron relacionados con algún fenómeno de más amplia escala temporal, se comparó la distribución de los valores del periodo analizado con los de la media de 1961 - 1990 o Normal Climática de Precipitaciones (Fig.9). En dicha figura puede observarse que los valores de los años considerados para los meses de enero, abril, mayo, noviembre y diciembre presentan un desvío positivo marcado con respecto a los valores de la Normal Climática. En razón de estas diferencias, se graficaron los valores medios de precipitaciones para cada uno de los meses con desvío, durante los once años considerados (Fig.10), con el fin de analizar si la desviación observada en estos meses fue producto de algún o algunos años particularmente lluviosos, y en ese caso, si están relacionados con algún fenómeno de índole global.

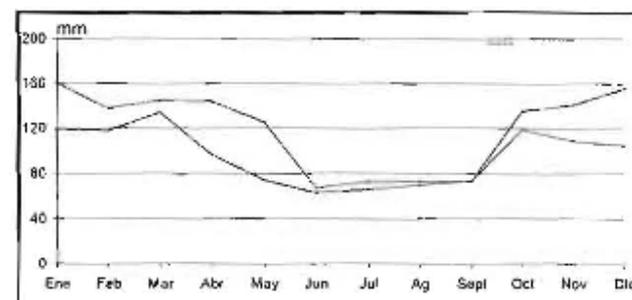
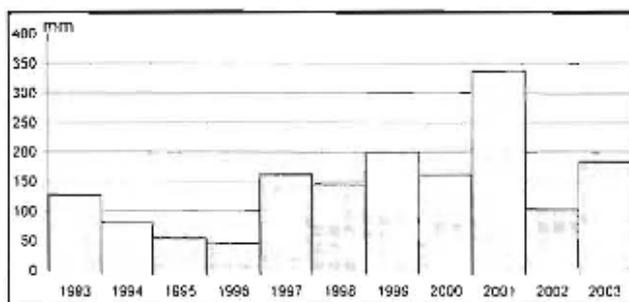
FIGURA 9. PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES

FIGURA 10a. PRECIPITACIONES ACUMULADAS DEL MES DE ENERO



En la figura 10a se puede observar que el mes de enero de 2001 fue el más lluvioso de los últimos once años, mientras que como se puede ver en la figura 10b, el desvío del mes de abril no se debe a un valor alto de precipitaciones de un año en particular sino que es causa de valores distribuidos a lo largo de los 11 años. A su vez el mayo más lluvioso del periodo estudiado fue el del año 2000 (Fig. 10c), 1993 y 2003 fueron los años más lluviosos para el mes de noviembre (Fig. 10d) y 1997 lo fue para el mes de diciembre (Fig. 10e). El análisis de esta información sugiere que las mayores precipitaciones de la última década parecen estar relacionadas a una tendencia general de aumento en las precipitaciones de la región, como lo vienen observando y señalando diversos investigadores, (entre otros, Barros 2001; Castañeda 1994) y no a un fenómeno particular y aislado.

FIGURA 10b. PRECIPITACIONES ACUMULADAS DEL MES DE ABRIL

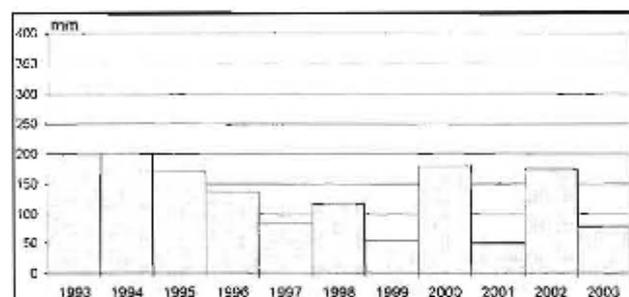


FIGURA 10c. PRECIPITACIONES ACUMULADAS DEL MES DE MAYO

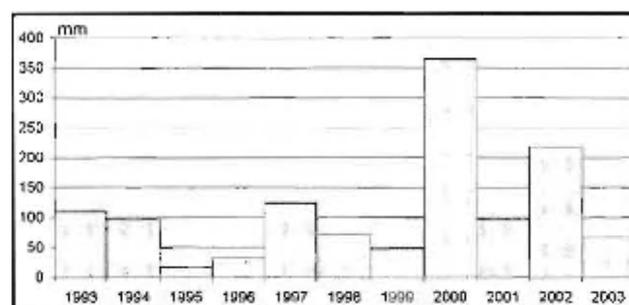


FIGURA 10d. PRECIPITACIONES ACUMULADAS DEL MES DE NOVIEMBRE

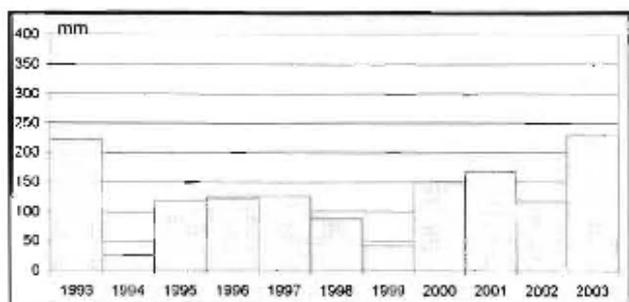
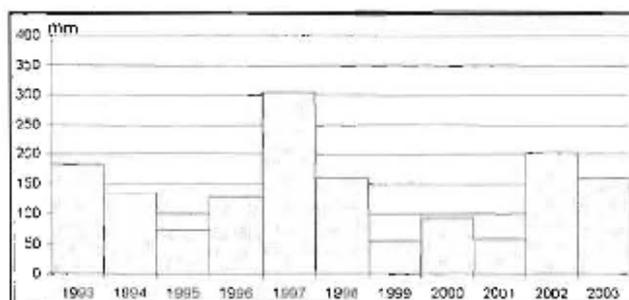


FIGURA 10e. PRECIPITACIONES ACUMULADAS DEL MES DE DICIEMBRE



Otro de los factores desencadenantes de eventos de inundación en la ciudad son las sudestadas. Éstas se caracterizan por ser vientos regulares a fuertes del sector SE. Una de las consecuencias del fenómeno, es el ingreso de agua dentro del Río de la Plata, aumentando la altura del río, lo que puede provocar inundaciones de las zonas costeras. Su efecto se potencia con la presión ejercida en la desembocadura de los desagües, donde actúa como tapones, impidiendo el escurrimiento hacia el río.

Para los 64 eventos de anegamiento registrados en el periodo 1993-2003, se definieron tres tipos de situaciones desencadenantes; precipitaciones (P), sudestada (S) y una combinación de ambas, o sea sudestada con precipitación (S+P) o precipitación con sudestada (P+S), colocando en estos dos últimos casos el fenómeno desencadenante o de mayor influencia en primer término.

En el presente trabajo se considera como:

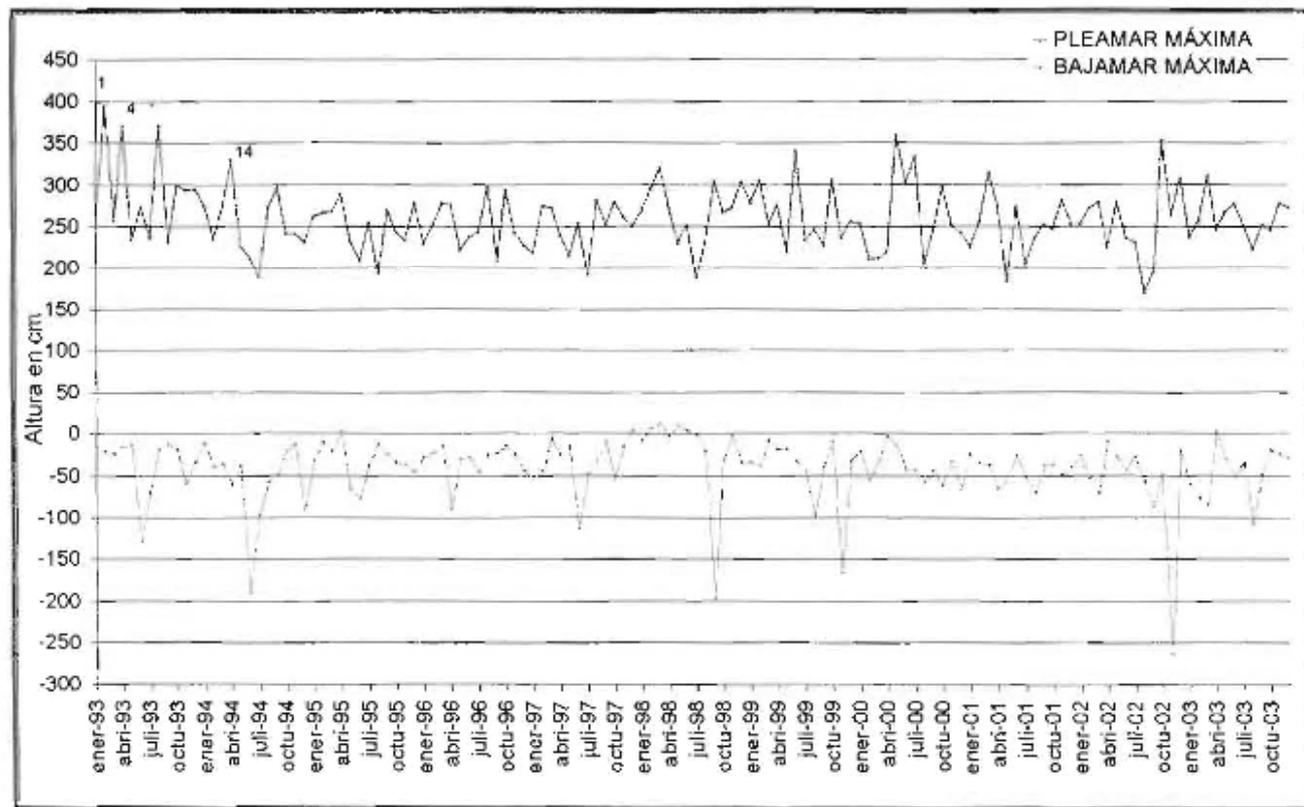
- Eventos de inundación provocados por Sudestada (S): Aquellos eventos en los que la altura del Río de La Plata, medida en el Puerto de Buenos Aires, supera el nivel de alerta de 2.50 metros definido por el SHN y no se han producido precipitaciones ó éstas han sido muy escasas.
- Eventos de inundación provocados por Precipitación (P): Aquellos eventos en los que se producen precipitaciones y la altura del Río de La Plata medida en el Puerto de Buenos Aires, se encuentra por debajo del nivel de alerta de 2.50 metros.
- Eventos de inundación mixtos, provocados por Precipitación con Sudestada (P+S) ó Sudestada con Precipitación (S+P): Aquellos eventos en los que se presentan precipitaciones y además la altura del Río de

La Plata medida en el Puerto de Buenos Aires, supera el nivel de alerta de 2.50 metros.

El análisis y la comparación de los valores de precipitación acumulada y altura máxima del río (tabla 1), permite discernir cuál de dichos fenómenos climáticos ha sido el desencadenante de cada uno de los eventos de inundación. Para la mayor parte de los eventos, la caracterización ha sido sencilla, sin

en los eventos de mayor duración generalmente participan ambos fenómenos. Un evento que se ha iniciado con fuertes precipitaciones, en los días subsiguientes suele registrar vientos del sudeste con aumento del nivel del río, por lo que se identifica como (P+S) o por el contrario se ha iniciado con una sudestada, que provocó el anegamiento, la que se agravó con precipitaciones posteriores (S+P).

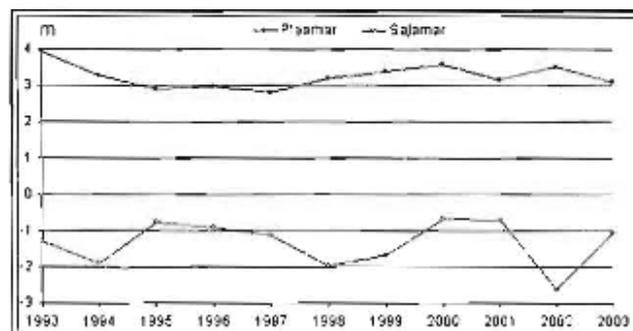
FIGURA 11. PLEAMARES Y BAJAMARES MÁXIMAS MENSUALES 1993-2003



En la figura 11 se han graficado las pleamares y bajamares máximas mensuales medidas en el Puerto de Buenos Aires para el periodo analizado, a la cual se le ha incorporado la ubicación de los eventos de inundación en el caso de coincidir con algún registro. En dicha figura puede observarse que las mayores pleamares han producido eventos de inundación. Todos los registros coincidentes con eventos de inundación que han superado los 3m de altura sobre el nivel del Río de Plata en el Puerto de Buenos Aires, han producido eventos calificados como S ó S+P. De las pleamares máximas mensuales que superaron los 2.50m durante este periodo, sólo el 25.6% ha producido inundaciones en la ciudad. A su vez, el 81.8% de las pleamares máximas anuales (Fig.12) han generado eventos de inundación, las que se encuentran próximas ó superan los 3m sobre el nivel del Río de La Plata.

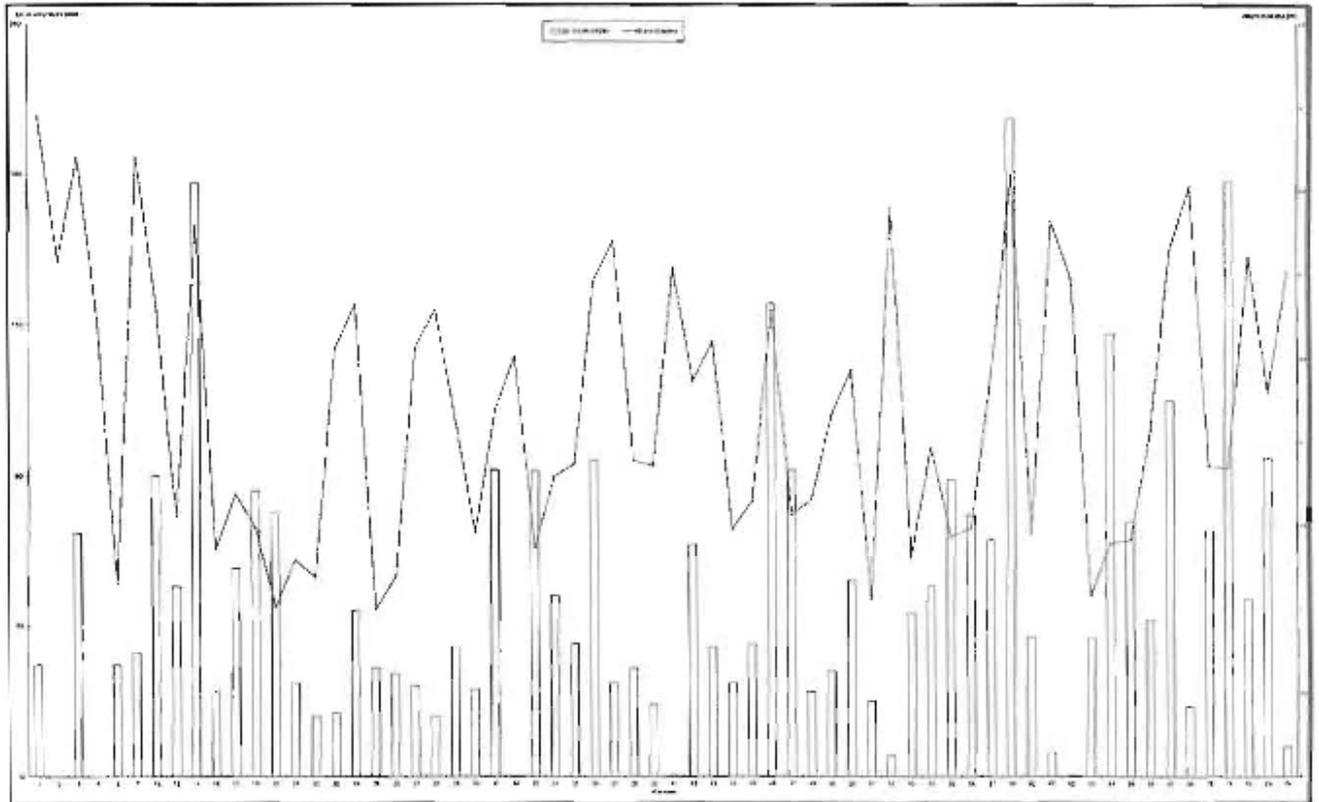
El hecho de que se hayan producido anegamientos con niveles del río por debajo del valor de pleamar máxima mensual registrado, e incluso algunos se hayan producido en coincidencia con bajamares máximas mensuales, indica hasta que punto este fenómeno es sólo uno de los factores que participan del evento.

FIGURA 12. PLEAMARES Y BAJAMARES MÁXIMAS ANUALES 1993-2003



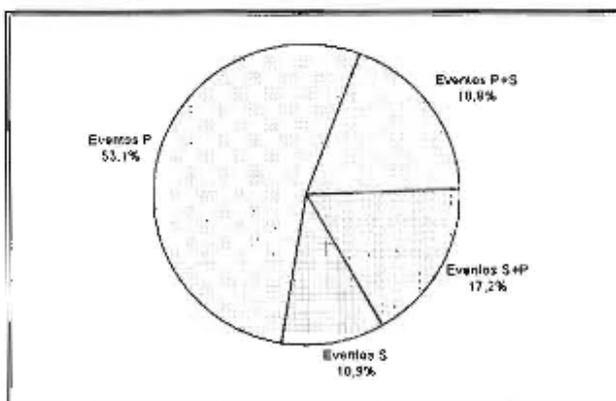
En la figura 13 se ha volcado la combinación de los factores climáticos mencionados (precipitaciones y alturas del nivel del río), que permite visualizar la participación de cada uno de ellos en los eventos de inundación ocurridos durante 1993-2003.

FIGURA 13. PRECIPITACIONES Y ALTURA MÁXIMA DEL RÍO DE LA PLATA REGISTRADAS PARA CADA EVENTO



El análisis de dicha información indica que se han producido 7 eventos caracterizados como S, los que representan el 10.9% del total, 34 eventos P, que representan el 53.1% del total de eventos, 11 eventos S+P y 12 eventos P+S que representan el 17.2% y el 18.8% respectivamente. Estos valores se han graficado en la Figura 14, donde se observa la proporción relativa de cada una de estas categorías.

FIGURA 14. CARACTERIZACIÓN DE LOS EVENTOS



Si bien en este gráfico se han diferenciado los eventos producidos por una de las variables climáticas (S ó P) de aquellos que en las que hubo participación de ambas (S+P y P+S), cabe considerar conjuntamente el número de eventos de inundación producidos o desencadenados

por cada una de dichos fenómenos. Es así que los eventos producidos y/o desencadenados por precipitaciones (P y P+S), alcanzan el 71.9%, mientras que aquellos producidos y/o desencadenados por sudestadas (S y S+P) alcanzan el 28.1%. Los eventos en que participan ambos fenómenos (P+S y S+P) alcanzan el 35.9%.

5. DISCUSIÓN

Un primer aspecto que surge del análisis de la información, es su dispar precisión y calidad, la que está vinculada a la diversidad de datos recolectados y a las características de las fuentes de procedencia.

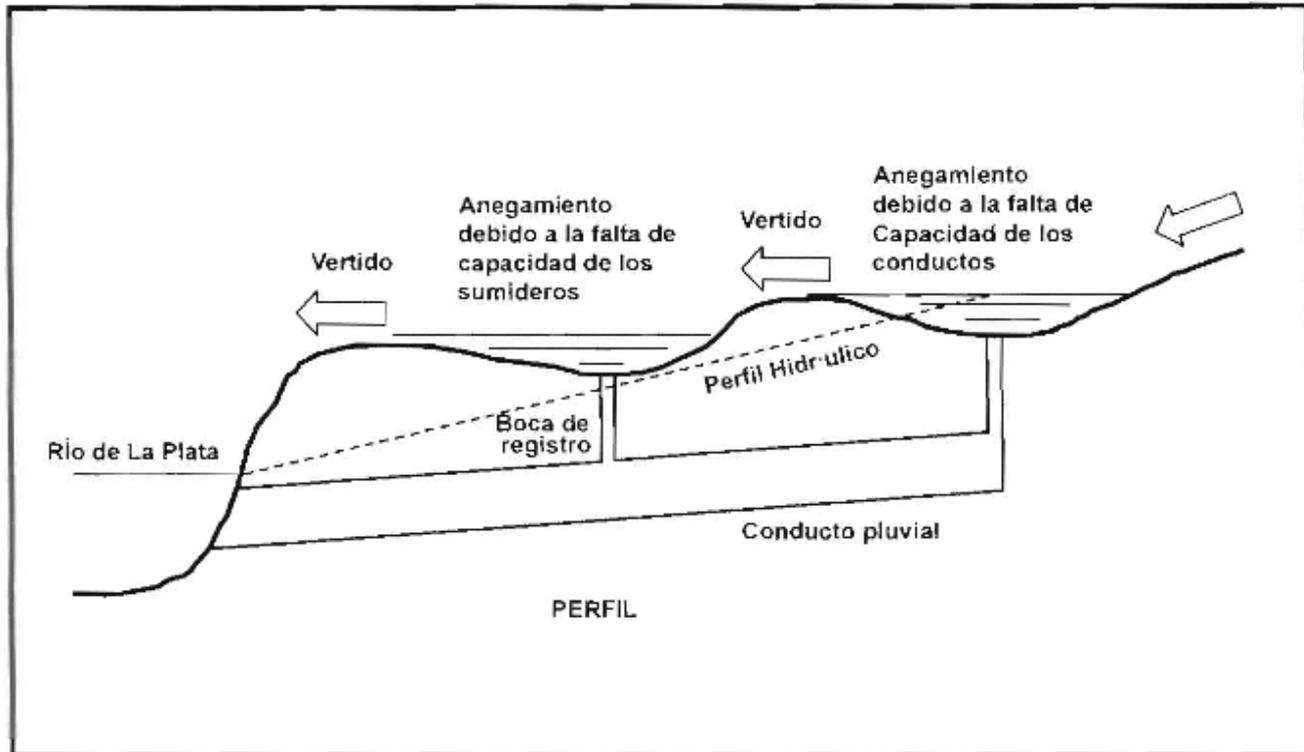
Durante el muestreo realizado para definir el número de eventos de inundación registrados entre 1993 y 2003, se han encontrado diferencias entre las distintas fuentes consultadas. Una de las razones en dichas discrepancias se debe a la falta de continuidad en los programas encargados del monitoreo de los eventos. Como resultado de esta situación, el rescate de la información presenta un grado de imprecisión difícil de valorar. Por otra parte, la discontinuidad en el monitoreo por organismos competentes y la falta de criterios estandarizados para el reconocimiento de los eventos, produce que éstos queden librados a la interpretación periodística. En estos casos se han mezclado afectaciones a la población que son de diferente naturaleza, como lo son los cortes en el suministro eléctrico atribuidos a las precipitaciones ó situaciones de sumideros tapados, etc., que resultan difíciles de

deslindar, cuando se quiere analizar el comportamiento y la dinámica de los fenómenos climáticos. Otro factor que produce imprecisiones en la información se debe a la falta de sistematización en la metodología utilizada en la recolección de datos referidos a las áreas afectadas. Como ya se ha dicho, en la actualidad dicha información está vinculada fundamentalmente al impacto social del evento. La cantidad de llamadas y reclamos que recibe DC de cada barrio depende de la iniciativa de los vecinos, y ello a su vez, del acostumbramiento a los eventos en ciertos barrios, de las pérdidas económicas

que producen y de factores socioeconómicos y/o psicológicos no evaluados. En este trabajo se ha analizado la información disponible, de manera tal de reconocer en todo lo posible estas diferencias.

La susceptibilidad de las áreas a las inundaciones sigue un patrón complejo, vinculado a la distribución de los conductos y a las geformas naturales. Los excedentes que desbordan la red canalizada durante los eventos de inundación se acumulan y escurren hacia los valles de inundación de los ríos y arroyos primitivos (Fig.15).

FIGURA 15. MODELO DE CIRCULACIÓN DEL FLUJO DURANTE LOS ANEGAMIENTOS (Fuente SUPCEBA)



La comparación de los eventos de inundación con las precipitaciones acumuladas en el período (Figs.1 y 8), sugiere la existencia de una cierta correspondencia entre el número de eventos ocurridos en el período 1993-2000 con el valor de las precipitaciones anuales para el mismo. Esta relación es coherente con el hecho de que la mayor parte de las inundaciones en la ciudad se han producido o se han desencadenado por eventos de precipitación. Estos eventos calificados como P y P+S representan el 71.9% (Fig.14) del total anegamientos.

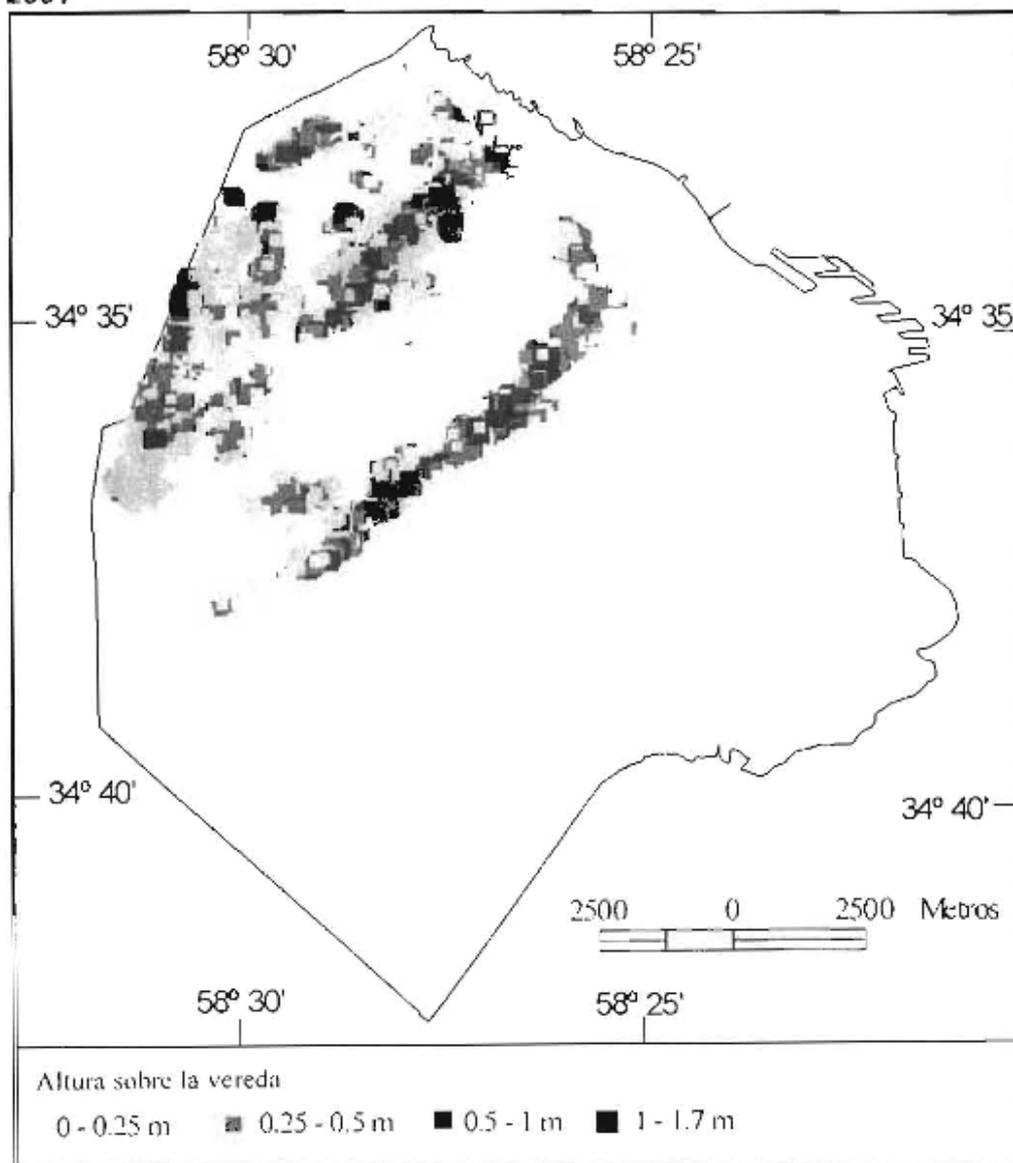
Sin embargo, entre los años 2001 a 2003, el valor de las precipitaciones acumuladas se ha mantenido muy elevado, registrándose el valor más alto del período en el año 2001, con 1763,8mm, mientras que el número de anegamientos en la ciudad ha disminuido.

Una explicación de este fenómeno podría estar vinculada al hecho de que a partir del año 1998 se fueron inaugurando diferentes obras estructurales en la cuenca del Matanzas-Riachuelo.

Los datos recogidos para nuestro análisis indican que a partir del año 2000 se modificó la relación de las áreas afectadas, observándose un mayor porcentaje de afectación en la zona norte de la ciudad en relación al sur (Fig.5). Particularmente dos de los anegamientos más severos que sufrió la ciudad desde entonces, que se produjeron el 24 de enero de 2001 y el 16 de marzo de 2002, afectaron principalmente las cuencas del Medrano, Maldonado, Vega, y del White (Fig.16 a y b). Durante el evento de marzo del 2002, hubo también un compromiso menor en la cuenca del Erézcano. En dicha figura, también se observa que no solo los valles de inundación de los ríos han sido colmatados, sino zonas de la planicie loésica más alta, señalando la participación de factores antrópicos, relacionados a los servicios de mantenimiento de la ciudad.

La afectación en la cuenca del Riachuelo, donde se realizaron las obras de remediación, disminuyó sensiblemente, pasando de un 100% en el año 1999 a un 33% en el 2003 (Fig.17).

FIGURA 16a. ÁREAS CON MÁXIMAS AFECTACIONES POR EL ANEGAMIENTO DEL 24 DE ENERO DE 2001



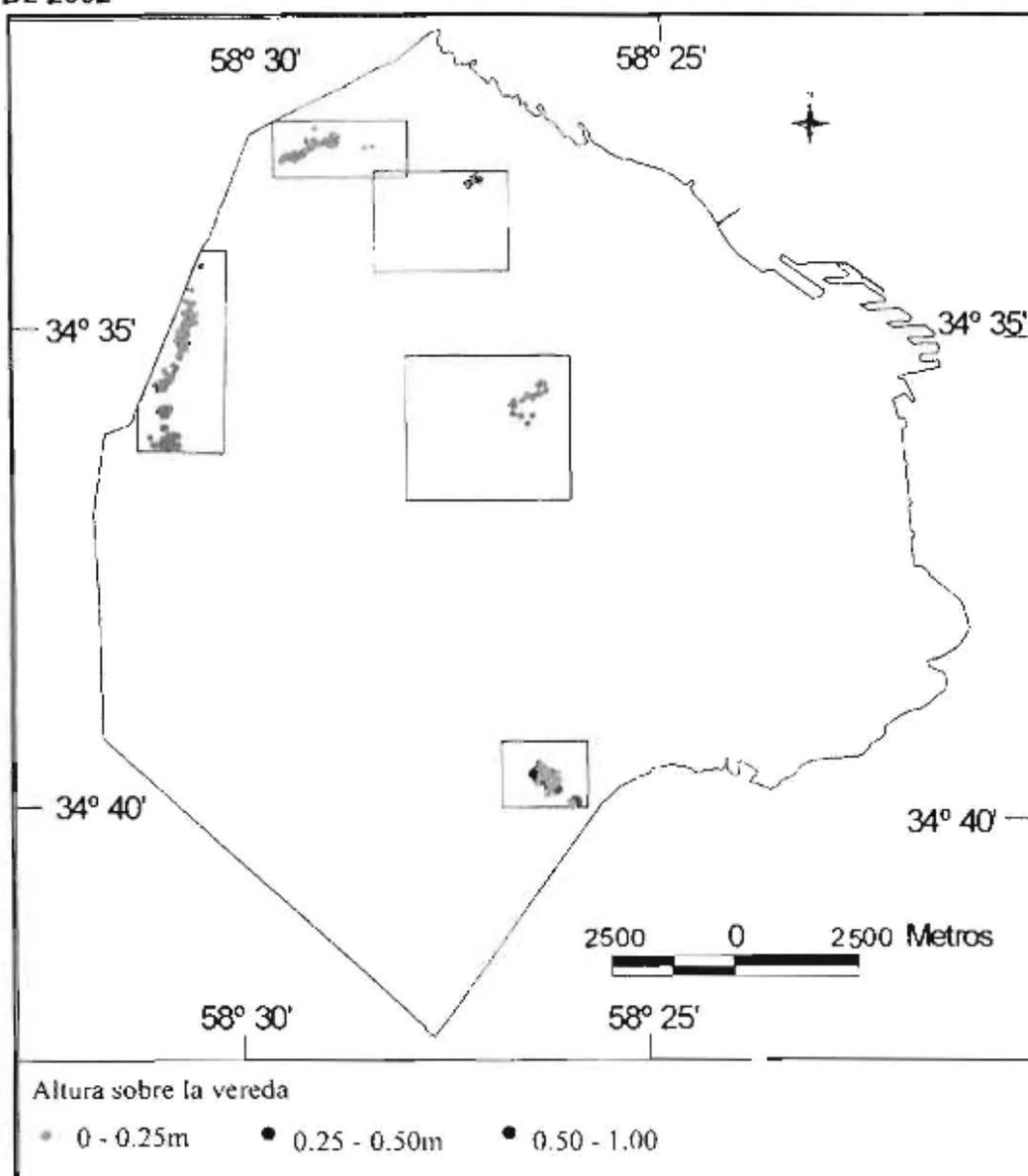
Otro aspecto que llama la atención al analizar la distribución de los eventos de inundación (Fig. 1c), es su abrupto aumento en el año 1997. Debido a que dicho año coincide con el inicio de un evento El Niño, se analizó la posibilidad de que existiera una relación entre ambos fenómenos.

El Niño se manifestó en los años 1997/1998 y produjo fuertes inundaciones en los grandes ríos del litoral argentino. Su influencia en la Ciudad de Buenos Aires no ha sido reconocida hasta el presente, sin embargo llama la atención el brusco cambio producido en los eventos de inundación a partir de ese año, aunque ciertamente estas continuaron más allá del año 1998, hasta el 2000.

Si bien el aumento en el número de anegamientos coincide con un aumento en las precipitaciones, (de los 862mm en el año 1996 a 1266mm en el año 1997), éstas se encuentran por debajo de los valores de precipitación de 1993 con 1558,8mm, que produjeron la mitad de los anegamientos que los ocurridos en 1997. Las pleamares de ese año tampoco fueron muy elevadas, encontrándose todas por debajo de los 3m de altura en el Puerto de

Buenos Aires, e incluso, dos de los eventos de inundación de ese año se produjeron en coincidencia con máximas bajamares mensuales (Fig. 11). Del análisis de las inundaciones durante el período en cuestión, se hace necesario analizar la posible influencia de otros fenómenos, además de las precipitaciones y las sudestadas, que pudieran producir afectaciones en la región. El Niño podría ser uno de ellos. Aunque este fenómeno no ha generado valores de precipitación particularmente elevados, que es el principal desencadenante de los anegamientos en la ciudad, su influencia requiere ser analizada. Las inundaciones ocurridas en otros lugares de la pampa ondulada, como resultado del fenómeno ENSO (El Niño South Oscillation), con la concomitante saturación de los acuíferos subterráneos y las lentas descargas a través de los ríos y arroyos de la región, podrían ejercer una influencia demorada en las inundaciones de la región metropolitana bonaerense.

En los años 1999 y 2000 los valores de las máximas pleamares mensuales fueron más elevadas que en

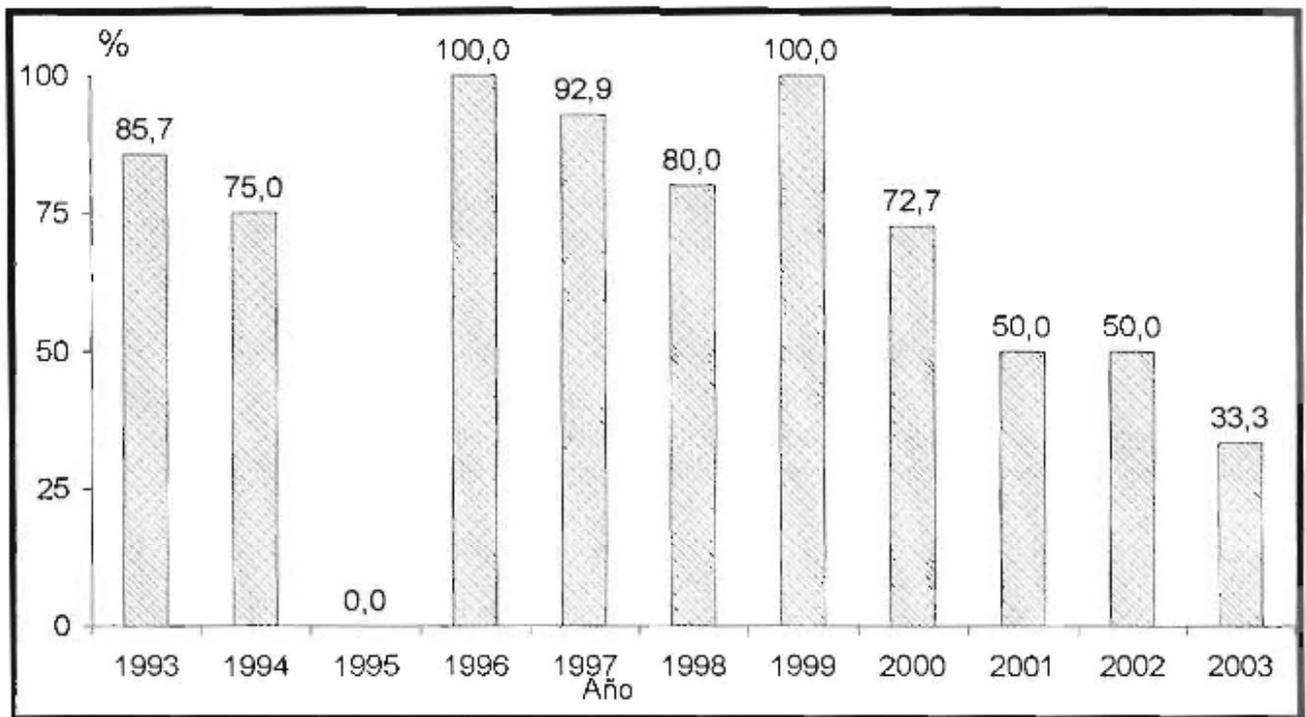
FIGURA 16b. ÁREAS CON MÁXIMAS AFECTACIONES POR EL ANEGAMIENTO DEL 16 DE MARZO DE 2002

años anteriores, produciéndose anegamientos en la ciudad en coincidencia con ellos. Sin embargo sus niveles no alcanzaron los valores del año 1993, en el que, sorprendentemente, se registró un menor número de anegamientos. Caben varias alternativas para explicar esta situación: 1- Que en razón de la falta de sistematización y monitoreo de los eventos, las diferencias expresen un cambio en la sensibilidad social frente a las inundaciones y concomitantemente en el interés periodístico de la noticia, registrándose un menor número de eventos para 1993.

2- Que efectivamente se hayan producido mayores anegamientos en la ciudad en el año 1999, a pesar de los menores valores de las precipitaciones medias y de las pleamares en ese año, en relación a 1993. En ese caso habría que considerar la posibilidad arriba mencionada de que los anegamientos no solo están vinculados a las precipitaciones y las sudestadas sobre el área

metropolitana, sino que existen otras condiciones del entorno, de carácter regional, que también ejercen su influencia, como podría ser un demorado efecto de descarga de los acuíferos.

En relación al impacto social de estos fenómenos, es posible que el inicio del programa de Defensa Civil de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires denominado "Determinación y estudio de zonas que sufren anegamientos por precipitaciones en la ciudad de Buenos Aires", en el año 1997, haya estado vinculado a este importante incremento en las inundaciones y se haya realizado en respuesta a las demandas producidas a partir de las afectaciones a la población de la Ciudad. A su vez, en ese mismo año se inició la primer etapa de las obras de remediación de la cuenca Matanza - Riachuelo que fueron inauguradas en el barrio de La Boca entre Julio y Octubre de 1998 en el marco del Plan Director de la cuenca Matanza - Riachuelo.

FIGURA 17. AFECTACIÓN DE LA CUENCA RIACHUELO

6. CONCLUSIONES

Es posible sintetizar las conclusiones de nuestro trabajo en una serie de puntos:

1- Uno de los problemas en la caracterización de los anegamientos de la Ciudad de Buenos Aires reside en la dificultad de acceder a datos genuinos, provenientes de los diferentes organismos productores de información. Consideramos, que el acceso a la misma debiera ser amplio y sencillo, ya que se ha producido con el financiamiento público.

2- Otro de los problemas detectados es el de la existencia de programas puntuales de monitoreo y la discontinuidad de los mismos, lo que produce sesgos de información difíciles de valorar. La falta de un organismo que monitoree los eventos de inundación y que establezca pautas de recopilación de datos en forma sistemática y con criterios de comparación, dificulta severamente el análisis del riesgo que afecta a la población.

3- Las áreas afectadas por los anegamientos conforman un patrón complejo, vinculado a la distribución de los conductos y a las geoformas naturales. Los excedentes que desbordan la red canalizada durante los eventos, se acumulan y escurren hacia los valles de inundación de los ríos y arroyos originales.

4- Las diferencias observadas en la comparación entre la curva de precipitaciones del periodo 1993-2003 y la curva del periodo 1961-1990 (Fig.9), exhibe un aumento de las precipitaciones para el periodo analizado en coherencia con la tendencia que se viene registrando para la región.

5- Las precipitaciones son responsables ó

desencadenantes del 71.9 % de los eventos de inundación en la Ciudad de Buenos Aires, mientras que el 28.1% restante tiene su origen en las sudestadas. Del total, un 35.9% es una combinación de estos efectos.

6- La disminución de los eventos de anegamiento a partir del año 2001, coincidentemente con un desplazamiento de los mismos desde la zona sur hacia el norte de la ciudad, abona la tesis de un efecto positivo de las obras estructurales realizadas en la cuenca Matanza-Riachuelo. Esta situación se verificó a pesar de que las condiciones climáticas (precipitaciones y pleamares) se mantuvieron en valores muy elevados.

7- El aumento observado en los eventos de inundación entre los años 1997 y 2000, resulta mucho más pronunciado que el esperado por el sesgo producido en las precipitaciones y las sudestadas. La coincidencia del evento El Niño 1997-1998 con el aumento de los anegamientos en la ciudad, podría indicar que el mismo ejerce su influencia, probablemente a través de la descarga retardada de los acuíferos subterráneos

7. AGRADECIMIENTOS

Las autoras desean agradecer al Lic. Bernardo Falczuk y al Ing. Ricardo Rebagliati de la Subunidad Provincial de Coordinación para la Emergencia de Buenos Aires (SUPCEBA) y al Ing. Enrique E. D'Onofrio del Servicio de Hidrografía Naval por sus aportes. A Defensa Civil de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires por facilitarnos información. Al Sr. Mario Saucedo y a la Agr. Amalia González por su colaboración en la confección de los mapas. Al Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia", a la ANPCyT y al CONICET, por el soporte brindado a esta investigación.

8. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BARROS, V.R., et al. 2000.

Recent Precipitation Trends in Southern South America East of the Andes: An Indication of Climatic Variability. En P.P Smolka and W. Volkheimer (eds.): "Southern Hemisphere Paleo and Neoclimates", Springer-Verlag. 187-206. Berlin, Germany.

BERRI, G. J., 2001.

Hidrometeorología de las inundaciones en la Argentina y en el AMBA, "Inundaciones en el Área Metropolitana de Buenos Aires". En A. Kreiner, D. Kullock, J.B. Valdés (eds) Disaster Risk management Working Paper Series N°3: 75-90. The World Bank, Washington.

CASTAÑEDA, M. E. et al. 1994.

Las tendencias de la precipitación en el Cono Sur de América al este de los Andes. Revista METEOROLOGICA, Volumen 19, Números 1 y 2: 23-32.

DEFENSA CIVIL DE LA CIUDAD AUTONOMA DE BUENOS AIRES, 2001.

Determinación y estudio de zonas que sufren anegamientos por precipitaciones en la ciudad de Buenos Aires, Buenos Aires.

INFORME DIAGNOSTICO, PLAN DIRECTOR DE ORDENAMIENTO HIDRAULICO Y PROYECTO EJECUTIVO DEL ARROYO MALDONADO, 2002. Subunidad Provincial de Coordinación para la Emergencia de Buenos Aires (SUPCEBA), Programa de Protección contra las Inundaciones (PPI), Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires.

NABEL, P. et al. 2000.

El Paisaje Natural, Bajo las Calles de Buenos Aires, Ed. Museo Argentino de Ciencias Naturales, Buenos Aires.

PEREYRA, F. X. et al. 2001.

Caracterización del medio físico de la ciudad de Buenos Aires y área metropolitana, Convenio Dto. De Cs. Geológicas, FCEyN, Universidad de Buenos Aires y Secretaría de Planeamiento Urbano, Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires.

PLANO DE ANEGAMIENTO DEL 24 DE ENERO DEL 2001, 2001.

Secretaría de Obras Públicas del Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Buenos Aires.



ASPECTOS GEOTÉRMICOS DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ EN EL AREA ARGENTINO-URUGUAYA

Silva Busso Adrián Ángel ¹

Resumen

Este estudio define y determina los principales aspectos geotérmicos de los dos principales acuíferos del Sistema Acuífero Termal o Sistema Acuífero Guaraní, contenidos por las Formaciones Botucatú y Serra Geral, en la región oriental de la Argentina y Occidental Uruguaya.

El objetivo es el de proponer un criterio adecuado para comprender las razones que determinan las condiciones de termalismo del sistema acuífero sobre la base de las mediciones geofísicas realizadas durante las perforaciones y el posterior control de cinco años en boca de pozo. Se ha determinado que el Sistema Acuífero Guaraní en el área de estudio se encuentra sometido a un gradiente geotérmico natural consecuente de la profundización de los niveles de aporte comprendido entre 0,022 - 0,024 °C/m y se estima una velocidad real de flujo horizontal estimada entre 1,43.10⁻⁵ - 1,79.10⁻⁵ cm/seg varios órdenes de magnitud menor que su velocidad máxima de Darcy estimada en 7,38.10⁻² cm/seg. Sin ser este un estudio definitivo de los aspectos geotérmicos tiene como objeto, el de orientar futuras investigaciones que conduzcan a una evaluación más exhaustiva.. en un contexto regional, a consecuencia del abunramiento del recurso en el sector Argentino.

Palabras clave: Geotermalismo, Hidrogeología, Acuífero Guaraní.

Abstract

This paper describe the main geothermal aspects of the Thermal Aquifer System or Guaraní Aquifer System inside Botucatú and Serra Geral Formations in the Eastern Argentine and Western Uruguay region. The main objective is to understand the reason that determine

the thermal conditions in that aquifer system. In this paper, we have used geophysical research and a monitoring data set taken along five years at the wells. In the Guaraní Aquifer System we have determined that the geothermal gradient varies between 0,022 - 0,024 °C/m and the real flow velocity varies between 1,43.10⁻⁵ - 1,79.10⁻⁵ cm/seg lower than Darcy velocity estimated in 7,38.10⁻² cm/seg. This paper is not a definite study about the geothermal aspects in the Guaraní Aquifer System, therefore we seek to purpose future research in this way.

Entregado: 18 de Agosto de 2004 • Aceptado: 28 de Setiembre de 2004

⁽¹⁾ Instituto del Agua y Ambiente Argentina. Autopista Ezeiza -Cañuelas, tramo J. Newbery km 1,620, Ezeiza, Argentina (1804). Tel/fax: 05411-44800295.
E-mail: pntsas@ina.gov.ar

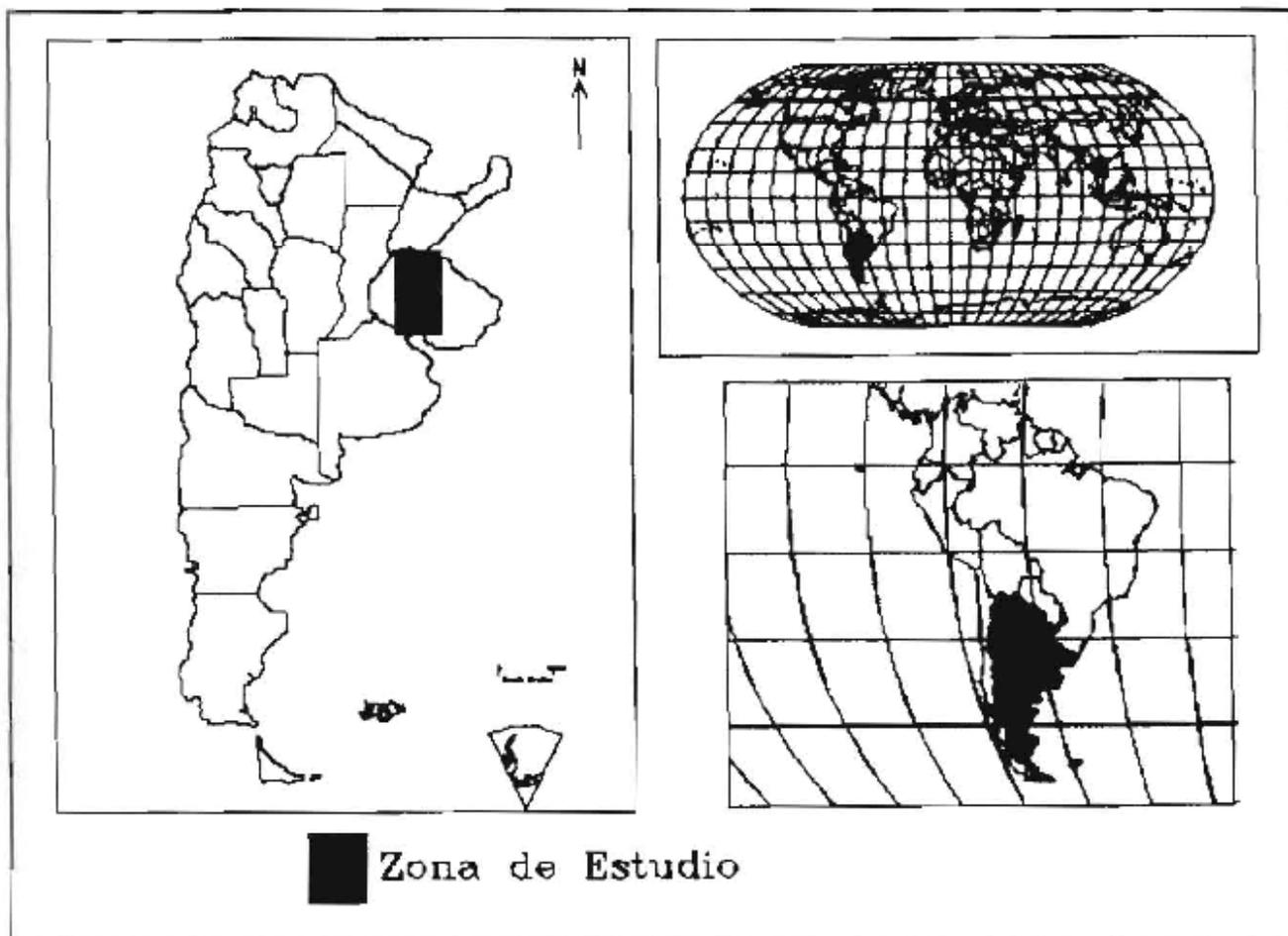
Key Words: Geothermal, Hydrogeology, Guaraní Aquifer

1. INTRODUCCIÓN

El área de estudio comprende la región Oriental de la Mesopotamia Argentina y Occidental de la República Oriental del Uruguay comprendida aproximadamente entre los 29°30' y 33°30' latitud Sur y los 57° y 60° longitud Oeste tal como puede observarse en la figura N 1. En la República Argentina el área estudiada, comprende la zona central-este de la Provincia de Entre

Ríos limitada al sur por el Delta del Paraná, al Norte por los Arroyos Feliciano y Guayquiraró pudiendo incluir la región sudoriental de la Provincia de Corrientes, hacia el este el río Uruguay y el Río Paraná al oeste. Eventualmente se incluirá en este estudio unidades acuíferas relacionadas en la región occidental del Uruguay, Río Grande do Sul, Brasil, y la Prov. de Santa Fe en Argentina.

FIGURA 1. MAPA DE UBICACION DEL ÁREA DE ESTUDIO



El área de estudio se encuentra sobre la base de la información geológica e hidrogeológica tomado del trabajo de Silva Busso, (1999 y 2000) en la comarca comprendida entre los afloramientos de las Formación Botucatú y Piramboia (Rivera y Tacuarembó) en Uruguay, el Río Paraná, los afloramientos de la Formación Serra Geral en Argentina y el Delta del Paraná. Las Formaciones continentales y/o relacionadas con el Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental son las denominadas Formaciones Piramboia y Botucatú (Gonzaga de Campos, 1889; Bigarella y Salamuni, 1964; Salamuni y Bigarella, 1967) o Formaciones Tacuarembó y Rivera (Falconer, 1931; Ferrando y Anderis, 1986) en Uruguay y Formación Serra Geral, en Uruguay denominada Formación Arapey (Bossi, 1966), y en Argentina Formación Serra Geral ampliamente estudiadas en afloramiento y que tienen continuidad en el subsuelo argentino (Silva Busso, 1999 ; Silva Busso y Fernández

Garrasino, 2004). El Sistema Acuífero Termal ha sido definido en función de sus características litológicas, hidráulicas e hidroquímicas relacionándolo con sus áreas de recarga en el Uruguay y diferenciándolo hidrogeológicamente de los acuíferos contenidos en las mismas Formaciones que se hayan en el subsuelo en brasileño (Silva Busso, 1999).

Los niveles geológicos continentales del Sistema Acuífero Termal no tiene afloramientos en el área de estudio del Sector Mesopotámico Argentino. La distribución de los afloramientos en Uruguay y las consideraciones permiten definir la cuenca en profundidad. La Formación Serra Geral aflora aproximadamente desde el Río Uruguay y se extiende hacia el este hasta aproximadamente el paralelo 56° hacia el sur hasta el Río Negro, al Norte se extiende sobre Brasil (Río Grande do Sul). La Formación Botucatú en la región se dispone como una franja norte sur de 10 a 100km de ancho entre los paralelos 56° y 55° aproximadamente. Las cotas

topográficas aumentan gradualmente hacia el este de tal forma que los afloramientos de la Formación Serra Geral suelen encontrarse entre los 50–100 m.s.n.m, mientras que los afloramientos de la Formación Botucatu suelen hallarse por encima de los 100m.s.n.m pudiendo llegar a los 200 m.s.n.m.(Rivera).Hacia el Río Negro y hacia el Rio grande do Sul (Brasil) las cotas descienden progresivamente y no llegan a superar los 100 m.s.n.m.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La sistematización e interpretación de la información recopilada en las perforaciones, ha ido aumentando progresivamente con el alumbramiento de las nuevas perforaciones realizadas en el subsuelo argentino a lo largo de gran parte de la última década, permitiendo un muestreo sistemático de la región. El inventario de captaciones realizado por Silva Busso, (1999) incluye las captaciones en Argentina, Uruguay y Brasil relacionadas con el Sistema Acuífero Termal permitiendo un conocimiento más abarcativo de las características regionales del acuífero. Se han realizado campañas de medición de parámetros en boca de pozo que pueden considerarse de una frecuencia semestral, semanal y diaria. En este estudio se incluire y analizará los datos de temperatura del agua surgente en boca de pozo. La misma se midió con el empleo de instrumental digital diseñado por la Wissenschaftlich Technische Werkstätten (WTW) Modelo 320 de acuerdo a los manuales correspondientes. La metodología de toma de muestra, para lectura en boca de pozo esta condicionada, entre otros factores; por las características de la captación o punto de sondeo. En este sentido se ha considerado la metodología propuesta por Fresina y Guarino, (1997); Cardona, (1996); Nicolli y Gamba (1979), empleada en la toma de parámetros de boca de pozo. La información obtenida en boca de pozo, relacionada con la hidrogeología de las unidades, se resume en los siguientes periodos de muestreo:

Muestreo Diario: Se realizó, la lectura de valores de temperatura, entre otros, durante periodos de 2 meses a lo largo de 5 años en condiciones de descarga. Se tomaron periodos luego de 2 o 3 meses de surgencia, en estas condiciones en las Captaciones Federación -I y Colón-I. Los mismos se consideraran constantes a los fines del posterior análisis.

Muestreo Semanal: Se realizó la lectura de valores de temperatura en boca de pozo con este en descarga. Para la lectura se eligió la perforación Colón -I debido a que era la única (por razones de obra) que podía mantenerse a caudal surgente constante, durante un periodo de tiempo de 10 meses a posterioridad de la obra. A lo largo del seguimiento la perforación mostró muy pocas variaciones, el seguimiento comenzó en el mes de Diciembre de 1996 y finalizó en Septiembre de 1997.

Muestreo Semestral: El muestreo semestral se realizó en todas las captaciones del Sector Argentino y comprendió diversas mediciones incluida la temperatura en boca de pozo, objeto de estudio en este trabajo. Las captaciones no se han realizado simultáneamente sino a lo largo de este estudio, por lo tanto la serie comienza cuando las

mismas fueron terminadas con el alumbramiento del recurso.

Sobre la base del diseño de las captaciones es discutible si los niveles de aporte de las Captaciones Concepción del Uruguay -I y Gualeguaychú -I pueden considerarse incluidas dentro del concepto de Sistema Acuífero Termal, dado que en Concepción de l Uruguay apenas alcanza esa condición. Con garantía de que la temperatura de boca de pozo tenga relación con los niveles de aporte y en Gualeguaychú; la temperatura de boca de pozo no alcanza esa condición aunque el perfil termométrico de pozo indicaría una temperatura adecuada a la profundidad del horizonte productor (Silva Busso, 1999 y 2000).

Muestreo Anual: Las captaciones del litoral Uruguayo han sido también seguidas y controladas anualmente, aunque en la bibliografía se describen diversos datos comprendidos en diferentes estudios, relacionados con el acuífero (Montaño Xavier y Collazo Caraballo, 1998; Montaño y Carrión, 1990; Cattaneo, 1992; HIDROSUD, 1988; Bossi y Navarro, 1982; TAHAL, 1986; DINAMIGE, 1986; entre otros). Todos han comprendido periodos diferentes, autores diferentes e incluso métodos de determinación diferentes. El muestreo anual realizado aquí tiene poca frecuencia. Solo se considera importante para verificar la conexión hidrogeológica, del conjunto de acuíferos del Sistema Acuífero Termal en la región.

3. DISCUSION

Geología e Hidrogeología

La extensión regional del Sistema Acuífero Termal se relaciona con la geología de subsuelo, se supone la existencia de un sistema de bloques relacionados a antiguos fallamientos observándose una profundización de la cuenca en la perforación Nogoya-I. Hacia el oeste, más allá del Río Gualeguay las variaciones laterales de la geología en profundidad ofrecen pocas posibilidades de contener los acuíferos del Sistema Acuífero Termal (Silva Busso, 1999). En esa región de la cuenca las estructuras de bloques en profundidad consecuentes del evento tecto-efusivo que originó las vulcanitas de la Formación Serra Geral tienen expresión, al menos, en los niveles mesozoicos infrabasálticos y muy posiblemente haya condicionado los procesos de sedimentación de gran parte de los depósitos suprabasálticos hasta los más recientes.

Las unidades geológicas definidas en base a los afloramientos y perforaciones de la República Oriental del Uruguay poseen continuidad litológica y estratigráfica en las perforaciones realizadas hacia el oeste sobre el sector Argentino, al menos para la región de la Mesopotamia, (Silva Busso, 1997 y 1999). En el área de estudio en Entre Ríos este criterio puede precisarse al menos hasta la cuenca del Río Gualeguay en el centro y sur de la provincia y hasta las localidades de San Salvador -Chajarí - Guaviravi (Corrientes) en el norte. Este área puede considerarse en profundidad y para edades mesozoicas como dominio de las Formaciones Serra Geral, Botucatu y Piramboiá (Silva

Busso, 1999; Silva Busso y Fernández Garrasino, 2004). Las unidades geológicas definidas en las perforaciones de Nogoyá y Gualaguaychú al sur y al este de la zona de estudio en la provincia de Entre Ríos poseen una posición estratigráfica similar, con variaciones litológicas que permiten una adecuada identificación de las unidades y es conveniente considerarlas como correlacionables con las unidades definidas en el

Tabla 1. HIDROESTRATIGRAFÍA DE LA CUENCA CHACOPARANENSE ARGENTINA (Santa Cruz y Silva Busso, 1999 y Silva Busso 1999)

EASNE, (1972); Sala, (1975)	Sala, (1983), Bonorino, (1988)	Silva Busso, (1999)
Epipelches	Epiparaniana	Sección Suprabasáltica
Puelches		
Hipopuelches	Paraneana	
	Hipoparaniana	Sección Interbasáltica
		Sección Infrabasáltica

La estratigrafía se presenta sobre la base de diversos autores y la hidroestratigrafía que se propone intenta incluir las propuestas del CFI-EASNE (1972), por Sala (1975, 1983) y Bonorino (1988) referidas a la hidroestratigrafía en extensas regiones particularmente de Buenos Aires y Santa Fe y los acuíferos definidos y estudiados en Uruguay (MGAP-MTOP-BIRF, 1995; DINAMIGE, 1986).

Las características regionales mencionadas permiten proponer la Tabla 1 como cuadro hidroestratigráfico para la región, considerando toda la columna estratigráfica y características estructurales, se describe considerando los criterios definidos por Silva Busso, (1999)

Basamento Hidrogeológico: Si bien el control estratigráfico y estructural sobre los niveles mesozoicos hace difícil definir las unidades que por sus características hidráulicas puedan considerarse como Basamento Hidrogeológico, pueden entenderse las mismas como los niveles acuíferos y acuíclados. Existen algunos antecedentes de posibles acuíferos por fracturación en la áreas de afloramiento del Basamento Cristalino (DINAMIGE, 1986). Los mismos son muy restringidos arealmente, de baja permeabilidad y aparentemente relacionados con cierto grado de alteración en las rocas metamórficas. De todas formas las posibilidades acuíferas son escasas, por lo que el Basamento Cristalino de la cuenca se considerará parte del Basamento Hidrogeológico. Es importante aclarar que, al igual que las sedimentitas Paleozoicas, algunas de las unidades consideradas acuíferas, son tales, en áreas de afloramiento y regionalmente en zonas muy restringidas. La Formación Yaguarí, cuya litología se compone de areniscas finas que intercalan en un paquete pelítico consolidado, posee niveles cuya granometría permite la extracción localizada de caudales inferiores a 1 m³/h. Se ha definido la misma como un "acuífero" de bajos rendimientos (DINAMIGE, 1986).

Sección Infrabasáltica: Las Unidades el Grupo Batoví Dorado en Uruguay, corresponden un paquete sedimentario que comprende unidades cuya edad

Uruguay y Brasil (Silva Busso, 1999). Según Silva Busso, (1999) las perforaciones de la región norte y este de la Cuenca Chacoparanense denominadas, no permiten una adecuada identificación de las unidades a causa de las variaciones litológicas, su distancia a las áreas donde fueron identificados los estratos tipo y la altura y relación estratigráfica con las unidades infra y suprayacentes.

comprende desde el Triásico superior hasta el Jurásico medio. En particular estas unidades ha sido definidas geológicamente hidrogeológicamente en el subsuelo entrerriano por (Silva Busso, 1999; Silva Busso y Fernández Garrasino, 2004).

La sección infrabasáltica (ver tabla 2) esta representada por la Formación o Acuífero Botucatú la Formación Serra Geral se sobrepone a la secuencia de areniscas de la Formación Botucatú y hacia el oeste, la primera actúa como nivel confinante de la segunda. De hecho el acuífero en profundidad tiene características hidráulicas de un acuífero confinado en Uruguay (Caitaneo, 1992) y también en Argentina (Silva Busso, 1999) y de acuífero libre en afloramiento (Montaño y Carrión, 1990).

Las características y parámetros hidráulicos del Sistema Acuífero Termal y en la medida de lo posible y según sea el caso se hace especial referencia a sus unidades acuíferas Solari y Botucatú o bien las perforaciones profundas de la zona de estudio. Según Silva Busso, (1999) considera que las unidades acuíferas del Sistema Acuífero Termal tienen magnitudes similares en sus propiedades hidráulicas, razón que refuerza el concepto de considerar a este un Sistema Acuífero, aunque no impide la determinación de sus parámetros individuales para cada unidad. A continuación y como resumen de lo expuesto se presenta la hidroestratigrafía de la Sección Infrabasáltica propuesta por estos los diversos autores.

Sección Interbasáltica: Los antecedentes hidrogeológicos relacionados con la Formación Serra Geral se limitan en Argentina a un conjunto de referencias muy localizadas o estudios relacionados con la captación de pequeños volúmenes de agua subterránea.

Su explotación en el área de estudio es ocasional, fundamentalmente debido a que las agua de los acuíferos suprabasálticos poseen buenas características hidráulicas y calidad hidroquímicas que las hacen aprovechables para diversos usos. Estudios más detallados en la República del Uruguay (MGAP-MTOP-BIRF, 1995) han permitido determinar y definir en el área de Salto, un complejo sistema acuífero que en su sección inferior

estaría representado por el acuífero fisurado Arapey, contenido en esta Sección Interbasáltica. Regionalmente, la Formación Serra Geral está constituida por dos unidades acuíferas en función de la litología que las caracteriza. La primera de ellas comprende a la roca efusiva volcánica propiamente dicha, o Miembro Posadas de la Formación Serra Geral. La segunda unidad acuífera queda representada por el Miembro Solari que es el término clásico de la Formación Serra Geral.

Sección Suprabasáltica: Los acuíferos de la sección Suprabasáltica en el área de estudio poseen como característica en común que son en su totalidad acuíferos clásticos. Esta Sección puede considerarse correlacionable con las Secciones Epiparaniana

(Epipelches y Pelches), Paranaiana (Hipopelches) e Hipoparaniana (Sala, 1983) definida en la provincia de Buenos Aires y Santa Fe. En esta región el Epiparaniano estaría representado por el Acuífero Ituizangó que subyace a los depósitos de las Formaciones Hernandarias o Tezanos Pintos. Estos poseen características hidráulicas que las asemejan a acuitardos o acuícludos y su extensión regional supera el área de estudio hacia el oeste y norte y se ve limitada hacia el sur por los depósitos deltaicos, y al este en Uruguay donde no se encuentran en el registro o no existen estudios de correlación que las comparen con términos contemporáneos en edad.

Tabla 2. COMPARACIÓN ENTRE LA HIDROESTRATIGRAFÍA PROPUESTA Y LA HIDROGEOLOGÍA PREVIA DEFINIDA POR LOS DIFERENTES AUTORES PARA LA SECCIÓN INFRABASÁLTICA. En negrita se destaca el Sistema Acuífero Termal y Guaraní. Tomada de Silva Busso, (1999)

ER, Argentina (subsuelo) Silva Busso (1999)		Brasil, Reboucas, 1994, Araujo et al, 1995 (superficie y subsuelo)		Uruguay, ANCAP, 1991; Cattáneo, 1992 (subsuelo)		Uruguay, Montañó Xavier y Collazo Caraballo, (1998)	
Acuífero Botucatu	Sección Acf Infrabasáltica	Acuífero Botucatu	Sistema Acuífero Mesozoico	F. Rivera	Acuífero Tacuerebó	Acuíf. Rivera	Sistema Acuífero Guaraní
Acuitardo Piramboia		Acuitardo Piramboia		Formación Tacuerebó		Acuífero Tacuerebó	
Acuícludos y Acuitardos Neopaleozoicos (Ciclo Sedim. 1 y/o Basamento Cristalino)	Acuícludos y Acuitardos Permo Triásicos Formación Rosario do Sul	F. Cuchilla Ombú?		Acuíf. Cuchilla Ombú?			
		Formación Buena Vista		Acuífero Buena Vista			
		Formación Yaguari	Acuífero-Acuitardo Yaguari				
	Basamento Hidrogeológico	Conjunto de acuícludos y acuífugos contenidos en las Sedimentitas Paleozoicas y/o Basamento Cristalino	Basamento Hidrogeológico	Basamento Hidrogeológico?/ Acuíferos de las Sedimentitas Paleozoicas	Acuícl. Melo		
					Acuífero Tres Islas		
					Acuífero-Acuitardo San Gregorio		
					Basamento Hidrogeológico?/ Acuíferos Pre-Devónicos?		

La extensión de los acuíferos del Sistema Acuífero Termal no necesariamente debe coincidir con la extensión regional de las unidades formacionales que los contienen. El concepto de acuífero involucra, además de la litología y sus estructuras, los parámetros físicos que los caracterizan, como alturas piezométricas del área de recarga, zona de descarga, hidroquímica de sus aguas, fases de equilibrio agua-mineralogía, dirección de la red de flujo subterráneo, isotopía de sus aguas, entre otras que permiten limitar su extensión y estudiarlo como una unidad acuífera característica.

En el área de estudio queda representado por los Acuíferos Solari y Botucatú y eventualmente algún nivel acuífero intercalado en Piramboiá (Silva Busso, 1999; Silva Busso y Fernández Garrasino, 2004). Las unidades acuíferas del Sistema Acuífero Termal tienen magnitudes similares en sus propiedades hidráulicas, razón que refuerza el concepto de considerar a este un Sistema Acuífero. Esto es compatible con el concepto hidroestratigráfico propuesto y deben considerarse al Sistema Acuífero Termal abarcando los acuíferos clásticos de Sección Interbasáltica y la Sección Infrabasáltica. (Silva Busso, 1999).

Las características del punto de muestreo, tipo de perforación, diseño de filtros y empaque, cementación y otros factores, como el uso pretendido para el recurso, son condicionantes de la representatividad de la información obtenida en las captaciones (Cardona, 1996; Custodio Llamas, 1983). Las perforaciones estudiadas aquí permiten una primera aproximación al comportamiento de uno de los Sistemas Acuíferos de mayor extensión, complejidad y profundidad de América del Sur. Por lo tanto, se presentará en este apartado, las características principales de las captaciones y sus obras adoptando un grado de representatividad relativo. Una consideración común a todas estas, es que el Sistema Acuífero Termal incluye en este estudio al menos dos niveles acuíferos identificables en las captaciones que podrían, a la luz de posteriores estudios; no tratarse de los únicos. Para garantizar cierto grado de representatividad de la información hidrogeológica en general, a partir de las captaciones de muestreo, Silva Busso, (1999) considerara los siguientes aspectos:

- Cumplir con las condiciones de aislamiento y estanqueidad de toda la Sección Suprabasáltica, atravesada por la perforación (encamisado y cementado) que eviten el aporte de los acuíferos de dicha sección
- Atravesar completamente los niveles interbasálticos e infrabasálticos, hasta llegar al basamento hidrogeológico o unidades claramente acuíferas.
- Aislar aquellos niveles que no constituyan acuíferos, con empleo de cañería y filtros
- Cumplir con la condición de termalismo de Schöeller (1962) superando 4°C la media termométrica anual máxima del lugar.

Teniendo en cuenta estos criterios, las captaciones de la región que han sido muestreadas poseen las siguientes características que es importante mencionar para entender la representatividad de cada una de ellas.

Fedración-1: La Sección Suprabasáltica está poco representada o ausente en el registro geológico, posee

libre la sección Interbasáltica con instalación de filtros de un diámetro de 152mm suspendidos en la Sección Infrabasáltica sin empaque de grava, si bien no llega, en rigor, al Basamento Hidrogeológico atraviesa los acuitardos del Formación Piramboiá. Se concluye que las muestras provenientes de las aguas de alumbramiento en la perforación, son representativas del Sistema Acuífero Termal en su conjunto.

Concordia -1: La Sección Suprabasáltica está poco representada o ausente en el registro geológico, posee entubada en un diámetro de 305mm la sección Interbasáltica de comprobada estanqueidad. No posee filtros en la Sección Infrabasáltica. La misma se explota libremente, si bien no llega, en rigor, al Basamento Hidrogeológico atraviesa los acuitardos del Formación Piramboiá. Se concluye, que las muestras provenientes de las aguas de alumbramiento en la perforación son representativas del Acuífero Botucatú, principal unidad incluida en el Sistema Acuífero Termal en su conjunto.

Colón-1: La Sección Suprabasáltica se encuentra aislada, por encamisado de un diámetro de 305mm y probada estanqueidad. La Sección Interbasáltica se encuentra libre, sin filtro llega al Basamento Hidrogeológico a los 886 m.b.b.p. y hacia la base de la Formación Serra Geral. No hay evidencia de niveles arenosos y las posibles fracturas se encuentran mineralizadas, sin posibilidad de aporte comprobándose como un acuífugo. Se concluye que las muestras provenientes de las aguas de alumbramiento en la perforación son representativas del Acuífero Solari, unidad incluida en el Sistema Acuífero Termal en su conjunto.

Villa Elisa-1: La Sección Suprabasáltica (además de los primeros 100 metros de la interbasáltica), se encuentra aislada por encamisado con un diámetro de 229mm y probada estanqueidad. La Sección Interbasáltica e Infrabasáltica, se encuentran libres y sin filtro. Si bien no llega, en rigor, al Basamento Hidrogeológico y atraviesa el Acuífero Botucatú (aunque no completamente), se concluye que las muestras provenientes de las aguas de alumbramiento en la perforación, son representativas del Sistema Acuífero Termal en su conjunto.

Concepción del Uruguay-1: La Sección Suprabasáltica se encuentra aislada por encamisado de un diámetro de 152mm, no se ha informado ensayo de estanqueidad. La Sección Interbasáltica se encuentra libre, sin filtro. Esta perforación llega al Basamento Hidrogeológico, constituido por el Basamento Cristalino de la región. Se concluye que las muestras provenientes de las aguas de alumbramiento en la perforación son representativas del Acuífero Solari. Existe la posibilidad de niveles de aporte del Acuífero Arapey (sección superficial fracturada), deben considerarse como medianamente representativas con posibilidades de mezcla con los acuíferos del Sistema Acuífero Termal. Su escasa temperatura compromete la condición de termalismo de Schöeller (1962).

Gualeguaychú-1: Su diseño es complejo, la Sección Suprabasáltica está entubada con un diámetro de 254mm hasta los 100 m.b.b.p. y 152m.b.b.p hasta los 620

m.b.b.p., pero no aislada, el empaque de grava puede poner en contacto los niveles acuíferos suprabasálticos. En particular el Acuífero Ituizangó de menor temperatura y buenas propiedades petrofísicas e hidráulicas que le permiten una elevada transmisividad y conductividad hidráulica vertical. La sección Interbasáltica se encuentra igualmente entubada con ranuras de 1,5mm (a manera de filtro) con un diámetro de 152mm hasta los 959 m.b.b.p. y engravada en contacto con todas los niveles de aporte o no. En la interbasáltica posee filtros en los niveles clásticos de 5 a 15 metros de espesor intercalados (Miembro Solari). Posee filtros (caño ranurado) en toda la Sección Infrabasáltica en niveles fundamentalmente limosos con intercalaciones arenosas y corresponde a los acuitardos de la Formación Piramboiá. Llega al Basamento Hidrogeológico constituido por el Basamento Cristalino. Se concluye que las muestras provenientes de las aguas de alumbramiento en la perforación tienen posibilidades de mezclarse y son representativas del Sistema Acuífero Termal, con las reservas sugeridas.

Perforaciones del Litoral Uruguayo: Por tratarse de un pozo de estudio de la actividad petrolera suelen haber tenido diferentes operaciones de entubado y desentubado. De todas formas en Arapey, Salto y Daymán la Sección Suprabasáltica, no está presente en el registro y se encuentra encamisada en Guaviyú. Actualmente la ubicación de las camisas son las siguientes:

Arapey : Camisa de un diámetro de 285mm hasta los 112 m.b.b.p..

Daymán: No se detalla encaminado, perforación en 13 3/8

Guaviyú: No se detalla encamisado, perforación en 13 3/8

Almirón: No se detalla encamisado, perforación en 13 3/8

Todas las captaciones llegan al Paleozoico o al Basamento Cristalino, o sea, que atraviesan todas las unidades acuíferas hasta el Basamento Hidrogeológico. La única excepción es la perforación Nicanor, que solo penetra 5 metros en el techo de la Formación Botucatú y tiene la sección Interbasáltica encamisada y cementada, esto la convierte en un importante punto de muestreo hidroquímicos, con elevada representatividad del Acuífero Botucatú. Si bien, es discutible el aporte de cada Unidad Acuífera, dado que la Sección ha tenido diferentes interpretaciones geológicas puede considerarse medianamente representativos del Sistema Termal tal como lo hemos definido en este estudio.

4. RESULTADOS

Temperatura de las aguas y relación con el Gradiente Geotérmico

Sobre la base de la información de las captaciones controladas la temperatura del agua subterránea surgente en las perforaciones ha sido medida periódicamente, permitiendo calcular la temperatura media durante el periodo de cinco años. Esto a permitido calcular la temperatura media para cada perforación, que se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. TEMPERATURA MEDIA DEL AGUA DE SURGENCIA DURANTE 5 AÑOS DE CONTROL (Silva Busso, 1999)

Perforación	Temperatura media en °C Periodo 1994-99	SD
Federación-I	43.02	0.16
Concordia-I	45.91	0.86
Colón-I	33.75	0.31
Villa Elisa-I	38.18	0.13
Concepción del Uruguay-I	28.9	0.37
Gauleguaychú-I	24.0	0
Arapey	42.17	1.35
Daymán	45.79	0.46
Guaviyú	38.27	0.71
Nicanor	44.75	0.35

Es evidente que, considerando las profundidades de los acuíferos del Sistema Acuífero Termal, la temperatura del agua en boca de pozo, tiene relación con la temperatura del agua contenida en el acuífero y esta en consecuencia se relaciona con el gradiente geotérmico de la región. En una primera aproximación se ha propuesto un gradiente geotérmico promedio para la corteza continental del orden de 0,030 °C/m (Ellis Manon, 1977) pero se acepta un valor comprendido entre 0,05 y 0,025 °C/m o 20 a 40 metros de profundidad por cada °C como frecuentes (Custodio Llamas, 1983). El efecto del calor solar o temperatura ambiente tiene influencia en los primeros metros, cuanto más cerca de la superficie se encuentran los acuíferos. Según Schöeller, (1962) esta influencia es poco notable por debajo de los 6 metros de profundidad y prácticamente nula a más de 20 metros de profundidad. A partir de mediciones realizadas en el Acuífero Ituizangó en la región, se ha verificado que la temperatura del agua del acuífero no parece tener relación directa con las oscilaciones diarias de la temperatura ambiente aunque si con las estacionales (Silva Busso, 1999). De todas formas la profundidad del Sistema Acuífero Termal reduce a despreciable su posible influencia. La temperatura a una profundidad determinada esta dada por el gradiente geotérmico de una región y la misma se calcula como la relación de:

$$(1) T_x = T_0 + Vg \cdot (x)$$

Donde:

T_x : Temperatura a una profundidad dada (°C)

T_0 : temperatura media en superficie(°C)

Vg : Gradiente Geotérmico

(x) : Profundidad (m)

En esta sencilla expresión existen dos variables importantes y en muchos casos complejas de medir o determinar. Una de ellas es la temperatura media superficial debido que la misma varia con las estaciones del año. No hay acuerdo en la bibliografía sobre la más conveniente. En este caso consideraremos la temperatura media anual del mes más cálido de la región del promedio registrada sobre la base de las series de precipitaciones de la región. De otra manera el límite sería muy bajo y el acuífero libre considerarse "termal"

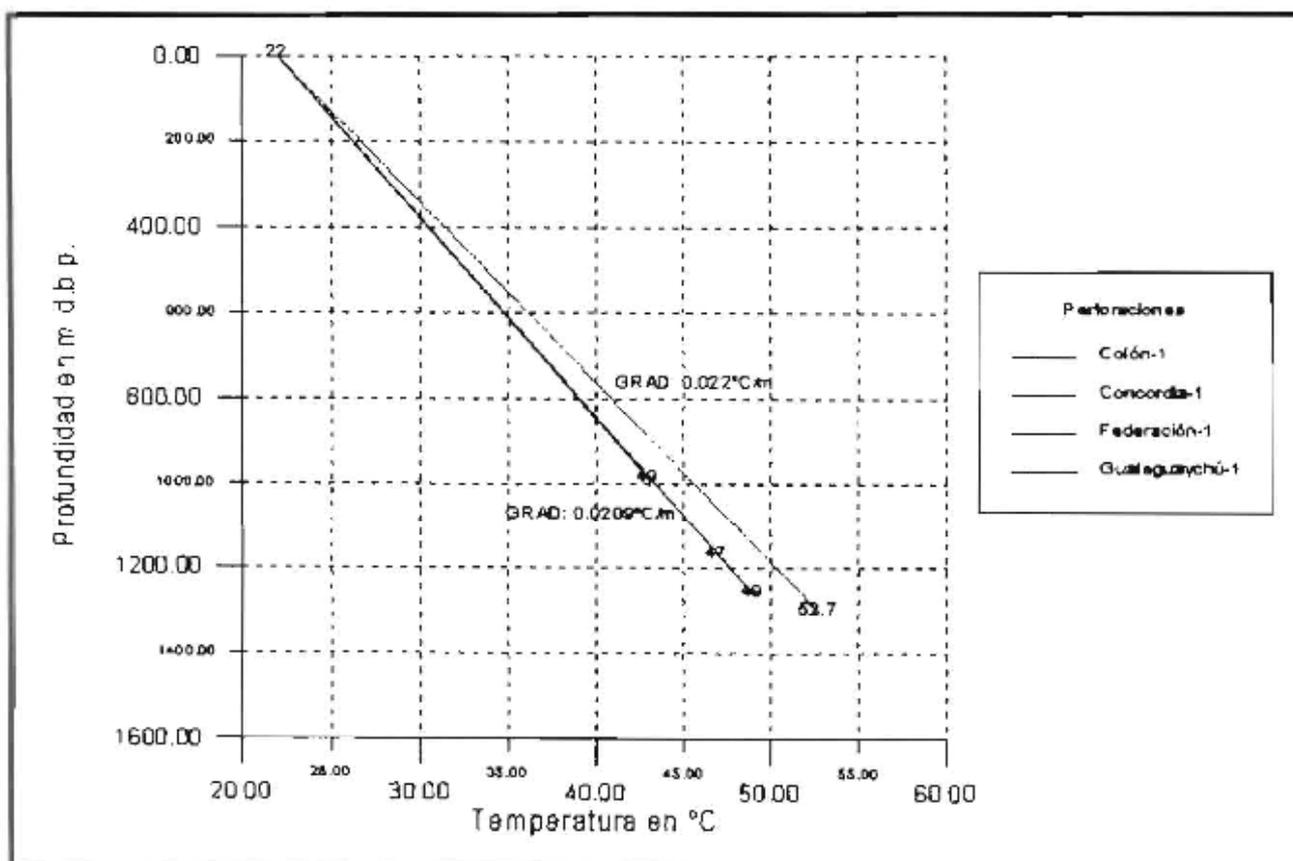
en algunas épocas del año, lo cual no es conveniente de suponer en este ambiente. Esta temperatura media promedio (Enero) corresponde a 22,6°C (INTA, 1970). Las figuras 2 y 3 permite observar la relación entre los diversos límites térmicos propuestos para las captaciones de Argentina y Uruguay, de esto se desprende que las aguas deben superar los 26,6 °C en las región para considerarlas Termales según Schöeller (1962) o sea que superen 4°C el valor medio citado. El otro factor, es la temperatura en profundidad o mejor expresado, conocer la temperatura a una profundidad inequívocamente determinada. Los perfilajes de las perforaciones

Federación-1, Concordia -1, Colón-1 y Gualaguaychú-1 permitieron medir directamente la temperatura de fondo de perforación. Gualaguaychú -1 además posee un registro continuo de temperaturas (Silva Busso, 1999). El gráfico N° 5 presenta la gráfica de la función $T_x = T_0 + Vg \cdot (x)$ para las captaciones mencionadas considerando las medidas de temperatura realizadas en los pozos durante el perfilaje de las unidades A partir de las medidas en las captaciones se presentan los datos de la tabla 4 y los valores de gradiente calculados de acuerdo a la expresión propuesta en (1), corresponde a la pendiente de las curvas presentadas tomadas de Silva Busso, (1999).

Tabla 4. TEMPERATURAS MEDIADAS A DIFERENTES PROFUNDIDADES Y GRADIENTE CALCULADO (Silva Busso, 1999)

Perforación	Profundidad m.b.b.p.	Temperatura °C	Grad. Geotérmico °C/m	Mts. por °C
Federación-1	1260	49	0.0209	47.9
Concordia-1	1170	47	0.0208	48.0
Colón-1	1300	51.6	0.0223	44.8
Gauleguaychú-1	988	43	0.0208	48.0

FIGURA 2. GRADIENTES GEOTÉRMICOS EN LAS CAPTACIONES ARGENTINAS A PARTIR DE LOS DATOS DE PERFILAJE



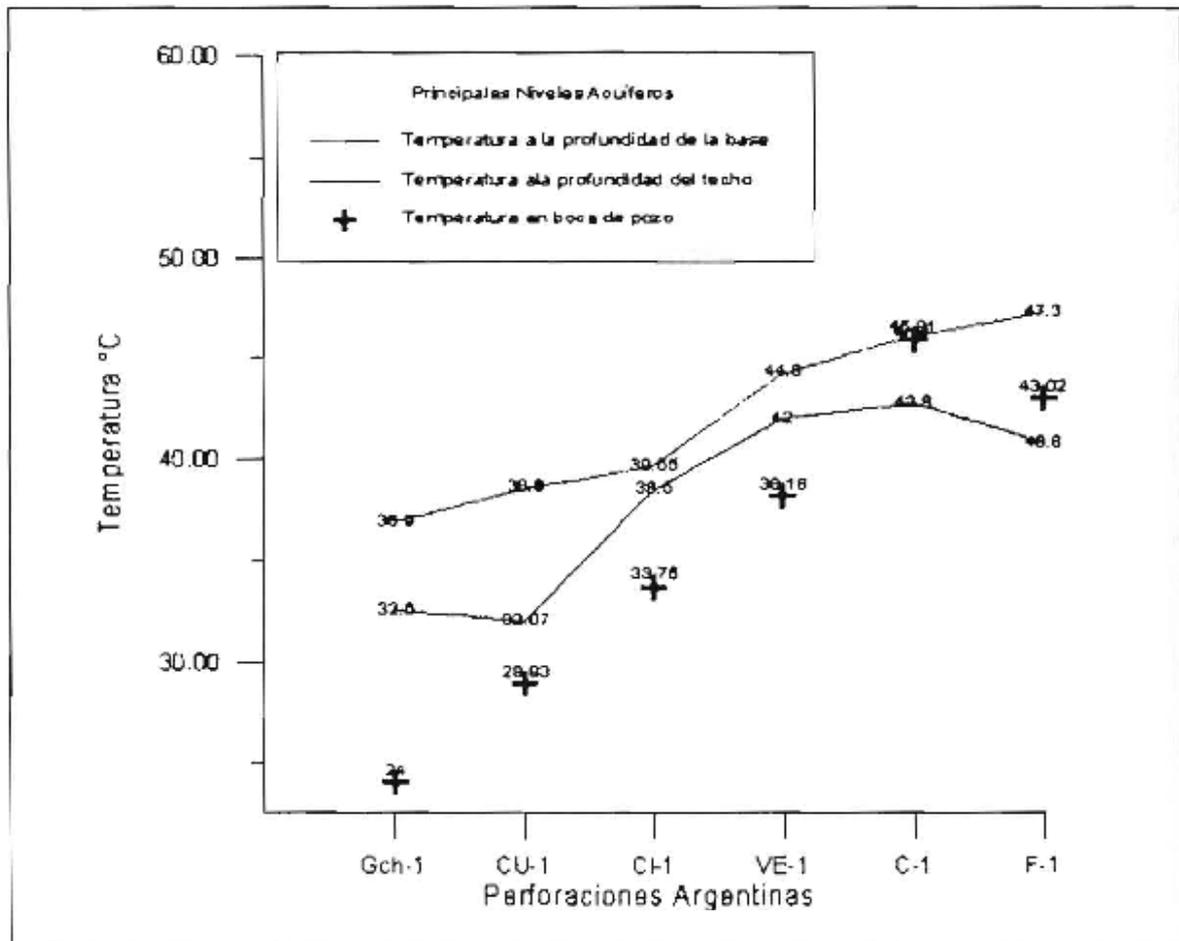
Las curvas y pendientes de los gradientes analizados en Gauleguaychú-1 Concordia-1 y Federación-1 son lo suficientemente similares como para considerarse iguales. Hacia la zona de Colón-1 el Gradiente Geotérmico aumenta sensiblemente. Esto podría relacionarse con el calor remanente en la región de estudio. Una interpretación posible es relacionar este

calor remanente con las anomalías magnéticas determinadas por Vila (1962) y modeladas por Guspi, (1993) en la región cercana a l de Mayo, interpretadas como la respuesta de un cono (nec) volcánico en profundidad (Silva Busso, 1999). De esta forma se suma otro criterio en apoyo de dicha interpretación. La temperatura del agua en boca de pozo suele

considerarse representativa, de la temperatura del agua contenida en el acuífero o al menos los intervalos más potentes del mismo. La Figura 3 muestra la temperatura correspondiente a las profundidades de techo y base del acuífero más productor en cada pozo, (Acuífero Botucatu en Federación -1, Concordia-1 y Villa Elisa-1 y Acuífero Solari en Colón -1, Concepción del Uruguay

-1 y Gauleguaychú-1), calculada a partir de los gradientes geotérmicos propuestos. Se ha asumido en Villa Elisa-1 el gradiente geotérmico determinado en Federación y Concordia y en Concepción del Uruguay el determinado en Colón. Los puntos volcados en el gráfico corresponden a la temperatura promedio del agua en boca de pozo en cada perforación mencionada.

FIGURA 3. RELACION ENTRE TEMPERATURA DE SURGENCIA Y GRADIENTES GEOTÉRMICOS EN LAS CAPTACIONES ARGENTINAS



Se desprende de lo expuesto que la temperatura del agua en boca de pozo no necesariamente debe correlacionarse con la temperatura de los principales niveles de aporte en profundidad. Solo en Federación y Concordia la temperatura del agua en boca de pozo posee pocas variaciones con la prevista a la profundidad de los niveles de aporte (ver figura 3). En Villa Elisa, Colón, Gauleguaychú y Concepción del Uruguay la temperatura es muy inferior al intervalo previsto. Si suponemos que la perforación alcanza un régimen térmico estable o con poca variación durante su conducción, (comprobado por la poca variación de las temperaturas registradas), las temperaturas medidas en boca de pozo se encuentran dentro del intervalo previsto solamente si se considera la presunción que el mayor caudal de aporte proviene de los niveles acuíferos comprendidos en el intervalo considerado.

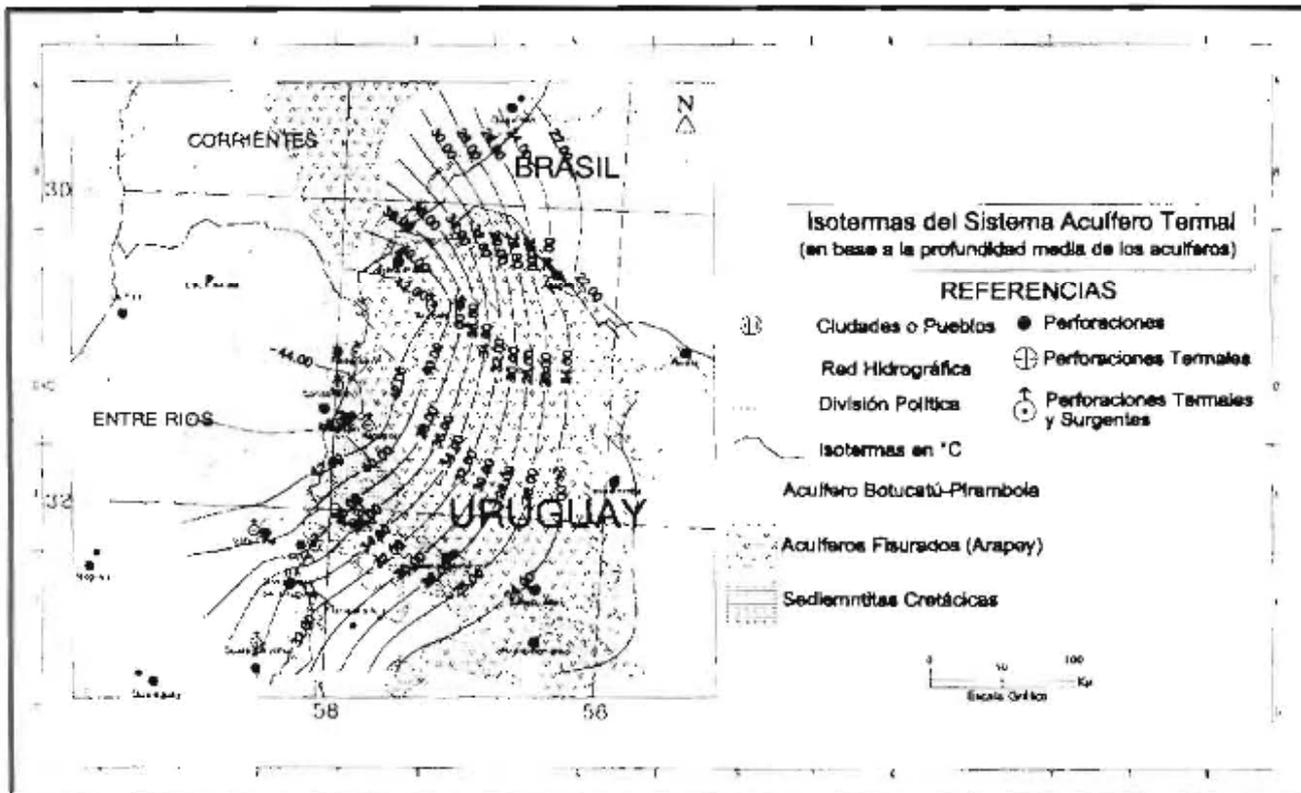
Este es el caso de Federación y Concordia donde la

temperatura de boca de pozo se considerará representativa de la temperatura en profundidad del Acuífero Botucatu (no de todo el sistema acuífero). Las captaciones Villa Elisa, Colón, Gauleguaychú y Concepción del Uruguay registran valores de temperatura en boca de pozo que difieren entre 5 - 6 °C menos de la prevista en función del gradiente calculado en las perforaciones. Por lo tanto se considera que las mismas no son representativas de sus principales niveles de aportes, en particular Colón -1, que de acuerdo a lo ya expuesto en 4.3. Las intercalaciones del Miembro Solari a profundidades más someras pueden estar aportando aguas de menor temperatura y posiblemente, de menor contenido salino, (las primeras determinaciones en boca de pozo realizadas los primeros días de alumbramiento en Colón -1 y Villa Elisa -1 del orden de 330 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 15.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente con temperaturas de 36°C y 39.5°C que luego

estabilizaron en las presentadas aquí. Estos datos son la base de esta última afirmación). Debe considerarse que en estas captaciones el Acuífero Botucatú, o está ausente del registro, o tiene poco espesor y que las captaciones no tienen aislada la Sección Interbasáltica. La temperatura de boca de pozo no siempre es representativa del gradiente geotérmico ni un

determinado, no obstante, puede considerarse representativa del Sistema Acuífero Termal en conjunto tal como ha sido definido hasta aquí con el aporte del acuífero Botucatú y Solarí. El mapa de isótermas de temperatura (figura 4) debe interpretarse dentro de este concepto de representatividad.

FIGURA 4. MAPA DE ISOTERMAS DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ CORREGIDAS A PARTIR DEL GRADIENTE GEOTÉRMICO



La importancia de estas consideraciones tiene aplicación directa, dado que es posible calcular al velocidad horizontal real del flujo, planteando al ecuación de continuidad en medios porosos con flujo de calor y agua en movimiento (Custodio y Llamas, 1983). La aplicación de esta ecuación de continuidad que se presenta a continuación, es de compleja resolución analítica. Sin embargo puede aplicarse con cierto grado de aproximación considerándose las siguientes circunstancias físicas del acuífero y la perforación (según Custodio y Llamas, 1983):

- Las condiciones litológicas, estratigráficas e hidrogeológicas deben ser similares. Es decir, que debe tratarse de la misma unidad acuífera con pocas variaciones laterales y verticales.
- Para cálculos aproximados o indicativos (como este caso) debe considerarse o admitirse un espesor constante de acuífero.
- Debe considerarse régimen permanente, es decir, con flujo de agua constante, que estabiliza los niveles dinámicos en el tiempo.
- La temperatura debe ser constante en la misma sección del acuífero.
- El acuífero debe ser horizontal en el tramo considerado

Considerando solamente el Acuífero Botucatú comprendido en el Sistema Acuífero Termal, la situación que más se aproxima a estas premisas ocurre en el intervalo infrabasáltico de las perforaciones Federación -1 y Concordia-1. Las mismas presentan una litología similar y además condiciones estratigráficas comparativamente iguales (Silva Busso, 1999 y 2000), las profundidades del techo - base y espesores de la unidad Acuífera Botucatú son similares o con pocos metros de diferencia. Puede considerarse en dicho intervalo como un acuífero horizontal, con flujo constante debido a que las captaciones estabilizan las presiones de surgencia rápidamente y las han sostenido así durante los últimos años. La temperatura puede considerarse constante en el intervalo entre ambos, ya que prácticamente poseen el mismo gradiente geotérmico calculado a partir de mediciones con sonda termométrica en el pozo. La ecuación general integrada, propuesta por Custodio y Llamas, (1983) se presenta según:

$$(2) \theta_x = \theta_s + (q \cdot h / K) - \left\{ (q \cdot h / K) - \theta_0 + \theta_s \right\} \cdot (x / K \cdot v \cdot b \cdot c \cdot \delta \cdot h)$$

Donde:

q: Calor interno del sistema (aporte de calor etc. de la tierra) cal/cm²/seg

K: Conductividad térmica (del conjunto agua+roca) cal/cm/seg/°C

c: conductividad térmica del fluido (agua) en cal/gr/°C

v: Velocidad real del agua en cm/seg

b: Espesor del acuífero en cm

h: Profundidad del acuífero en cm

x: Distancia entre los puntos referidos en cm

δ: Densidad del fluido (agua) g/cm³

θ_x: Temperatura del agua del acuífero a una distancia determinada en °C

θ_s: Temperatura media de la superficie del terreno en °C

θ_o: Temperatura del agua del acuífero en el origen de coordenadas en °C

Se considerará como origen la perforación de Concordia-1 (x=0) debido que posee los valores de presión de surgencia mayores que Federación-1 (x=6) Km, considerando agua como fluido el módulo de las variables c y d es igual a 1 (uno), se considerará una distancia (x) entre ambas de 61 km, un espesor medio (b) en el intervalo de 250 mts., una profundidad del acuífero (h) de 1000 mts, una temperatura media de superficie (θ_s) de 22,6°C, y una temperatura del acuífero a 1000 metros que cumple con la condición de θ_o = θ_x de 43 °C. Los valores de q, k y v son incógnitas del sistema de análisis propuesto. Para calcular v (velocidad real horizontal) es escenario asumir un valor de q y k. El valor de q propuesto por diversos autores (Custodio y Llamas, 1983; White, 1970 y Schöeller, 1962) suele variar entre 1,2 - 1,5 x10⁻⁶ cal/cm²/seg en áreas continentales. El valor de K depende de la naturaleza de la unidad considerada y puede calcularse a partir de la expresión (4). En la medida en que x tiende a infinito el término $\{(q.h/K) - \theta_o + \theta_s\} (-xK/v.b.c.\delta.h)$ tiende a cero. Considerando la distancia entre las captaciones el tercer término de la expresión (4) tiende a ser un número cercano a 0. Por lo tanto que da reducida a la siguiente expresión:

$$(3) \theta_x = \theta_s + (q.h/K)$$

y K queda definida por:

$$(4) K = q.h/(\theta_x - \theta_s)$$

Donde:

q: Calor interno del sistema (aporte de calor etc. de la tierra) cal/cm²/seg:

K: Conductividad térmica (del conjunto agua-roca) cal/cm/seg/°C

θ_x: Temperatura del agua del acuífero a una distancia determinada en °C

θ_s: Temperatura media de la superficie del terreno en °C

para θ_s = 22,6°C, θ_x = 43°C y h = 100000 cm tenemos:

$$(5) K = q.(4901.96)$$

Considerando los valores de q propuestos tenemos, la tabla 5:

Tabla 5. VALORES DE q Y K PROPUESTOS POR (Silva Busso, 1999)

q considerado en cal/cm ² /seg	K calculado en cal/cm/seg/°C
1.2x10 ⁻⁶	5.88x10 ⁻³
1.5x10 ⁻⁶	7.35x10 ⁻³

Estos valores de K corresponden a la conductividad térmica del Acuífero Botucatú en el tramo comprendido y puede considerarse una parámetro característico de la unidad acuífera. Estos valores poseen un orden de magnitud similar a los citados para los acuíferos clástico (Custodio y Llamas, 1983). La velocidad de flujo horizontal puede calcularse considerando que la zona posee el mismo gradiente geotérmico e igual temperatura a igual profundidad en ambas perforaciones. En este caso tanto Federación -1 como Concordia -1 posee un gradiente muy similar y para los 1000mts de profundidad prácticamente cumplen con la condición θ_o = θ_x, aplicando logaritmos v queda definida a partir de la expresión (2)

$$(6) v = (-xK/b.c.\delta.h). \{ \log((q.h/K) - \theta_o + \theta_s) / \log(\theta_s - \theta_x + (q.h/K)) \}$$

cuando θ_o = θ_x el segundo término entre corchetes toma el valor de la unidad y queda:

$$(7) v = (-xK/b.c.\delta.h)$$

con x, b, c, d,h constantes tenemos que el módulo de v corresponde:

$$(8) v = 2,44x10^{-3}.(K)$$

Como se han calculado dos valores de K atendiendo a las oscilaciones de q tendremos también dos valores de v según la siguiente tabla 6:

Tabla 6. PROPIEDADES HIDRÁULICAS ESTIMADAS (Silva Busso, 1999)

K calculado en cal/cm/seg/°C	v calculado en cm/seg	V expresado en m/año
5.88x10 ⁻³	1.43x10 ⁻⁵	4,5
7.35x10 ⁻³	1.79x10 ⁻⁵	5.6

Como síntesis de lo expuesto se considerará que a partir de las circunstancias físicas definidas anteriormente es posible determinar para el Acuífero Botucatú en el intervalo entre Federación y Concordia lo siguiente:

La conductividad térmica (K) de la unidad acuífera Botucatú, considerando que la distancia entre ambos es suficientemente grande para anular el término exponencial, queda definidas por la expresión genérica (4) $K = q.h/(\theta_x - \theta_s)$.

La velocidad real del flujo horizontal (v) de la unidad acuífera Botucatú, considerando que θ_o = θ_x, queda

definidas por la expresión genérica (9) $v = (-xK/b.c.\delta.h)$.

Debe considerarse que si bien la velocidad horizontal puede variar regionalmente, las mediciones isotópicas sobre la base de ^{18}O , D y ^{14}C realizadas en las captaciones Uruguayas sobre muestras de las perforaciones Arapey (Dellepère, 1992) aproximan edades del orden de 22000 años, para un recorrido lineal de 110 km aproximadamente desde el área de recarga o sea cercanas a 5 m/año muy similares a las calculadas en el intervalo de captaciones propuesto con condiciones geológicas e hidrogeológicas similares en las tres perforaciones.

5. CONCLUSION

En este estudio se ha considerado que el Sistema Acuífero Termal debe su condición de termal porque cumple con la condición expresada por Schöeller, (1962), pero significa que el termino Sistema Acuífero Termal no queda cerrado o limitado solamente por un determinado conjunto de Formaciones, sino por aquellas que además contienen acuíferos capaces de cumplir con la condición $T(\text{acuífero}) > T(\text{media}) + 4^{\circ}C$ (Hipertermias o termales). Esta definición de geotermalismo no es la única definida en la bibliografía pero sí es la más aceptada.

En el área de estudio queda representado por los Acuíferos Solari y Botucatu (eventualmente algún nivel acuífero intercalado en Piramboia), sin excluir niveles acuíferos que, en futuras investigaciones, podrían considerarse incluidos en el Sistema Acuífero Termal. En consecuencia, se desprende de este concepto, que el "Sistema Acuífero Guarani" por ser definido en afloramiento no cumple la condición tennométrica de Schöeller (1962), por lo tanto para evitar confusión al respecto, si bien se entiende que posee acuíferos en común (Botucatu-Rivera y Tacuarembó-Piramboia) que caracterizan el área de recarga en profundidad no comprenden el mismo "Sistema" por lo que se propone evitar su correlación con los niveles en profundidad hasta que futuros estudios, más detallados, permitan hacerlo.

Los cálculos geotérmicos presentados se ha realizado fundamentalmente sobre la información proveniente de

-1, la falta de una mejor determinación del gradiente geotérmico que impide su verificación en los pozos restantes solo nos permite considerarlos comparables con las captaciones Villa Elisa-1, Arapey, Daymán y Guaviyú (esta última con reservas por su proximidad a Colón-1) por sus similitudes geológicas. La perforación Colón-1 y Gualaguaychú-1 que poseen valores de temperatura medido en la perforación al igual que Concordia-1 y Federación-1, poseen una geología diferente y circunstancias físicas diferentes (Silva Busso, 1999) que impiden una adecuada comparación. Entre dichas causas la más importante es que las intercalaciones arenosas que constituyen el Acuífero Solari, son de poca potencia y suelen distribuirse entre las vulcanitas que pueden alcanzar los 1000 metros de espesor, esto hace difícil la determinación de temperaturas para el conjunto excepto que se consideren las unidades clásticas separadamente. Como es previsible la conductividad térmica (K) depende del material considerado y es altamente probable, por su tipo litológico, que la Formación Serra Geral posea valores de K diferentes que la Formación Botucatu y que hasta tal vez varíen en diferentes captaciones al igual que otras propiedades físicas. Por esta razón los valores de k y v calculados se considerara solo representativos del Acuífero Botucatu y no del Sistema Acuífero Termal en su conjunto. Las perforación en Concepción del Uruguay-1 también se encuentra bajo la última situación descrita.

En síntesis el Sistema Acuífero Termal en el área de estudio se encuentra sometido a un gradiente geotérmico natural consecuente de la profundización de los niveles de aporte comprendido entre $0,022 - 0,024^{\circ}C/m$ y se estima una velocidad real de flujo horizontal estimada entre $1,43.10^{-5} - 1,79.10^{-5}$ cm/seg varios órdenes de magnitud menor que su velocidad máxima de Darcy estimada en $7,38.10^{-2}$ cm/seg.

La temperaturas medias en boca de pozo y las calculadas a partir del gradiente geotérmico considerando la profundidad del techo y base de los acuíferos que componen el Sistema Acuífero Termal presentadas, se encuentran entre $40-60^{\circ}C$. Esto permite clasificar al Sistema Acuífero Termal como de muy baja entalpía y líquido-dominante. La poca posibilidad de transferencia del calor restringe su uso, para el aprovechamiento del calor en su uso directo sobre la agricultura.

6. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ARAUJO, L.M., A.B. FRANCA Y P.E. POTTER, 1995.

Acuífero Gigante del Mercosur (Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay: Mapas Hidrogeológicos de las Formaciones Botucatu, Piramboia, Rosario do Sul, Buena Vista, Misiones y Tacuarembó. PETROBRAS-UFPR., Brasil.

BIGARELLA, J. Y R. SALAMUNI, 1964.

Paleowind patterns in the Botucatu sandstone (Triassic-Jurassic) of Brazil and Uruguay. En: Nairn, A. (Ed.)

BONORINO, A., G., 1988.

Geohidrología del Sistema Termal Profundo de la Región de Bahía Blanca., Universidad Nacional del Sur, Dpto. de Geología, Tesis Doctoral.

BOSSI, J. Y R. NAVARRO, 1982.

Los "granitos negros" (microgabros) del Eocambriano del Uruguay. 5º Congreso Latinoamericano de Geología Actas 2: 23-35, Buenos Aires

- BOSSI, J., 1966.
Geología del Uruguay. Universidad de la República, Departamento de Publicaciones, Colección Ciencias 2: 1-470, Montevideo
- CARDONA BENAVIDEZ, A., 1996.
Toma de Muestras de Aguas Subterráneas. Cursos de hidrogeología de campo. San Luis de Potosí, México.
- CATTANEO, O 1992.
Experiencias sobre el Manejo del acuífero infrabasáltico en Uruguay y su proyección dentro de los países del Mercosur. O.S.E. Congreso Latinoamericano, Mérida, Venezuela.
- CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES (CFI-EASNE), 1972.
Contribución al Estudio Geohidrológico de la Región NE en la Prov. de Buenos Aires. Serie Técnica 24., Buenos Aires, Argentina.
- INTA, 1970.
Convenio UNNE-INTA. Mapa de Suelos de la Provincia de Corrientes. Primera Etapa, Impreso UNNE, vol. 1 y 2., Corrientes, Argentina.
- CUSTODIO E.Y M.R. LLAMAS, 1983.
Hidrología Subterránea. Editorial Omega, Segunda Edición, Tomos I y II. Barcelona, España.
- DELLEPERE, A. 1992.
Datación por Carbono 14 de las Aguas Termales del Acuífero Tacuarembó (Botucatu) Uruguay. 2º Congreso Geológico del Uruguay. Actas I: pag 307-313.
- DINAMIGE, 1986.
Dirección Nacional de Minería y Geología. Carta Hidrogeológica del Uruguay, Escala 1:2.000.000, Ministerio de Industria y Energía, Dirección Nacional de Minería y Geología de la República Oriental del Uruguay, 1ra edición
- ELLIS, A. J. Y W.A.J. MANON, 1977.
Chemistry and geothermal System. Editorial J. Denton, Academic Press. London.
- FALCONER, J., 1931.
Terrenos gondwánicos del Departamento de Tacuarembó: Memoria explicativa del Mapa Geológico. Instituto de Geología y Perforaciones del Uruguay Boletín 15: 1-17, Montevideo
- FERRANDO, L. Y R. ANDREIS, 1986.
Nueva estratigrafía en el Gondwana de Uruguay. Ier. Congreso Latinoamericano de Hidrocarburos I: 295-323, Buenos Aires.
- FRESINA M., M. GUARINO, 1997.
Muestreo de Aguas Subterráneas su Importancia para la Confiabilidad en los Resultados de los Análisis Físicoquímicos y Bacteriológicos. Partido de Escobar, Argentina. VIII Congreso Geológico Chileno, Actas Vol I. Sección 4, pag: 690-695.
- GONZAGA DE CAMPOS, L., 1889.
Seção Geológica. Comissao Geográfica e Geológica do Estado de Sao Paulo Anexo Relatório 1889: 21-34, Sao Paulo
- GUSPI, F. 1991.
Rapid Modeling and inversion of Axisymmetric Potencial Fields Using Equivalent Sources. Revista de Geofísica, N°47, pag 19-26. Rosario, Argentina
- HIDROSUD, 1988.
Desarrollo de la Actividad Termal. Informe I., FONADEP, MTU, Uruguay.
- MGAP-MTOP-BIRF, 1995.
Estudio del Acuífero Salto. Programa de Manejo y Recursos Naturales y Desarrollo del Riego, MGAP, MTOP, BIRF y CONSUR. Uruguay.
- MONTAÑO XAVIER, J., M. P. COLLAZO CARABALLO, 1998.
Hidrogeoquímica del sistema Acuífero Guaraní (Uruguay). 2º Congreso Uruguayo de Geología, Sociedad Uruguaya de Geología, Facultad de Ciencias, Actas I, Sección Geología Aplicada, pag: 395-400. Punta del Este Uruguay

MONTAÑO, J., R. CARRION, 1990.

Optimización de la Explotación del Sistema Acuífero Jurásico-Triásico. Tacuarembó-Buena Vista. 6º Congreso de Aguas Subterráneas, Actas Vol I pag: 180-189. Porto Alegre, Brasil.

NICOLLI, H. B., T. O'CONNOR, J. SURUNO, M. L. KOUKHRISKY, M. A. GOMEZ PERAL, L. M. BERTINI, I. M. COHEN, L. I. CORRADI, O. A. BALEANI, E.G ABRIL, 1985.

Geoquímica del Arsénico y otros Oligoelementos en Aguas Subterráneas de la Llanura sudoriental de la Provincia de Córdoba. Academia Nacional de Ciencias, Miscelánea 71, Córdoba, Argentina.

REBOUÇAS, A.C., 1994.

Sistema Acuífero Botucatú no Brasil. Recife, PE. 8º Congreso. Brasileiro de Aguas Subterráneas. ABAS. Actas, Tomo I pag: 500-509.

SALA, J.M. 1975.

Recursos Hídricos, Especial Mención de las Aguas Subterráneas. Relatorio Geología de la Pcia. de Buenos Aires. IV Congreso Geológico Arg. pp. 169 – 193. Bs. As.

SALA, J.M.; González, N. y Kruse, E. 1983.

Generalización Hidrológica de la Provincia de Bs. As. Coloquio Internacional Sobre Hidrología de Grandes Llanuras. Comité Nacional para el Programa Hidrológico Internacional, Olavarría, Argentina.

SALAMUNI, R. Y J. BIGARELLA, 1967.

The Botucatú Formation. Centro Nacional de Pesquisas. En: Bigarella, J., R. Becker e I. Pinto (Ed.) Problems in Brazilian Gondwana Geology: 197-206, Curitiba

SCHÖELLER, H., 1962.

Les Eaux Susouterraines, Editorial Mason, París.

SILVA BUSSO, A. 1997.

Estratigrafía y Correlación de los Niveles Mesozoicos de las Captaciones del Agua Termal de la Región Mesopotámica Argentina y Litoral Uruguayo, Congreso Internacional Sobre Aguas, apartado II-3, UBA, UNESCO, Buenos Aires, Argentina.

SILVA BUSSO, A., A. PAULUCCI, 1997.

Caracterización Química y Actividad Fármaco - Terapéutica de las Aguas de los Acuíferos Ternaes Botucatú (F. Botucatú) y Solari (F. Serra Geral) en la Región Mesopotámica Argentina y Litoral Uruguayo, Congreso Internacional Sobre Aguas, apartado III-8, UBA, UNESCO, Buenos Aires, Argentina.

SILVA BUSSO, A. 1999.

Contribución al Conocimiento Geológico e Hidrogeológico del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental Argentina. Tesis Doctoral, Facultad de Cs. Exáctas y Naturales, UBA (INEDITO).

SILVA BUSSO A., 2000.

Geologic and Hydrogeologic Aspects of the Thermal Aquifer System in Argentine Eastern Chacoparanense Basin. Primer Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas. Abstracts, pag: 134 en CD pag: . Fortaleza, Brasil. ALSHUD.AIH.

SILVA BUSSO, A. Y FERNÁNDEZ GARRASINO C., 2004.

Presencia de las Formaciones Pirambaia y Botucatú (Triásico – Jurásico) en el subsuelo oriental de la Provincia de Entre Ríos. Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina RAGA, (en prensa).

TAHAL, 1986.

Proyecto Agrícola de Riego Basado en la Perforación de Pozos Profundos. Tomo 2, 4 y 5. Tahal Consulting Engineers, ROU.

VILA, F. 1962.

Efecto de la Imanación Invertida en las Anomalías Magnéticas. Boletín de Informaciones Petroleras. YPF. N°346, pag 837-870. Argentina.

WHITE, D. E., 1970.

Geochemistry applied to the discovery, evaluation, and explration of geothermal energy resources. Proc. U.N. Symp. on the Development and Utilization of geothermal resource, Geothermics S.p. iss 2,1 pag: 58-80.



LA SISMICIDAD Y SISMOTECTÓNICA DE AMÉRICA DEL SUR

Suayter L. ⁽¹⁾ Torres de Plaza M. Benítez de Parra L

Resumen

El borde occidental de América del Sur es una de las regiones de mayor actividad sísmica en el mundo. En este continente son frecuentes los terremotos que llegan a alcanzar grandes magnitudes y producen enormes catástrofes con cuantiosas vidas humanas y daños materiales. La zona de subducción de Wadatti y Benioff, que es una franja cambiante en su ángulo de penetración por debajo de la placa sudamericana y se comporta como una falla activa de tipo inversa hasta los 600 km de profundidad.

Palabras clave: Sismicidad – Sismotectónica – Placa de Nazca

Abstract

The western Southamerican border is one of the regions of higher seismic activity throughout the world. In this continent earthquakes are frequent reaching higher magnitudes and causing enormous catastrophes with huge losses of human lives and material damage. The subduction Wadatti and Benioff zone is a changing belt at its penetration angle below the Southamerican plate and it behaves as an inverse-type active fault up to a depth of 600 km.

1. SISMICIDAD

La región andina desde Colombia a Tierra del Fuego es sacudida permanentemente por grandes terremotos y contribuye aproximadamente con el 15% del total de la energía sísmica disipada en todo el mundo en cada siglo. (Udías 1998).

Se tiene una marcada zonificación sísmica, comprobada por numerosos autores, en base a perfiles sismotectónicos, que pueden definirse a grandes rasgos de la siguiente manera:

1. Los hipocentros de los terremotos son superficiales en la zona costera, aumentando su profundidad hacia el interior del continente, donde el plano de Wadatti-Benioff juega un papel importante, en el ángulo de subducción.

2. Los focos de mayor profundidad, se situarían entre los 64° y 65° de longitud oeste entre los 500 a 630 km de profundidad. Se debe destacar que Chile es una región asolada de manera continua por grandes terremotos, que acompañados de maremotos y actividades volcánicas.

Entregado: 14 de Setiembre de 2003 • Aceptado: 18 de Octubre de 2003

¹Instituto de Riesgo Geológico y Sistematización Territorial (IRGYST) de la Fac. de Cs. Naturales e Inst. M. Lillo - UNT

⁽¹⁾ Juan L. Nougués 1604 (4000) Tucumán -
matcat@csnat.unt.edu.ar

En 1960, todo Chile fue sacudido por una serie de terremotos, cuya duración se extendió por más de un año. El terremoto principal fue de magnitud 8,5, y estuvo acompañado de actividad volcánica y un importante maremoto. El área cubierta por la actividad sísmica se enmarcó en una extensión de unos mil kilómetros a lo largo de la costa. Al sur de Chile la placa del Pacífico se comporta de manera inversa, en vez de tener el mecanismo de subducción, la corteza oceánica cabalga sobre la placa continental, este mecanismo se conoce como **OBDUCCIÓN**.

En Argentina la parte más afectada por los terremotos se encuentra en el interior, afectando principalmente a las provincias de Mendoza, San Juan y La Rioja, consideradas como las de mayor sismicidad en el territorio argentino.

2. SISMOTECTÓNICA

La Fig.1 y Fig. 2, explican pedagógicamente la posición de los hipocentros en América Central y del Sur en el período 1970 – 1995 con magnitudes superiores a 4, con profundidades que no superan los 40 km. Entre las placas que afectan América Central y del Sur, el choque más claro, es el que se produce entre la placa de Nazca y la Sudamericana. (Molnar and Sykes 1969; Araujo y Suárez 1994; Valiás 1998).

Esta colisión de una placa oceánica con una continental, ha dado lugar a un proceso de subducción de la placa oceánica y la formación de la Cordillera de los Andes.

Según la mayoría de los autores y nuestras propias investigaciones la situación en el margen entre la placa de Nazca y el borde occidental de la placa sudamericana es muy compleja.

En la Cordillera de los Andes no se dan fuertes cabalgamientos de los sedimentos, sino que el proceso de subducción de la placa oceánica ha ido formando a lo largo del tiempo una serie de arcos volcánicos en el interior de la placa continental. Estos arcos volcánicos están situados cada vez más al interior, formados por la ascensión del magma desde la placa subducida.

Consecuencia de esta ascensión de magma es el progresivo engrosamiento de la corteza que llega a espesores de hasta 70 km con el plegamiento de los sedimentos.

La subducción en la República Argentina llega en este margen hasta los 650 km de profundidad (Suayter 1984).

Sismicidad de Chile y Argentina

La Fig.3, muestra claramente la ubicación de los epicentros en Chile y Argentina durante el período 1962 - 1995. (Engdahl et al 1995, 1998)

En Chile la recurrencia de un terremoto superior a 8 M, se produce cada 10 años y en Argentina aunque con magnitudes menores cada 20 años.

Cuando se estudia el modelo de la tectónica de placa, en la zona de subducción debemos distinguir dos tipos de fallas activas.

1. La de flexura, en la placa de Nazca, antes de descender bajo la placa Americana, que da un mecanismo de fallas directas o normales.

2. La zona de descenso de la placa de Nazca, que da un mecanismo de fallas inversas.

Baranzangi e Isaac (1976) demostraron que la zona de subducción de la placa de Nazca, se divide en 5 (cinco) segmentos de longitud variable, que poseen ángulos de subducción muy diferentes. Suayter (1984) en el territorio argentino entre los 22° a 28° de latitud sur, confirma 4 (cuatro) segmentos separados por grandes lineamientos o megacizallas oblicuas a la estructura andina, que fracturaron a la placa de Nazca. (Fig. 4)

Fig. 5 nos da curvas de nivel de la zona de Benioff, donde se puede apreciar, la relación entre la sismicidad y la tectónica, de fallas activas sismogénicas, en profundidad, en donde los últimos estudios confirman la existencia de una franja de gran deformación, que afecta la Cordillera Oriental y las Sierras Subandinas en el territorio argentino, sumando a ello los terremotos de intraplacas superficiales, que probablemente estén conectados a los terremotos profundos de cota -600 km entre los meridianos 65° y 64° de longitud Oeste

Suayter (1984) señala zonas de silencio sísmico entre los 300 a 600 km de profundidad, que también fueron confirmados por recientes estudios (Madariaga 1998).

Cabe preguntarse si hay una ruptura de la placa o hay otros mecanismos, que confluyen, como el bajo ángulo de penetración de la placa de Nazca ya estudiada por numerosos autores o un cambio en las propiedades físico-químicas de las rocas del manto, que pueden influir en las celdas convectivas y provocar la fragmentación de la placa (hipótesis actualmente en estudio). En conclusión podemos afirmar que la segmentación es una característica esencial de la sismicidad en la zona de subducción que afecta a Chile y Argentina.

El origen mecánico o geofísico de estas fragmentaciones de la zona de subducción, ha sido objeto de numerosas especulaciones. En particular para nosotros los lineamientos o megacizallas (Fig.6), oblicuos a la estructura andina podrían ser los responsables de esa fragmentación, por lo tanto hipotéticamente tendrían sus raíces profundas, pero no podemos verificarlo por el momento, aunque la hipótesis queda planteada.

Sismicidad de intraplaca

La sismicidad intraplaca se concentra en las cadenas orogénicas de la Cordillera Oriental y de las Sierras Subandinas en la provincia de Salta y en el Sistema Burruyaquense en la provincia de Tucumán, donde se concentran sismos superficiales de hasta 30km de profundidad.

Aunque debemos señalar, que no se conoce bien la sismicidad superficial por falta de una red de instrumentación adecuada y se debe recurrir a centros de investigación lejanos (Volponi 1950), afirma que superando los 600 km de la fuente sísmica, la ubicación de los epicentros se hace imprecisa.

En los terremotos de intraplaca, de acuerdo a numerosos autores, se conjugan dos mecanismos, la tensión y la compresión, produciendo los sismos por la acción de fallas normales o directas y fallas inversas o de empuje. Lo que puede inferirse, es que las zonas de tensión, generan manifestaciones de volcanes de agua o manifestaciones termales alineadas meridionalmente, entre los 64° a 65° de Longitud Oeste, como ser Termas

de Río Hondo (Tucumán - Santiago del Estero), Rosario de la Frontera (Salta) y Termas de Reyes (Jujuy), producto combinado de la tectónica, vulcanismo, sismicidad y energía geotérmica que provoca un adelgazamiento cortical, donde cuerpos máficos del manto superior, se encuentran próximos a la superficie, a partir de los 10 km de profundidad.

Es probable que estemos ante la presencia de un proto-rif ya que actúan esfuerzos tensionales ligados a las fuentes de aguas termales. Por otro lado en los límites de las Sierras Subandinas y del Sistema Burruyaquense, se levantan en la llanura conos volcánicos de andesitas básicas, como se puede observar en el Cerro Cantero, en San Lorenzo y Antilla en el Sud de la Provincia de Salta.

Las "Lagunas sísmicas" o "silencios sísmicos"

La sismicidad de las "lagunas sísmicas" es aún desconocida. Sin un conocimiento acabado de la sismicidad en función del tiempo y del espacio, hay muy

poca esperanza que una vez que la laguna sísmica haya sido identificada, se pueda realizar una estimación exacta de la peligrosidad sísmica de la misma; y mucho menos predecir.

Las Lagunas sísmicas pueden cargarse de energía lentamente, durante el periodo intersísmico, que puede durar 60 años o más, y descargar violentamente las tensiones acumuladas en un breve periodo, ya sea en uno o varios terremotos, como fue estudiado por numerosos autores.

Lo que se tiene en claro, es que los terremotos no cumplen con leyes de repetibilidad espacial o periodicidad temporal. Ellos migran temporalmente y espacialmente, por el comportamiento de las fallas activas y sobre todo por la movilidad de las placas.

Los terremotos tampoco se repiten de igual manera y que nada parece ratificar la idea que un terremoto libera completamente su energía, almacenada en la zona.

FIGURA 1. ESQUEMA DE LAS PLACAS LITOSFÉRICAS EN LA REGIÓN DE AMÉRICA CENTRAL Y DEL SUD Y SU MOVIMIENTO RELATIVO

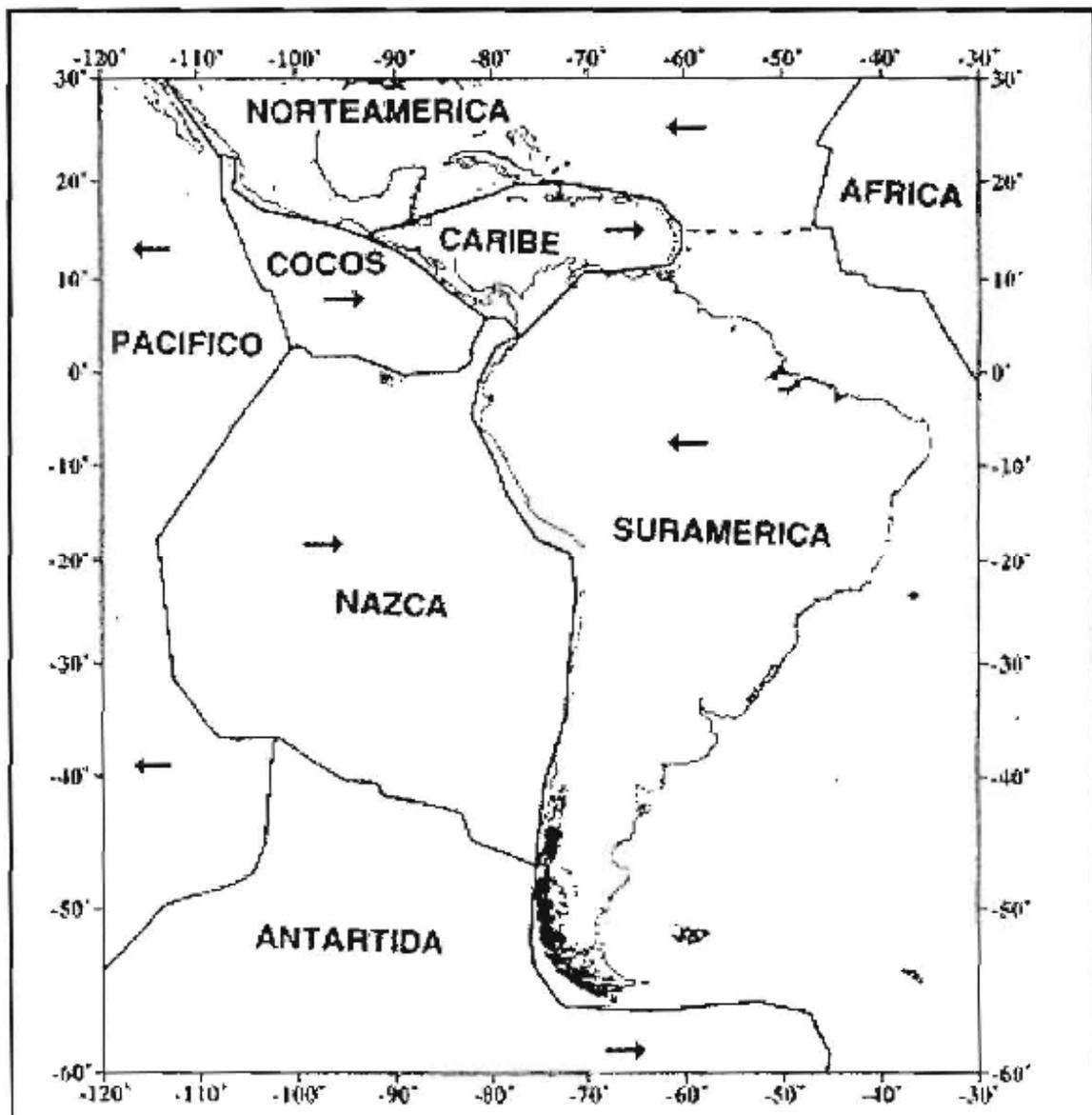


FIGURA 2. SISMICIDAD DE AMÉRICA CENTRAL Y DEL SUD (1970-1995, M>4) - NEIC, U.S. GEOLOGICAL SURVEY

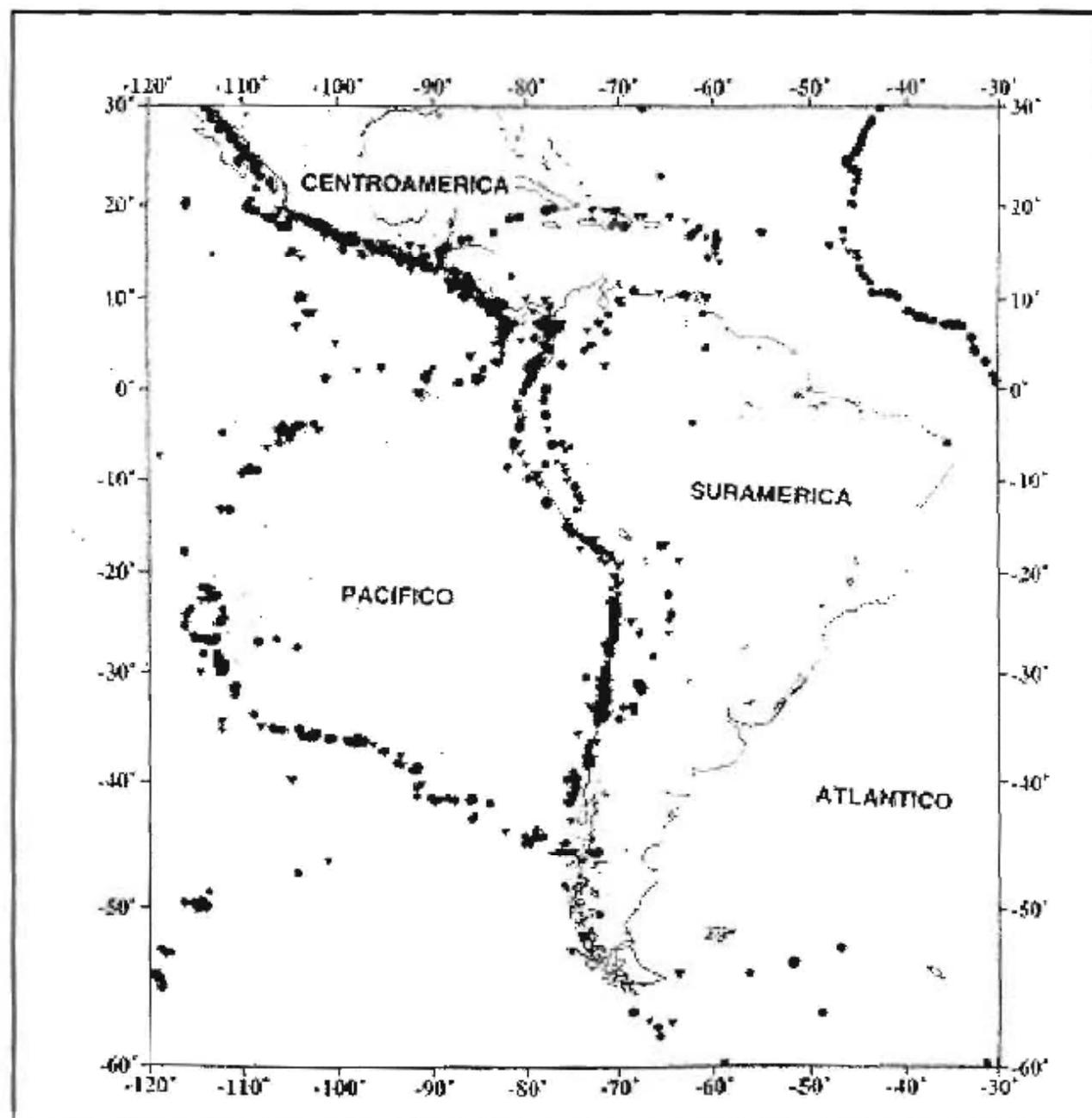


FIGURA 3. SISMICIDAD DE CHILE Y ARGENTINA 1962-1995. SISMOS LOCALIZADOS USANDO DATOS DE FASE DE PROFUNDIDAD

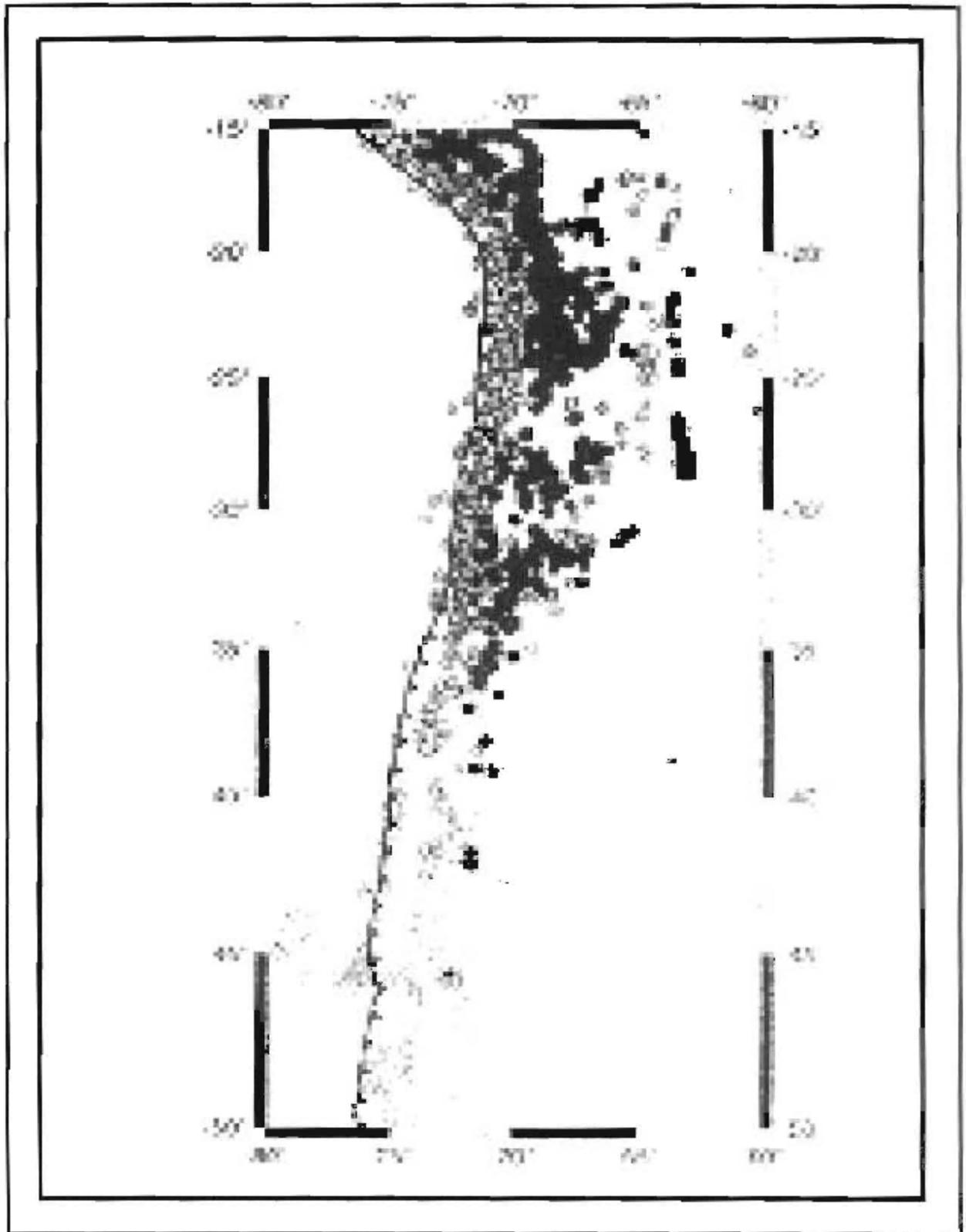


FIGURA 4. SEGMENTACION DE LA PLACA DE NAZCA

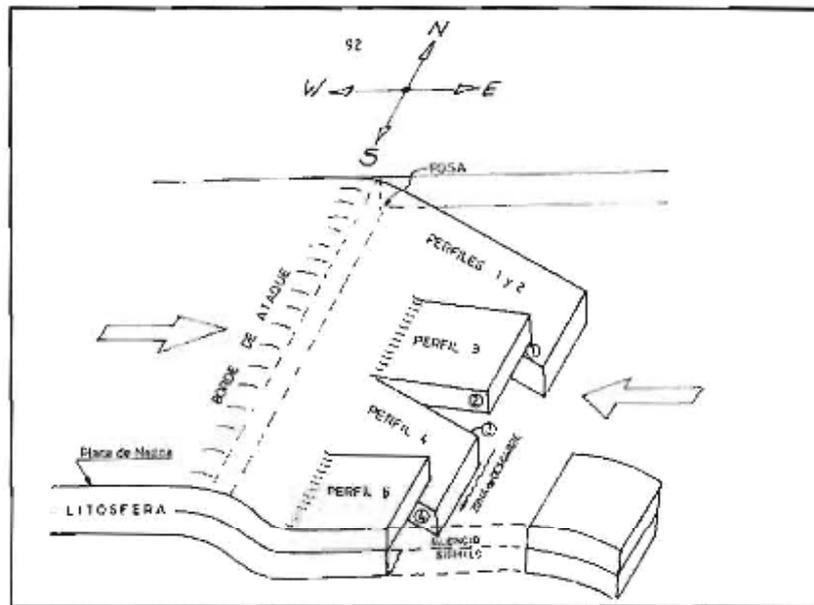


FIGURA 5. CURVAS DE NIVEL DE LA ZONA DE BENIOFF BAJO CHILE DETERMINADA A PARTIR DE LA SISMICIDAD RELOCALIZADA POR ENGD AHL et al. (1998)

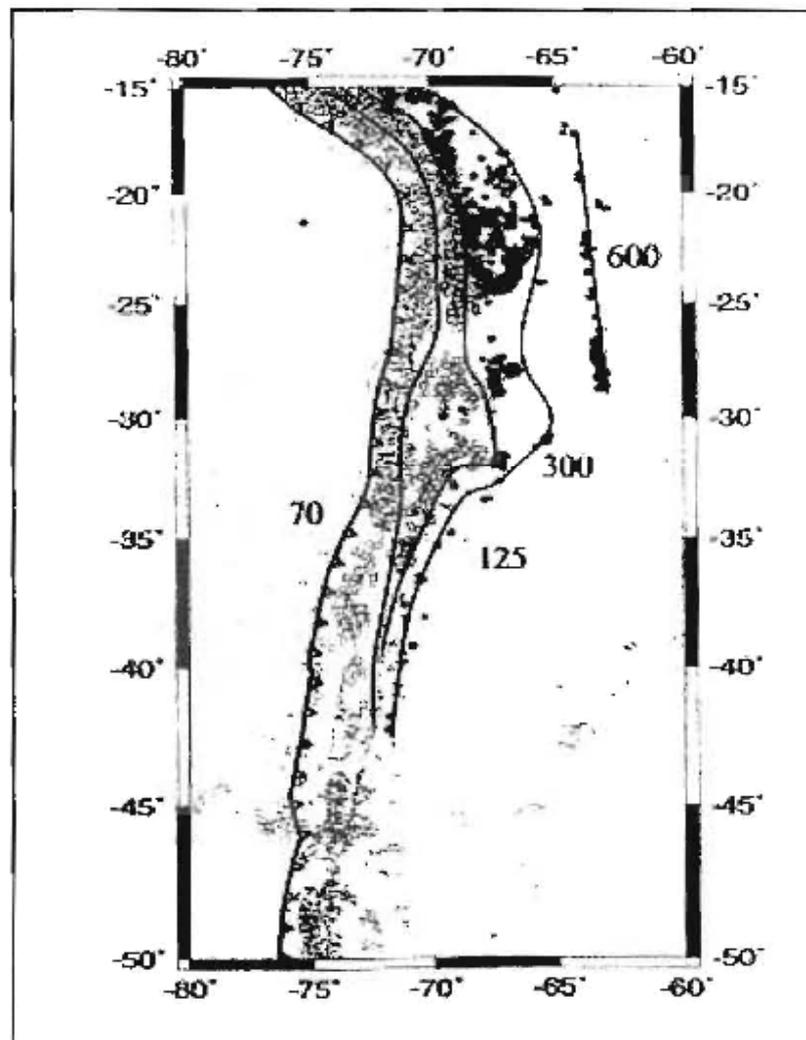
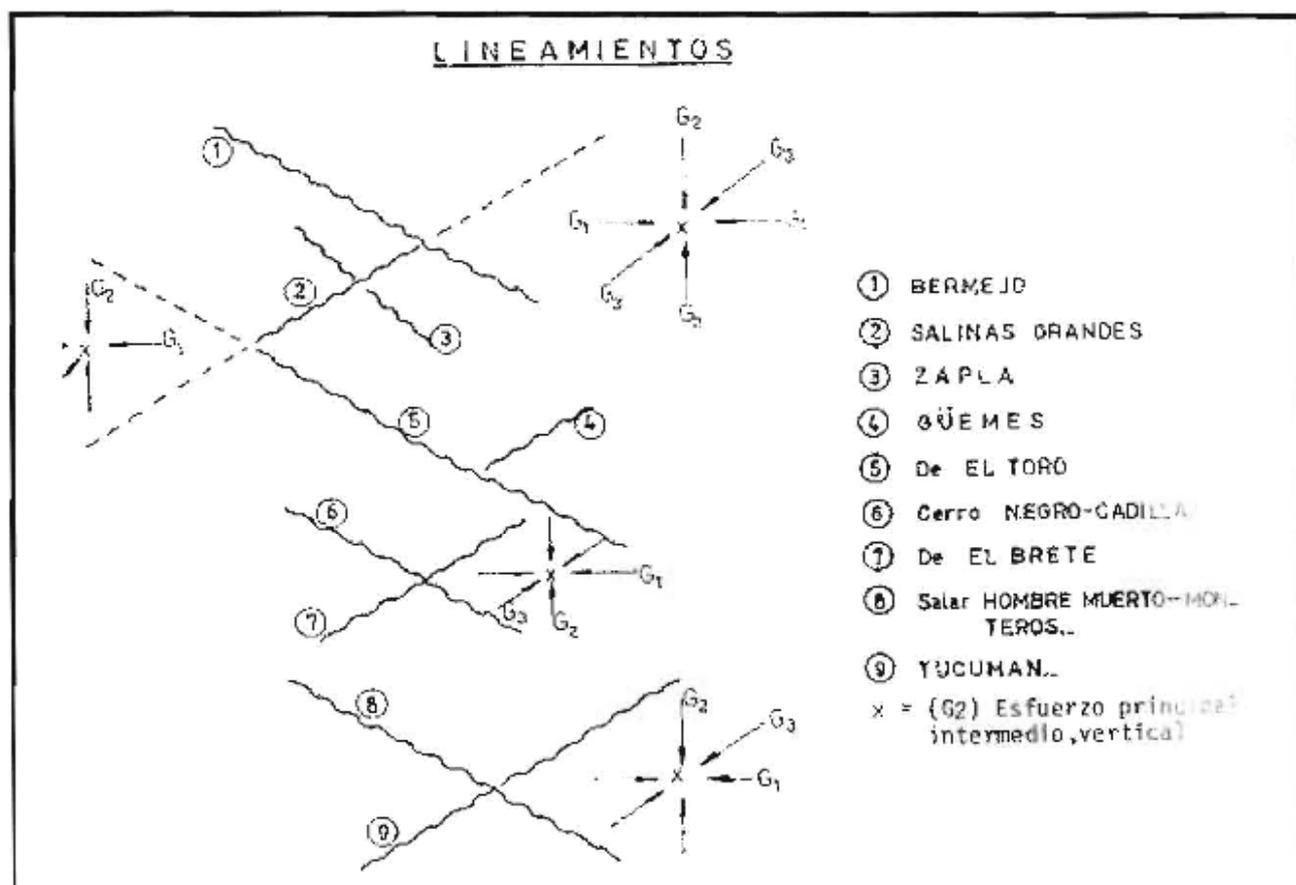


FIGURA 6. LINEAMIENTOS O MEGACIZALLAS OBLICUOS



3. CONCLUSION

La República Argentina, sobre todo el sector de los Andes, está dominado por la sismicidad de Chile, que es uno de los países más sísmicos del planeta. La placa de Nazca, a pesar de estar fragmentada, no por ello, deja de ser la causa de numerosos sismos destructivos, desde que se tuvo conocimiento

En base a ese conocimiento se puede tener una estadística sísmica de los Andes Occidentales y Orientales.

Todo esto nos lleva a pensar, que para profundizar en el conocimiento de dicha actividad en nuestro país, se requieren estudios detallados que sólo serán posibles con una red de monitoreo permanente y confiable, lo que por el momento no existe.

4. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ARAUJO, M. and SUAREZ, G. (1994)

Geometry and state of stress of the subducted Nazca plate beneath central Chile and Argentina: Evidence from teleseismic data. *GEO Phys. J. Int.* 116, 283-303

BARANZANGI, M. and ISAKS, B. (1976)

Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *GEOLOGY*, 4, 686-692

ENGDÄHL, E. R. R. D. VAN DER HILST and J. B. – Imaging of subducted lithosphere beneath South America. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2317-2320, 1995

MADARIAGA, R. (1998)

Sismicidad de Chile – Física de la tierra. Nº 10. 221-258

SUAYTER, L. (1984)

Las relaciones entre la tectónica y la sismicidad entre los paralelos 22° a 28° latitud Sud y los meridianos 64° a 68° de longitud Oeste. Tesis Doctoral. Inédita. Facultad de Cs. Naturales UNT Argentina

UDIAS, A. (1998)

Sismicidad y sismotectónica de América Central y del Sud. Física de la tierra. N° 10, 11-17.



ENSAYOS TRIAXIALES EN ROCAS MODELIZACION DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Néstor Vendramini¹ - Arcadio Niell²

Resumen

Se ha modelizado un tratamiento de tensiones principales de rotura para rocas, obtenidas a partir de ensayos triaxiales realizados sobre diferentes litotipos, que incluye el clásico análisis lineal apto para cierto tipo de rocas débiles y otros no lineales que incorporan ecuaciones constitutivas a la clásica de Hoek & Brown. De esta forma se tiende a optimizar el ajuste en los planos (s1-s3) y (s-t) calculando el error medio cuadrático como estimador de ajuste y generando las tablas numéricas y gráficos correspondientes.

1. METODOLOGÍA

El análisis implementado permite facilidades para el cálculo considerando el aspecto numérico y gráfico a partir de los datos de input experimentales.

COMPORTAMIENTO LINEAL

Para el tratamiento de datos correspondientes a rocas débiles, como lo son generalmente las sedimentitas friables de poco nivel de diagénesis y con diferentes propiedades mecánicas variables de acuerdo al grado de saturación, se desarrolló un ajuste lineal de los datos de tensiones de rotura (σ_1) en función de tensiones de confinamiento (σ_3). Además, determina la ley que vincula la tensión normal (σ) con la tensión de corte (τ), como ecuación de la envolvente de círculos de Mohr. En ambos casos confecciona los gráficos correspondientes.

La ley lineal de ajuste tiene la forma

$$(1) \quad \sigma_1 = \alpha \cdot \sigma_3 + b$$

Los coeficientes se determinan aplicando el criterio de cuadrados mínimos al conjunto de pares de valores (σ_3, σ_1) obtenidos de los ensayos. Además se calcula el coeficiente de determinación lineal (r^2).

La ecuación de la envolvente de círculos de Mohr que resulta del ajuste es la siguiente:

$$(2) \quad r = \frac{(\alpha - b) \sigma + b}{r = 2\sqrt{\alpha}}$$

Los valores (σ_3, σ_1) antedichos corresponden a las tensiones totales. Se incorpora, como opción, la posterior aplicación del mismo procedimiento de cálculo, a las tensiones efectivas, en este caso los datos son temas de valores (σ_3, σ_1, u) y las tensiones efectivas son pares ($\sigma_3 - u, \sigma_1 - u$).

Entregado: 1 de Setiembre de 2004 • Aceptado: 7 de Octubre de 2004

¹ Dto. de Geología, Facultad de Cs. Exactas Físicas y Naturales U.N.C.

² Fa. M.A.F. U.N.C.

COMPORTAMIENTO NO LINEAL

La Modelización de los resultados de ensayos triaxiales para rocas contempló la evaluación de resultados de ensayos correspondientes a diferentes tipos de rocas cristalinas, ígneas y metamórficas de nuestro país. De este modo se estructuraron distintas ecuaciones constitutivas a fin de lograr un adecuado ajuste para distintos tipos litológicos, incluyendo el cálculo del error medio cuadrático como estimador.

Para realizar una descripción unificada de las distintas leyes adoptadas, partiremos de la siguiente expresión general:

$$(3) \quad \sigma_1 = \alpha \cdot \sigma_3 + p\sigma_3 + q$$

De aquí resultan en particular las siguientes leyes:

L.1: Lineal: $p = 0$ Queda $\sigma_1 = \alpha \cdot \sigma_3 + \sqrt{q}$, lo cual coincide con la fórmula del tratamiento para rocas débiles $b = \sqrt{q}$

L.2: Hoek (linealizada): $\alpha = 1$. Queda,

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{p\sigma_3 + q}$$

donde los parámetros se calculan por el siguiente proceso.

Se define $x = \sigma_3$, $y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2$; entonces la ley puede escribirse $y = px + q$. Los parámetros p y q se determinan por ajuste lineal y a partir de las relaciones $p = m \cdot \sigma_c$, $q = s \cdot \sigma_c^2$, pueden calcularse otros valores que tienen significación práctica:

• Caso de roca intacta: se define $s = 1$. Entonces es

$$(4) \quad \sigma_c = \sqrt{q}, \quad m = \frac{p}{\sigma_c}$$

• Caso de roca fracturada: debe proporcionarse el valor de s como dato. Entonces es

$$(5) \quad s = \frac{q}{\sigma_c^2}, \quad m = \frac{p}{\sigma_c}$$

L. 3: Hoek (optimizada): Es el mismo tipo de ley anterior, variando solamente el procedimiento de determinación de los parámetros p y q . En este caso y en todos los que siguen la determinación se realiza por aplicación del método simplex (Caceci-Cacheris, 1984), minimizando la suma de los cuadrados de las desviaciones.

L. 4: Raíz cuadrada: se obtiene haciendo $\alpha = 0$. Queda

$$\sigma_1 = \sqrt{p\sigma_3 + q}$$

L. 5: Raíz cuadrada y término negativo: $\alpha = -1$. Queda

$$\sigma_1 = -\sigma_3 + \sqrt{p\sigma_3 + q}$$

L. 6: Triparamétrica: Se calculan todos los parámetros de la ley general (3) minimizando la suma de los

de los errores, también por la aplicación del método simplex. Obsérvese que en todas las leyes anteriores la cantidad de parámetros libres era dos, y solamente en este caso es tres (α , p y q).

2. ENVOLVENTE DE CIRCULOS DE MOHR (PLANOS σ - τ).

En todo el desarrollo que sigue tomaremos σ como variable independiente.

A partir de una cierta ley $\sigma_1 = \sigma_1(\sigma_3)$, cada círculo de Mohr se define por su centro de abscisa $c = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ y ordenada 0, y su radio $r = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$.

Nota importante: supondremos siempre $\sigma_1 \geq \sigma_3$.

La ecuación de la familia de círculos es

$$(6) \quad F(\sigma, \tau, \sigma_3) = (c - \sigma)^2 + \tau^2 - r^2 = 0$$

Donde σ_3 aparece como parámetro. Para determinar la envolvente debe primero derivarse con respecto al parámetro:

$$(7) \quad \frac{\delta F}{\delta \sigma_3} = 2(c - \sigma)c' - 2r r' = 0,$$

de donde

$$c'(\sigma) = cc' - r r'$$

y, suponiendo: $c' \neq 0$:

$$\sigma = c - \frac{r'}{c'} r = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + 1} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Operando y simplificando queda

$$(8) \quad \sigma = \frac{(\sigma_1 \sigma_3)'}{\sigma_1' + 1} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 \sigma_1'}{\sigma_1' + 1}$$

Por otra parte, a partir de (ref{seis}):

$$\tau = \sqrt{r^2 (c - \sigma)^2} = \frac{r'}{c'} \sqrt{(c')^2 - (r')^2}$$

de donde finalmente

$$(9) \quad \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1' + 1} \sqrt{\sigma_1'}$$

o también

$$(10) \quad \tau = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma)(\sigma - \sigma_3)}$$

Las expresiones (8) y (9) son las ecuaciones paramétricas de la envolvente de los círculos de Mohr, con carácter general. En cada caso particular deberán sustituirse σ_1 y σ_1' por sus expresiones correspondientes en función de σ_3 , teniendo en cuenta con la ley adoptada.

Por (8), siempre se cumple

$$(11) \quad \sigma'_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma}{\sigma - \sigma_3}$$

A partir de (10), y teniendo en cuenta (11), se obtiene

$$(12) \quad \frac{d\tau}{d\sigma} = \frac{\tau'}{\sigma'} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma}{2\tau}$$

Esta es la pendiente en cada punto de la envolvente de los círculos de Mohr. Tomando su arco tangente se obtiene el ángulo de fricción (ϕ).

Tratándose de una ley con la forma general (3), como lo son las incluidas en el presente estudio, la respectiva derivada tiene la forma

$$(13) \quad \sigma'_1 = \alpha + \frac{p}{2\sqrt{p\sigma_3 + q}}$$

Hechas las sustituciones a partir de (3) y (13) en (8) y (9), las ecuaciones paramétricas de la envolvente de los círculos de Mohr para este tipo de leyes son:

$$(14) \quad \sigma = \frac{p\sigma_3 + 2(p\sigma_3 + q) + \alpha\sigma_3\sqrt{p\sigma_3 + q}}{p + 2(\alpha + 1)\sqrt{p\sigma_3 + q}}$$

$$(15) \quad \tau = \frac{[(\alpha - 1)\sigma_3 + \sqrt{p\sigma_3 + q}]\sqrt{4\alpha(p\sigma_3 + q) + 2p\sqrt{p\sigma_3 + q}}}{p + 2(\alpha + 1)\sqrt{p\sigma_3 + q}}$$

En la práctica no es necesario aplicar la fórmula (15). Una vez calculado por (14), resulta más sencillo utilizar (10) para el cálculo de τ .

Estas expresiones plenamente desarrolladas son las que corresponden a la ley triparamétrica (L.6). Puesto que las leyes anteriores son casos particulares de ésta, las fórmulas podrán en cada caso simplificarse. Así se tiene:

L.1 (lineal). Llamando como antes $b = \sqrt{q}$, queda

$$\sigma = \frac{2\alpha\sigma_3 + b}{\alpha + 1}, \quad \tau = \frac{\sqrt{\alpha}[(\alpha - 1)\sigma_3 + b]}{\alpha + 1}$$

puediendo eliminarse entre ambas ecuaciones para obtener como resultado la ecuación (2)

L. 2 y L. 3 (Hoek):

$$\sigma = \sigma_3 + \frac{2(p\sigma_3 + q)}{p + 4\sqrt{p\sigma_3 + q}}$$

L. 4 (raíz cuadrada):

$$\sigma = \frac{p\sigma_3 + 2(p\sigma_3 + q)}{p + 2\sqrt{p\sigma_3 + q}}$$

L. 5 (raíz cuadrada y término negativo):

$$\sigma = \sigma_3 + \frac{2(p\sigma_3 + q) - 4\sigma_3\sqrt{p\sigma_3 + q}}{p}$$

Por la observación hecha anteriormente, no se han incluido en estos últimos casos las respectivas expresiones de τ , ya que es preferible utilizar (10)

A continuación haremos una comprobación de las ecuaciones de Balmer (1952) referidas a la ley de Hoek (L.2 y L.3). Con ello se verá que dichas ecuaciones resultan como consecuencia directa del desarrollo anterior.

En este caso se tiene $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{p\sigma_3 + q}$

Definimos

$$\tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sqrt{p\sigma_3 + q}}{2}$$

de donde resulta por (13)

$$\sigma'_1 = \alpha + \frac{p}{4\tau_m}$$

y reemplazando en (8) y (9) se obtiene

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{\tau_m^2}{\tau_m + p/8}, \quad \tau = (\sigma - \sigma_3)\sqrt{1 + \frac{p}{4\tau_m}}$$

que son las ecuaciones de Balmer.

3. PROCESAMIENTO DE ENSAYOS (CÁMARA TRIAXIAL TIPO HOEK)

CUARZO ARENISCA (redepositada-terciario) - (Villa Lola - Prov.de Tucumán).

Ley Lineal : $\sigma_1 = 12.04 \cdot \sigma_3 + 16.20$

Ley de Hoek (proceso lineal):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{519.52 \cdot \sigma_3 + 240.21}$$

Error medio cuadrático = 1.532

Ley de Hoek optimizada:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{535.01 \cdot \sigma_3 + 228.81}$$

Error medio cuadrático = 1.094

*) Tensiones (Mpa)

(Graf. 1, 2)

ARENISCAS FORMACION ANTA (Terciario - Prov. de Salta)

Ley Lineal : $\sigma_1 = 4.59 \cdot \sigma_3 + 13.99$

Ley de Hoek (proceso lineal):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{144.28 \cdot \sigma_3 + 242.56}$$

Error medio cuadrático = 4.302

Ley de Hoek optimizada:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{161.79 \cdot \sigma_3 + 198.60}$$

Error medio cuadrático = 3.712

Ley de Raíz Cuadrada: $\sigma_1 = \sqrt{203.94 \cdot \sigma_3 + 244.73}$

Error medio cuadrático = 3.295

*) Tensiones (Mpa)

(Graf.3, 4)

ARENISCAS TERCIARIAS FRIABLES (Las Maderas - Prov. de Jujuy)

Ley Lineal : $\sigma_1 = 6.0740 \cdot \sigma_3 + 744.207$

*) Tensiones (Kpa)

Graf. (5, 6)

FORMACION LUMBRERA (Arenisca, Cretácico Salta)

Ley de Hoek (proceso lineal):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{510.65 \cdot \sigma_3 + 881.57}$$

*) Tensiones (Mpa)

Graf. (7, 8)

BASALTO (Río Limay)

Ley Lineal : $\sigma_1 = 4.63 \cdot \sigma_3 + 81.14$

Ley de Hoek optimizada:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{967.63 \cdot \sigma_3 + 5431.20}$$

Graf.(9, 10)

*) Tensiones (Mpa)

Se utilizó cámara triaxial tipo Hoek y máquinas de ensayo de 100 y 1500 Kn con control de velocidad de carga (ASTM, ISRM), las probetas se obtuvieron con coronas dianantadas diámetro NX y sacatestigo doble, realizándose los estudios en condiciones de humedad natural.

FIGURA 1.

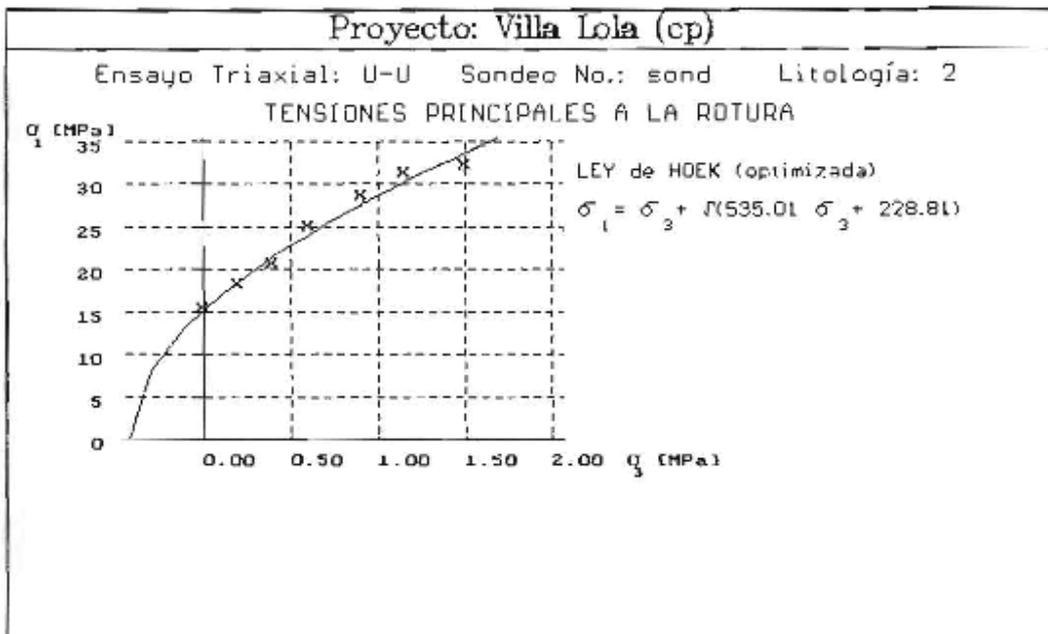


FIGURA 2.

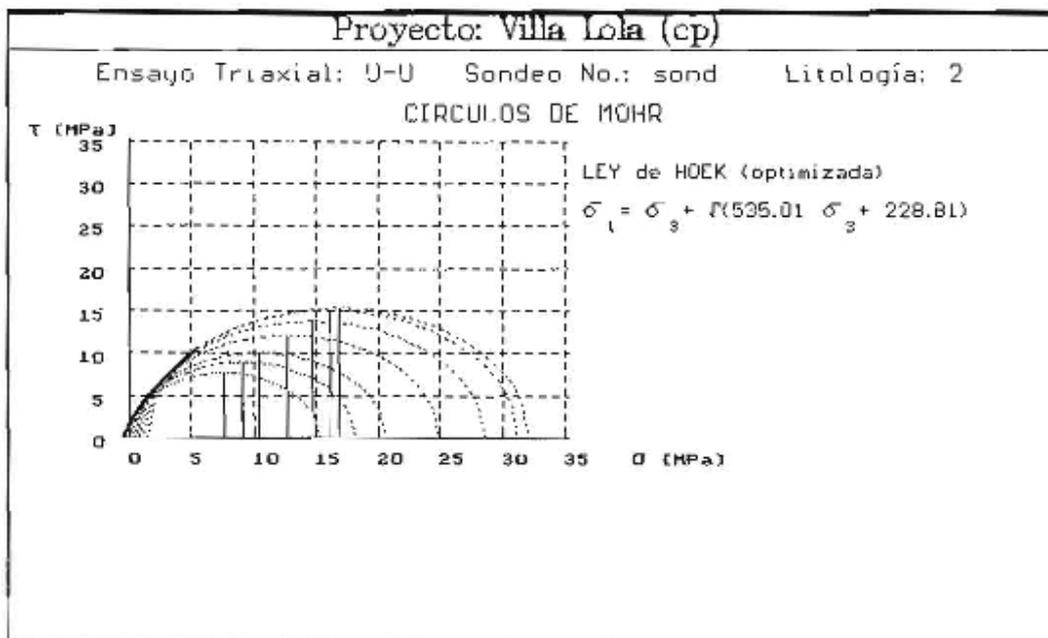


FIGURA 3.

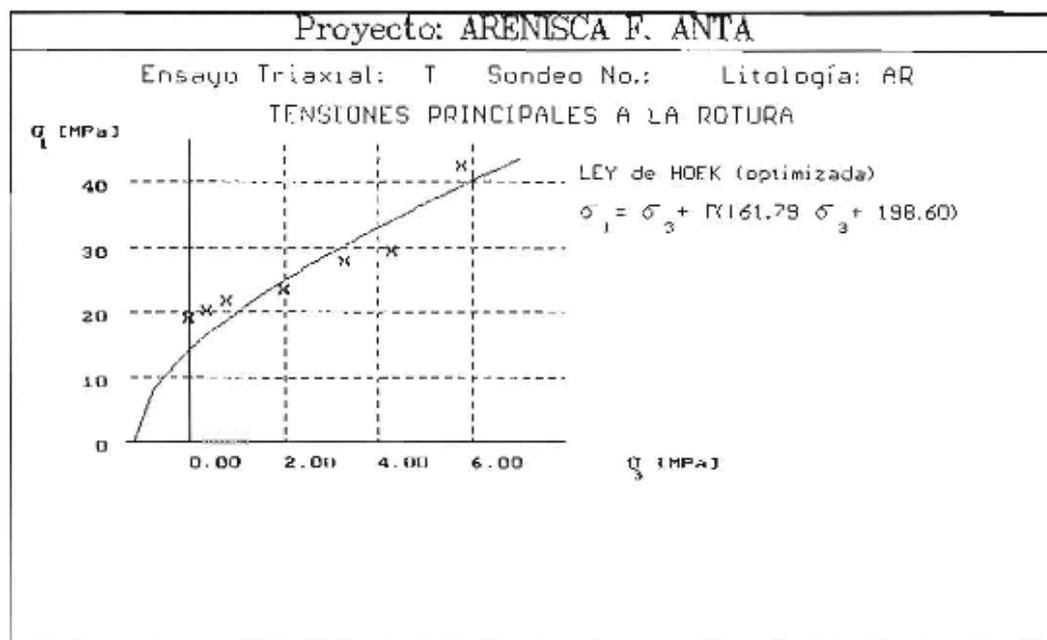


FIGURA 4.

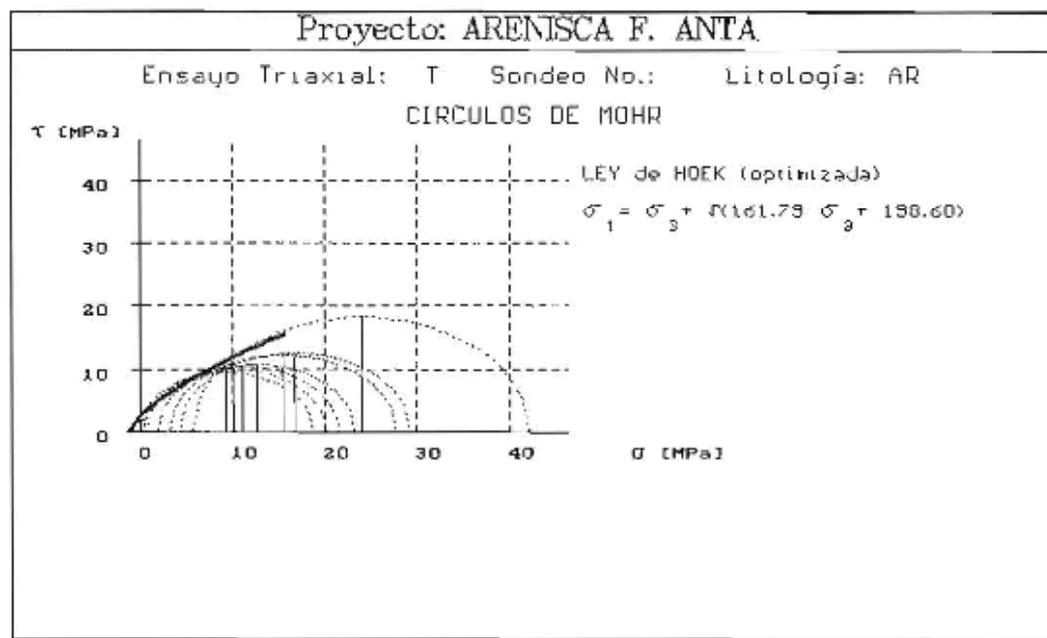


FIGURA 5.

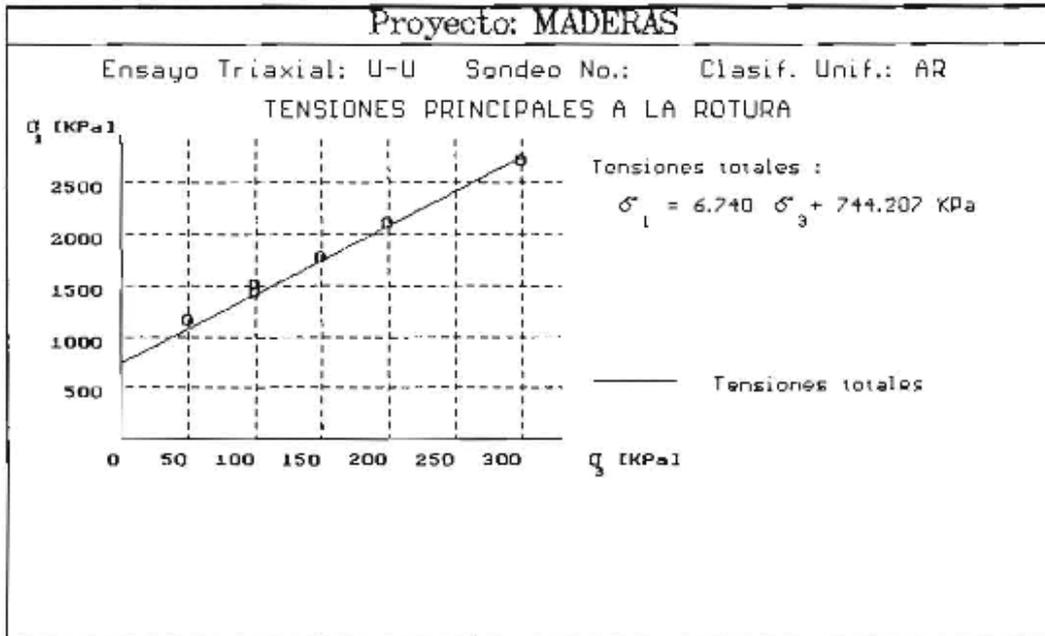


FIGURA 6.

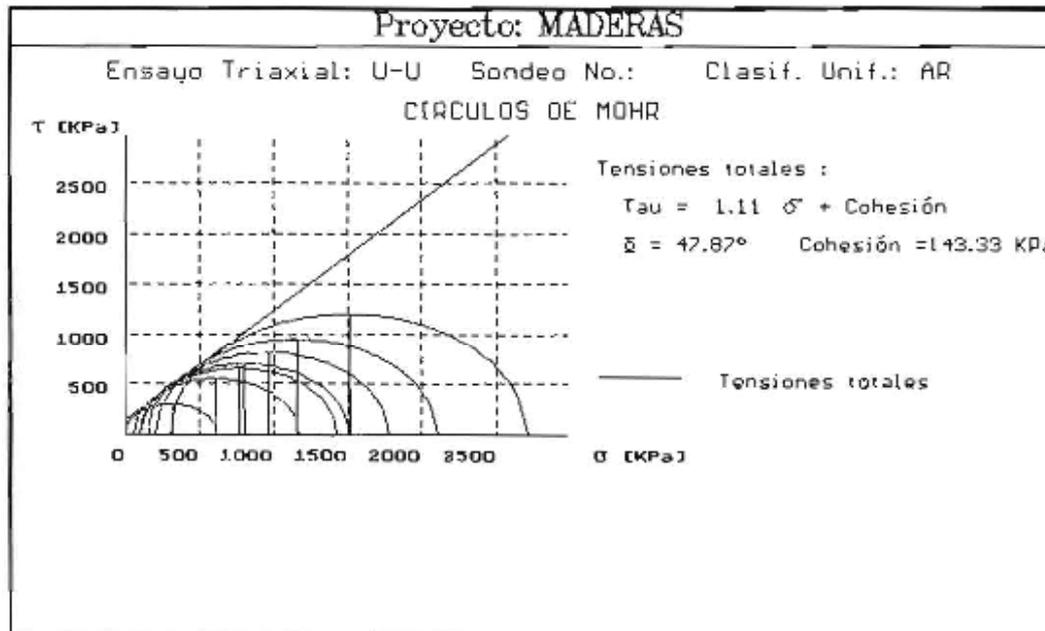


FIGURA 7.

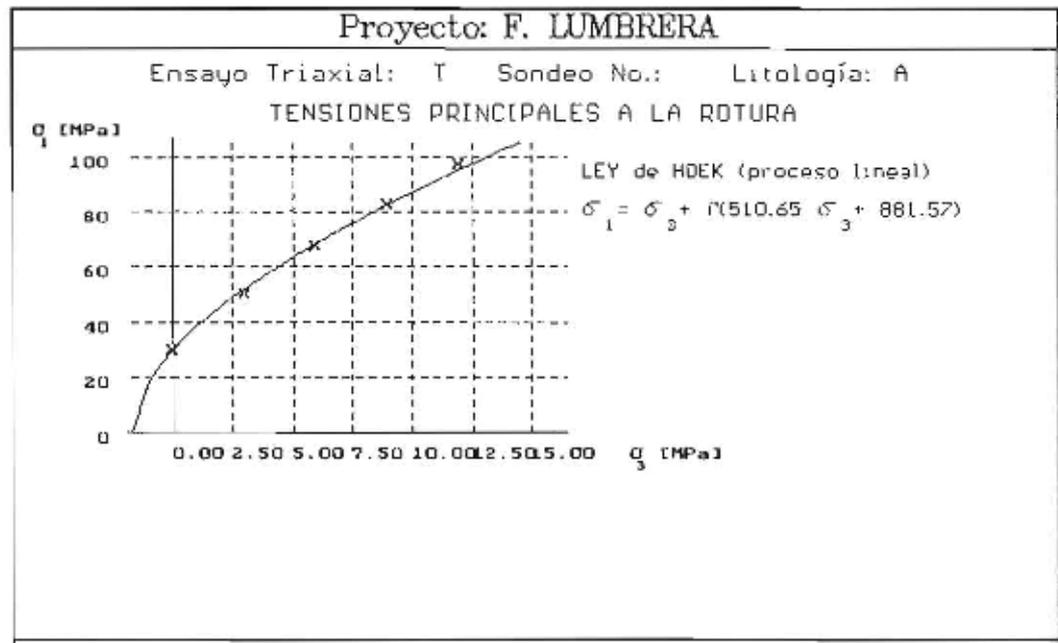


FIGURA 8.

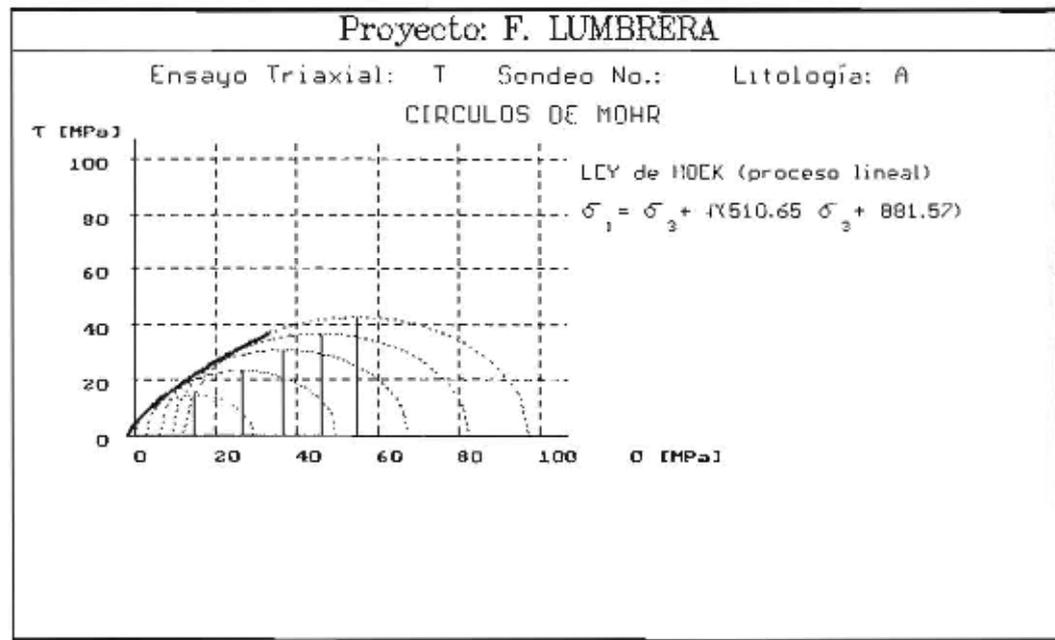


FIGURA 9.

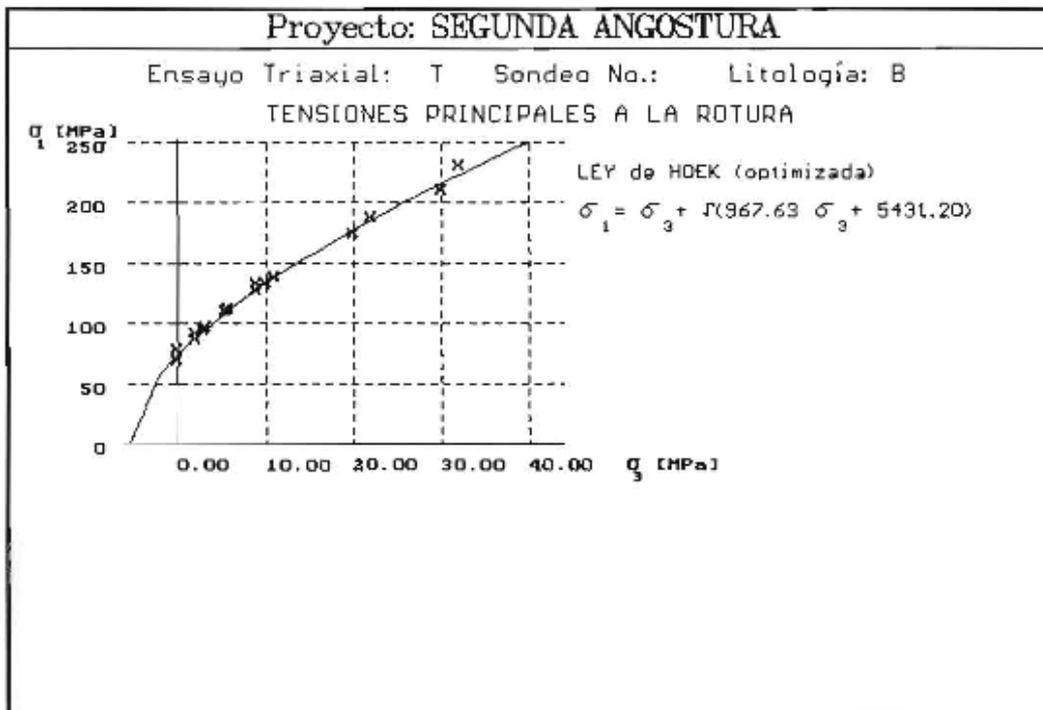
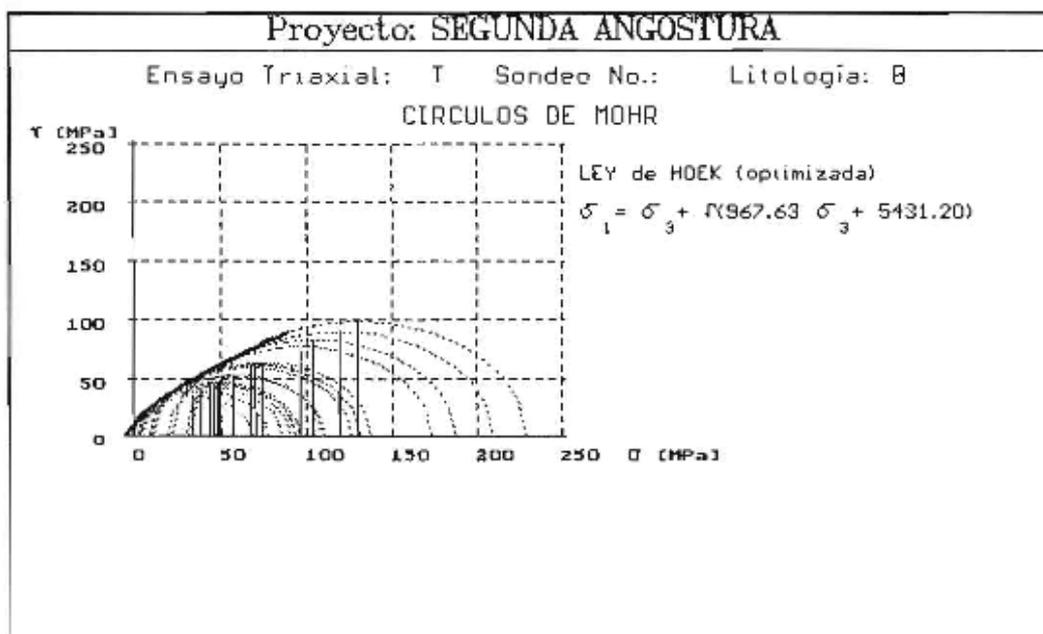


FIGURA 10.



4. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

[HOEK] E. HOEK: An empirical strength criterion and its use in designing slopes and tunnels in heavily jointed weathered rock. (Sixth Southeast Asian Conference on soil engineering, Taiwan, May 1980).

[CACECI] M.CACECI, W. CACHERIS: Fitting curves to data. (Byte, 9, No. 6, May 1984, pp. 340-362).

[HOEK] E. HOEK: Rock Engineering – The Application of Modern Techniques to Underground Desing. (CBMR) Brazilian Rock Mechanics Committee. 1998.



CARTOGRAFÍA GEOCIENTÍFICA APLICADA A LA EVALUACIÓN DE AMENAZAS GEOLÓGICAS EN LA CUENCA DEL RÍO PURMAMARCA (JUJUY)

Ramiro Daniel, Soler¹

Resumen

Se analizan las principales amenazas geológicas en la cuenca hídrica del río Purmamarca, afluente del río Grande de Jujuy, a partir de la aplicación de una metodología integrada de cartografía geocientífica. La cuenca de estudio se desarrolla sobre el flanco montañoso occidental de la quebrada de Humahuaca y constituye un ámbito geográfico altamente favorable para la existencia de diversos procesos geológicos exógenos, muchos de los cuales representan verdaderas amenazas para la infraestructura civil y los pobladores. La elaboración de estrategias de ordenamiento territorial de la cuenca requiere como punto de partida la obtención de información precisa del medio físico en general y geológico en particular. La metodología analítica considera el territorio constituido por la superposición o agregación de una serie de elementos representados mediante una cartografía sectorial individualizada en mapas temáticos y permitió obtener múltiples documentos como el mapa litológico, el mapa de pendientes y el mapa de usos del suelo, entre otros. La metodología utilizada es esencialmente cartográfica y de base geomorfológica e incluye dos aproximaciones, diferentes pero complementarias. La metodología sintética consiste en la delimitación y representación de porciones del territorio con elevada homogeneidad interna (unidades homogéneas) y permitió obtener el mapa de unidades geomorfológicas homogéneas utilizado, junto con los mapas temáticos o la aplicación de métodos específicos, para la elaboración de la cartografía de amenazas. Dicha cartografía, de carácter interpretativo, incluye el mapa de estados erosivos, el mapa de susceptibilidad de movimientos en masa, el mapa de amenaza de flujos densos y el mapa de inundabilidad. El análisis combinado de ambas aproximaciones derivó en la formulación de una serie de recomendaciones básicas para la planificación del uso racional del territorio.

Palabras clave: cartografía, geocientífica, amenaza, Purmamarca.

ABSTRACT

The main geologic hazards are analyzed on the hydric basin of the Purmamarca river, tributary of the Grande de Jujuy river, starting from the application of an integrated methodology of geoscientific cartography. The studied basin is located in western mountainous flank of the Quebrada of Humahuaca and constitutes a highly favorable geographical environment for the existence of diverse exogenous geologic processes, many of

represent true hazard for the civil infrastructure and the residents. The elaboration of strategies of territorial planning of the basin requires as starting point the obtaining of precise information of the physical setting in general and geologic in particular. The analytic methodology considers the territory constituted by the overlapping or aggregation of a series of elements represented by a sectorial cartography individualized in thematic maps and allowed to obtain multiple documents like the lithological map, the slopes map and the land uses map, among others. The used methodology is essentially cartographic and geomorphologic and it includes two approaches, different but complementary. The synthetic methodology consists on the delimitation and representation of portions of the territory with high internal homogeneity (homogeneous units) and allowed to obtain the map of homogeneous geomorphologic units used, together with the thematic maps or the application

Entregado: 31 de Agosto de 2004 • Aceptado: 25 de Octubre de 2004

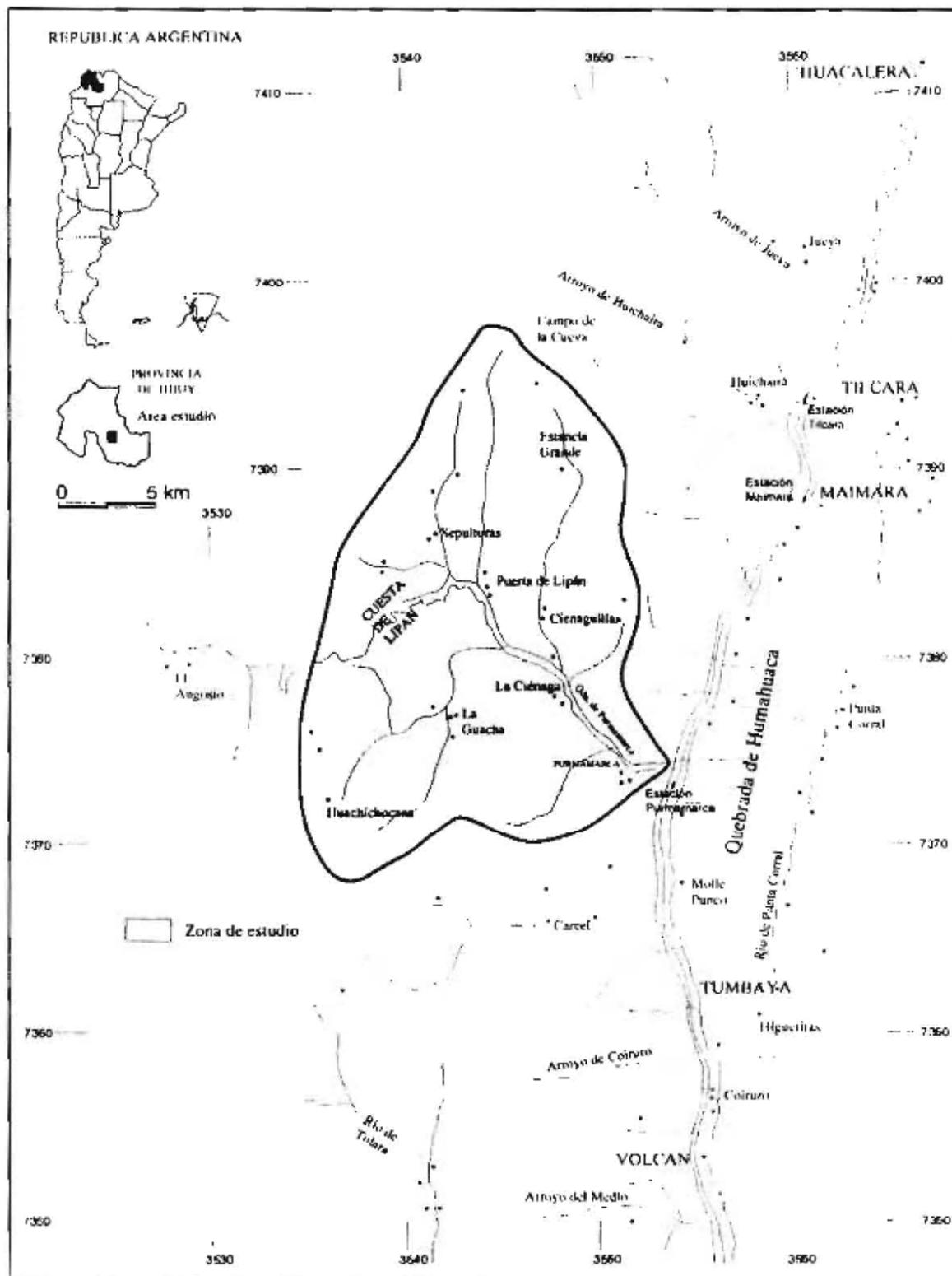
¹ Comisión Nacional de Energía Atómica. Departamento Regional Noroeste.
Av. Bolivia 4 750. CP: 4400. Salta
E-mail: rdsoler@yahoo.com.ar

of specific methods, for the elaboration of the hazard cartography. This cartography, of interpretive character, includes the erosive stages map, the susceptibility of mass movements map, the dense flows hazard map and the flooding hazard map. The combined analysis of both approaches derived in the formulation of a series of basic recommendations for the planning of the rational use of the territory.

1. INTRODUCCION

El río Purmamarca drena la vertiente occidental de la Quebrada de Humahuaca y es uno de los principales afluentes del río Grande de Jujuy. Su cuenca imbrifera tiene una extensión de 596 km² (Fig.1) y muestra, al igual que la mayor parte de los cursos fluviales de la región, un régimen hidrológico marcadamente torrencial.

FIGURA 1. MAPA DE UBICACIÓN



Los mayores caudales se registran durante los meses de verano como respuesta a la distribución estival de las precipitaciones. Al tratarse de una cuenca de alta montaña gran parte de los elementos naturales que componen el medio físico están controlados por la altitud y orientación de los cordones montañosos.

La dinámica geológica externa está dominada por la acción fluvial y la remoción en masa. Estos procesos, y en especial sus fases más intensas, vienen afectando sensiblemente a los habitantes de la cuenca y a sus bienes materiales desde tiempos históricos como así también a las obras de infraestructura civil implantadas durante las últimas décadas. Procesos menos espectaculares, aunque no menos importantes, como la erosión o salinización de suelos o la intervención inadecuada del hombre en el paisaje (impacto visual) resultan de fundamental importancia al momento de analizar y definir estrategias de ordenamiento territorial para la región. En los últimos años las rutas de la zona comenzaron a mostrar un marcado incremento en el tránsito de vehículos, tanto de carga como particulares y de transporte de pasajeros. Asimismo los pueblos de la Quebrada de Humahuaca, debido al incremento de la actividad turística, se vieron estimulados a reforzar su infraestructura de hoteles, paradores y predios para acampar. La consolidación del Paso de Jama como principal vía de comunicación entre el noroeste argentino y el norte de Chile así como el incremento del turismo a nivel nacional constituyen las causas fundamentales de tal situación. La falta de una planificación territorial que tome como punto de partida la caracterización del medio físico ha provocado que sectores fuertemente amenazados por procesos naturales como la llanura de inundación del río Purmamarca hayan sido incorporados al ejido urbano del pueblo.

La demanda creciente de productos regionales (dulces y comidas artesanales) y artesanías provocó también la expansión de las áreas cultivadas las que, al igual que en el caso anterior, suelen ser sectores poco aptos para este tipo de usos. El presente trabajo tiene por objeto evaluar el riesgo de erosión hídrica en la cuenca del río Purmamarca a partir de la aplicación de tres metodologías diferentes y forma parte de un estudio geológico ambiental elaborado por el autor.

2. RASGOS FISIográficos

La Quebrada de Humahuaca es una depresión intermontana de aproximadamente 150 km de longitud, extendida en sentido N-S desde las cercanías de la ciudad de San Salvador de Jujuy, en el sur, hasta la localidad de Tres Cruces en el norte (Fig.1). Su rasgo morfológico más destacable es la asimetría entre la vertiente oriental, de escaso desarrollo areal e hidrográfico y la occidental, más extensa, tendida y drenada. Los principales afluentes occidentales son los ríos Yacoraité, en el norte, Purmamarca y Tumbaya Grande en el sector central y León, Lozano y Reyes hacia el sur. El colector troncal es el río Grande de Jujuy que desagua en el río San Francisco perteneciente al Sistema del Plata (Fig.1).

El río Purmamarca tiene sus nacientes a una altura cercana a los 4.100 m sobre el nivel del mar y desde este punto hasta su desembocadura en el río Grande presenta un desnivel cercano a los 1.700 m. El cordón montañoso que ocupa el sector occidental de su cuenca hídrica corresponde a las estribaciones meridionales de la Sierra Alta, una cadena con orientación N-S y altitudes que pueden superar los 4.000 m. Este elemento orográfico constituye el límite físico entre la Cordillera Oriental y la Puna. Las alturas orográficas descienden progresivamente hacia el E hasta alcanzar el cierre de la cuenca a aproximadamente 2.400 m s.n.m. Entre los picos montañosos más destacados pueden mencionarse: el Cerro Morado de Purmamarca (3.050 m s.n.m), el Cerro del Cobre (3.650 m s.n.m), el Cerro Estancia Grande (3.650 m s.n.m) y el Cerro Lipán (3.550 m s.n.m) en el norte y el cerro Azul Alto (3.800 m s.n.m) hacia el sur.

La orientación predominantemente meridiana de los cordones montañosos define una dirección predominante N-S para los cursos tributarios que ocupan el sector norte como los ríos de las quebradas de Estancia Grande (o Cienaguillas), Lipán y Sepulturas. Esta característica es el reflejo del fuerte control que ejerce la estructura regional -donde son característicos los bloques montañosos limitados por fallas de dirección meridiana- en la configuración del relieve y el drenaje.

Los ríos tributarios ubicados hacia el sur del río Purmamarca muestran algunas diferencias con respecto a aquellos que drenan el sector septentrional. Tales diferencias se relacionan principalmente a la variabilidad en la orientación de los colectores principales, la morfología de las cuencas y el diseño de las redes de drenaje. Así, mientras en el sector norte predominan las cuencas de morfologías alargadas y angostas en la porción sur son características las formas redondeadas. Del mismo modo el típico diseño rectangular de las redes de drenaje del sector norte es reemplazado por diseños dendríticos con una mayor sinuosidad del colector principal lo que respondería a un control relacionado más directamente con la litología que con la estructura regional. Los principales afluentes del sector sur de la cuenca son los ríos de las quebradas de Coquena, Chalala y Huachichocana.

3. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

El clima de la zona es árido, mesotermal, con nulo exceso de agua y baja concentración estival de la eficiencia térmica (Thornthwaite 1948). El régimen térmico está condicionado por la latitud y principalmente por la altitud debido a que a mayor altura la temperatura desciende según un gradiente que es función del contenido de humedad del aire, el mayor albedo y la presencia de vientos (Buitrago y Larrán 1994). Al igual que en muchos sectores del noroeste argentino la información termo-pluviométrica es escasa e incompleta. Los datos de temperatura para la localidad de Purmamarca, obtenidos entre los años 1988 y 1995, arrojan una media anual de 16.3 °C registrándose los valores máximos (19.1 °C) y mínimos (12.1 °C) durante

los meses de diciembre y julio respectivamente. En lo que respecta a las temperaturas extremas, la variación anual de los valores mínimos es más marcada que aquella mostrada por los máximos o medios debido a la escasa variación del goce de radiación, que determina pocas diferencias entre las máximas de verano y las de invierno (Buitrago y Larrán 1998). Las temperaturas mínimas, en cambio, dependen de la irradiación térmica nocturna, que se acentúa marcadamente en invierno debido a la mayor duración de la noche y al menor contenido de humedad en la atmósfera, sumándose a esto, la llegada de masas de aire frío procedentes del sur. La amplitud térmica media oscila entre 4.7 y 25 °C para los meses de julio y diciembre respectivamente. El régimen de heladas aumenta con la altitud y oscila los 200 días al año. El fuerte control del relieve sobre el ingreso de las masas de aire en la región determina que las precipitaciones sean de tipo orográfico con una distribución de tipo monzónico.

La precipitación media anual de Purmamarca es de 96 mm y se concentra entre los meses de noviembre y marzo. Cada ciertos años –en coincidencia con los efectos de perturbaciones del patrón climático global– se registran valores superiores a los 200 mm, debido a la influencia del fenómeno ENSO (El Niño / Southern Oscillation) que provoca sensibles modificaciones tanto en los volúmenes como en la distribución de las precipitaciones en todo el noroeste argentino (Bianchi y Yañez 1993). La influencia del ENSO ha provocado importantes movimientos en masa a lo largo de toda la quebrada de Humahuaca desde tiempos históricos.

La humedad relativa registra los mayores valores durante los meses de otoño debido a la menor temperatura respecto del verano y a la alta humedad remanente luego de la estación lluviosa.

El régimen de vientos –fuertemente condicionado por el relieve– muestra un predominio de las denominadas “brisas de valle y montaña” caracterizadas por un movimiento ascendente de las masas de aire caliente hacia la montaña durante el día y el descenso de brisas frescas por la noche. Otro viento de influencia local es el “viento norte” típicamente seco, cálido y rafagoso. Durante los meses de verano, la entrada de aire húmedo desde el océano Atlántico responde a la circulación de la alta atmósfera y, si bien no registran velocidades de importancia, son los vientos proveedores de las lluvias orográficas de la región. En el invierno ingresan a la región masas de aire polar (secas o húmedas).

4. MARCO GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL

Desde el punto de vista morfoestructural la comarca de estudio pertenece a la provincia geológica de la Cordillera Oriental (Turner y Mon 1979). Esta unidad, que presenta la configuración típica de una faja plegada y corrida, está caracterizada por una tectónica de corrimientos de rumbo N-S los que produjeron estructuras imbricadas y vergentes hacia el E. Se trata de un cinturón orogénico joven, afectado por diferentes fases diastólicas desde el Paleozoico inferior hasta el Cenozoico, las que alcanzaron su mayor intensidad (levantamiento) durante el período Plioceno-Pleistoceno.

Las fases diastólicas precenozoicas han condicionado la distribución y geometría de las unidades litológicas y han influido en la generación de las estructuras más jóvenes.

El Basamento está integrado por las metasedimentitas de bajo grado de la Formación Puncoviscana las que, junto con las unidades cámbricas del Grupo Mesón, forman la mayor parte de los cordones montañosos. El contacto discordante entre ambas unidades se atribuye a la fase Tilcárica (Turner y Méndez 1979) del Ciclo Geotectónico Pampeano.

Las sedimentitas ordovícicas pertenecientes al Grupo Santa Victoria afloran principalmente en el sector sur de la cuenca y sólo localmente en las cabeceras de la quebrada de Estancia Grande. Forman fajas alargadas en sentido submeridional compuestas por lutitas y areniscas arcillosas de coloración amarillenta a gris amarillenta, muy fosilíferas e intensamente diaclasadas.

Con posterioridad a la depositación de éstas unidades se produce un extenso hiato hasta el Cretácico superior, momento en que se inicia la sedimentación de las unidades del Grupo Salta. Este grupo está compuesto por areniscas calcáreas, medianas a gruesas, friables y de color blanquecino (Formación Lecho) y calizas oolíticas, estromatolíticas y margas de coloración amarillenta (Formación Yacoraite) que afloran en el tramo inferior y sobre ambos márgenes de la quebrada de Purmamarca y también en la quebrada de Estancia Grande. En la localidad de Cienaguillas la Formación Lecho se asienta en discordancia sobre unidades ordovícicas (Salfity 1980).

Los depósitos cuaternarios corresponden esencialmente a sucesiones de conglomerados de color rosado, mal seleccionados, entre los que intercalan niveles de areniscas gruesas a conglomerádicas y bancos de pelitas de color verdoso, asociados a abanicos aluviales dominados por fenómenos gravitatorios de sedimentos –esencialmente debris flows– actualmente infuncionales.

Los depósitos modernos, representados por las actuales planicies y abanicos aluviales junto con las espesas formaciones coluviales ubicadas al pie de las vertientes, están compuestos principalmente de bloques, gravas y arenas.

5. LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS EN LA CUENCA DEL RÍO PURMAMARCA

Los problemas ambientales surgen como resultado de la interacción entre las actividades humanas y el medio natural en general y el medio geológico en particular. Según Cendrero (1997) el término amenaza (hazard) expresa la probabilidad de que una zona de la superficie terrestre se vea afectada por una fase paroxísmica de un determinado proceso. El término riesgo (risk) se refiere –según este autor– a la posibilidad de que se produzcan daños para las personas o para sus bienes lo que depende fundamentalmente del grado y tipo de ocupación de la superficie terrestre por parte de las comunidades humanas. Distintas metodologías han sido propuestas para evaluar la amenaza (Cendrero et al., 1987 a y b; Nagarajan et al., 2000, entre otros) y el riesgo geológico (Cendrero et al., 1987 c; Duque et al., 1990, entre otros)

de una determinada región. Algunas utilizan expresiones algebraicas para obtener una cuantificación de los posibles daños en unidades monetarias por año mientras que otras permiten valorar pérdidas potenciales por un lapso de tiempo determinado (Ej. 30 años) (Alfors et al. 1973).

Entre las medidas concretas que se pueden poner en práctica para mitigar los riesgos, se encuentran las de carácter preventivo para evitar la aparición de nuevas situaciones de riesgo, o las de tipo correctivo para eliminar o reducir los riesgos existentes. Tales medidas también pueden clasificarse como no estructurales, es decir, sin intervención física directa o indirecta, o estructurales con la realización de obras o intervenciones materiales de distinto tipo.

Las acciones preventivas -normalmente no estructurales- incluyen por lo general la elaboración de mapas de amenaza y el establecimiento de normas legales o de planeamiento que impidan o limiten la ocupación de zonas potencialmente peligrosas. Por su parte, los mapas de riesgo constituyen una medida no estructural de carácter correctivo ya que pueden ayudar a delimitar las zonas de riesgos y a establecer en cual de ellas se han de implantar medidas estructurales. Una manera económica y eficaz de implantar estas medidas es a través de normas de planeamiento a escala provincial y, sobre todo, municipal (Cendrero et al. 1990; Frances et al. 1990). Las medidas correctivas de carácter estructural, mucho más costosas, son eficaces para determinados procesos (inundaciones, deslizamientos) y dentro de ciertos límites.

La dinámica geológica de la región de Purmamarca y alrededores se caracteriza por una serie de procesos superficiales entre los que merecen destacarse la remoción en masa y la acción fluvial. Estos procesos, y en especial sus fases más intensas, han afectado en el pasado histórico a los habitantes de la cuenca y sus bienes materiales como así también a las obras de infraestructura. El impacto de procesos menos espectaculares aunque no por ello menos riesgosos como la erosión o salinización de los suelos o el impacto de ciertas obras sobre el paisaje (impacto visual) aunque tienen gran importancia en la región y deben ser tomados en cuenta a la hora de la planificación territorial no serán abordados en el presente trabajo. En los últimos años las rutas que recorren la región comenzaron a mostrar un sensible incremento en el tránsito de vehículos de transporte tanto de carga o pasajeros como de particulares. Asimismo los pueblos de la Quebrada de Humahuaca debido al incremento en la cantidad de turistas que visitan la zona se vieron estimulados a reforzar la infraestructura hotelera (hoteles, hospedajes y predios para acampar). Las principales causas que promovieron tal situación fue la consolidación del Paso de Jama como principal vía de comunicación entre el noroeste argentino y el norte de Chile así como el importante crecimiento de la actividad turística en el país. La falta de una planificación territorial de la cuenca que tome como punto de partida la caracterización del medio físico ha provocado que sectores fuertemente amenazados por procesos naturales como la llanura de inundación del río Purmamarca haya sido utilizada para

la construcción de un hotel de dos plantas. Del mismo modo el aumento de la demanda de productos gastronómicos y artesanías elaborados con recursos autóctonos favoreció las actividades agrícolas dentro de la cuenca lo que derivó en la expansión de las áreas cultivadas.

Al igual que en el caso anterior las porciones de territorio incorporadas a la producción agrícola en la mayor parte de los casos suelen ser zonas fuertemente amenazadas por fenómenos geológicos.

6. METODOLOGÍA

En el análisis de las amenazas naturales que afectan la cuenca del río Purmamarca la cartografía, sintética y analítica en el nivel descriptivo y la de amenazas geológicas, en el interpretativo, representan un elemento de fundamental importancia por su practicidad y versatilidad. Por su relativa sencillez puede ser utilizada, además, por personas no especializadas en el tema pero que tienen una participación decisiva en la formulación de criterios de ordenamiento territorial y manejo del medio natural. La metodología utilizada en el análisis puede observarse en el Cuadro 1.

Cartografía básica

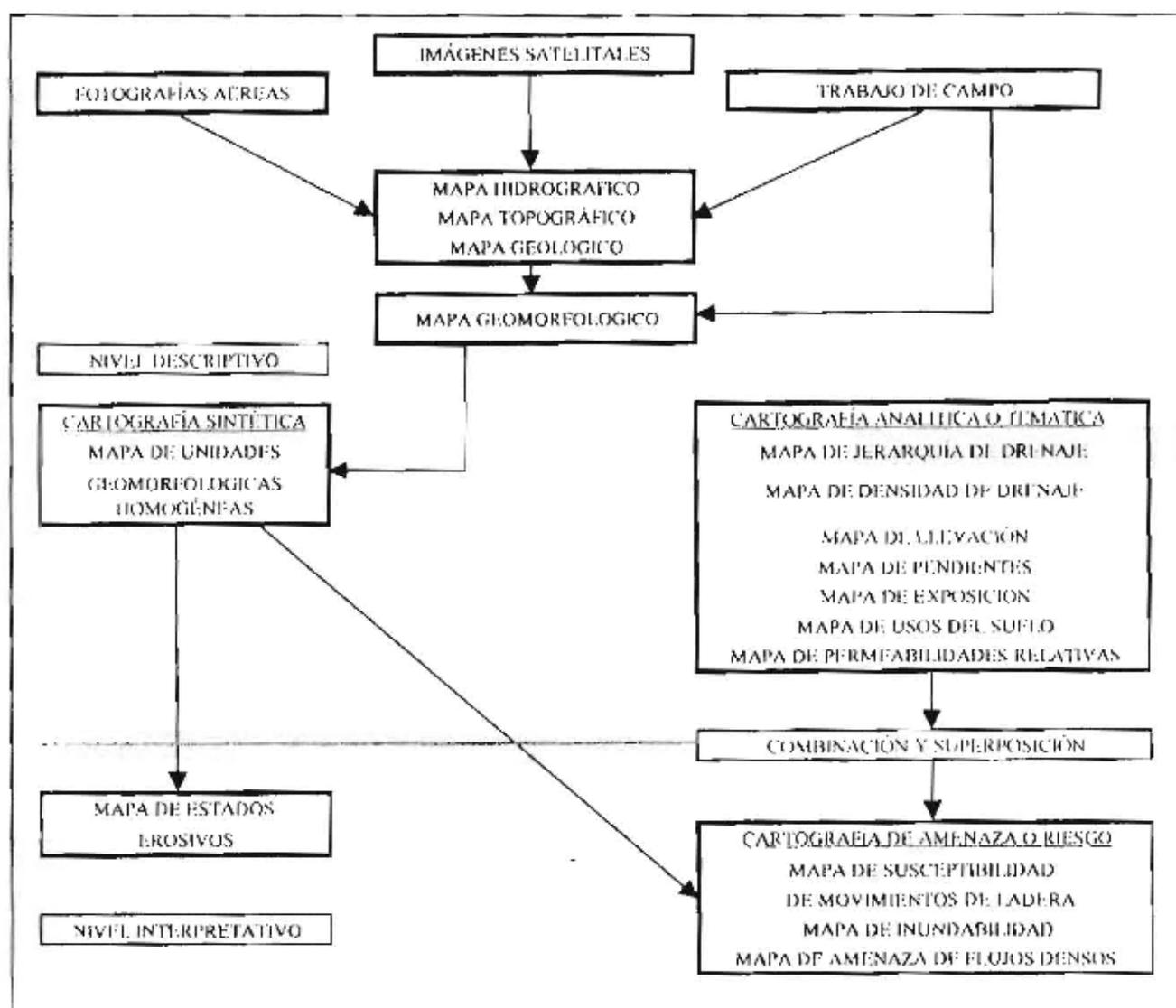
Mapa hidrográfico: para elaboración se utilizó aerofotografías a escala 1:35.000 y 1:50.000 e imágenes satelitales LANDSAT 7 TM.

Mapa topográfico: se confeccionó a partir de la restitución de un fotomapa a escala 1:50.000 (inédito) obtenido del Servicio Geológico Minero Argentino juntamente con la Hoja Topográfica 2366-IV "Libertador General san Martín (provincias de Jujuy y Salta)".

Mapa geológico: para su elaboración se utilizó como base el mapa geológico de la Quebrada de Humahuaca a escala 1:100.000 (SEGEMAR-ITGE 1998) y las fotocartas geológicas preliminares a escala 1:50.000 del Programa Geológico Minero NOA. El análisis de la información fue complementado con chequeos y nuevas observaciones de campo, las que estuvieron enfocadas en las unidades cuaternarias aflorantes en la zona de estudio.

Mapa geomorfológico: constituye el documento principal y representa sintéticamente las características de las formas del paisaje y su distribución en el interior de la unidad territorial analizada (Rodolfo 1983). Aunque se trata de un mapa de detalle a los fines del estudio puede considerarse como un mapa aplicado ya que fue confeccionado para el análisis de los procesos de amenaza geológica. Se utilizó para su elaboración aerofotografías a escala 1:35.000 y 1:50.000 e imágenes satelitales LANDSAT TM con posterior chequeo detallado de campo.

CUADRO 1. ESQUEMA METODOLÓGICO



Cartografía analítica

La cartografía analítica considera el territorio constituido por la superposición o agregación de una serie de elementos representado mediante una cartografía sectorial individualizada en mapas temáticos. Se obtuvieron los siguientes mapas:

Mapa de jerarquía de drenaje: la jerarquización de la red de drenaje tiene por objetivo conocer el grado de ramificación del curso principal. Para su determinación se utilizó el criterio de Strahler (1952) que consiste en asignar el menor valor (1) a los primeros segmentos de cauce, próximos al nacimiento, e ir incrementando el mismo cuando se unen dos corrientes del mismo orden.

Mapa de densidad de drenaje: representa el mayor o menor desarrollo del drenaje en diferentes sectores de la cuenca. Los valores de densidad de drenaje –definida como la relación entre la longitud de los cursos y el área considerada– fueron calculados para sectores que pueden considerarse subcuencas del colector principal.

Mapa litológico de resistencia mecánica: este mapa muestra la distribución de las propiedades mecánicas de las rocas aflorantes en la cuneca y está basado en la información del mapa geológico y observaciones de campo. Como elemento adicional se tomó en cuenta la existencia de zonas de debilidad y buzamiento de las capas de cada unidad.

Mapa de pendientes: representa los desniveles del terreno a partir de la asignación de clases o rangos de pendiente expresadas en porcentajes. Para su elaboración se procesó la información topográfica con el programa WODITEM (Watershed Oriented Digital Terrain Model), un paquete de programas tipo SIG desarrollado en la Universidad de Padova (Italia) para la modelación de cuencas hidrográficas de alta montaña (Cazorzi 1991).

Mapa de elevación: muestra mediante tintas hipsométricas la configuración del relieve y se obtuvo –al igual que el mapa de pendientes– con la aplicación del programa WODITEM.

Mapa de exposición: representa la orientación de las diferentes porciones del terreno respecto al norte geográfico. También se obtuvo por medio del programa WODITEM. Cada clase de orientación abarca un rango de 45° y resulta de gran importancia al analizar factores como la precipitación en la cuenca que está fuertemente controlada por la orientación de los cordones montañosos.

Mapa de usos del suelo: representa las diferentes actividades realizadas por el hombre sobre el territorio y tiene fundamental importancia a la hora de analizar los potenciales sectores afectados por procesos geológicos o el impacto que éstos producen sobre el entorno natural.

Mapa de permeabilidades relativas: su utilidad principal radica en identificar aquellas formaciones con mayor capacidad de incorporar agua a partir de la infiltración directa de la lluvia o el escurrimiento superficial y promover procesos de amenaza como movimientos de ladera o erosión hídrica.

Cartografía sintética

La cartografía sintética consiste en la delimitación y representación de porciones del territorio que presentan una homogeneidad geomorfológica interna (unidades geomorfológicas homogéneas). Es similar en su concepción a la resultante de la clasificación tipo land system (Christian 1957) siendo el producto final es un documento de trabajo con contornos precisos y bien caracterizados apropiado para la evaluación del territorio respecto a diferentes usos o amenazas naturales.

El mapa de unidades geomorfológicas homogéneas (Fig. 2) es un mapa derivado del mapa geomorfológico en el que se establece una zonificación en unidades de relieve de una relativa homogeneidad en cuanto a su composición y características morfológicas.

Cartografía aplicada

Mapa de estados erosivos: utilizando las unidades geomorfológicas homogéneas se asignan diferentes grados de erosión en función de la aplicación de tres metodologías diferentes y complementarias, dos de ellas de tipo cualitativo (CORINE-CEC 1992 e ITC) y una de tipo cuantitativo (Gavrilovic 1988). La aplicación de los métodos cualitativos permite obtener clases de riesgo o susceptibilidad a la erosión que surgen de la obtención de índices obtenidos a partir de baremos relacionados a los factores que regulan el proceso erosivo.

El método cuantitativo de valoración de la erosión de Gavrilovic (1988) permite estimar el volumen medio anual de sedimentos producidos en una cuenca hídrica y consiste en dividir la misma en diferentes subcuencas y calcular una serie de parámetros relacionados al proceso erosivo. Mayores detalles respecto a los parámetros utilizados y los resultados obtenidos en este tópico pueden consultarse en Soler (2003).

Mapa de susceptibilidad de movimientos de ladera: permite zonificar los espacios potencialmente inestables por diferentes movimientos de laderas (Fig. 3). Esta basado esencialmente en los mapas de pendientes y litológico de resistencia mecánica complementados con antecedentes. Se han definido seis clases de susceptibilidad de movimientos de ladera en función de las categorías de pendiente y de resistencia mecánica (Cuadro 2).

Mapa de amenaza de debris flows: fue elaborado sobre la base las características dinámicas, recurrencia estimada y ubicación de las áreas de aporte-acumulación de los flujos y utilizando como base el mapa de unidades geomorfológicas homogéneas (Fig. 4). Los movimientos tipo debris flows tienen una recurrencia de entre 1 y 3 años. Las características de éstos movimientos al igual que para los debris floods se pueden observar en el Cuadro 3 el que fue utilizado para la clasificación de los flujos (Hung et al. 2001).

Mapa de amenaza de debris floods: al igual que el anterior para su realización se partió del mapa de unidades geomorfológicas homogéneas utilizando criterios similares para la definición de las áreas de diferente grado de amenaza (Fig. 5).

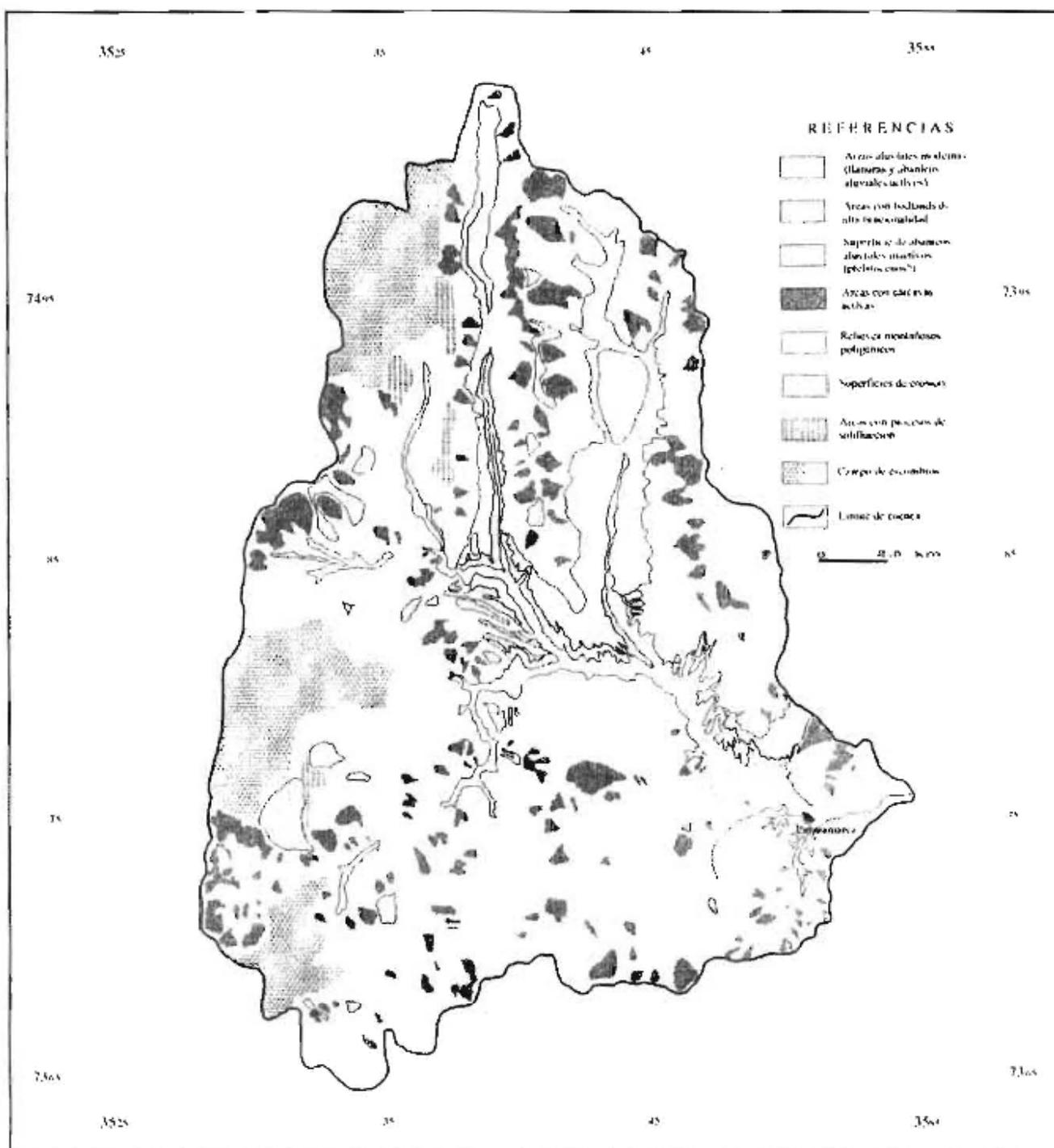
Mapa de inundabilidad: partiendo del mapa de unidades geomorfológicas homogéneas y poniendo especial atención en las unidades relacionadas al ámbito fluvial se evaluó el riesgo de inundabilidad en la cuenca a partir de criterios hidrológicos y geomorfológicos (Fig. 6).

7. CONSIDERACIONES FINALES

La planificación es una herramienta metodológica para la toma de decisiones racionales respecto al uso del espacio territorial. Es fundamental, además, para establecer prioridades en la asignación de recursos y la implementación de medidas de intervención.

La aplicación de metodologías integradas permite obtener resultados satisfactorios especialmente al nivel de identificación y caracterización de los problemas existentes y establecer criterios generales de actuación. Esta posibilidad se ve potenciada en la actualidad por la versatilidad de los sistemas de almacenamiento y tratamiento digital de la información lo que permite una constante actualización y replanteo de los resultados alcanzados o la modificación de algunas variables no analizadas en una primera instancia. Para la evaluación de las amenazas geológicas en la cuenca del río Purmamarca y tomando en cuenta tales consideraciones se adoptó una metodología esencialmente cartográfica a una escala uniforme lo que contribuyó en forma decisiva en el desarrollo del trabajo durante las distintas etapas del análisis. Las características torrenciales de la cuenca son las responsables de la situación de inestabilidad existente lo que provoca consecuencias de diferente naturaleza e intensidad sobre las actividades humanas. El impacto antrópico, aunque presente, solo representa un

FIGURA 2. MAPA DE UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS HOMOGÉNEAS



elemento secundario cuyo efecto más notable es la agudización de ciertos procesos naturalmente activos como la erosión, la remoción en masa o la desestabilización de algunos sistemas ecológicos. No obstante, algunos síntomas de deterioro ambiental relacionados con la actividad del hombre (ramoneo excesivo, compactación por pisoteo, desprotección por incendios, entre otras) hacen aconsejable, como primera medida, la divulgación entre los usuarios del suelo de las medidas de protección indispensables.

La implementación de medidas estructurales de corrección torrencial –altamente costosas y de compleja implementación– cuando no van acompañadas de

criterios científicamente integrados no solo son ineficientes, sino que pueden provocar resultados contrapuestos a los buscados por lo que deben ser analizadas cuidadosamente. La información obtenida pretende servir de base para la evaluación de los procesos geológicos que pueden afectar la infraestructura antrópica y como punto de partida para la planificación territorial. En muchos casos debido al tipo de actividad considerada y a las limitaciones espaciales impuestas por el terreno debe contemplarse la intervención antrópica a partir de medidas de protección efectivas y a bajo costo y solo eventualmente la implementación de obras de corrección mayores, las que aunque necesarias deben ser

CUADRO 2. CLASES DE SUSCEPTIBILIDAD DE MOVIMIENTOS DE LADERA

RESISTENCIA MECÁNICA RELATIVA	PENDIENTE (%)			
	< 10	10 a 20	20 a 40	> 40
MUY BAJA Pizarras, lutitas y areniscas arcillosas intensamente fracturadas Gravas y arenas inconsolidadas	BAJA	ALTA	MUY ALTA	ALÍSIMA
BAJA Conglomerados y areniscas poco consolidadas	BAJA	MODERADA	ALTA	MUY ALTA
MODERADA Conglomerados, areniscas, calizas y margas bien cementadas	MUY BAJA	BAJA	MODERADA	ALTA

CUADRO 3. CLASIFICACIÓN DE Hungr et al. (2001) PARA MOVIMIENTOS EN MASA TIPO FLUJO

Material	Contenido de agua ¹	Condición especial	Velocidad	Nombre
limo, arena, grava, debris (talus)	seco, húmedo o saturado	a) sin exceso de presión poral b) volumen limitado	variable	Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow
limo, arena, debris, rocas débiles ²	saturado	a) material liquefactible b) agua constante	extremadamente rápido	Sand (silt, debris, rock) flow slide
arcillas sensitivas	en o por encima del límite líquido	a) liquefacción in situ ³ b) contenido de agua constante ⁴	extremadamente rápido	Clay flow slide
turba	saturado	exceso de presión poral	lento a muy rápido	Peat flow
arcilla o earth	cerca del límite plástico	a) movimiento lento b) plug flow (sliding)	rápido	Earth flow
Debris	saturado	a) canal definido ⁵ b) contenido de agua creciente ⁶	extremadamente rápido	Debris flow
Mud	en o por encima del límite líquido	debris flow de grano fino	muy rápido	Mud flow
Debris	agua libre presente	flood ⁷	extremadamente rápido	Debris flood
Debris	parcial o totalmente saturado	a) canal no definido ⁵ b) relativamente superficial, fuente escarpada	extremadamente rápido	Debris avalanche
Rocas fragmentadas	variable, principalmente seco	a) roca intacta como fuente b) grandes volúmenes ⁷	extremadamente rápido	Rock avalanche

1 - Contenido de agua en las cercanías del plano de ruptura al momento del inicio del movimiento.

2 - Rocas débiles, altamente porosa (Ej. Cenizas meteorizadas).

3 - La presencia de total o parcial liquefacción in situ de la fuente del material del flujo puede ser observada o implícita.

4 - Relativo a la fuente de material in situ.

5 - Presencia o ausencia de un canal definido sobre una importante longitud del recorrido y una forma definida de acumulación (abanico).

Los debris flows son un fenómeno recurrente dentro de este canal y hay ausencia de debris avalanches.

6 - Pico de creciente del mismo orden que la mayor creciente. Importante fuerza tractiva del flujo de agua libre. Presencia de detritos flotantes.

7 - Volúmenes mayores que 10.000 m³ aproximadamente. Flujo masivo, en contraste con caída de rocas fragmentadas.

planificadas con criterios multidisciplinarios y con objetivos muy claros.

Las áreas aluviales modernas tienen como principal limitación su alta amenaza de ser afectadas por flujos densos de tipo debris floods y debris flows. Corresponden a zonas con una muy alta susceptibilidad de ser inundadas por crecientes fluviales. Allí se localizan las principales áreas de cultivo y urbanizadas de la cuenca debido a su posición favorable respecto a las fuentes de agua para consumo humano y riego. Se recomienda para esta zona un uso agrícola moderadamente intensivo siendo deseable la previa construcción de obras de protección eficientes a los efectos de minimizar los posibles daños producidos por inundaciones y flujos densos. Una buena alternativa sería la puesta en marcha de técnicas adecuadas para reducir las tasas de erosión y salinización de suelos y optimizar el riego así como la instauración de cortinas forestales para minimizar los efectos de la erosión eólica. Respecto a los sistemas de conducción de agua sería recomendable llevar adelante medidas tendientes a reducir las pérdidas por infiltración a partir de un mejoramiento de la impermeabilización de las paredes de los canales. Otro inconveniente importante es la continua destrucción de los canales por efectos de los flujos o inundaciones cuya atenuación puede lograrse mediante una elevación de los mismos en los lugares que así lo permitan. En los sitios donde éstos canales atraviesan cursos fluviales resultaría favorable la construcción de obras de protección que permitan la descarga de las aguas de escurrimiento y disminuyan la erosión.

En lo referente a los sectores urbanizados y especialmente en el pueblo de Purnamarca—actualmente ubicado a una cota topográfica menor a la del río homónimo— se recomienda una intervención en dos niveles diferentes. Por un lado la construcción de estructuras de protección en las cercanías del pueblo y por el otro y en función de planes de regulación mayor, la implementación de obras transversales de retención de sedimento en los sectores de mayor producción de la cuenca. En lo que respecta a éstas últimas el alto costo de la inversión demandada hace necesario un exhaustivo análisis de los sectores más productores de sedimento. En este sentido aunque la totalidad de la cuenca en mayor o menor medida es altamente productora de sedimentos, existen zonas donde los volúmenes son realmente muy altos. Las áreas ocupadas por badlands de alta funcionalidad constituyen áreas de altísima erosión y susceptibilidad a movimientos de ladera. Además, constituyen zonas de aporte de material y canales de circulación de los flujos de tipo debris flows. Representan unidades de una elevada dinámica morfogenética y debido a las fuertes pendientes pueden considerarse zonas de restricción de uso antrópico debido a la combinación de diferentes riesgos naturales. Los sectores correspondientes a las superficies de abanicos aluviales inactivos constituyen áreas con baja a moderada erosión, una moderada inundabilidad pero una muy alta amenaza de debris flows. No obstante mediante la previa implementación de obras de protección localizadas, representan zonas factibles para un uso agrícola moderadamente intensivo o para forestación con especies adaptables a las condiciones climáticas. Las áreas de cárcavas activas constituyen zonas de alta

altísima erosión y por su ubicación topográfica representan las principales áreas de aporte de material a los flujos densos y fluviales. Su enorme representación areal dentro de la cuenca hace que sea prácticamente imposible la implementación de medidas estructurales de retención de sedimentos.

Los relieves montañosos poligénicos, superficies de erosión antiguas, áreas con procesos de soliflucción y los sectores ocupados por el campo de escombros por su elevada altitud, difícil accesibilidad, elevada pendiente o condiciones climáticas extremas pueden considerarse zonas en las cuales no es posible en las condiciones actuales emitir recomendaciones específicas de uso o actuación. Finalmente respecto a la ubicación y protección de las diferentes obras de infraestructura implantadas en la cuenca puede decirse que por lo general no presentan problemas de gran magnitud respecto de su funcionalidad o impacto sobre las demás actividades de la cuenca. La traza de la ruta nacional N° 52 desde el pueblo de Purnamarca hasta la culminación de la Cuesta de Lipán no presenta inconvenientes de difícil solución o control. No obstante existen ciertos tramos que suelen verse afectados cortes temporarios debido a procesos de remoción en masa (caída de rocas, deslizamientos y flujos densos). Las futuras obras viales como el ensanchamiento de la traza o la instalación de nueva infraestructura de servicios deberán tener en cuenta este tipo de procesos actualmente activos así como aquellos que pueden comenzar activarse. En lo que respecta al puente ubicado en las cercanías de la confluencia de los ríos de Huachichocana y Purnamarca ha mostrado en los últimos años una disminución de la sección drenante por una tendencia agradacional del río en este sector. La instalación de estructuras de retención de sedimentos sobre la parte alta de la cuenca de Huachichocana podría ayudar a atenuar esta tendencia. En lo que respecta a la cañería del gasoducto Atacama no se observan mayores problemas. No se manifiestan procesos de erosión aunque en ciertos sectores como donde se ubica una de las estaciones reguladoras de presión que se encuentra instalada sobre un abanico aluvial podría sufrir algún tipo de inconveniente en el caso de producirse un flujo de magnitud.

8. CONCLUSIONES

Sobre la base del análisis de la información obtenida se puede concluir lo siguiente:

1. La cuenca del río Purnamarca se desarrolla en un ámbito montañoso caracterizado por cordones orográficos de orientación meridiana a submeridiana, con altitudes que pueden superar los 4.000 metros sobre el nivel del mar.
2. El colector principal es el río Purnamarca que escurre de oeste a este y desemboca en el río Grande de Jujuy.
3. Las características climáticas son esencialmente semiáridas con una precipitación media anual de 96 mm y una temperatura media anual de 16,3 °C. Cada ciertos años por efecto de perturbaciones a escala global como el fenómeno ENSO (El Niño / Southern Oscillation) se registran altas precipitaciones que pueden duplicar o triplicar los valores medios. Las lluvias son de tipo orográfico y los mayores volúmenes se descargan

FIGURA 3. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE MOVIMIENTOS DE LADERA



los meses de octubre y marzo. Predominan los años con lluvias de moderada a alta intensidad aunque no son infrecuentes los veranos con lloviznas de intensidad baja.

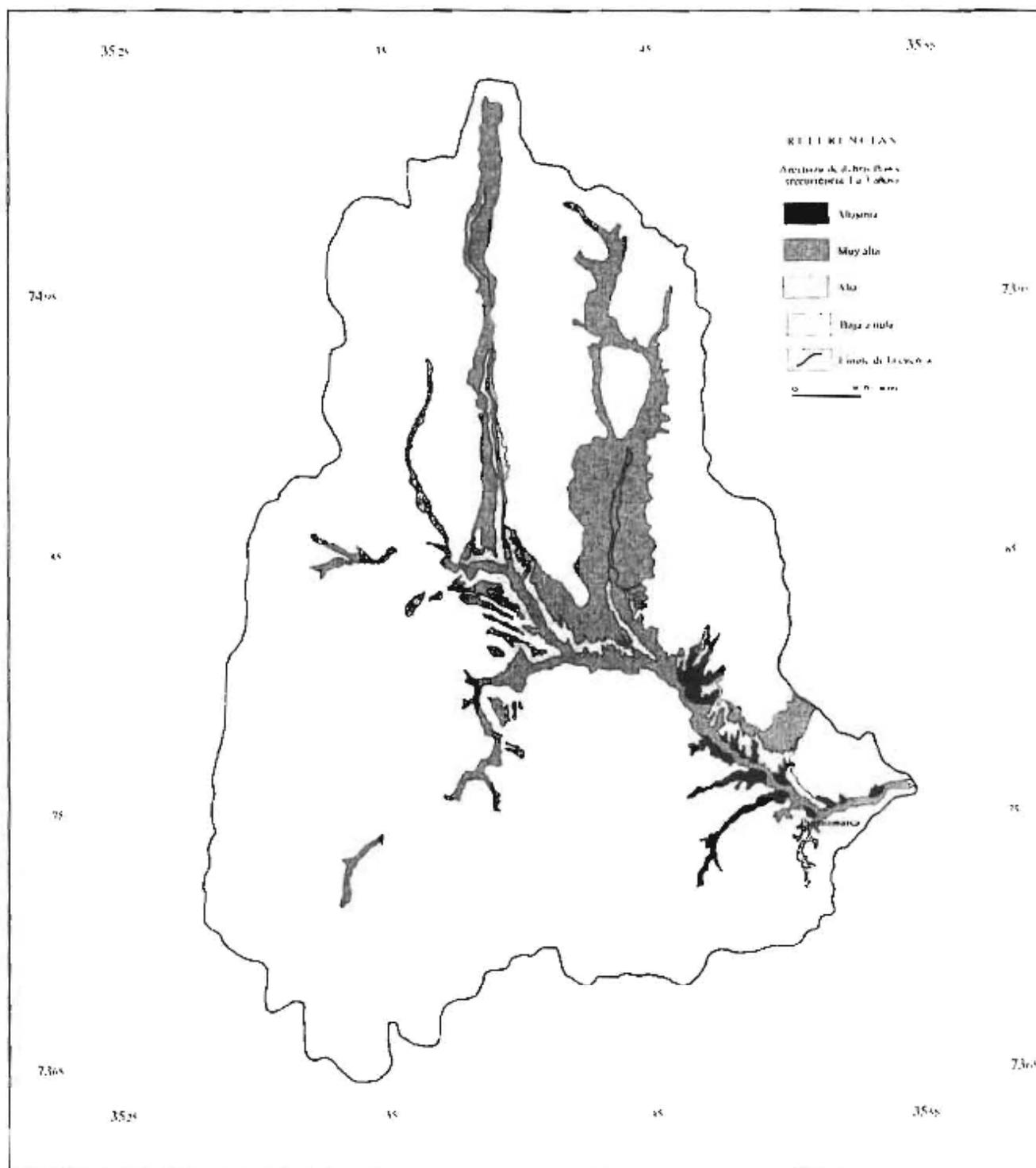
4. La cobertura vegetal es escasa y está representada mayoritariamente por especies pertenecientes a la estepa arbustiva las que se sustentan sobre suelos con escaso a nulo desarrollo.

5. La estratigrafía está representada por metasedimentitas precámbricas, cuarcitas y areniscas cuarzosas cámbricas y lutitas y areniscas arcillosas de edad ordovícica. Las unidades cretácico-terciarias corresponden a areniscas

calcáreas, calizas y conglomerados mientras que las unidades cuaternarias están representadas por conglomerados y areniscas (¿pleistocenas?) y conglomerados y arenas inconsolidadas modernas. Desde el punto de vista estructural la cuenca presenta los rasgos característicos de una comarca fallada y plegada donde predomina la tectónica de corrimientos de rumbo N-S los que limitan series de láminas imbricadas y vergentes hacia el este.

6. Las pendientes de los terrenos tienen un valor medio del 19 % mientras que para los álveos el valor medio

FIGURA 4. MAPA DE AMENAZA DE DEBRIS FLOWS



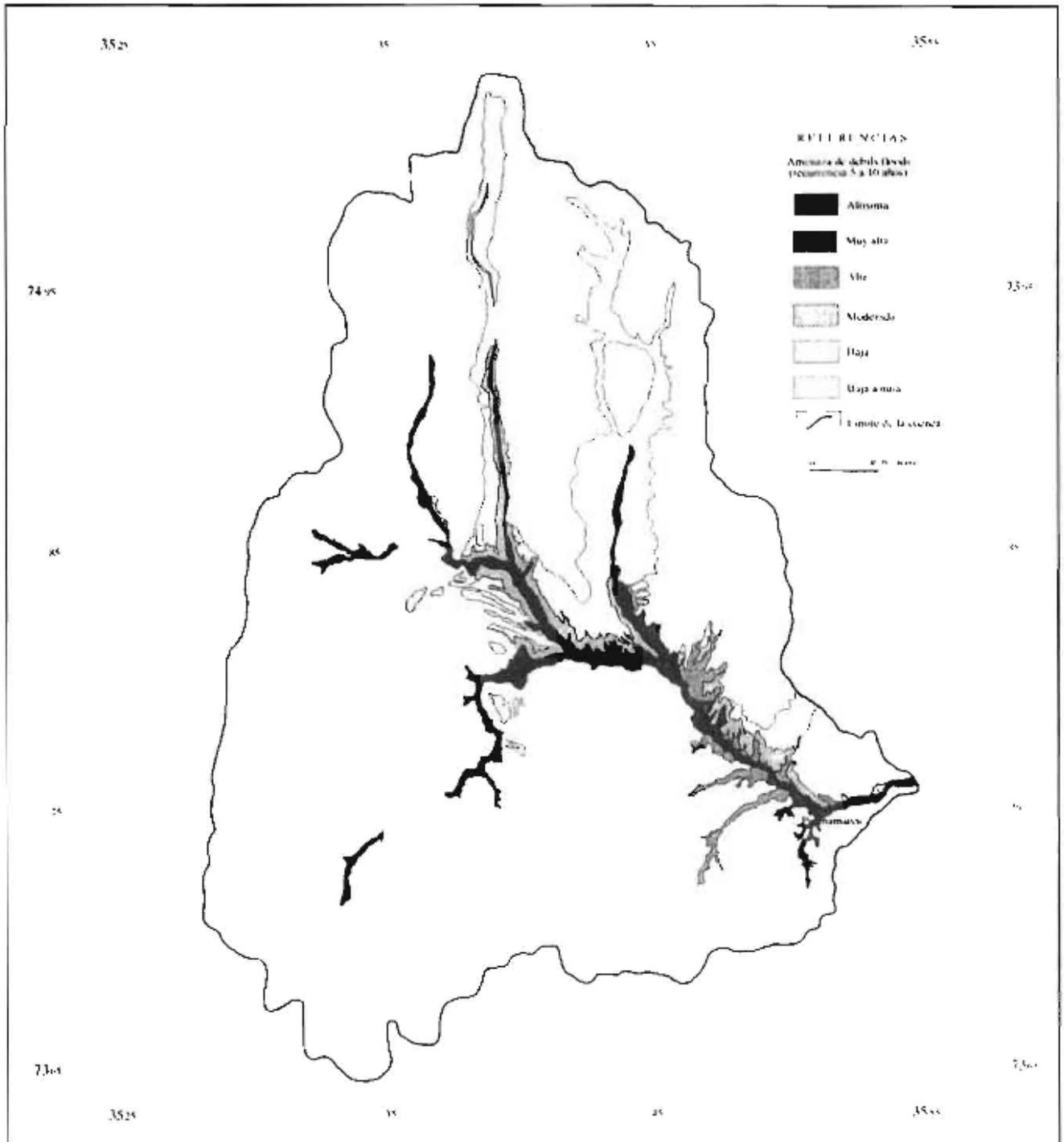
de 4,5 %. Predominan las laderas con exposición hacia el E, O y NE.

7. Las características geomorfológicas de la cuenca son el resultado de la compleja interacción entre la evolución tectónica y la acción de los agentes externos, principalmente del escurrimiento fluvial y la remoción en masa.

8. La dinámica externa permite definir como los principales procesos de riesgo a la erosión, la remoción en masa y las inundaciones. La alta vulnerabilidad del

medio antrópico

deriva principalmente de la falta de políticas de ordenamiento territorial y de las limitaciones de espacio impuestas por el relieve.

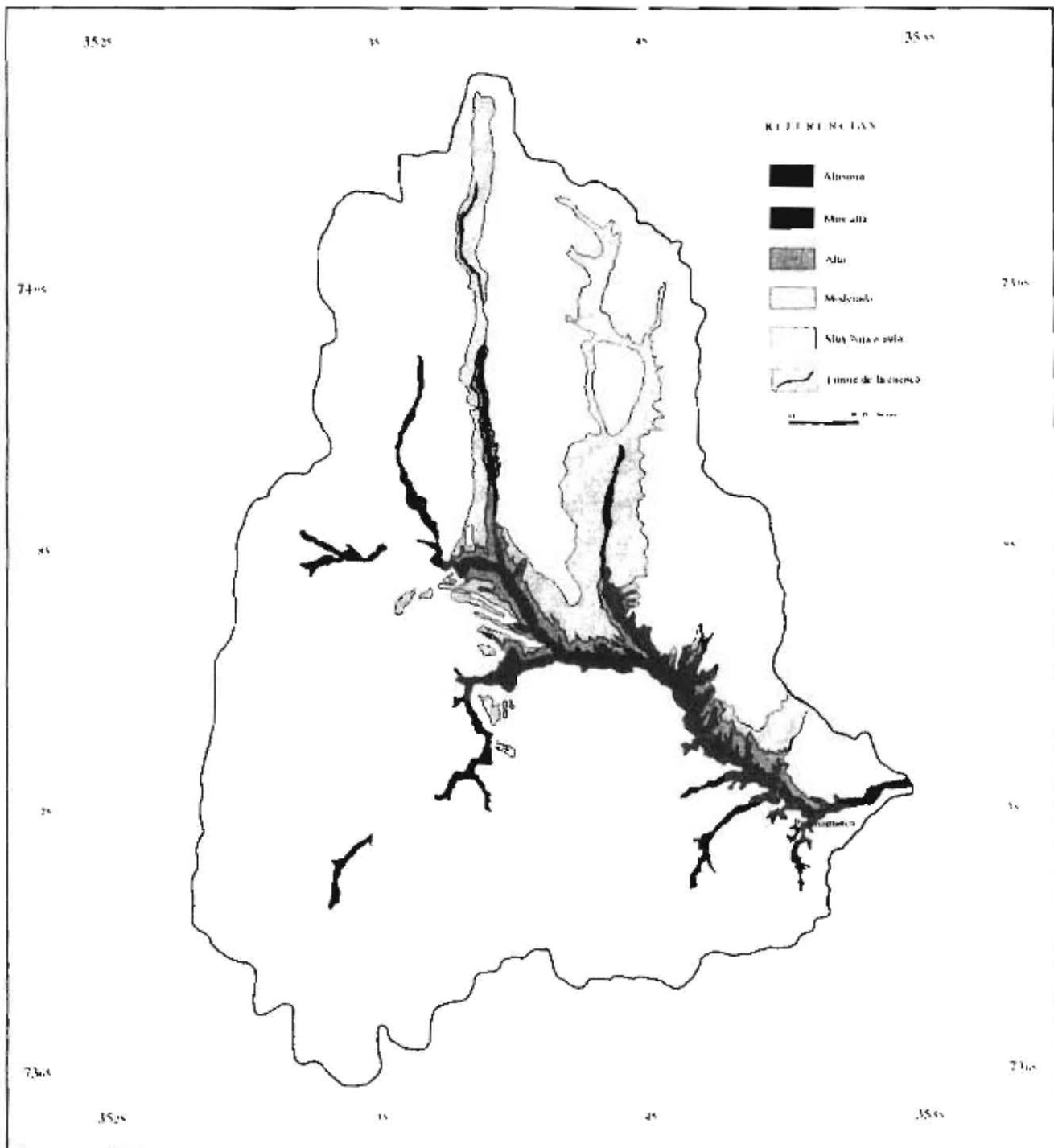
FIGURA 5. MAPA DE AMENAZAS DE DEBRIS FLOODS

9. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del estudio "Geología ambiental de la cuenca del río Purmamarca (Jujuy - Argentina)". El autor desea expresar su más sincero agradecimiento a todos aquellos que han aportado de una manera u otra a la realización del mismo y de manera expresa al Proyecto FOMEC 072/95 de la Carrera

Nacional de salta y a la Unidad de Actividad de Geología de Comisión Nacional de Energía Atómica.

FIGURA 6. MAPA DE INUNDABILIDAD



10. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ALFORS, J., BURNETT, J.L. Y GAY, T.E., 1973.

Urban geology; Master plan for California: the nature, magnitude and cost of geologic hazards in California and recommendations for their mitigations. California Division of Mines and Geology Bulletin, 198 pp.

BIANCHI, A.R. Y C.E. YAÑEZ, 1993.

Las precipitaciones en el Noroeste Argentino. 383 pp. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

BUITRAGO, L.G. Y M. LARRÁN, 1994.

El Clima de la Provincia de Jujuy. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Jujuy, 38 pp. Jujuy.

CAZORZI, F., 1991.

Watershed Oriented Digital Terrain Model. User's manual. Department of Land Agroforest Environment, University of Padova, Internal Report, 180 pp.

CENDRERO, A., 1997.

Riesgos naturales e impacto ambiental, En *La Interpretación de la Problemática Ambiental: enfoques básicos II*, Colección Medio Ambiente y Educación Ambiental, Madrid, 23-84.

CENDRERO, A., DÍAZ DE TERÁN, J.R., FERNÁNDEZ, O., GARROTE, R., GONZÁLEZ LASTRA, J.R., INORIZA, I., LÜTTIG, G., OTAMENDI, J., SERRANO, A. Y GRUPO "IKERLANA", 1987a, Detailed geological hazards mapping for urban and rural planning in Vizcaya (Northern - Spain), En F.Ch. Wolff (ed.) *Geology for environmental planning*, Geological Survey of Norway, Trondheim, Special Publication, 225-41.

CENDRERO, A., DÍAZ DE TERÁN, J.R., FERNÁNDEZ, O., GARROTE, R., GONZÁLEZ LASTRA, J.R., INORIZA, I., LÜTTIG, G., OTAMENDI, J., PÉREZ, M. Y SERRANO, A., 1987c, Metodología de elaboración de mapas de riesgos, *Actas de la III Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Valencia, Volumen II, 843-870.

CENDRERO, A., DÍAZ DE TERÁN, J.R., FERNÁNDEZ, O., GARROTE, R., GONZÁLEZ LASTRA, J.R., INORIZA, I., LÜTTIG, G., OTAMENDI, J., PÉREZ, M. Y SERRANO, A., 1987b, Establecimiento de tipos de inestabilidad de ladera en función de parámetros objetivos, aplicación a escala 1:5.000 a un área de Vizcaya, *Actas de la III Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Valencia, Volumen II, 1035-1051.

CENDRERO, A., SÁNCHEZ, J., ANTOLIN, C., ARNAL, S., DÍAZ DE TERÁN, J.C., FRANCES, E., MARTÍNEZ, V., MOÑINO, M., NIETO, M., NOGALES, I., PÉREZ, E., RÍOS, C., ROBLES, F., ROMERO, A. Y SUÁREZ, C., 1990, Geoscientific maps for planning in semi-arid regions: Valencia and Gran Canaria, Spain, *Engineering Geology*, Volumen XXIX, 291-319.

CHRISTIAN, C.S., 1957.

The concept of land units and land systems. *Proceeding 9th Pacific Science Congress*, 20:74-81.

CORINE-CEC (COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES), 1992.

CORINE Soil erosion risk and important land resources. An assessment to evaluate and map the distribution of land quality and soil erosion risk. Office for official publications of the European Communities, EUR 13233, 97 pp. Luxemburgo.

DUQUE, A., ECHEVERRÍA, G., FERNÁNDEZ DE LIENCRES, E., KEREJETA, A., CENDRERO, A. Y TAMES, P., 1990, Metodología de elaboración de mapas de riesgos, *Actas de la IV Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, Gijón, 105-113.

FRANCES, E., CENDRERO, A., DÍAZ DE TERÁN, J.C., LEONARDO, J. Y SAIZ, L., 1990.

Criterios geoambientales aplicados al plan de ordenación urbana del Municipio de Suances (Cantabria), *Actas de la IV Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, 195-201.

GAVRILOVIC, Z., 1988.

The use of an empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. 98 pp. Wallingford.

HARRINGTON, H.J., 1975.

South America, En R. Fairbridge (ed.), *The encyclopedia of World Regional Geology*, Reinhold Book Co, Volumen I, 456-465.

HUNGR, O., EVANS, S.G., BOVIS, M.J. Y HUTCHINSON, J.N., 2001.

A Review of the classification of landslides of the flow type, *Environmental & Engineering Geosciences*, 8(3): 221-238.

NAGARAJAN, R., ROY, A., VINOD KUMAR, R., MUKHERJEE, A., Y KHIRE, M.V., 2000.

Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions, *Engineering Geology and the Environment Bulletin*, 58(4):275-287.

RODOLFI, G., 1983.

Frane e franosità nell'area di Monterspertoli. Il paesaggio naturale e la sua evoluzione. *Annali Ist. Sper. Studio e Difesa*

SALFITY, J.A., 1980.

Estratigrafía de la Formación Lecho (Cretácico) en la cuenca andina del norte argentino. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. Tesis de Doctorado, 91 pp. Inédito.

SEGEMAR-ITGE, 1998.

Estudio geológico integrado de la Quebrada de Humahuaca. Geología Regional y Geomorfología, Anales 30, 77 pp. Buenos Aires.

STRAHLER, A., 1952.

Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, Geological Society of America Bulletin, Volumen 63, 1117-1142.

SOLER, R.D., 2003.

Geología ambiental de la cuenca del río Purmamarca (Jujuy – Argentina). Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, 191 pp. Inédito.

THORNTHWAITE, C.W., 1948.

An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review 28(1): 55-94.

TURNER, J.C.M. Y V. MENDEZ, 1979.

Geología del sector oriental de los departamentos de Santa Victoria e Iruya, Provincia de Salta, República Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, Volumen 51(1-2):11-24, Córdoba.

TURNER, J.C.M. Y R. MON, 1979.

Cordillera Oriental. En J.M.C. Turner (ed.) Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, Volumen I:57-94, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.



ANÁLISIS BLOQUIMÉTRICO DE MACIZOS ROCOSOS FRACTURADOS

Néstor Vendramini ¹ - Graciela Jazan ²

Resumen

Se presenta en forma compacta un criterio metodológico a partir de datos de relevamientos mediante líneas de muestreo (scan lines) para la evaluación cuantitativa de la condición bloquimétrica en macizos rocosos fracturados. El modelado numérico y computacional con software a medida, permiten el abordaje de la curva de distribución de bloques del macizo rocoso representativo del sector de relevamiento, explicitando los volúmenes característicos de los mismos. De esta forma se avanza en la caracterización de unos de los parámetros relevantes, que gobiernan propiedades geomecánicas e hidrotécnicas a escala real.

1. INTRODUCCIÓN

El siguiente es un procedimiento numérico para la evaluación bloquimétrica cuantitativa en macizos rocosos fracturados, a partir de relevamientos in-situ mediante línea de muestreo (scan lines).

Sea una línea de muestreo ("scan-line") definida por su punto de origen, su dirección y su inclinación. Se tiene: α = dirección de buzamiento (sentido horario desde el Norte).

β = intensidad de buzamiento (positiva hacia abajo).

Definamos un sistema de coordenadas ortogonal (x,y,z) con centro en el origen de la línea de muestreo, y de modo que el eje y coincida con la dirección Norte-Sur (positiva hacia el Norte), el eje x con la dirección Este-Oeste (positiva hacia el Este), y consideremos un

cuyo eje es la línea de muestreo. Esto significa que la línea pasa por el centro de las bases del prisma y las aristas que unen las bases son paralelas a la línea.

Sean W y H el semiancho y semialto del prisma, y L la longitud de la línea. Entonces la línea va de $(0,0,0)$ a $(L \sin \alpha \cos \beta, L \cos \alpha \cos \beta, -L \sin \beta)$ las coordenadas de los vértices del prisma son:

$$v_1 = (H \sin \alpha \sen \beta + W \cos \alpha, H \cos \alpha \sen \beta - W \sen \alpha, W \cos \beta)$$

$$v_2 = (H \sen \alpha \sen \beta - W \cos \alpha, H \cos \alpha \sen \beta + W \sen \alpha, W \cos \beta)$$

$$v_3 = (-H \sen \alpha \sen \beta - W \cos \alpha, -H \cos \alpha \sen \beta + W \sen \alpha, -W \cos \beta)$$

$$v_4 = (-H \sen \alpha \sen \beta + W \cos \alpha, -H \cos \alpha \sen \beta - W \sen \alpha, -W \cos \beta)$$

$$v_5 = v_4 + (L \sen \alpha \cos \beta, L \cos \alpha \cos \beta, -L \sen \beta)$$

$$v_6 = v_3 + (L \sen \alpha \cos \beta, L \cos \alpha \cos \beta, -L \sen \beta)$$

$$v_7 = v_2 + (L \sen \alpha \cos \beta, L \cos \alpha \cos \beta, -L \sen \beta)$$

$$v_8 = v_1 + (L \sen \alpha \cos \beta, L \cos \alpha \cos \beta, -L \sen \beta)$$

Entregado: 1 de Setiembre de 2004 • Aceptado: 7 de Octubre de 2004

¹ Dto. de Geología aplicada, Facultad de Cs. Exactas Físicas y Naturales U.N.C

² Fa.M.A.F, U.N.C

Tenemos una serie de planos de discontinuidad, cada uno caracterizado por su dirección y su intensidad de buzamiento. Sean:

α_i = dirección de buzamiento, es decir, de máxima pendiente hacia abajo (grados).

β_i = intensidad de buzamiento (grados).

El coseno del ángulo formado por la normal a la familia i y la línea de muestreo j estará dado por:

$$C_i = \cos \theta_i = \cos(\alpha_i - \alpha_j) \cos \beta_i \cos \beta_j + \sin \beta_i \sin \beta_j$$

$$= \cos \alpha_i \cos \beta_j \cos \alpha_j \cos \beta_i + \sin \alpha_i \cos \beta_j \sin \alpha_j \cos \beta_i + \sin \beta_i \sin \beta_j$$

En caso de que la línea de muestreo pueda materializarse sobre un afloramiento con baja irregularidad geométrica, no es necesario realizar correcciones sobre la progresiva de intersección; de no ser así, se realiza el siguiente ajuste, para lo cual se debe medir la distancia vertical al punto de afloramiento.

El punto de afloramiento en el terreno de cada plano de discontinuidad, debajo de la línea de muestreo, queda determinado por el punto de medición, que es el punto de la línea de muestreo situado en la vertical del punto de afloramiento, y por la distancia vertical entre ambos puntos.

Sean:

X = progresiva del punto de medición, es decir, su distancia desde el origen (metros).

Y = distancia vertical entre ambos puntos (metros).

Se calculan las progresivas al origen y los espaciamientos de las discontinuidades

La progresiva es:

$$(1) \quad P_i = X_i + \frac{Y_i}{\sin \beta_i - \cos \beta_i \cos(\alpha_i - \alpha_j) \operatorname{tg} \beta_j}$$

2. DISCRETIZACIÓN EN BLOQUES

Para el corte de bloques se utilizaron criterios definidos por Heliot (Heliot 1988), pero con diferentes adecuaciones. En el análisis realizado, cada plano está definido por la dirección de su normal (a_i, b_i, c_i) y su distancia al origen, d_i , donde:

$$a_i = \sin \alpha_i \sin \beta_i$$

$$b_i = \cos \alpha_i \sin \beta_i$$

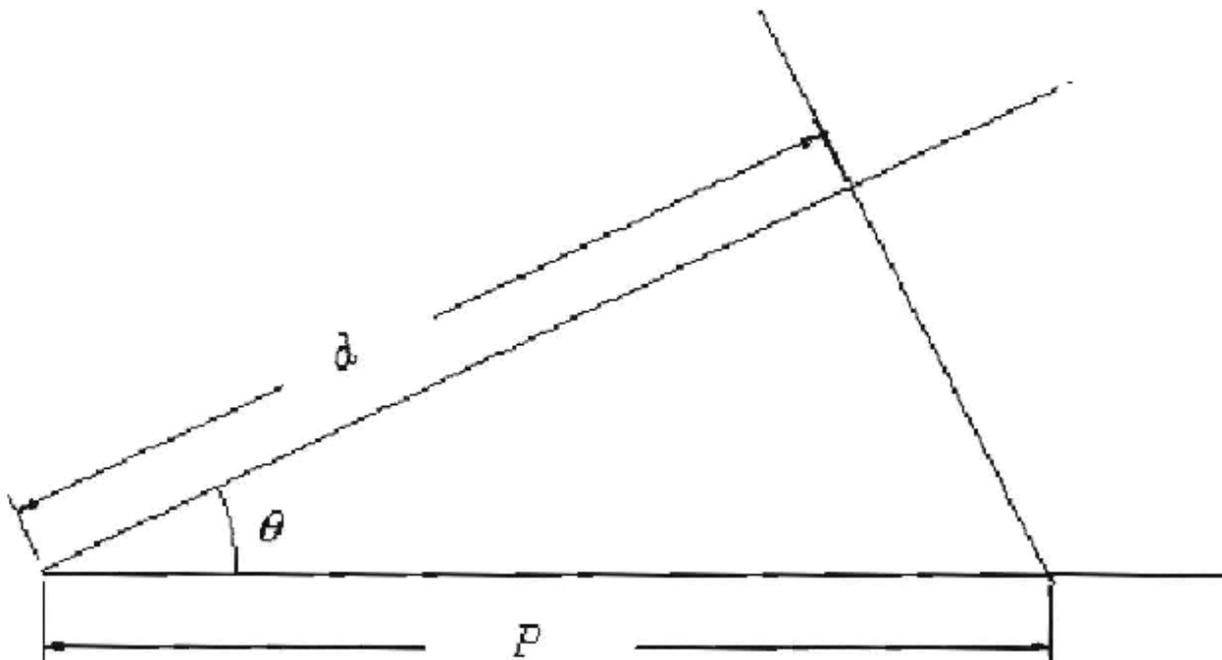
$$c_i = \cos \beta_i$$

y (Fig. 1),

$$(2) \quad d_i = P_i \cdot \Omega \cos \theta_i \Omega$$

Es decir, $(x, y, z) \in \text{Plano} \Leftrightarrow a_i \cdot x + b_i \cdot y + c_i \cdot z = d_i$

FIGURA 1.



Podemos calcular la distancia de un punto $q = (x, y, z)$ al plano por

$$\text{Dist}(q, P) = a_i \cdot x + b_i \cdot y + c_i \cdot z - d_i \quad (3)$$

Si $q \notin P$, definimos los dos semiespacios $S^+(q)$ y $S^-(q)$ (Fig. 2) por

$$p \in S^+(q) \Leftrightarrow \text{Dist}(p, P) = 0, \text{ o } \text{signo}(\text{Dist}(p, P)) = \text{signo}(\text{Dist}(q, P))$$

$$p \in S^-(q) \Leftrightarrow \text{signo}(\text{Dist}(p, P)) \neq \text{signo}(\text{Dist}(q, P))$$

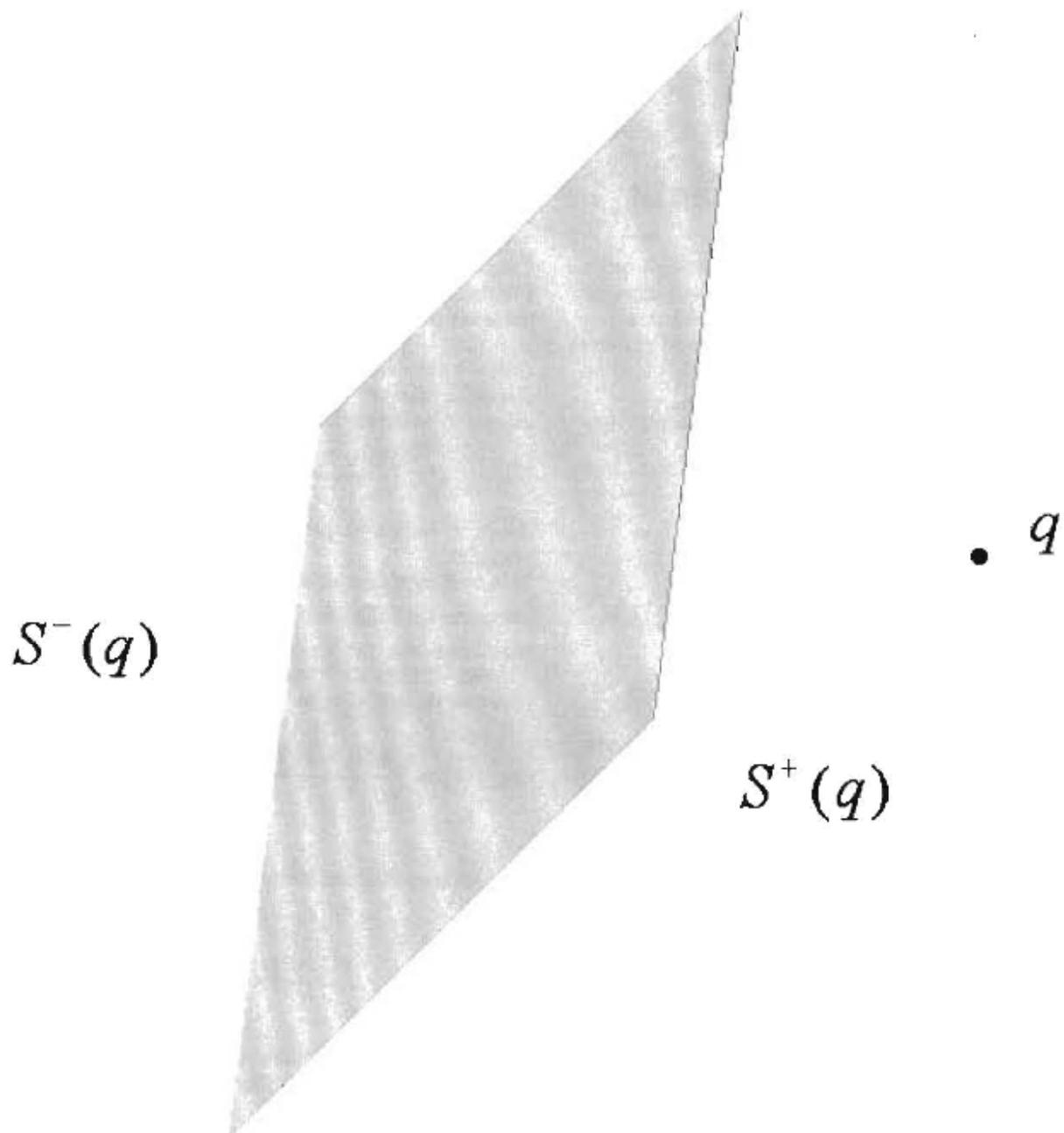
Notación:

Cada bloque B está definido por:

nv = número de vértices

nc = número de caras

FIGURA 2.



$V=V(B)=\{v_i, i=1,\dots,nv\}$ lista de vértices
 $C=C(B)=\{c_j, j=1,\dots,nc\}$ lista de caras

$$(4) \quad q = \frac{\sum_{i=1}^{NV} v_i}{NV} = \text{centroide}$$

su diámetro y volumen un valor lógico que indica si es el bloque es externo. Un vértice v está definido por sus coordenadas (x,y,z) un conjunto $K=K(v)$ que define a que caras del bloque pertenece

Una cara está definida por :
 ip = número índice correspondiente al plano de discontinuidad al que pertenece (a partir de 7; los números 1 a 6 corresponden a las caras del prisma básico). Un bloque es externo si alguna de sus caras tiene un número índice entre 1 y 6.

3. ALGORITMO DE CORTE Y CÁLCULO DE BLOQUES:

Para cada plano de discontinuidad P , se recorren todos los bloques de la lista. Primero se verifica si el plano lo corta. Para esto se calcula el radio de una esfera con centro en el centroide que contiene al bloque. Si el radio es menor que la distancia del plano al origen, el plano no corta al bloque.

Sea q el centroide del bloque B . Definamos tres subconjuntos de $\{i=1 \wedge nv\}$ por

$$H^i = \{i/v_i \in S^-(q)\}$$

$$H = \{i/v_i \in S^+(q)\}$$

$$H^p = \{i/v_i \in P\}$$

(Nótese que $H^p \subseteq H^i$)

Entonces el plano corta el bloque si H no es vacío y $H^i \cap H^p$.

Calculemos las coordenadas de los nuevos vértices $v'_i, i=1, \wedge, n'$. Inicialmente hacemos $n' = 0$

Sean dos vértices $v_i \pi v_j$. Si $i \in H^i$ y $j \in H^i$, o viceversa, calculamos $A=K(v_i) \cap K(v_j)$. Si $Card(A) = 2$, entonces v_i y v_j son los extremos de una arista del poliedro original cortada por el plano. Incrementamos n' . Para calcular las coordenadas del nuevo vértice v_k , hacemos:

$$d_1 = \text{Dist}(v_i, P)$$

$$d_2 = \text{Dist}(v_j, P)$$

$$\text{Entonces } v_k = \frac{1}{(d_1 - d_2)} (d_2 v_i + d_1 v_j) \quad (5)$$

Inicializamos $K(v_k)$ como A .

Llamemos a los dos nuevos bloques B^1 y B^2 , y sean nv^1 y nv^2 la cantidad total respectiva de vértices. Entonces

$$nv_1 = n' + \text{Card}(H^+)$$

$$nv_2 = n' + \text{Card}(H^-)$$

y

$$V(B_1) = \{v'_i, i=1, \wedge, n'\} \cup H^+$$

$$V(B_2) = \{v'_i, i=1, \wedge, n'\} \cup H^-$$

Para cada vértice "nuevo" agregamos el índice del plano a su conjunto de caras.

El número de caras de los nuevos poliedros se calcula mediante la fórmula de Euler

$$nc = na + 2 - nv$$

donde na es el número de aristas., definido por

$$(6) \quad na = \text{Card} \{ (i,j) \in \Omega \mid \text{Card}(K(v_i) \cap K(v_j)) = 2 \}$$

Sea c_i una cara. Para cada vértice v_j , se verifica si $i \in K(v_j)$. En ese caso, se agrega el vértice a la lista de vértices de la cara. Luego se reordenan los vértices de modo que recorran el perímetro de la cara.

Si el bloque original era externo se verifica si los subbloques lo son. (Es obvio que al menos uno de ellos debe serlo).

Se calculan a continuación el diámetro, el volumen y el centroide de los subbloques.

Cálculo del Diámetro

El diámetro del bloque es el máximo de la distancia entre todos los pares de vértices.

Cálculo del Volumen

Sea n el número de vértices del bloque. Si $n=4$, se calcula el volumen del tetraedro con la formula

$$(7) \quad V = \frac{(v_2 - v_1) \cdot [(v_3 - v_1) \times (v_4 - v_1)]}{6}$$

donde \cdot indica el producto interno y \times el producto vectorial.

Si $n > 4$, entonces dividimos el bloque en tetraedros y sumamos los volúmenes. Sea v_1 un vértice del poliedro y sea C una cara que no contenga a v_1 . Sean $\{\hat{v}_i, i=1, \wedge, nc\}$ los vértices de la cara. Entonces el volumen de la pirámide de base C será

$$(8) \quad V_c = \sum_{i=2}^{nc} \frac{[(\hat{v}_i - v_1) \cdot [(\hat{v}_1 - v_1) \times (\hat{v}_{i+1} - v_1)]] \Omega}{6}$$

y el volumen total del bloque será

$$(9) \quad V = \sum_C V_c, v_1 \notin C$$

Los bloques de volumen menor a 0.001 m³ son descartados, aunque su volumen total y su número son almacenados.

4. BLOQUIMETRÍA

Se definen una serie de "tamices virtuales" de la siguiente manera:

Sean V_{\min} y V_{\max} los volúmenes mínimo y máximo de bloques. Entonces hacemos

$$(10) \quad \begin{aligned} l &= 0 \\ \text{Para } j &= [\log(V_{\min})] - 1, \dots, [\log(V_{\max})] + 1 \\ \text{Para } k &= 1, \dots, 9 \\ l &= l + 1 \\ T(l) &= k \cdot 10^l \end{aligned}$$

Entonces se calcula $R(j) = \sum Vol(B)$, si j es el primer índice que satisface $Vol(B) < T(j)$, y $RA(j) = \sum_{i \leq j} R(i)$ y

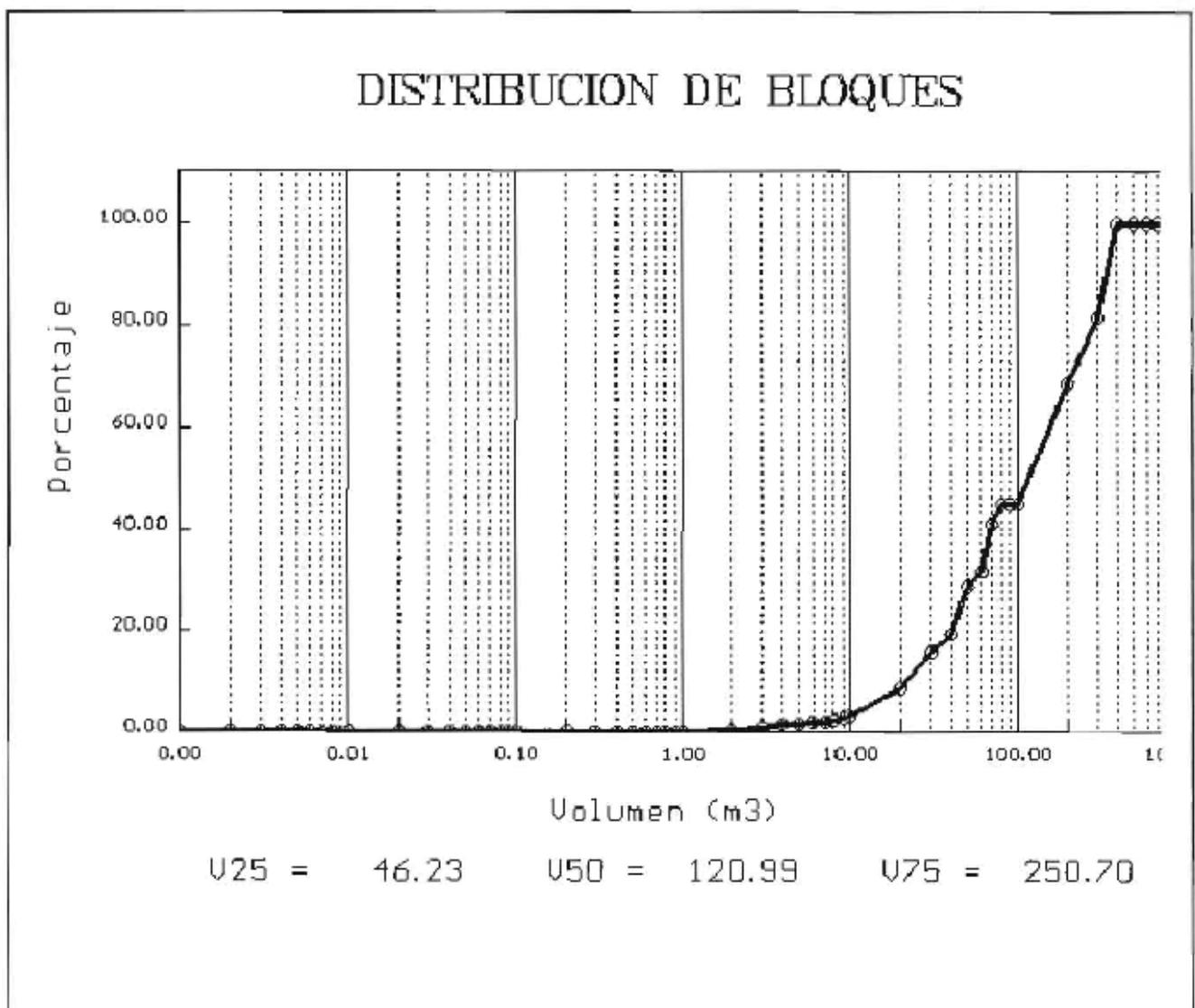
el porcentaje de $RA(j)$ respecto al volumen total.

Se calculan los percentiles V_{25} , V_{50} y V_{75} del volumen del volumen total considerado.

5. SALIDA DE CÁLCULO PRINCIPAL

El modelo analítico genera una tabla de bloques con sus diámetros y volúmenes, con una indicación del número y volumen total de bloques menores que 0.001 m³; y un gráfico (curva bloquimétrica) con la distribución de porcentaje (% pasante) de volúmenes acumulados. De esta forma se avanza en cuantificación estructural con fines geotécnicos, en la medida de disponibilidad de ejecución de líneas de muestreo, para las que generalmente se tienen facilidades en etapa de excavaciones, o también implementando obtención de testigo orientado en los sondeos de estudio con diamantina, este último procedimiento sería deseable se implementara como método rutinario, en la evaluación y diseño de proyectos relevantes en roca en Argentina.

FIGURA 3.



6. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

HELIOT, D. 1988.

Generating a blocky rock mass. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 12, No. 3.: 127-138.

GOODMAN, R. E and G. SHI. 1985.

Block Theory and Its Application to Rock Engineering. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

BARTON, N. and S. BANDIS. 1982.

Effects of Block Size on the Shear Behavior of Jointed Rock. *Proceedings 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics Berkeley, August 25-27, 1982*), pp. 739-760. New York: Society of Mining Engineers, A.I.M.E.

VENDRAMINI, N. A. NIELL, 1994.

Tratamiento integral de líneas de datos obtenidos mediante líneas de muestreo. *ACTAS Asoc. Arg. Geol. Apl. Ing.* : Vol VIII, 104 -117 (1994) Bs.As.

VENDRAMINI, N. A. NIELL, 1994.

Tratamiento de datos de orientación de discontinuidades "Modelo Estructural Probabilístico". *ACTAS Asoc. Arg. Geol. Apl. Ing.* : Vol VIII, 122-134 (1994) Bs.As.

VENDRAMINI, N. A. NIELL, 1999.

Tratamiento de frecuencias de discontinuidades determinadas por líneas de muestreo incorporando la incertidumbre estadística de los datos. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*. N° 14 . 161 - 164 . 1999. Buenos Aires



EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO PURMAMARCA (JUJUY - ARGENTINA)

Ramiro Daniel SOLER¹

Resumen

Se evalúa la erosión hídrica en la cuenca del río Purmamarca a partir de la aplicación de tres metodologías. La primera, de carácter cualitativo, consiste en calcular a partir de una serie de parámetros ligados al suelo, al clima y a la vegetación dos índices: a) Índice de erosión potencial y b) Índice de erosión real utilizando la propuesta aplicada en el Programa CORINE de la Unión Europea. La segunda metodología, también de tipo cualitativo, es la propuesta por el ITC (International Training Centre for Aerial Survey), que consiste en evaluar las unidades en que se divide el territorio asignándole una clase de susceptibilidad a la erosión la cual resulta de la suma de baremos asociados a distintos parámetros del medio físico. Finalmente, la aplicación del Método de Erosión Potencial permite obtener en forma cuantitativa la degradación específica de la cuenca. Los valores obtenidos fueron agrupados en clases de susceptibilidad de erosión para la confección de la cartografía de riesgo de erosión. La cuenca hídrica del río Purmamarca, afluente del río Grande de Jujuy, se desarrolla sobre el flanco montañoso occidental de la quebrada de Humahuaca. Constituye un ámbito geográfico favorable para la existencia de diversos procesos geológicos superficiales como la erosión hídrica. La necesidad de elaborar estrategias de ordenamiento territorial de la cuenca requiere como punto de partida la obtención de información precisa del medio físico en general y geológico en particular, siendo la erosión hídrica un aspecto de especial interés en el análisis.

Palabras clave: riesgo, erosión, cuenca, Purmamarca.

ABSTRACT

The hydric erosion is evaluated in the basin of the Purmamarca River starting from the application of three methodologies. The first, of qualitative character, consists on calculating starting from a series of parameters related to the soil, climate and vegetation two indexes: a) Index of potential erosion and b) Index of real erosion using the proposal applied and it was elaborated in the Program CORINE of the European Union. The second methodology, also of qualitative type, are the proposed by the ITC (International Training

Centre for Aerial Survey), consists on evaluating each one of the units in that the territory is divided assigning a class of erosion susceptibility that is the sum of scales assigned to different parameters of the physical setting. Finally, the application of the Potential Erosion Method allowed obtaining in quantitative form the specific degradation of the basin. The values or categories obtained were contained in classes of erosion susceptibility for the making of the cartography of erosion risk. The hydric basin of the Purmamarca river, tributary of the Grande de Jujuy river, it is developed on the western mountainous flank of the Quebrada of Humahuaca. It constitutes a favorable geographical environment for the existence of diverse surficial geologic processes as hydric erosion. The necessity to elaborate strategies of territorial planning of the basin requires as starting point the obtaining of precise information of the physical means in general and geologic in particular, being the hydric erosion an aspect of special interest in the analysis.

Entregado: 31 de Agosto de 2004 • Aceptado: 14 de Octubre de 2004

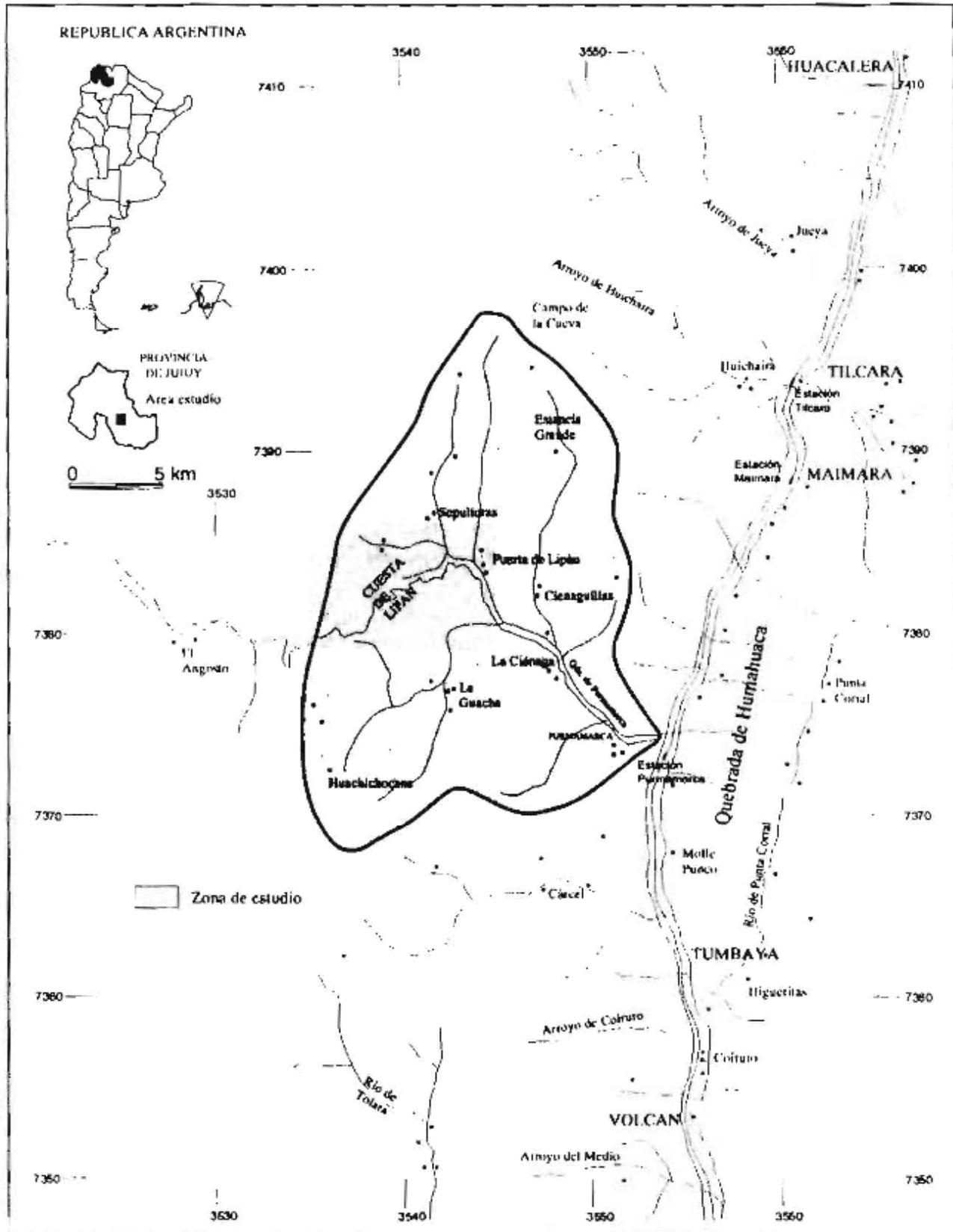
¹ Comisión Nacional de Energía Atómica, Departamento Regional Noroeste.
Av. Bolivia 4.750. CP: 4400, Salta.
E-mail: rdsoler@yahoo.com.ar

1. INTRODUCCIÓN

El río Purmamarca drena la vertiente occidental de la Quebrada de Humahuaca y es uno de los principales

afluentes del río Grande de Jujuy. Su cuenca imbrífera tiene una extensión de 596 km² (Fig.1) y muestra, al igual que la mayor parte de los cursos fluviales de la región, un régimen hidrológico marcadamente torrencial.

FIGURA 1. MAPA DE UBICACIÓN



Los mayores caudales se registran durante los meses de verano como respuesta a la distribución estival de las precipitaciones. Al tratarse de una cuenca de alta montaña gran parte de los elementos naturales que componen el medio físico están controlados por la altitud y orientación de los cordones montañosos.

La dinámica geológica externa está dominada por la acción fluvial y la remoción en masa. Estos procesos, y en especial sus fases más intensas, vienen afectando sensiblemente a los habitantes de la cuenca y a sus bienes materiales desde tiempos históricos como así también a las obras de infraestructura civil implantadas durante las últimas décadas. Procesos menos espectaculares, aunque no menos importantes, como la erosión o salinización de suelos o la intervención inadecuada del hombre en el paisaje (impacto visual) resultan de fundamental importancia al momento de analizar y definir estrategias de ordenamiento territorial para la región. En los últimos años las rutas de la zona comenzaron a mostrar un marcado incremento en el tránsito de vehículos, tanto de carga como particulares y de transporte de pasajeros. Asimismo los pueblos de la Quebrada de Humahuaca, debido al incremento de la actividad turística, se vieron estimulados a reforzar su infraestructura de hoteles, paradores y predios para acampar. La consolidación del Paso de Jama como principal vía de comunicación entre el noroeste argentino y el norte de Chile así como el incremento del turismo a nivel nacional constituyen las causas fundamentales de tal situación. La falta de una planificación territorial que tome como punto de partida la caracterización del medio físico ha provocado que sectores fuertemente amenazados por procesos naturales como la llanura de inundación del río Purmamarca hayan sido incorporados al ejido urbano del pueblo.

La demanda creciente de productos regionales (dulces y comidas artesanales) y artesanías provocó también la expansión de las áreas cultivadas las que, al igual que en el caso anterior, suelen ser sectores poco aptos para este tipo de usos. El presente trabajo tiene por objeto evaluar el riesgo de erosión hídrica en la cuenca del río Purmamarca a partir de la aplicación de tres metodologías diferentes y forma parte de un estudio geológico ambiental elaborado por el autor.

2. RASGOS FISOGRÁFICOS

La Quebrada de Humahuaca es una depresión intermontana de aproximadamente 150 km de longitud, extendida en sentido N-S desde las cercanías de la ciudad de San Salvador de Jujuy, en el sur, hasta la localidad de Tres Cruces en el norte. Su rasgo morfológico más destacable es la asimetría entre la vertiente oriental, de escaso desarrollo areal e hidrográfico y la occidental, más extensa, tendida y drenada. Los principales afluentes occidentales son los ríos Yacoraité, en el norte, Purmamarca y Tumbaya Grande en el sector central y León, Lozano y Reyes hacia el sur. El colector troncal es el río Grande de Jujuy que desagua en el río San Francisco perteneciente al Sistema del Plata (Fig.1).

El río Purmamarca tiene sus nacientes a una altura cercana a los 4.100 m sobre el nivel del mar y desde este punto hasta su desembocadura en el río Grande presenta un desnivel cercano a los 1.700 m. El cordón montañoso que ocupa el sector occidental de su cuenca hídrica corresponde a las estribaciones meridionales de la Sierra Alta, una cadena con orientación N-S y altitudes que pueden superar los 4.000 m. Este elemento orográfico constituye el límite físico entre la Cordillera Oriental y la Puna. Las alturas orográficas descienden progresivamente hacia el E hasta alcanzar el cierre de la cuenca a aproximadamente 2.400 m s.n.m. Entre los picos montañosos más destacados pueden mencionarse: el Cerro Morado de Purmamarca (3.050 m s.n.m), el Cerro del Cobre (3.650 m s.n.m), el Cerro Estancia Grande (3.650 m s.n.m) y el Cerro Lipán (3.550 m s.n.m) en el norte y el cerro Azul Alto (3.800 m s.n.m) hacia el sur.

La orientación predominantemente meridiana de los cordones montañosos define una dirección predominante N-S para los cursos tributarios que ocupan el sector norte como los ríos de las quebradas de Estancia Grande (o Cienaguillas), Lipán y Sepulturas. Esta característica es el reflejo del fuerte control que ejerce la estructura regional -donde son característicos los bloques montañosos limitados por fallas de dirección meridiana- en la configuración del relieve y el drenaje.

Los ríos tributarios ubicados hacia el sur del río Purmamarca muestran algunas diferencias con respecto a aquellos que drenan el sector septentrional. Tales diferencias se relacionan principalmente a la variabilidad en la orientación de los colectores principales, la morfología de las cuencas y el diseño de las redes de drenaje. Así, mientras en el sector norte predominan las cuencas de morfologías alargadas y angostas en la porción sur son características las formas redondeadas. Del mismo modo el típico diseño rectangular de las redes de drenaje del sector norte es reemplazado por diseños dendríticos con una mayor sinuosidad del colector principal lo que respondería a un control relacionado más directamente con la litología que con la estructura regional. Los principales afluentes del sector sur de la cuenca son los ríos de las quebradas de Coquena, Chalala y Huachichocana.

3. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

El clima de la zona es árido, mesotermal, con nulo exceso de agua y baja concentración estival de la eficiencia térmica (Thornthwaite 1948). El régimen térmico está condicionado por la latitud y principalmente por la altitud debido a que a mayor altura la temperatura desciende según un gradiente que es función del contenido de humedad del aire, el mayor albedo y la presencia de vientos (Buitrago y Larrán 1994). Al igual que en muchos sectores del noroeste argentino la información termo-pluviométrica es escasa e incompleta. Los datos de temperatura para la localidad de Purmamarca, obtenidos entre los años 1988 y 1995, arrojan una media anual de 16.3 °C registrándose los valores máximos (19.1 °C) y mínimos (12.1 °C) durante los meses de diciembre y julio respectivamente (Tabla

Tabla 1. TEMPERATURAS DE LA LOCALIDAD DE PURMAMARCA (Serie: 1988-1995)

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	MEDIA
1988	19,9	17,2	19	16,1	11,2	12,4	10,6	14,4	13,7	16,3	18,3	18,5	15,6
1989	18,4	18,8	17,1	16,5	13,7	13,4	12,2	16,2	13,4	16,6	18	19,6	16,2
1990	18,6	17,3	18,7	17,5	15	12,3	10	14,5	14,3	17,6	18,7	18,6	16,1
1991	18,3	17,8	17,7	17,5	16,9	13,9	14,2	18,3	16,8	15,8	17	19,9	17
1992	18	18,2	18,1	16,3	16	15,1	10,2	12,9	13,6	16,3	16,3	19	15,8
1993	18,8	16,5	18	16,8	16	14,9	11,2	13,4	14,4	16,8	18,1	18,4	16,1
1994	18,7	17,9	17	16	15,7	14,6	12,8	14	16,6	17,5	18,1	20	16,6
1995	19,6	18	17,8	16,4	13,7	14,9	15,3	14,8	15,1	16,8	18,1	18,7	16,6
Media	18,8	17,7	17,9	16,6	14,8	13,9	12,1	14,8	14,7	16,7	17,8	19,1	16,3

En lo que respecta a las temperaturas extremas, la variación anual de los valores mínimos es más marcada que aquella mostrada por los máximos o medios debido a la escasa variación del goce de radiación, que determina pocas diferencias entre las máximas de verano y las de invierno (Buitrago y Larrán 1998). Las temperaturas mínimas, en cambio, dependen de la irradiación térmica nocturna, que se acentúa marcadamente en invierno debido a la mayor duración de la noche y al menor contenido de humedad en la atmósfera, sumándose a esto, la llegada de masas de aire frío procedentes del sur. La amplitud térmica media oscila entre 4,7 y 25 °C para los meses de julio y diciembre respectivamente. El régimen de heladas aumenta con la altitud y oscila los 200 días al año. El fuerte control del relieve sobre el ingreso de las masas de aire en la región determina que las precipitaciones sean de tipo orográfico con una distribución de tipo monzónico.

La precipitación media anual de Purmamarca es de 96 mm y se concentra entre los meses de noviembre y marzo. Cada ciertos años –en coincidencia con los efectos de perturbaciones del patrón climático global– se registran valores superiores a los 200 mm, debido a la influencia del fenómeno ENSO (El Niño / Southern Oscillation) que provoca sensibles modificaciones tanto en los volúmenes como en la distribución de las precipitaciones en todo el noroeste argentino (Bianchi y Yañez 1993). La influencia del ENSO ha provocado importantes movimientos en masa a lo largo de toda la quebrada de Humahuaca desde tiempos históricos.

La humedad relativa registra los mayores valores durante los meses de otoño debido a la menor temperatura respecto del verano y a la alta humedad remanente luego de la estación lluviosa.

El régimen de vientos –fuertemente condicionado por el relieve– muestra un predominio de las denominadas “brisas de valle y montaña” caracterizadas por un movimiento ascendente de las masas de aire caliente hacia la montaña durante el día y el descenso de brisas frescas por la noche. Otro viento de influencia local es el “viento norte” típicamente seco, cálido y rafagoso. Durante los meses de verano, la entrada de aire húmedo desde el océano Atlántico responde a la circulación de la alta atmósfera y, si bien no registran velocidades de importancia, son los vientos proveedores de las lluvias orográficas de la región. En el invierno ingresan a la región masas de aire polar (secas o húmedas).

4. MARCO GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL

Desde el punto de vista morfoestructural la comarca de estudio pertenece a la provincia geológica de la Cordillera Oriental (Turner y Mon 1979). Esta unidad, que presenta la configuración típica de una faja plegada y corrida, está caracterizada por una tectónica de corrimientos de rumbo N-S los que produjeron estructuras imbricadas y vergentes hacia el E. Se trata de un cinturón orogénico joven, afectado por diferentes fases diastróficas desde el Paleozoico inferior hasta el Cenozoico, las que alcanzaron su mayor intensidad (levantamiento) durante el período Plioceno-Pleistoceno. Las fases diastróficas precenozoicas han condicionado la distribución y geometría de las unidades litológicas y han influido en la generación de las estructuras más jóvenes.

El Basamento está integrado por las metasedimentitas de bajo grado de la Formación Puncoviscana las que, junto con las unidades cámbricas del Grupo Mesón, forman la mayor parte de los cordones montañosos. El contacto discordante entre ambas unidades se atribuye a la fase Tilcárica (Turner y Méndez 1979) del Ciclo Geotectónico Pampeano.

Las sedimentitas ordovícicas pertenecientes al Grupo Santa Victoria afloran principalmente en el sector sur de la cuenca y sólo localmente en las cabeceras de la quebrada de Estancia Grande. Forman fajas alargadas en sentido submeridional compuestas por lutitas y areniscas arcillosas de coloración amarillenta a gris amarillenta, muy fosilíferas e intensamente diaclasadas.

Con posterioridad a la depositación de éstas unidades se produce un extenso hiato hasta el Cretácico superior, momento en que se inicia la sedimentación de las unidades del Grupo Salta. Este grupo está compuesto por areniscas calcáreas, medianas a gruesas, friables y de color blanquecino (Formación Lecho) y calizas oolíticas, estromatolíticas y margas de coloración amarillenta (Formación Yacoraite) que afloran en el tramo inferior y sobre ambos márgenes de la quebrada de Purmamarca y también en la quebrada de Estancia Grande. En la localidad de Cienaguillas la Formación Lecho se asienta en discordancia sobre unidades ordovícicas (Salfity 1980).

Los depósitos cuaternarios corresponden esencialmente a sucesiones de conglomerados de color rosado, mal seleccionados, entre los que intercalan niveles

areniscas gruesas a conglomerádicas y bancos de pelitas de color verdoso, asociados a abanicos aluviales dominados por fenómenos gravitatorios de sedimentos - esencialmente debris flows- actualmente infuncionales. Los depósitos modernos, representados por las actuales planicies y abanicos aluviales junto con las espesas formaciones coluviales ubicadas al pie de las vertientes, están compuestos principalmente de bloques, gravas y arenas.

5. GEOMORFOLOGÍA

La morfología de la cuenca del río Purnamarca es el resultado de la compleja interacción entre la evolución tectónica y los procesos exógenos. Los principales agentes modeladores del relieve son el escurrimiento fluvial y la remoción en masa, aunque en forma subordinada y local merece destacarse la acción eólica. Pueden reconocerse dos ambientes morfológicamente diferenciados ubicados por encima y debajo de los 3.500 m de altitud.

En las áreas altas la morfogénesis es escasa y predominan las formas suaves y redondeadas. Predominan las formas asociadas a un ambiente criogénico el que estaría relacionado a una condición paleoclimática más fría y húmeda, que habría afectado a la región durante el Pleistoceno.

La acción del escurrimiento fluvial es poco importante y la mayor parte de los sectores pedemontanos se encuentran cubiertos por un espeso manto de detritos (campo de derrubios) compuesto por bloques angulosos y de granulometría variada.

Las vertientes de las serranías, tal como ocurre en la sierra de Lipán u otros sectores del sudoeste de la cuenca, suelen mostrar en su porción superior conspicuos lóbulos y terracillas de soliflucción.

Por encima de los 4.000 m de altura puede observarse, sólo localmente, relictos de geformas de origen glacial. En contraposición, los terrenos ubicados por debajo de los 3.500 m se encuentran sometidos a una intensa morfogénesis dominada por procesos fluviales y gravitatorios que le imprimen al paisaje un aspecto accidentado donde dominan las pendientes pronunciadas y las divisorias agudas. El escurrimiento fluvial se organiza en valles cuya morfología y evolución estuvieron fuertemente controladas por la estructura regional y las fluctuaciones climáticas ocurridas durante el Cuaternario. En el sector norte de la cuenca se destaca la presencia de valles de orientación meridional a submeridional. Son de carácter subsecuente y están controlados por frentes de corrimiento tectónico. De este a oeste, pueden citarse los de Estancia Grande (o Cienaguillas), Lipán y Sepulturas. La hidrografía de la porción sur de la cuenca muestra algunas diferencias principalmente en lo que respecta a la geometría de las redes fluviales y a la morfología de las subcuencas. Mientras que en el sector norte predominan las redes de drenaje de diseño rectangular a angular en la porción sur suelen dominar las de tipo dendrítico. La morfología de las subcuencas, por su parte, muestra una clara tendencia hacia formas más circulares y con una mayor sinuosidad

de los colectores principales. Entre los principales tributarios del sector sur pueden mencionarse los ríos de las quebradas de Coquena, Chalala y Huachichocana.

Las principales geformas de origen fluvial son los abanicos aluviales que se distribuyen principalmente a lo largo de la quebrada principal y en las quebradas laterales del sector septentrional. Sobre la base de sus características morfológicas y correlación topográfica se han identificado tres generaciones de abanicos (Soler 2003).

En algunos sectores suelen encontrarse cerca de la superficie de los abanicos más antiguos horizontes calcáreos (calcretes), observables en surcos producidos por la erosión hídrica. Sobre el frente de éstas acumulaciones aluviales es destacable la presencia de una densa y ramificada red de canales angostos, profundos y pronunciados que en conjunto forman un paisaje de badlands altamente funcionales durante la estación lluviosa. Estos canales suelen concentrar rápidamente las aguas de precipitación, encauzándolas y dando lugar a flujos con alta capacidad de transporte y velocidad. En la totalidad de los abanicos los flujos densos (debris flows) muestran un claro predominio sobre los netamente fluviales. En los abanicos acrivos es característica la presencia de los típicos "albardones laterales" hacia los bordes del canal de descarga de numerosos abanicos actuales ubicados tanto dentro de la cuenca como en otros sectores de la quebrada de Humahuaca. Los procesos típicamente fluviales suelen ser poco frecuentes debido a la enorme disponibilidad de material detrítico en prácticamente toda la cuenca y a la incapacidad del sistema de movilizarlo con caudales normales. Los cursos de agua adquieren un carácter típicamente fluvial durante los meses de estiaje, cuando son alimentados por pequeños manantiales ubicados hacia las cabeceras de las cuencas.

Los flujos densos suelen dominar también la dinámica de las llanuras aluviales actuales las que suelen ser invadidas por las aguas fluviales durante las crecientes asociadas lluvias elevadas.

La acción fluvial también puede observarse en la erosión lineal de las acumulaciones coluviales que tapizan las vertientes.

Las pronunciadas pendientes, el fuerte grado de fracturación de las rocas aflorantes, la escasa cobertura vegetal y las intensas precipitaciones estivales son los principales elementos que controlan y favorecen la ocurrencia de diversos procesos de remoción en masa como los flujos. Estos fenómenos son los principales mecanismos constructores de los actuales abanicos y bajadas aluviales que ocupan las áreas pedemontanas y la desembocadura de las principales quebradas.

En diferentes sectores de la cuenca media e inferior pueden observarse deslizamientos rotacionales parcialmente estabilizados y otros que en apariencia han tenido una actividad reciente. Los paquetes inmovilizados suelen verse afectados por nuevos deslizamientos más modernos producidos a expensas del movimiento principal y también eventos que comienzan como deslizamientos y culminan como flujos. El factor disparador de los flujos de mayor magnitud está ligado a las fuertes precipitaciones estivales las que presentan

comportamiento diferencial según el año en que se considere. Han sido definidos dos tipos característicos de fenómenos: por un lado se encuentran los debris flows de gran magnitud que responden a precipitaciones "excepcionales" de alta intensidad dentro de la cuenca los que tendrían una recurrencia variable de entre 10 y 20 años. Su alta velocidad, capacidad de transporte y movilidad les permite recorrer distancias relativamente largas e inclusive abandonar los límites de las subcuencas de origen e inclusive de la misma cuenca de Purmamarca. El segundo tipo, más frecuente, corresponde a debris flows de menor magnitud, con moderada a baja movilidad y de recurrencia prácticamente anual. En este caso la masa inmovilizada y la distancia recorrida es considerablemente menor. Otros fenómenos gravitatorios más localizados se observan a lo largo de la ruta nacional N° 52 (Cuesta de Lipán) donde se producen caídas de rocas y detritos, originados principalmente en la desestabilización de las vertientes afectadas por el corte del camino. Sobre las áreas cumbreles de las sierras se desarrollan relieves con muy baja pendiente desarrollados principalmente sobre rocas de edad cámbrica y precámbricas que corresponderían a antiguas planicies de erosión regional. Tales superficies se presentan dislocadas por efecto de las distintas fases de la orogenia andina (Tchilinguirian y Percyra 2001) por lo que aparecen ubicadas a diferentes niveles altitudinales.

6. METODOLOGÍA

La erosión -especialmente la de origen hídrico- es un fenómeno lento y extendido en gran parte del planeta llegando en muchas áreas a constituir un verdadero riesgo. Cuando este proceso, por su intensidad o persistencia, afecta las propiedades y productividad de los suelos deben llevarse adelante una serie de medidas tendientes a minimizar el impacto negativo o evitar

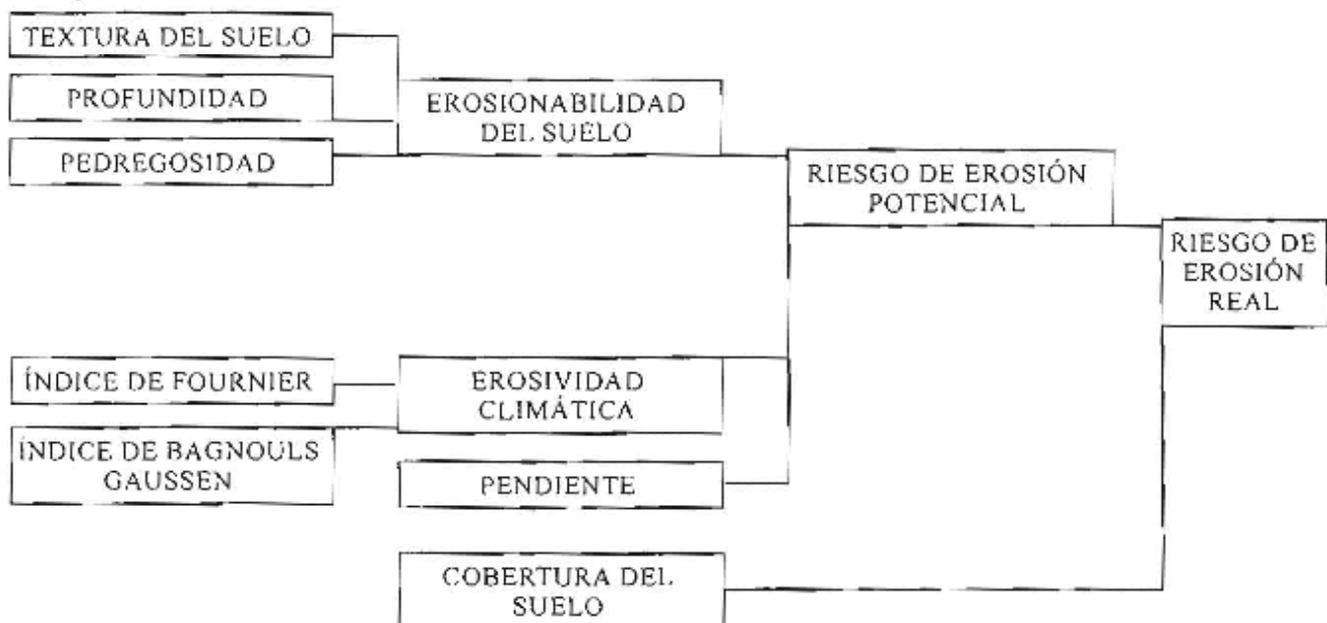
extensión del proceso hacia mayores superficies. La escasa fertilidad de los suelos y la agresividad de las lluvias que caracterizan gran parte de la cuenca de estudio hace prioritaria la valoración de este proceso y su consideración en la planificación del manejo del medio natural. La estimación de la intensidad de la erosión sobre los suelos de la cuenca está enfocada principalmente al impacto sobre el valor productivo del suelo o a su relación con otros fenómenos asociados (aluvionamiento, mayor aporte de material sólido para movimientos en masa, entre otros) más que a la descripción del proceso erosivo en sí. En este contexto resulta primordial la identificación de sectores con características y grados de intensidad erosiva semejantes a los fines de priorizar las actuaciones sobre las áreas más críticas. Los métodos utilizados para la evaluación de la erosión en el presente trabajo son los del Programa CORINE (1992) y del ITC, ambos de tipo cualitativo. En forma complementaria se utilizó el método de cuantificación de la producción media anual de sedimentos propuesto por Gavrilovic (1988). La aplicación de las tres metodologías se utilizó como base el mapa de unidades geomorfológicas homogéneas de la cuenca (Fig.2).

Método CORINE-CEC

Este método fue elaborado y aplicado en el Proyecto "Riesgos de erosión de suelos y evaluación de tierras" (*Soil erosion risk and important land resources*) dentro del Programa CORINE y su objetivo primordial fue crear un sistema de información sobre el estado del medio y de los recursos naturales en los distintos estados de la Unión Europea (CORINE-CEC 1992).

La aplicación del método permite obtener dos índices denominados: a) *Índice de riesgo de erosión potencial (IREP)* que indica la susceptibilidad de los terrenos a la erosión considerando los factores ligados al suelo, las condiciones climáticas y el relieve y b) *Índice de riesgo de erosión*

Cuadro 1. ETAPAS DE LA EVALUACIÓN DE RIESGO DE EROSIÓN POR EL MÉTODO DE CORINE (1992)



real (IRER) que muestra la erosión en las condiciones actuales de uso del suelo y cobertura vegetal (Cuadro 1). En una primera etapa, se determina el riesgo de erosión potencial a partir de los índices de erosionabilidad del suelo, erosividad climática y pendiente mediante la determinación de valores que corresponden a diferentes clases. Con ello se obtiene la susceptibilidad inherente del terreno a la erosión, sin considerar la cobertura vegetal, lo que correspondería al peor de los casos.

Posteriormente, el IREP se modifica según el Índice de cobertura del suelo, obteniéndose el Índice de riesgo de erosión real (IRER). El índice de erosionabilidad del suelo (IES) se evalúa considerando la granulometría, profundidad y pedregosidad superficial. Las características granulométricas del suelo permiten definir tres clases de granulometría (Tabla 2) obtenidas a partir del diagrama del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

FIGURA 2. MAPA DE UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS HOMOGÉNEAS

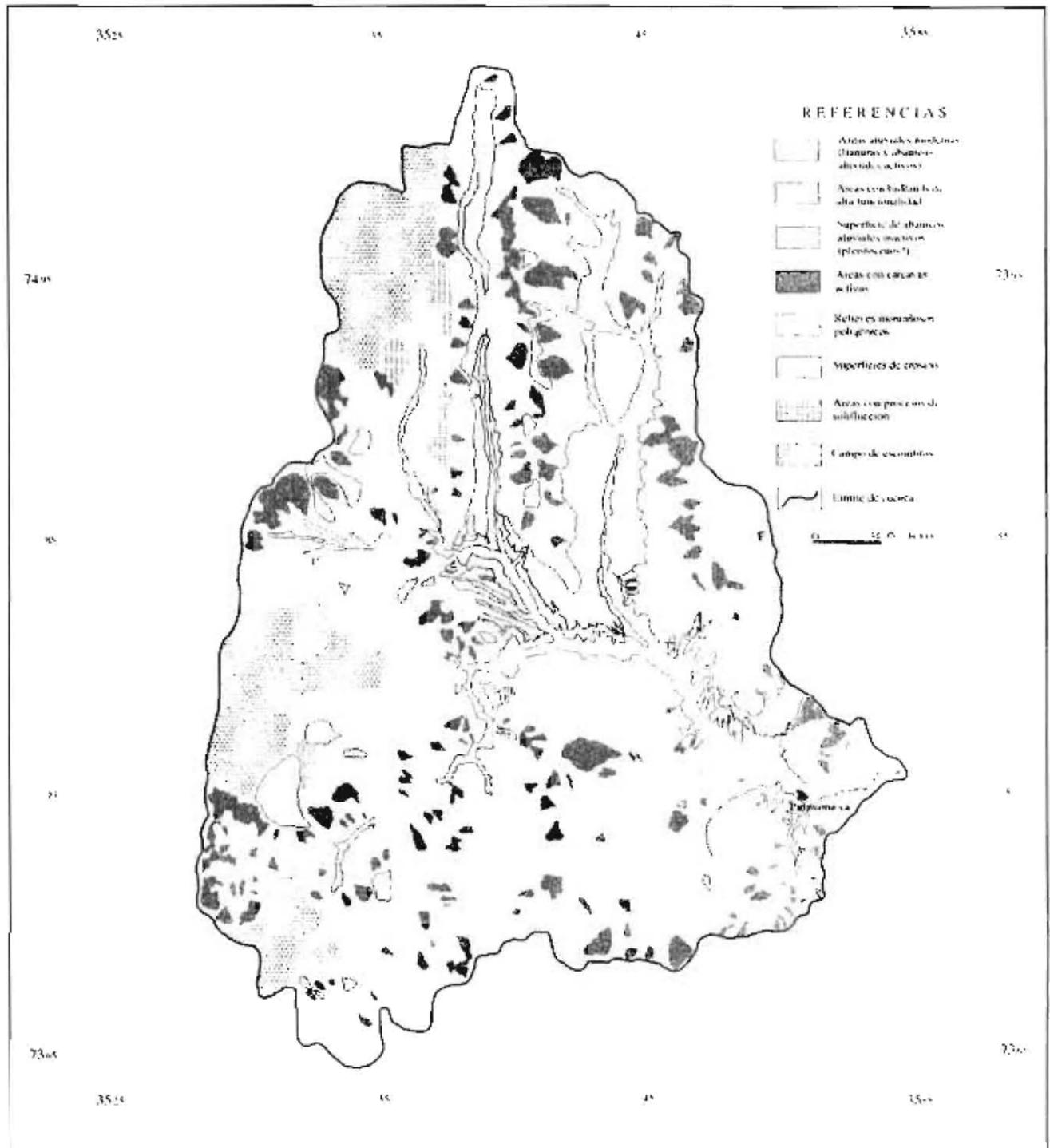


Tabla 2. CLASES DE EROSIONABILIDAD SEGÚN TEXTURA USDA (United States Department of Agriculture)

Clase	Descripción	Textura
1	Ligeramente erosionable	C, SC, ZC
2	Moderadamente erosionable	SCL, CL, ZCL, LS, S
3	Altamente erosionable	L, ZL, Z, SL

Donde: Z: arcillosa LS: arenosa-franca
 SL: franco-arenosa SC: arcillo-arenosa
 ZC: arcillo-limosa C: limosa
 SCL: franco-arcillo-arenosa ZL: franco-limosa
 C: limosa

La profundidad del suelo se establece como la distancia superior de la roca o del material original sin meteorizar) entre la superficie y la base del perfil (Ej. la parte según la Tabla 3:

Tabla 3. CLASES DE EROSIONABILIDAD SEGÚN LA PROFUNDIDAD DEL SUELO

Clase	Descripción	Profundidad (mm)
1	Ligeramente erosionable	> 750
2	Moderadamente erosionable	250 - 750
3	Altamente erosionable	< 250

La pedregosidad está referida al porcentaje de piedras (material > 20 mm) en superficie, según la Tabla 4:

Tabla 4. CLASES DE EROSIONABILIDAD SEGÚN PEDREGOSIDAD SUPERFICIAL

Clase	Descripción	Porcentaje cobertura
1	Completamente protegido	> 10 %
2	No totalmente protegido	< 10 %

El valor del IES se obtiene del producto:

$IES = \text{clase textural} \times \text{clase por profundidad} \times \text{clase de pedregosidad}$

Al IES se le asignan los valores de la Tabla 5:

Tabla 5. VALORES ASIGNADOS AL INDICE DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO (IES)

Índice	Descripción	Rango
1	Bajo	0 - 3
2	Moderado	3 - 6
3	Alto	> 6

El Índice de erosividad climática (IE) se obtiene a partir del Índice de Fournier-Arnoldus IF (*Fournier Index*) (Arnoldus 1980) y del Índice ombrotérmico de Bagnouls-Gaussen IBG (Gaussen 1954, 1955). El Índice de Fournier, modificado por Arnoldus, se obtiene por medio de la expresión:

$$IF = \sum (p_i^2 / P) \quad \text{de } i = 1 \text{ hasta } i = 12 \quad (1)$$

Donde: p_i = precipitación total del mes i (mm)
 P = precipitación total media anual (mm)

El valor de IF se clasifica según la Tabla 6:

Tabla 6. VALORES ASIGNADOS SEGÚN EL INDICE FOURNIER (IF)

Clase	Descripción	Rango
1	Muy bajo	< 60
2	Bajo	60 - 90
3	Moderado	90 - 120
4	Alto	120 - 160
5	Muy alto	> 160

El índice ombrotérmico de Bagnouls-Gaussien se calcula a partir del balance de humedad mes a mes, estimando la evapotranspiración a partir de la temperatura, por lo que constituye una estimación de la aridez climática. Se obtiene aplicando la formulación:

$$IBG = \sum (2 t_i - p_i) k_i \quad \text{de } i = 1 \text{ hasta } i = 12 \quad (2)$$

Donde: t_i = temperatura media del mes i ($^{\circ}\text{C}$)
 p_i = precipitación total del mes i (mm)
 k_i = proporción del mes i en que $2 t_i - p_i > 0$ (se obtiene por interpolación lineal)

El valor de IBG se clasifica según la Tabla 7:

Tabla 7. VALORES ASIGNADOS SEGÚN EL IBG

Clase	Descripción	Rango
1	Húmedo	0
2	Moderadamente húmedo	0 - 50
3	Seco	50 - 130
4	Muy seco	130

El valor de IE se obtiene del producto:

$$IE = IF \times IBG$$

Asignándole al IE los valores de la Tabla 8.

Tabla 8. VALORES ASIGNADOS SEGÚN EL IE

Índice	Descripción	Rango
1	Bajo	< 4
2	Moderado	5 - 8
3	Alto	> 8

El Índice de pendiente (IP) se estableció a partir del valor medio del ángulo de la pendiente en cada

homogénea. A esta pendiente se le asigna el IP en función del rango de valores indicado en la Tabla 9:

Tabla 9. VALORES ASIGNADOS SEGÚN PENDIENTE

Índice	Descripción	Rango
1	Suave o llano	< 5
2	Llano	5 - 15
3	Pendiente	15 - 30
4	Muy pendiente	> 30

Para la cubierta vegetal se efectúa una binaria en función del tipo de vegetación según la Tabla

Tabla 10. VALORES ASIGNADOS SEGÚN CUBIERTA VEGETAL

Índice	Descripción	Rango
1	Completamente protegido	Bosques, pastos permanentes y montaje bajo denso
2	No completamente protegido	Terreno cultivado o desnudo

El riesgo de erosión potencial IREP se obtiene mediante el producto:

$$IREP = IES \times IE \times IP$$

El IREP se clasifica posteriormente en cuatro grados (Tabla 11):

Tabla 11. GRADOS DE CLASIFICACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN POTENCIAL

Clase	Descripción	Rango
0	Ninguno	0
1	Bajo	0 - 5
2	Moderado	5 - 11
3	Alto	> 11

El Índice de riesgo de erosión real (IRER) se obtiene a partir del IREP y de la cubierta vegetal, mediante la siguiente matriz (Tabla 12):

Tabla 12. VALORES DEL GRADO DE EROSIÓN REAL

Índice cubierta vegetal	PSER			
	1	2	3	4
1	0	1	1	2
2	0	1	2	3

Los valores obtenidos para la cuenca del río Purmamarca se presentan en el Cuadro 2 y en el mapa de riesgo de erosión (Fig. 3). La aplicación del método CORINE para la evaluación de las diferentes unidades homogéneas en las que se ha subdividido la cuenca del río Purmamarca permite agrupar dichas unidades dentro de tres categorías o clases donde el fenómeno erosivo se presenta con diferente intensidad. A partir del cálculo del Índice de Riesgo de Erosión Real (IRER) se observa que las cárcavas de alta funcionalidad y los badlands son los sectores que se encuentran sometidos a un ALTO riesgo de erosión. Los relieves montañosos poligénicos presentan un MODERADO riesgo de erosión. Finalmente las áreas correspondientes a las llanuras y abanicos aluviales actuales, la superficie de abanicos antiguos (AI), las superficies de erosión antiguas, las áreas de soliflucción y el campo de derrubios presenta un BAJO riesgo de erosión. No surgen diferencias considerables al comparar el Índice de Riesgo de Erosión Potencial (IREP) respecto al Índice de riesgo de erosión real debido a que la influencia de la cobertura vegetal en las unidades analizadas es baja y solo presenta cierta importancia en los sectores donde se presentan procesos de soliflucción y en los campos de derrubios donde los pastizales de altura generan un efecto protector con respecto a la erosión disminuyendo el riesgo de moderado a débil. No se han implementado prácticas de conservación en ningún sector de la cuenca.

Método de valoración de la erosión del ITC

Este método, al igual que el anterior, permite obtener en forma cualitativa una aproximación del estado del terreno a partir de la ponderación de los parámetros que controlan la erosión (Cendrero et al. 1986; Centeno et al. 1994). Consiste en la evaluación de cada una de las diferentes unidades homogéneas en las que se subdivide el territorio y asignarlas a una clase de susceptibilidad de erosión de acuerdo a un índice que surge de la sumatoria

de los baremos de cada parámetro (Sancho 1997). Los resultados obtenidos son comparables con los de otras metodologías como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (López Cadenas 1987). El método considera tanto los parámetros que controlan los procesos erosivos como la eventual implementación de prácticas de conservación de los suelos (Van Zuidam y Van Zuidam-Cancelado 1979). La valoración final de cada unidad se obtiene sumando los baremos correspondientes a cada parámetro y asignando cada unidad a una clase de susceptibilidad de acuerdo a su grado de erosión actual. La asignación de baremos y la definición de las clases de susceptibilidad de erosión para las diferentes unidades homogéneas de la cuenca del río Purmamarca puede observarse en el Cuadro 3 y en el mapa de susceptibilidad a la erosión (Fig. 4). Los resultados obtenidos permiten definir cinco categorías de susceptibilidad a la erosión. Presentan una DÉBIL susceptibilidad a la erosión las áreas ocupadas por el campo de derrubios. Las antiguas superficies de erosión, los sectores con procesos de soliflucción, las superficies de abanicos inactivos y las áreas aluviales modernas presentan una MODERADA susceptibilidad a la erosión. Una ALTA a MUY ALTA susceptibilidad a la erosión está presente en los relieves montañosos poligénicos. Las áreas ocupadas por cárcavas activas muestran una MUY ALTA a ALTÍSIMA susceptibilidad a la erosión. Finalmente las áreas ocupadas por badlands de alta funcionalidad presentan una ALTÍSIMA susceptibilidad a la erosión.

Método de Erosión Potencial (Gavrilovic 1988)

Este método es un modelo empírico para la estimación del volumen de sedimentos producidos en una cuenca hídrica y fue desarrollado por S. Gavrilovic para las cuencas del sureste de la ex-Yugoslavia (Gavrilovic 1959). Posteriormente fue modificado por Zemljic (1971) para su aplicación a cuencas de Eslovenia y por

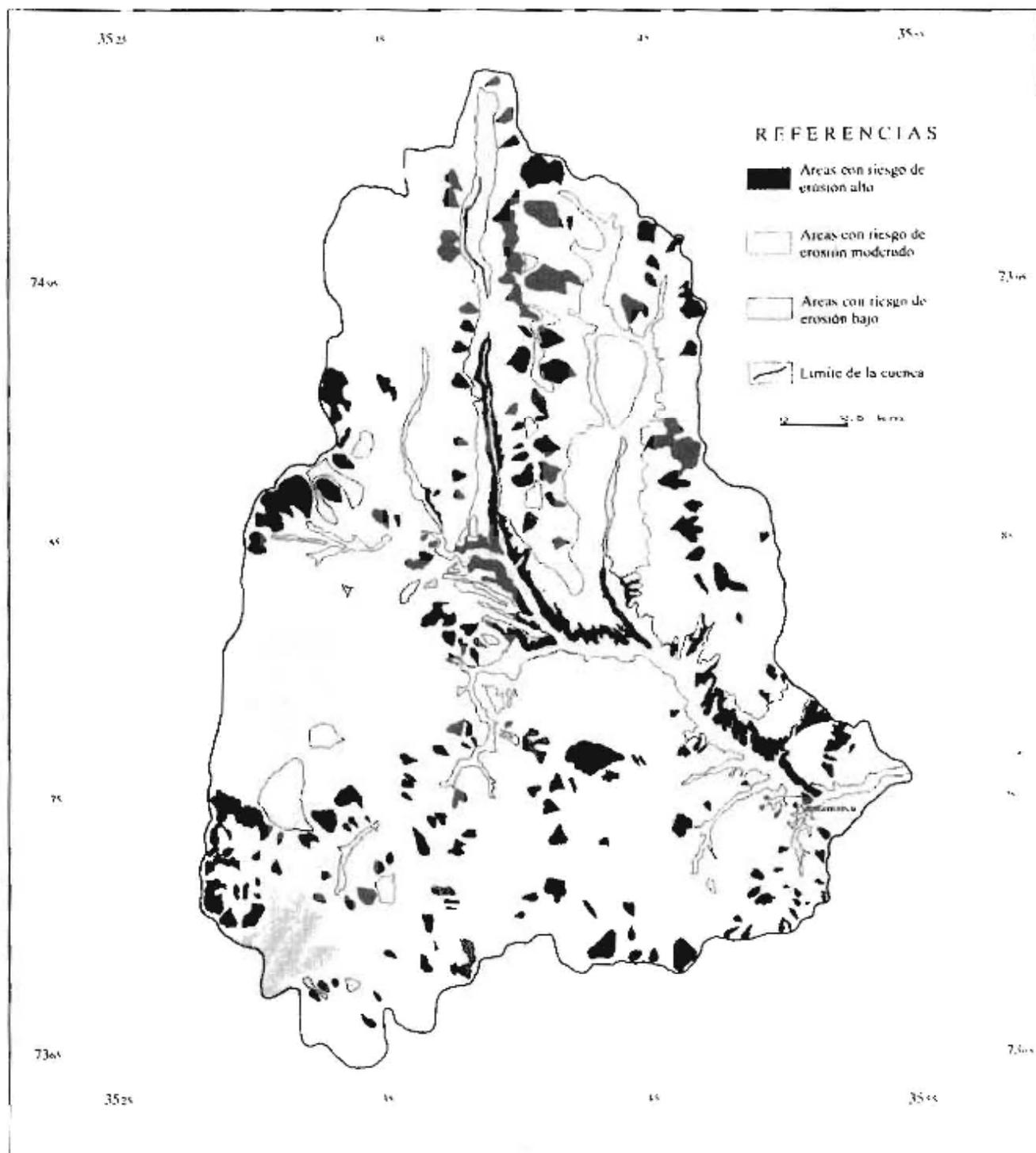
M. Djorovic del Instituto Forestal de Industrias de la Madera de Belgrado (Gavrilovic y Djorovic 1974). Luego, en 1988, Z. Gavrilovic renombró el método como Método de Erosión Potencial. La utilización de esta metodología permite calcular la degradación específica de cuencas no demasiado extensas y con marcadas

características torrenciales a partir de la valoración de una serie de parámetros que representan los factores principales que controlan el proceso erosivo (precipitación y clima, suelo, relieve y vegetación además de un parámetro que estima el grado y tipo de erosión actual en la cuenca).

Cuadro 2. PARÁMETROS Y VALORES DE RIESGO DE EROSIÓN PARA LA CUENCA DEL RÍO PURMAMARCA SEGÚN EL MÉTODO DE CORINE-CEC (1992)

ÍNDICE / UNIDAD GEOMORFOLÓGICA HOMOGÉNEA	Áreas aluviales modernas	Superficie de abanicos inactivos (AI)	Superficies de erosión	Relieves serranos degradados	Cárcavas de alta funcionalidad	Badlands	Áreas con procesos de soliflucción	Campos de derrubios
Clase de erosionabilidad según textura	3	1	3	2	3	3	3	3
Clase de erosionabilidad según profundidad	3	2	3	3	3	3	3	3
Clase de erosionabilidad según pedregosidad	1	2	1	1	2	1	1	1
ÍNDICE DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO	Alto 3	Moderado 2	Alto 3	Moderado 2	Alto 3	Alto 3	Alto 3	Alto 3
Índice de Fournier	1	1	1	1	1	1	1	1
Índice de Bagnouls-Gaussen	4	4	4	4	4	4	4	4
ÍNDICE DE EROSIÓN CLIMÁTICA	Bajo 1	Bajo 1	Bajo 1	Bajo 1	Bajo 1	Bajo 1	Bajo 1	Bajo 1
ÍNDICE DE PENDIENTE	Suave o llano 1	Llano 2	Suave o llano 1	Pendiente 3	Muy pendiente 4	Muy pendiente 4	Pendiente 3	Llano 2
RIESGO DE EROSIÓN POTENCIAL	Bajo 1	Bajo 1	Bajo 1	Moderado 2	Alto 3	Alto 3	Moderado 2	Moderado 2
Cobertura vegetal	2	1	1	2	2	2	1	1
RIESGO DE EROSIÓN REAL	Bajo 1	Bajo 1	Bajo 1	Moderado 2	Alto 3	Alto 3	Bajo 1	Bajo 1

FIGURA 3. MAPA DE RIESGO DE EROSIÓN (CORINE 1992)



La ecuación de la producción media anual de sedimentos es:

$$W = T h n (Z^3)^{1/2} F \quad (\text{m}^3/\text{año})$$

Donde W es el caudal sólido medio en $\text{m}^3/\text{año}$ como medida de la degradación específica de una cuenca, $T = (t_0 / 10 + 1)^{1/2}$ es el factor de temperatura, t_0 es la temperatura media anual en $^{\circ}\text{C}$, h la precipitación media anual en mm, $n = 3.1416$, F la superficie de la cuenca en

km^2 y Z el coeficiente de erosión, que refleja la intensidad y extensión del fenómeno erosivo en la cuenca.

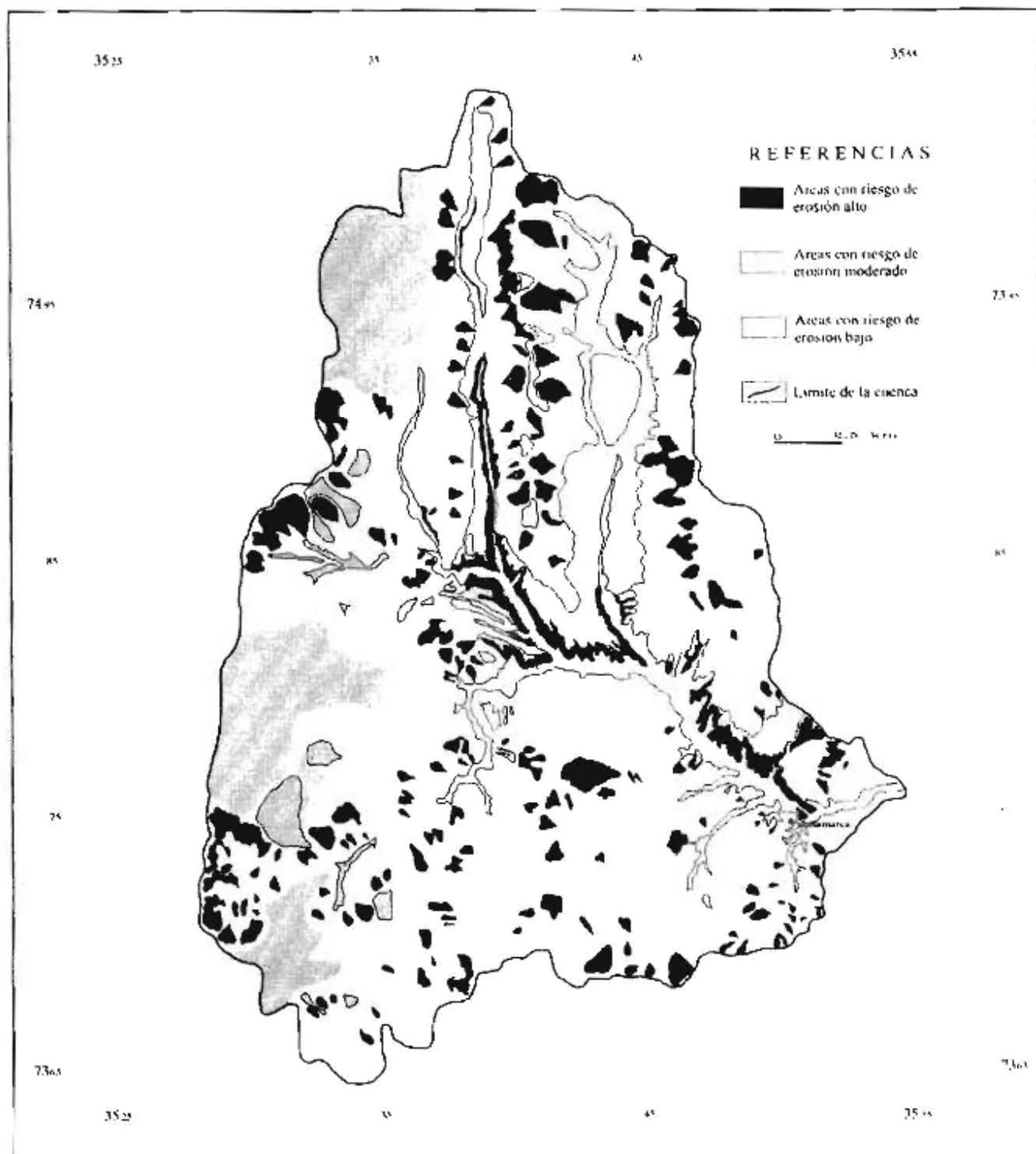
El parámetro Z valora la influencia de los factores de suelo, vegetación y relieve de la siguiente forma:

$$Z = X_a Y (d + l^{1/2})$$

Cuadro 3. CÁLCULO DE LA CLASIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO PURMAMARCA (Van Zuidam y Van Zuidam-Cancelado 1979)

Parámetro / Unidad Homogénea	Áreas aluviales modernas	Superficies de abanicos inactivos (AI)	Superficies de erosión	Relieves serranos degradados	Cárcavas de alta funcionalidad	Bodilands	Áreas con procesos de soliflucción	Campo de derrubios
A) Pendiente								
Tipo %	Llano o casi llano 1	Poco pendiente 2	Casi llano 1	Escarpado 16	Muy escarpado 24	Muy escarpado 24	Pendiente 4	Poco pendiente 2
Longitud	Algo larga 4	Algo larga 4	Algo larga 4	Algo larga 4	Corta 2	Corta 2	Corta 2	Muy larga 8
Forma	Recta 3	Cóncava 1	Convexa 2	Recta 3	Cóncava 1	Cóncava 1	Convexa 2	Cóncava 1
B) Vegetación y usos del suelo								
Tipo / densidad	Cultivos extensivos 8	Pastizales 4	Pastizales 4	Pastizales 4	Nula 12	Nula 12	Pastizales 4	Pastizales 4
C) Condiciones climatológicas								
Aguaceros	Varios / año 4	Varios / año 4	1 en un año 2	Varios / año 4	Varios / año 4	Varios / año 4	Varios / año 4	Excepcional 1
D) Grados de erosión y movimientos en masa								
Eólica	Moderada 2	Débil 1	Débil 1	Débil 1	Débil 1	Débil 1	Débil 1	Moderada 2
Laminar	Ninguna 0	Moderada 2	Ninguna 0	Débil 1	Ninguna 0	Ninguna 0	Débil 1	Débil 1
Drenaje	Fuerte 4	Débil 1	Ninguna 0	Débil 1	Fuerte 4	Fuerte 4	Débil 1	Ninguna 0
Masas	Ninguna 0	Ninguna 0	Ninguna 0	Moderada 2	Fuerte 4	Fuerte 4	Débil 1	Ninguna 0
E) Suelo y roca madre								
Profundidad	Muy profundo 1	Muy profundo 1	Muy profundo 1	Algo superficial 3	Muy superficial 4	Profundo 1	Poco profundo 2	Muy profundo 1
Textura	Grava 1	Arena gruesa 2	Grava 1	Grava 1	Grava 1	Grava 1	Grava 1	Grava 1
Fragmentación	Ninguna 0	Ninguna 0	Ninguna 0	Ninguna 0	Ninguna 0	Ninguna 0	Ninguna 0	Ninguna 0
Compactación	No consolidado 4	Poco consolidado 2	Poco consolidado 2	No consolidado 4	No consolidado 4	No consolidado 4	Poco consolidado 2	Poco consolidado 2
Estructura	Poco inclinada 1	Medio inclinada 2	Horizontal 0	Muy inclinada 3	Muy inclinada 3	Muy inclinada 3	Muy inclinada 3	Poco inclinada 1
Impermeabilidad	Profunda 0	Profunda 0	Profunda 0	Poco profunda 1	Profunda 0	Superficial 4	Profunda 0	Profunda 0
F) Prácticas de conservación								
Terreno	-	-	-	-	-	-	-	-
Drenaje	Canales -2	-	-	-	-	-	-	-
CLASE	Moderada 31	Moderada 26	Moderada 31	Alta a muy alta 48	Muy Alta a altísima 64	Altísima 65	Moderada 28	Débil 24

FIGURA 4. MAPA DE RIESGO DE EROSIÓN (ITC)



Siendo:

Y: coeficiente adimensional de erosionabilidad del suelo que varía entre 0.5 para suelos con buena estructura, menos erosionables y 2 para arenas, gravas y suelos sueltos.

X₀: coeficiente adimensional que cuantifica el estado de la cobertura vegetal y las prácticas de conservación de suelos, variando de 0.05 para bosques y vegetación arbustiva bien cubiertos a 1 para suelos desnudos sin labranza.

d: coeficiente adimensional que cuantifica el

erosivo de la cuenca desde 0.2 para cuencas sin otro tipo de erosión manifiesta que pequeños deslizamientos de márgenes en la red de drenaje, a 0.1 en cuencas en su totalidad con procesos erosivos avanzados.

l: pendiente media de la cuenca como parámetro representativo del factor relieve en %.

Los valores de *Y*, *X* y *d* propuestos por Gavrilovic (1988) (Tabla 13) surgen de más de veinte años de experiencia en este campo (Peviani et al. 1994).

El coeficiente de retención (*R*) se obtiene de acuerdo con

Zemljic (1971) de la siguiente ecuación:

$$R = [(O \cdot D)^{1/2} (L + L_1)] / [(L + 10) \cdot F]$$

Donde:

O es el perímetro de la cuenca en km

D diferencia media de nivel en la cuenca en km

L₁ es longitud total de los afluentes fluviales laterales en km

L es la longitud de la cuenca medida sobre el talweg principal en km

F es la superficie de la cuenca en km²

Para la aplicación del método se subdividió la cuenca en 23 subcuencas debido a que el método tiene un mejor

ajuste para superficies reducidas y, además, de esta forma puede discriminarse con mayor facilidad los sectores más productivos. Los valores de pendiente de cada subcuenca, reflejados en el parámetro *I* y expresados en porcentaje, se obtuvieron a partir de dividir el Relieve (*Rc*) que es la diferencia de altitud entre el punto más elevado de la cuenca y el punto en que el cauce que drena esta cuenca se une con el valle, y la Longitud de la cuenca (*Lc*) que es la distancia en línea recta desde la desembocadura del cauce y el punto más alejado sobre el perímetro de la cuenca. Estos datos fueron obtenidos del mapa topográfico de la cuenca. Con relación a la temperatura y a la precipitación se utilizaron los registros de la estación Purmamarca.

Tabla 13. VALORES DE LOS COEFICIENTES Y, X y d DE LA ECUACIÓN DE GAVRILOVIC (Gavrilovic 1988)

Coefficiente de resistencia del suelo "Y"	Valor
Suelos sueltos, arenas y gravas	2
Loess y suelos salinos	1.6
Rocas calizas desintegradas	1.2
Flisch y areniscas	1.1
Esquistos	1
Calizas duras y pizarras	0.9
Suelos con buena estructura	0.5

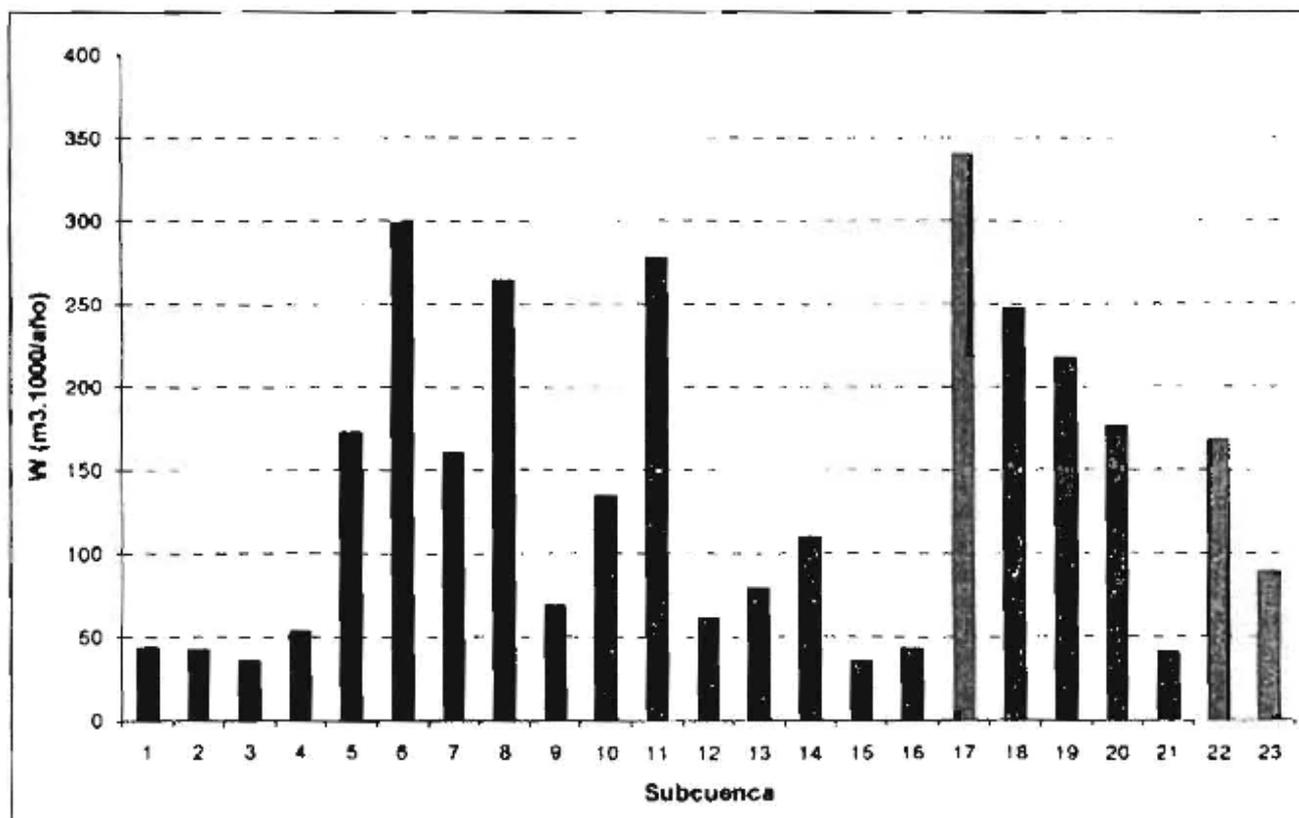
Coefficiente de uso del suelo "X"	Valor
Suelo desnudo	1
Barbecho	0.9
Viñedos	0.7
Pastizales de montaña	0.6
Bosques	0.5
Praderas	0.4

Coefficiente de procesos erosivos observados "d"	Valor
100 % de la cuenca con erosiones profundas y con cárcavas y deslizamientos	1
80 % de la cuenca con erosiones profundas y con cárcavas y deslizamientos	0.9
50 % de la cuenca con erosiones profundas y con cárcavas y deslizamientos	0.8
100 % de la cuenca con erosión laminar y algunos regueros y cárcavas	0.6
50 % de la cuenca con erosión laminar y algunos regueros y cárcavas	0.5
20 % de la cuenca con erosión laminar y algunos regueros y cárcavas	0.3
Sin signos de procesos erosivos	0.2

Los coeficientes de erosión observada y de usos de suelo fueron obtenidos de la aerofotointerpretación de la zona y de observaciones directas en el terreno. Finalmente, los coeficientes de resistencia del suelo fueron asignados a partir de la cartografía de suelos existente y observaciones de campo. Los resultados

permiten estimar la tasa promedio anual de producción de sedimentos de las diferentes subcuencas y se presentan en la figura 5. Como figura 6 se presenta el mapa de producción media anual de sedimentos en m³ .1000/año y en porcentajes respecto al total producido por la cuenca.

FIGURA 5. PRODUCCIÓN MEDIA ANUAL DE SEDIMENTOS DE LAS SUBCUENCAS DEL RÍO PURMAMARCA DE ACUERDO CON LA METODOLOGÍA DE GAVRILOVIC (1988)



Si bien existen áreas de mayor importancia (Ej. subcuenca 17) la totalidad de la subcuencas analizadas muestran una elevadísima tasa de producción de sedimentos. Aunque esta situación hace realmente compleja la intervención a nivel de cuenca permite definir los sectores más críticos para la implementación de medidas locales y la asignación de prioridades en la planificación

7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las metodologías descriptas permiten concluir:

1. La cuenca del río Purmamarca se encuentra sujeta a una intensa y generalizada erosión hídrica resultado de la coexistencia de factores como las elevadas pendientes, la escasa cobertura vegetal y la intensidad de las precipitaciones.
2. El riesgo de erosión en los diferentes sectores de la cuenca está controlado esencialmente por las diferencias en el régimen de lluvia (altitud), la resistencia mecánica de las litologías aflorantes y las pendientes.
3. Las diferencias en el estado erosivo de cada una de las unidades analizadas, muestra una clara relación con la morfología y dinámica morfogenética interna de las mismas lo que permite concluir que la base geomorfológica resulta un instrumento de gran utilidad

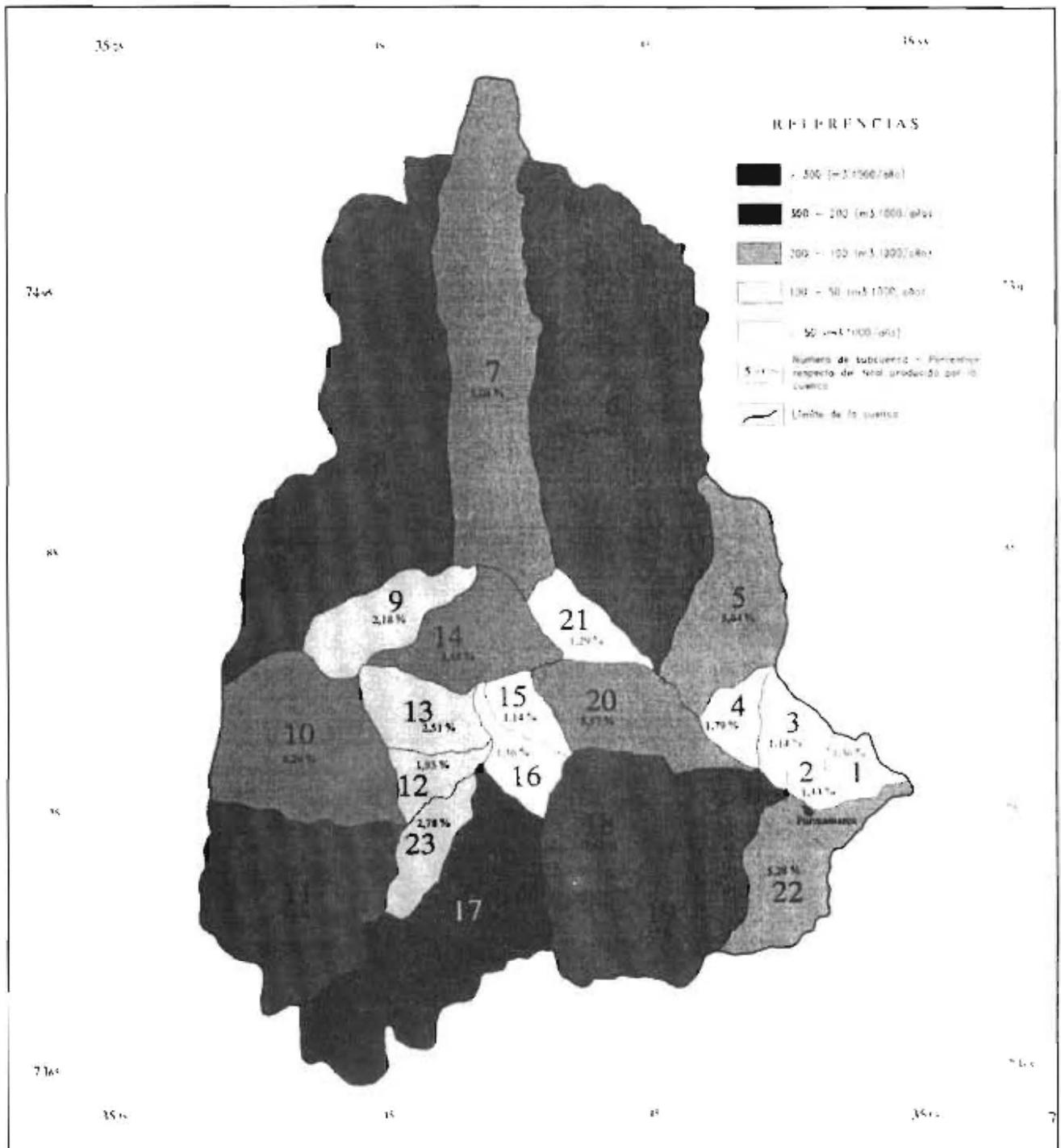
en el análisis del proceso erosivo a nivel de cuenca.

4. Los resultados de las tres metodologías aplicadas son semejantes y coherentes con lo observado en la interpretación fotogeológica y el terreno.

5. La evaluación de la erosión hídrica es de vital importancia a la hora de minimizar los efectos negativos de la misma y realizar una planificación territorial de la cuenca.

8. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del estudio "Geología ambiental de la cuenca del río Purmamarca (Jujuy - Argentina)". El autor desea expresar su agradecimiento a todos aquellos que han aportado de una manera u otra a la realización del mismo y de manera expresa al Proyecto FOMEC 072/95 de la Carrera del Doctorado en Ciencias Geológicas de la Universidad Nacional de Salta y a la Unidad de Actividad de Geología de Comisión Nacional de Energía Atómica.

FIGURA 6. MAPA DE PRODUCCIÓN MEDIA ANUAL DE SEDIMENTOS**9. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO**

ARNOLDUS, H.M.J., 1980.

An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. En De Boodt, H. & Gabriels, P. (eds.) Assessment of Erosion, John Wiley & Sons, 324 pp. Chichester.

BIANCHI, A.R. Y C.E. YAÑEZ, 1993.

Las precipitaciones en el Noroeste Argentino. 383 pp. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

BUITRAGO, L.G. Y M. LARRÁN, 1994.

El Clima de la Provincia de Jujuy. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Jujuy, 38 pp. Jujuy.

CENDRERO, A. et al., 1986.

Mapa geocientífico de la provincia de Valencia. Diputación General de Valencia, 71 pp. Valencia.

CENTENO, J.D., M.J. FRAILE, M.A. OTERO Y A.J. PIVIDAL, 1994.

Geomorfología Práctica. Editorial Rueda, 66 pp. Madrid.

CORINE-CEC (COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES), 1992.

CORINE Soil erosion risk and important land resources. An assessment to evaluate and map the distribution of land quality and soil erosion risk. Office for official publications of the European Communities, EUR 13233, 97 pp. Luxemburgo.

GAVRILOVIC, S., 1959.

Methode de la classification des bassins torrentiels et equations nouvelles pour le calcul des hautes eaux et du debit solide. 87 pp. Belgrado.

GAVRILOVIC, Z., 1988,

The use of an empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. 98 pp. Wallingford.

GAVRILOVIC, S. Y M. DJOROVIC, 1974.

Quantitative classification of torrents waterways. Institute for Forestry and Wood Industry, 88 pp. Belgrade.

GAUSSEN, H., 1954.

Theories et classification des climats et microclimats. Act VII Congrès Inter. CNRS, 125-130.

GAUSSEN, H., 1955.

Expression des milieux par des formules écologiques. Colloque Inter. CNRS, 257-269.

LÓPEZ CADENAS, F. et al., 1987.

Mapas de estados erosivos. Cuenca hidrográfica del Ebro, ICONA, 87 pp. Zaragoza.

PEVIANI, M., M. BALDIN Y L. CREPALDI, 1994.

Application of a Sediment Yield Model to an East Alpine Basin. *Man and Mountain*, Volume 94:1-14, Ponte di Legno.

SALFITY, J.A., 1980.

Estratigrafía de la Formación Lecho (Cretácico) en la cuenca andina del norte argentino. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. Tesis de Doctorado, 91 pp. Inédito.

SANCHO, C., 1997.

Los mapas de riesgos. En J.L. Peña Monne (ed.) *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*, Geoforma Ediciones, 181-200, Logroño.

SOLER, R.D., 2003.

Geomorfología de la cuenca del río Purmamarca (Jujuy – Argentina). *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, N° 19:121-134, Buenos Aires.

TCHILINGUIRIAN, P. Y F.X. PEREYRA, 2001.

Geomorfología del sector Salinas Grandes-Quebrada de Humahuaca, provincia de Jujuy. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 56(1):3-15, Buenos Aires.

THORNTHWAITE, C.W., 1948.

An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 28(1): 55-94.

TURNER, J.C.M. Y V. MENDEZ, 1979.

Geología del sector oriental de los departamentos de Santa Victoria e Iruya, Provincia de Salta, República Argentina. *Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, Volumen 51(1-2):11-24, Córdoba.

TURNER, J.C.M. Y R. MON, 1979.

Cordillera Oriental. En J.M.C. Turner (ed.) *Segundo Simposio de Geología Regional Argentina*, Volumen 1:57-94, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.

VAN ZUIDAM, R.A. Y F.I. VAN ZUIDAM-CANCELADO, 1979.

Terrain analysis and classification using aerial photographs. *ITC Textbook of photo-interpretation*, Volume VII:367-410, Amsterdam.

ZFMLJIC, M., 1971.

Calcul du debit solide – Evaluation de la vegetation comme un des facteurs antierosif. *International Symposium Interpraevent*, Villach, 15-27.



CARACTERÍSTICAS HIDRAULICAS DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANI EN EL AREA DE URUGUAY - ARGENTINA

Silva Busso Adrián Ángel ¹

Resumen

El siguiente trabajo caracteriza los aspectos hidráulicos e hidrodinámicos de los Acuíferos Termales contenidos por las Formaciones Botucatu y Serra Geral en la región oriental de la Cuenca Chacoparanense Argentina unidades hidrogeológicas atribuidas al Sistema Acuífero Guarani. Uno de los principales objetivos es definir los parámetros hidráulicos del sistema Acuífero Guarani sobre la base de 5 años de monitoreo continuo y ensayos de bombeo en los pozos. Se han determinado transmisividades entre 367 – 555 m²/día, un caudal específico varía entre 7.20 – 14.5 m³/h.m y un almacenamiento de 10-4. Este trabajo solo pretende definir a algunos aspectos relacionados con la hidráulica del sistema acuífero con el objeto de orientar futuras investigaciones.

Palabras clave: Hidrodinámica, Hidrogeología, Acuífero Guarani

ABSTRACT

This paper describe the main hydrodynamics and hydraulic aspects of the Thermal Aquifer System or Guarani Aquifer System inside Botucatu and Serra Geral Formations in the Eastern Argentine and Western Uruguay region. The main objective is determined the hydraulic characteristics and hydraulic parameters in that

aquifer system. In this paper, we have used pump test research and a monitoring data set taken along five years at the wells. In the Guarani Aquifer System we have determined that the Trasmisivity varies between 367 - 555m²/día, the specific yeld varies between 7.20- 14.5m³/h.n., and the storage of 10-4 This paper is not a definite study about the hydraulic aspects in the Guarani Aquifer System, therefore we seek to purpose future research in this way.

Entregado: 7 de Octubre de 2004 • Aceptado: 29 de Octubre de 2004

¹Instituto del Agua y Ambiente Argentina. Autopista Ezeiza - Cañuelas, tramo J. Newbery km 1,620, Ezeiza, Argentina (1804). Tel/fax. 05411-44800295.
E-mail: pntsas@ina.gov.ar

Keywords: Hydrodynamic, Hydrogeology, Guarani Aquifer

1. INTRODUCCIÓN Y ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la región Oriental de la Mesopotamia Argentina y Occidental de la República Oriental del Uruguay comprendida aproximadamente entre los 29°30' y 33°30' latitud Sur y los 57° y 60° longitud Oeste tal como puede observarse en la

Nº1. Eventualmente se ha considerado información geológica e hidrogeológica de la comarca comprendida entre los afloramientos de las Formaciones Botucatú y Piramboia (Rivera y Tacuarembó) en Uruguay, el Río Paraná, los afloramientos de la Formación Serra Geral en Argentina y el Delta del Paraná, (ver Figura 1).

FIGURA 1. MAPA DE UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



El área de estudio se encuentra sobre la base de la información geológica e hidrogeológica tomado del trabajo de Silva Busso, (1999 y 2000) en la comarca comprendida entre los afloramientos de las Formaciones Botucatú y Piramboia (Rivera y Tacuarembó) en Uruguay, el Río Paraná, los afloramientos de la Formación Serra Geral en Argentina y el Delta del Paraná. Las Formaciones continentales y/o relacionadas con el Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental son las denominadas Formaciones Piramboia y Botucatú (Gonzaga de Campos, 1889; Bigarella y Salamuni, 1964; Salamuni y Bigarella, 1967) o Formaciones Tacuarembó y Rivera (Falconer, 1931; Ferrando y Anderis, 1986) en Uruguay y Formación Serra Geral, en Uruguay denominada Formación Arapey (Bossi, 1966), y en Argentina Formación Serra Geral ampliamente estudiadas en afloramiento y que tienen continuidad en el subsuelo argentino (Silva Busso, 1999; Silva Busso y Fernández Garrasino, 2004). El Sistema Acuífero Termal ha sido

definido en función de sus características litológicas, hidráulicas e hidroquímicas relacionándolo con sus áreas de recarga en el Uruguay y diferenciándolo hidrogeológicamente de los acuíferos contenidos en las mismas Formaciones que se hayan en el subsuelo en brasileño (Silva Busso, 1999).

Los niveles geológicos continentales del Sistema Acuífero Termal no tiene afloramientos en el área de estudio del Sector Mesopotámico Argentino. La distribución de los afloramientos en Uruguay y las consideraciones permiten definir la cuenca en profundidad. La Formación Serra Geral aflora aproximadamente desde el Río Uruguay y se extiende hacia el este hasta aproximadamente el paralelo 56° hacia el sur hasta el Río Negro, al Norte se extiende sobre Brasil (Río Grande do Sul). La Formación Botucatú en la región se dispone como una franja norte sur de 10 a 100km de ancho entre los paralelos 56° y 55° aproximadamente. Las cotas topográficas aumentan gradualmente hacia el este de tal forma que los afloramientos de la Formación Serra Geral

suelen encontrarse entre los 50–100 m.s.n.m, mientras que los afloramientos de la Formación Botucatú suelen hallarse por encima de los 100m.s.n.m pudiendo llegar a los 200 m.s.n.m.(Rivera).Hacia el Río Negro y hacia el Río grande do Sul (Brasil) las cotas descienden progresivamente y no llegan a superar los 100 m.s.n.m.

2. HIDROESTRATIGRAFÍA DEL SISTEMA ACUÍFERO TERMAL

Las Formaciones continentales y/o relacionadas con el Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental son las denominadas Formaciones Piramboiá y Botucatú o Formaciones Tacuarembó y Rivera en Uruguay y la Formación Serra Geral, en Uruguay y Argentina ampliamente estudiadas en afloramiento y que tienen continuidad en el subsuelo argentino. El Sistema Acuífero Termal ha sido definido por Silva Busso, (1999 y 2000) en función de sus características litológicas, hidráulicas e hidroquímicas relacionándolo con sus áreas de recarga en el Uruguay y diferenciándolo hidrogeológicamente de los acuíferos que en unidades las mismas Formaciones se hallan en el subsuelo brasileño. La correlación de las unidades del subsuelo de la Cuenca Chacoparanense y propone un marco geológico e hidroestratigráfico adecuado para la interpretación hidrogeológica, caracterizándolo dentro de un conjunto más regional representado por las mismas (o correlacionables) unidades geológicas en Brasil y en Paraguay (Silva Busso, 2000).

La estratigrafía y geología estructural de la cuenca en Brasil son comparables con las del área de estudio en Argentina y Uruguay originadas de un conjunto de procesos tecto-efusivos y tecto-sedimentarios en común que ocurrieron durante el Mesozoico. Los acuíferos de las Formaciones Serra Geral y Botucatú están controlados por las estructuras mencionadas. Las características hidrogeológicas de cada Sistema Acuífero definido en Brasil y Argentina-Uruguay se relacionan con la disposición de los depocentros y altos existentes que controlan a cada uno de ellos localmente (Silva Busso, 1999). Esto particulariza los acuíferos contenidos en el noreste de la cuenca en Brasil, de los acuíferos del Sistema Termal en Argentina-Uruguay.

Los depocentros mencionados y la profundización de las unidades en área de estudio en rumbo NE-SO tiene control sobre la dirección de flujo subterráneo. Se debe considerar que en el área de estudio presenta un depocentro que se profundiza NE-SO separado de los depocentros definidos en Brasil por el Arco de Río Grande que eleva la altimetría del Basamento y las Formaciones suprayacentes (Silva Busso, 2000).

En el área de recarga la caracterización hidroquímica comprende a aguas que se clasifican como cloruradas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas. La concentración de Calcio supera la de Sodio, de acuerdo con estos autores, consecuente de la cementación de las unidades en afloramiento, y temperaturas en boca de pozo de 19-23 °C. La denominada Zona Hidroquímica I se caracteriza por aguas dulces (TDS<1500mg/dm³), Blandas a

Semiduras, de alta alcalinidad, tipo Bicarbonatada Sódica a Cloruro-Sulfatada Sódica en general potables restringida por la concentración de F que puede exceder la norma y la aptitud para riego es limitada con índices de RAS 3–44 y un promedio de 12 (Silva Busso, 1999). La Zona Hidroquímica II se caracteriza por aguas salobres a saladas (TDS<15000mg/dm³), Duras, de alta alcalinidad, tipo Clorurorada Sódica. Excediendo en varios parámetros los límites de potabilidad. Totalmente Inapta para riego con índices de RAS entre 37–69 y un promedio de 60 (Silva Busso, 1999). Téngase en cuenta que el gradiente hidroquímico entre Colón-I y Villa Elisa-I provincia de Entre Ríos es aproximadamente de 420 mg/dm³ de Sales Totales por Kilómetro, mientras que entre Colón-I y Arapey (R.O. del Uruguay) es de 2 mg/dm³ por kilómetro (Silva Busso, 1999).

La extensión regional del Sistema Acuífero Termal se relaciona con la geología de subsuelo, se supone la existencia de un sistema de bloques relacionados a antiguos fallamientos observándose una profundización de la cuenca en la perforación Nogoya-I, (YPF, 1962). Hacia el oeste, más allá del Río Guaqueguay las variaciones laterales de la geología en profundidad ofrecen pocas posibilidades de contener los acuíferos del Sistema Acuífero Termal. Puede considerarse como una interpretación general que la zona de estudio dentro de la cuenca presenta una profundización en dirección Sudoeste hacia Nogoyá -I constituyendo una subcuenca. En esa región de la cuenca las estructuras de bloques en profundidad consecuentes del evento tecto-efusivo que originó las vulcanitas de la Formación Serra Geral tienen expresión, al menos, en los niveles inesozoicos infrabasálticos y muy posiblemente haya condicionado los procesos de sedimentación de gran parte de los depósitos suprabasálticos hasta los más recientes.

En esta interpretación se adoptaran como probables los siguiente criterios como base para la geometría de los acuíferos contenidos en las Formaciones Serra Geral y Botucatú, considerándose este modelo estructural como posible para el Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental Argentina.

Las unidades geológicas definidas en base a los afloramientos y perforaciones de la República Oriental del Uruguay poseen continuidad litológica y estratigráfica en las perforaciones realizadas hacia el oeste sobre el sector Argentino, al menos para la región de la Mesopotamia, (Silva Busso, 1997 y 1999). En el área de estudio en Entre Ríos este criterio puede precisarse al menos hasta la cuenca del Río Guaqueguay en el centro y sur de la provincia y hasta las localidades de San Salvador -Chajarí - Guaviraví (Corrientes) en el norte. Este área puede considerarse en profundidad para edades mesozoicas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos hidráulicos efectuados en la perforaciones han estado condicionados por diversos factores que se consideran a continuación:

- Accesibilidad a la obra

- Grado de conocimiento del perfil geológico
- Diseño de las captaciones
- Características hidráulicas del Sistema Acuífero Termal

Considerando estos factores citados se ha considerado conveniente, para garantizar la representatividad de la información obtenida, realizar tres ensayos hidráulicos en las perforaciones de Federación -1, Concordia -1 y Colón -1. Los ensayos hidráulicos de las perforaciones Federación -1 y Concordia -1 (en particular esta última) se consideran representativos del Acuífero Botucatu y los ensayos sobre la perforación Colón -1 se consideran representativos del Acuífero Solari. (Silva Busso, 1999; 2000).

Las características hidráulicas del Sistema Termal impidieron realizar ensayos a régimen variable, es decir aquellos métodos que permiten interpretar la evolución de los descensos. La razón de dicho impedimento se relaciona con la naturaleza de los acuíferos del Sistema Acuífero Termal. En dicha región, que frente a las variaciones del caudal de descarga estabilizan los valores de presión en boca de pozo, en intervalos de tiempo inferiores a 1 segundo sosteniendo ese valor por periodos de tiempo medidos de hasta un año prácticamente sin variación apreciable. Los gráficos 2 y 3 muestran los valores de presión medidos a caudal de descarga constante posteriormente a los ensayos hidráulicos en las captaciones de Federación -1 y Colón -1.

FIGURA 2. VARIACIÓN DE LOS NIVELES DINÁMICOS DURANTE 30 DÍAS FEDERACIÓN 1

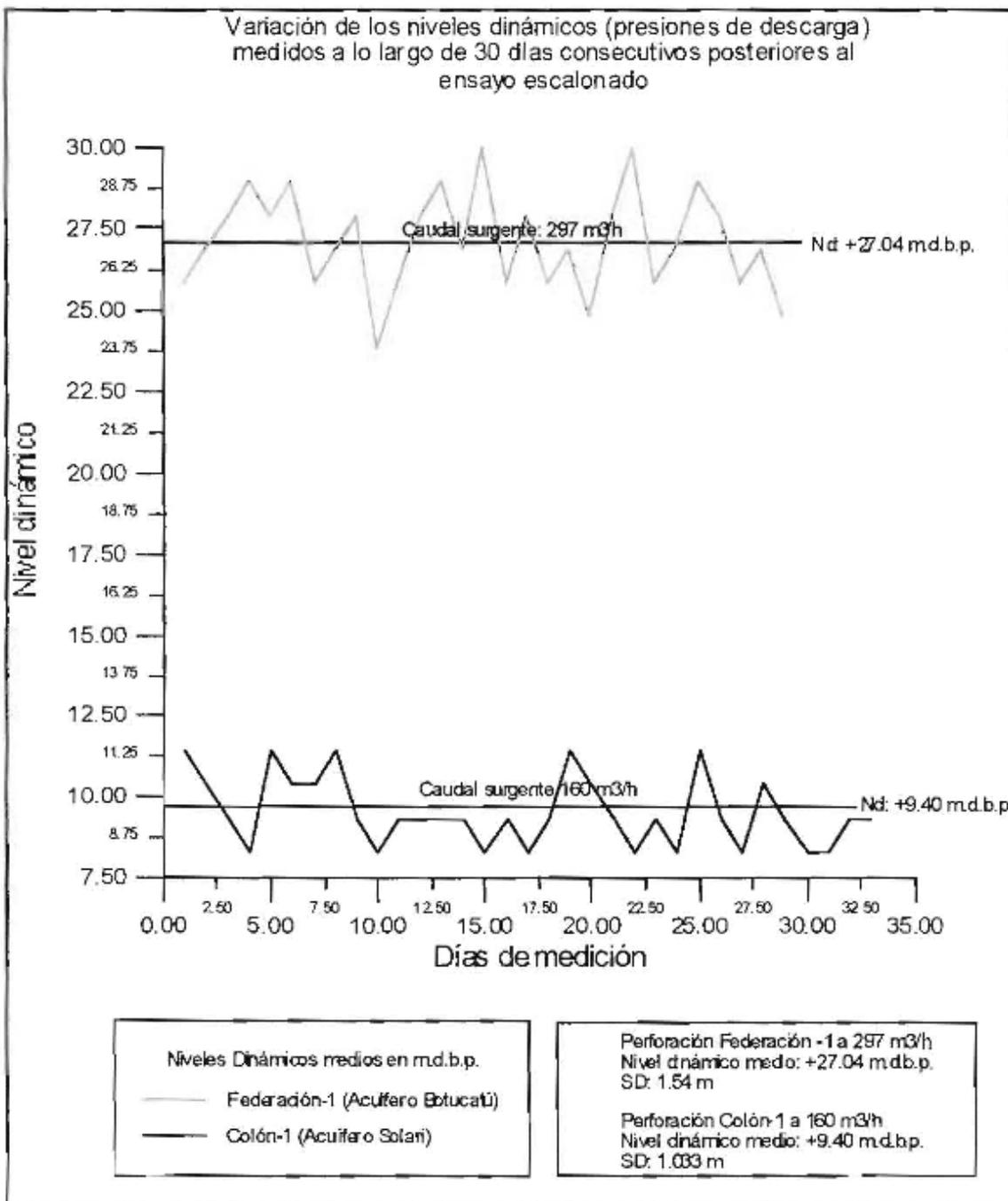
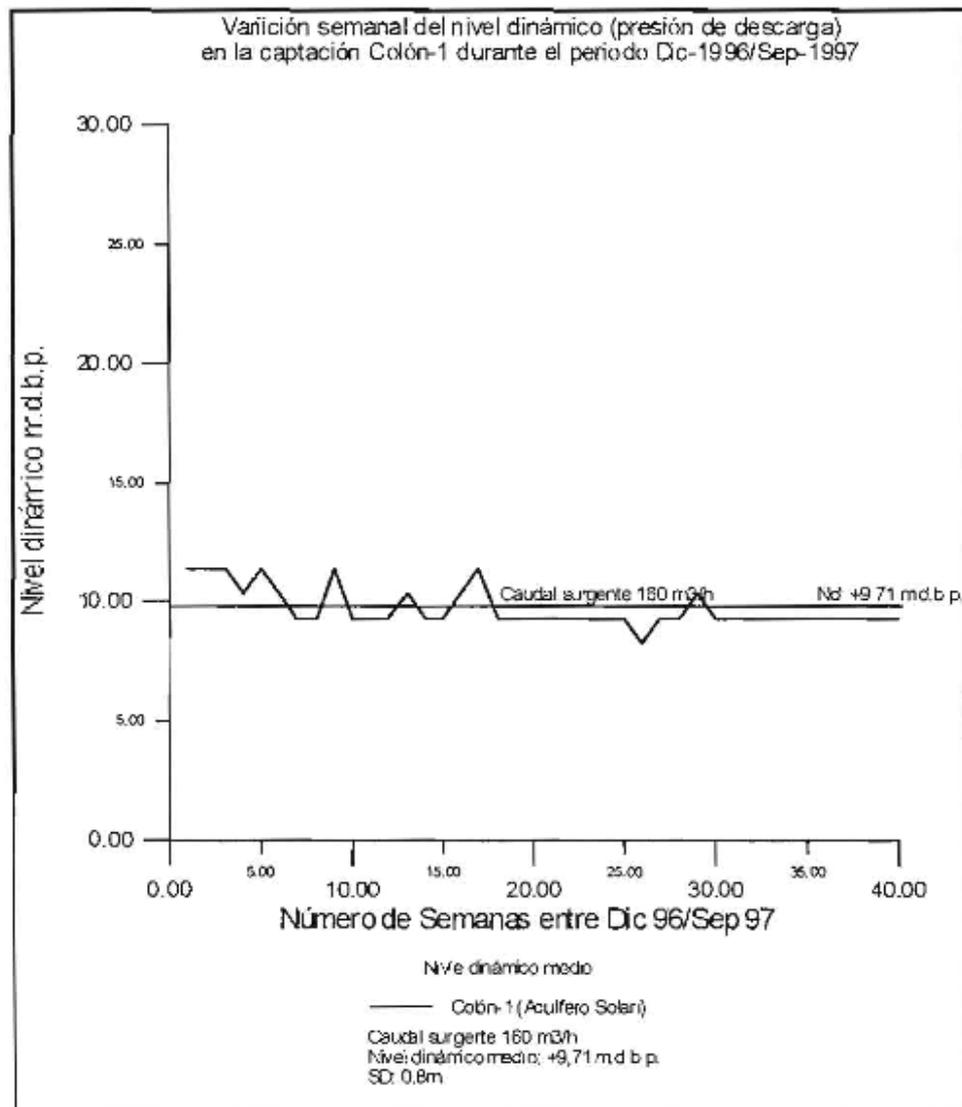


FIGURA 3. VARIACIÓN DE LOS NIVELES DINÁMICOS DURANTE 10 MESES COLÓN-1

El seguimiento es diario por espacio de 35 días en Federación -1 y Colón -1 y por espacio de 40 semanas en Colón -1, las variaciones (SD) de los niveles calculados a están en el orden de 0,8 - 1,54 m y corresponde a variaciones de presión entre 0,07 - 0,14 Kg/cm², muy bajas para considerarse significativas y, como se verá más adelante, pueden ser atribuida a las pérdidas de carga de las perforaciones.

Verificando la estabilización de los niveles por periodos tan prolongados, se consideró conveniente realizar un análisis a régimen permanente considerando las depresiones finales. Para la aplicación de este método Villanueva e Iglesias, (1984) consideran las siguientes limitaciones propias del mismo que deben tenerse en cuenta en esta evaluación y se detallan según:

- El régimen es permanente (se estabilizan niveles o presiones)
- No existen recargas exteriores
- El acuífero es homogéneo e isótopo
- El acuífero es infinito
- El pozo de bombeo es de diámetro cero
- El pozo atraviesa completamente la Formación permeable

- El agua extraída produce un inmediato descenso en el niveles y vuelve a introducirse en el acuífero
- El flujo del agua al pozo es radial sin componentes verticales
- El caudal de bombeo es constante

Algunas de estas consideraciones son teóricas, sin embargo las perforaciones ensayadas poseen niveles acuíferos que estabilizan niveles casi instantáneamente, no poseen recargas exteriores, la litología de las Formaciones acuíferas son relativamente homogéneas. Además están compuestas por areniscas cuarzosas de muy buena selección (Silva Busso, 1999), el acuífero es de gran extensión regional, el pozo de bombeo es de pequeño diámetro (152.4mm-203.2mm), las perforaciones atraviesa completamente las Formaciones acuíferas y el flujo de agua en la perforación tiene poco aporte vertical ya que lo confinan un niveles impermeables. El caudal de descarga ha sido constante en cada determinación y escalón.

A estas limitaciones citadas para el método, deben considerarse además la falta de piezómetros a diferentes distancias de las perforación, lo que obligó a medir presiones en la perforación donde se produce la

descarga. Por esta razón se realizaron ensayos a caudal variable, esto determina que deben asumirse algunos datos (como el radio de influencia del pozo), sobre la base de la base a la bibliografía existente, como se detallará en lo sucesivo. La imposibilidad de realizar un análisis evolutivo presiones vs. tiempo impide calcular el coeficiente almacenamiento (S), dado que el término S_{qh}/Tqt de la ecuación de Darcy es igual a cero.

4. DISCUSIÓN

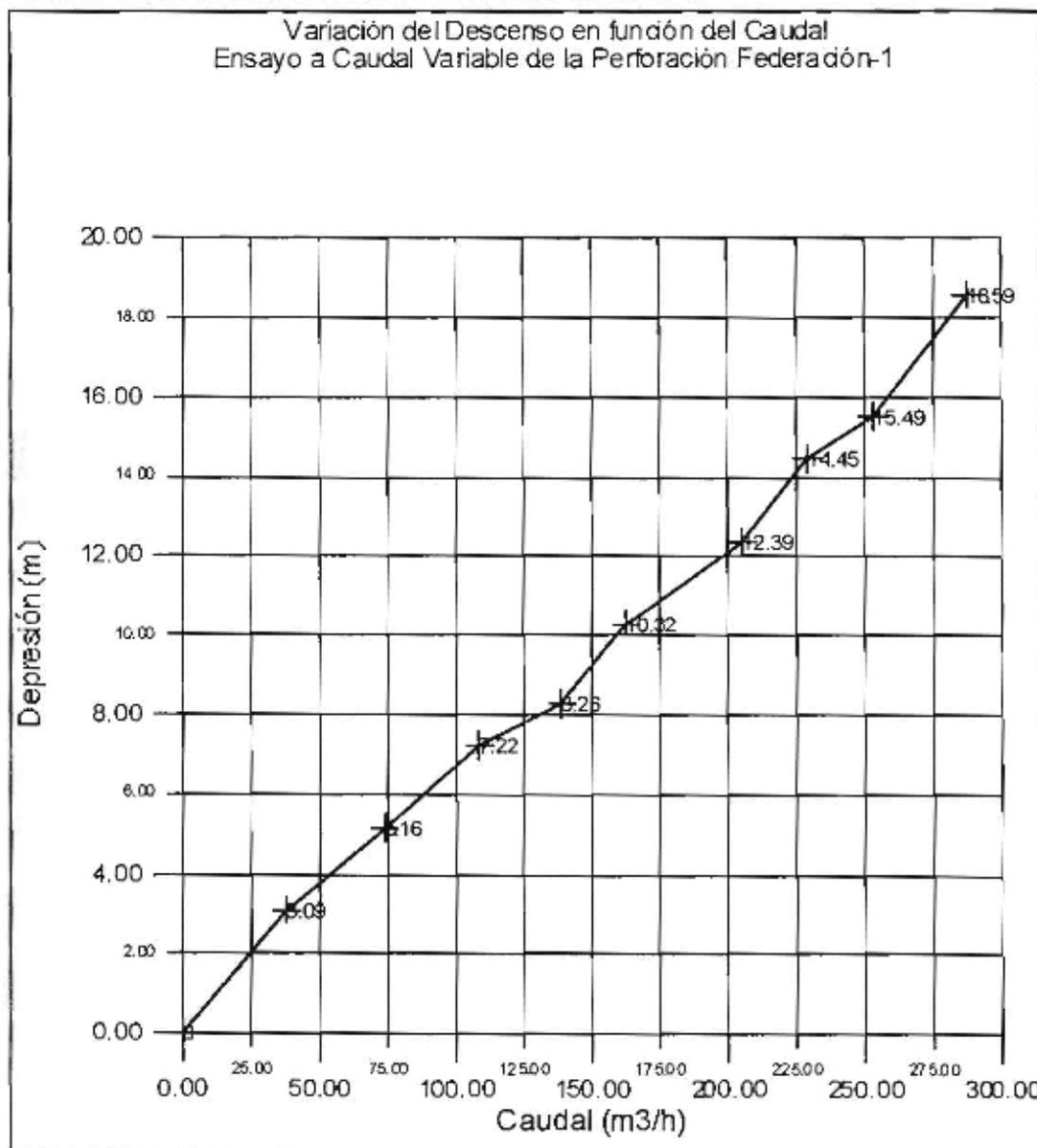
Un acuífero confinado, cautivo o artesiano se define como aquel en que el agua contenida por el mismo se encuentra en un punto a una presión mayor que la atmosférica (Custodio Llamas, 1983; González et al., 1986; Ortiz Aguirre, 1996). Esto provoca el ascenso de la columna de agua por encima de la cota topográfica a lo que se denomina surgencia. En los puntos de ensayo se verifican ambas situaciones por lo tanto el acuífero

estudio en la zona de estudio se lo considerará como confinado o cautivo. Esta última afirmación permite asumir un coeficiente de almacenamiento (S) del orden de 10^{-4} atribuible por diversos autores a acuíferos confinados (Davis, 1969; Custodio y Llamas, 1983; Villanueva e Iglesias, 1984) este valor fue considerado con similar criterio por Cattaneo (1992) a los niveles atribuibles al Acuífero Botucatú en las captaciones uruguayas

Estas consideraciones determinan el tipo de método de determinación de parámetros hidráulicos más convenientes Custodio Llamas (1983) y Villanueva e Iglesias (1984) proponen para acuíferos cautivos en régimen permanente el método de Thiem (Thiem, 1906). De la ecuación propuesta a continuación, se deduce a partir de la Ley de Darcy (Custodio y Llamas, 1983; Villanueva e Iglesias, 1984) y se presenta según:

$$(1) d_p = 0,366 Q/T \log_{10} (R/r_p)$$

FIGURA 4. ENSAYO A CAUDAL VARIABLE EN FEDERACIÓN-1



Donde:

d_p : Depresión estabilizada en el pozo de observación (m.b.b.p.)

Q : Caudal constante referida a dicha depresión (m³/h)

T : Transmisividad (m²/día)

R : Radio de influencia del pozo de explotación

r_p : Radio de la perforación

El objetivo es el cálculo de la Transmisividad de los acuíferos, considerados para diferentes relaciones caudal vs descensos tomados a partir de los ensayos de bombeo a caudal variable. Los gráficos 4, 5 y 6 muestran la variación de los niveles (a partir de las presiones) vs. caudales constantes para cada perforación. Es notoria la relación proporcional entre caudales y depresiones, lo que indica una buena respuesta hidráulica de las unidades acuíferas. Los gráficos 4 y 5 corresponden al Acuífero Botucatu y el gráfico 6 al Acuífero Solari. Si se

compara las curvas de cada perforación obtenemos el gráfico 18, la inclinación de las curvas es prácticamente la misma para el intervalo considerado. todas las curvas responden a la ecuación general definidas por Rorabaugh (1953) que se detalla según:

$$(2) d=AQ+BQ^n$$

Donde:

d : Descenso total (depresión medidas) en m

Q : Caudal (m³/h)

A : Valor relacionado al descenso teórico o relacionado con T y S de cada acuífero (h/m²)

B : Indicador de la eficiencia del sondeo, relacionado a las pérdidas de carga (h²/m⁵)

n : Valor adimensional que suele ser 2 pero puede tomar valores entre 1 y 3

FIGURA 5. VARIACIÓN DE LOS NIVELES DINÁMICOS DURANTE 10 MESES CONCORDIA-1

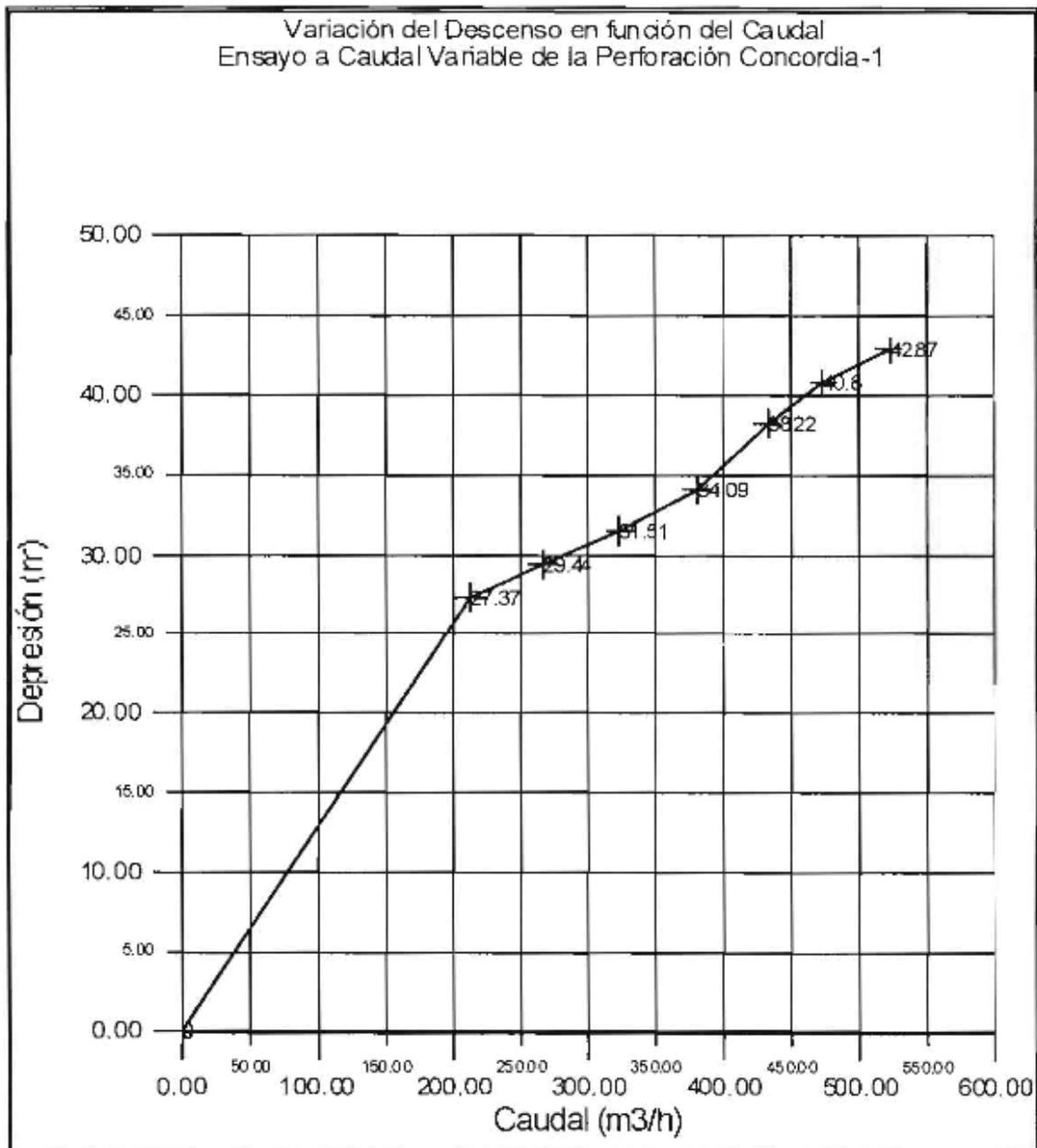
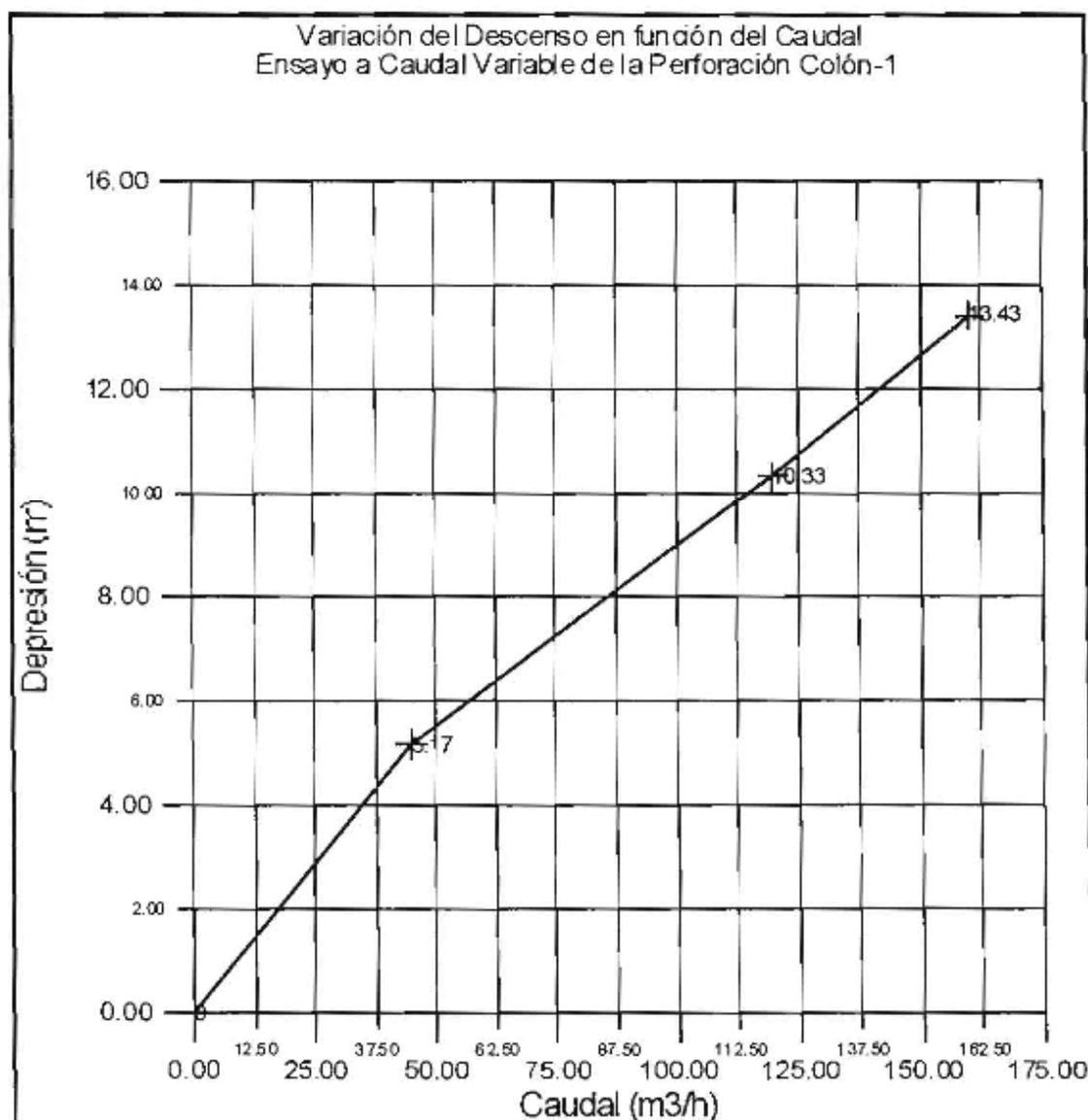


FIGURA 5. ENSAYO A CAUDAL VARIABLE EN COLON-1



El valor de A se relaciona con los descensos teóricos en pozos de observación (ausentes en este estudio) y con la transmisividad (T) y almacenamientos (S) a través de la expresión de Jacob (1940), pero esta última se emplea en ensayos a régimen variable y queda fuera de este análisis.

El valor de B se relaciona con la eficiencia de la perforación y las pérdidas de carga (Pc) de cada perforación que dependen del caudal y no del tiempo de estabilización de los niveles dinámicos. El valor de n toma oscila entre 1 y 3,5 en acuíferos confinados y puede tomar valores más elevados en acuíferos libres o cuando los niveles dinámicos se encuentran por debajo del techo del acuífero (Villanueva e Iglesias, 1984). Sobre la base de lo expuesto se ha calculado el valor de la transmisividad según la expresión:

$$(3) T = 0,366 Q/d_p \log (R/r_p)$$

Donde:

d_p : Depresión estabilizada en el pozo de observación (m.b.b.p.)

R: Radio de influencia del pozo de explotación

r_p : Radio de la perforación

La ausencia de piezómetros obliga a considerar un radio de influencia sugerido en la bibliografía entre 200 y 10000 metros para acuíferos confinados (Custodio y Llamas, 1983), si bien la diferencia es grande como en la ecuación (3) está afectada por el signo logarítmico reduce mucho su significancia en la expresión. Villanueva e Iglesias (1984) reducen el intervalo de radios de influencia más frecuente en acuíferos clásticos con porosidad intergranular a valores entre 900 y 1200 metros. Considerando este último tomaremos un valor de radio de influencia de 1000 metros.

Debe tenerse en cuenta que en afloramiento, donde el acuífero es libre, se han propuesto valores del orden de 600 metros (Montaño y Pessi, 1988). Sobre la base de lo

expuesto y para cada escalón del ensayo a caudal variable en cada perforación se presenta el tabla siguiente que se acompaña con los datos obtenidos, el

calculado de la transmisividad de acuerdo al análisis ya expuesto:

ACUÍFERO BOTACATÚ

Tabla 1. Datos obtenidos a partir del ensayo a caudal variable en la perforación Federación-1
Considérese un $R=1000m$; y un $R_p= 0,0762m$ (&6')

Caudal (Q) en m ³ /h	Presión (Pd) en Kg/cm ²	Nivel Dinámico m.b.b.p..	Depresión (dp) en m	Δ Depres (Δd) en m	Relación dp/Q en h/m ²	Trasmis. (T) en m ² /día
287.05	4.3	+44.419	18.59	3.1	0.064	557.45
252.97	4.6	+47.518	15.49	1.04	0.061	589.59
229.07	4.7	+48.551	14.45	2.06	0.063	572.31
205.5	4.9	+50.617	12.39	2.07	0.06	598.79
162.9	5.1	+52.683	10.32	2.06	0.063	569.86
139.04	5.3	+54.749	8.26	1.04	0.059	607.70
108.72	5.4	+55.782	7.22	2.06	0.066	543.63
73.47	5.6	+57.848	5.16	2.07	0.07	514.03
37.95	5.8	+59.914	3.09	3.09	0.081	443.39
0	6.1	+63.013	0			

ACUÍFERO BOTACATÚ

Tabla 2. Datos obtenidos a partir del ensayo a caudal variable en la perforación Concordia-1
Considérese un $R=1000m$; y un $R_p= 0,1016m$ (&8')

Caudal (Q) en m ³ /h	Presión (Pd) en Kg/cm ²	Nivel Dinámico m.b.b.p..	Depresión (dp) en m	Δ Depres (Δd) en m	Relación dp/Q en h/m ²	Trasmis. (T) en m ² /día
522.12	3.05	+31.5	42.87	2.07	0.0821076	426.75
473.5	3.25	+33.57	40.8	2.58	0.0861668	406.6
432.57	3.5	+36.15	38.22	4.13	0.0883556	396.57
381.02	3.9	+40.28	34.09	2.58	0.0894704	391.63
323.8	4.15	+42.86	31.51	2.07	0.0973132	360.07
266	4.35	+44.93	29.44	2.07	0.1106767	316.59
212	4.55	+47	27.37	27.37	0.1291038	271.40
0	7.2	+74.37	0			

ACUÍFERO SOLARI

Tabla 3. Datos obtenidos a partir del ensayo a caudal variable en la perforación Colón-1
Considérese un $R=1000m$; y un $R_p= 0,1524m$ (&12')

Caudal (Q) en m ³ /h	Presión (Pd) en Kg/cm ²	Nivel Dinámico m.b.b.p..	Depresión (dp) en m	Δ Depres (Δd) en m	Relación dp/Q en h/m ²	Trasmis. (T) en m ² /día
160	0.8	+8.26	13.43	3.1	0.0839	399.34
135	1.1	+11.36	10.33	5.16	0.0765	438.06
45	1.6	+16.52	5.17	5.17	0.1148	291.76
0	2.1	+21.69	0	0		

A partir de estos valores por escalón puede calcularse la transmisividad y caudal específico promedio de

ensayo en cada perforación, que a manera de síntesis se resume en la siguiente tabla:

Tabla 4. Transmisividades promedio y caudales específico promedio durante los ensayos efectuados

Perforación	Unidad Acuífera	Transmisividad Promedio m ² /día	SD	Caudal Específico Promedio m ³ /h.m	SD
Federación-1	Botucatu	555.19	50.1	15.37	1.4
Concordia-1	Botucatu	367.10	55.3	10.47	1.5
Colón -1	Solari	376.38	75.8	11.22	2.2

Según Custodio Llamas, (1983) considerando variaciones del radio de perforación (rp) entre 0,1 -0,5 metros y de radio de influencia (R) entre 200 - 10000 que suelen ser las más frecuentes, proponen que una relación sencilla entre Transmisividad (T) y Caudal Específico (Ce) es aceptable bajo las condiciones hidrodinámicas de este análisis. Dicha relación se expresa según:

$$(27) T = 1,4 Ce$$

Empleando esta expresión se puede calcular,

estimativamente, los valores de transmisividad (T) a partir de los caudales específicos calculados por Silva Busso, (1999) para el periodo 1994-1999 y comparando las captaciones Federación-1, Concordia-1 y Colón-1 con los mismos. Esta expresión es una aproximación pero se ha empleado y se emplea comúnmente cuando no se posee otra información o no se realizan ensayos de bombeo. Es de frecuente empleo en los ensayos por bombeo de las perforaciones a los acuíferos de la Sección Suprabasáltica y suele presentar poca diferencia con otros métodos de cálculo. La siguiente tabla presenta dichos resultados:

Tabla 5. Relación entre Caudales específicos medios y Transmisividades aproximadas *Implementación de bombeo de la perforación posterior a derrumbes (1999), ** No atraviesa toda la sección del acuífero

Perforación	Caudales Específicos medios en las Captaciones (m ³ /h/m) Según Silva Busso, (1999)	Transmisividades medias calculadas a partir del Caudal específico medio (m ² /día)
Federación-1	11.21	376.65
Concordia-1	14.79	496.94
Colón-1	14.27	479.47
Villa Elisa-1	7.12	239.23
Concepción del Uruguay-1*	3.69	123.98
Gauleguaychú-1	5.3	178.08
Arapey	7.83	263.08
Daymán	6.83	229.48
Guaviyú	5.18	174.04
Nicanor	3.4	114.24**
Colón *	7.28	244.60

Los valores de transmisividad así calculados no difieren significativamente entre sí ni con los determinados a partir de los ensayos hidráulicos a caudal variable. Las captaciones de Federación -1, Concordia-1 y Colón-1 presentan valores de Transmisividad semejantes cuando se tomaron los valores con el caudal de descarga (surgente). Luego del derrumbe parcial de la perforación Colón-1 (Junio de 1999) se verifica una caída de Caudal Específico y Transmisividad. Las perforación Villa Elisa-1 se encuentra en condiciones similares (ha tenido problemas de derrumbes incluso durante su ejecución), las perforaciones Concepción del Uruguay -1 y Gauleguaychú -1 poseen niveles del Acuífero

(solamente) de poca potencia por lo que puede considerarse que hacia el sur del área de estudio las propiedades hidráulicas de los acuíferos desmejoran. Las perforaciones Uruguayas tiene más de 40 años en explotación y según el informe de TAHAL (1986) e HIDROSUD, (1988) todas han tenido derrumbes en diversas oportunidades antes del comienzo de este estudio. La perforación Nicanor solo penetra en los primeros 5 metros el techo del Acuífero Botucatu, por lo que el valor propuesto, aunque bueno dadas sus características, es solo orientativo.

5. CONCLUSIÓN

- A partir de los ensayos de bombeo escalonados bajo régimen permanente, nos permiten obtener a través del análisis hidráulico, suficiente argumento para atribuir un comportamiento, en el área de estudio, comparable al de un acuífero artesiano, confinado o cautivo. Esta afirmación es válida para los Acuíferos Botucatú y Solari, en suma para el Sistema Acuífero Termal en su conjunto.
- Las características de la ocurrencia en los pozos (surgencia) y la ausencia de piezómetros condicionó el tipo de ensayo hidráulico. Optándose, por realizar el estudio a régimen permanente. Esto limitó el cálculo de los parámetros hidráulicos del acuífero a la Transmisividad (T), Caudal específico (Ce) y obligó a suponer o asumir aquellos que, por las características del método, no pueden calcularse como el almacenamiento (S) y el radio de influencia (R)

• La transmisividad (T) de los acuíferos fue calculada a partir de las mediciones de campo, considerando los descensos totales con valores y a partir de los descensos teóricos calculados en cada perforación se calculó una transmisividad "teórica" ambas poseen pocas diferencias y pueden considerarse para el Sistema Acuífero Termal valores que oscilan entre 300 –600 m²/día. Cercanos a los mencionados por Cattaneo, (1992) en las perforaciones uruguayas. La transmisividad calculada en el resto de las perforaciones solo tiene un fin orientativo.

• Dada la imposibilidad de calcularlo o estimarlo se aceptará válido un valor de almacenamiento (S) de 1.10-4 (Custodio y Llamas, 1983; Villanueva e Iglesias, 1984) característico de los acuíferos confinados y coincidente con la apreciación de Cattaneo (1992) en las captaciones Uruguayas

6. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BIGARELLA, J. y R. SALAMUNI, 1964.

Paleowind patterns in the Botucatú sandstone (Triassic-Jurassic) of Brazil and Uruguay. En: Naim, A. (Ed.)

BOSSI, J., 1966.

Geología del Uruguay. Universidad de la República, Departamento de Publicaciones, Colección Ciencias 2: 1-470, Montevideo.

CUSTODIO E. y M.R. LLAMAS, 1983.

Hidrología Subterránea. Editorial Omega, Segunda Edición, Tomos I y II. Barcelona, España.

DAVIS, S. N. y R. J. DE WIEST, 1969.

Hydrogeology. Editorial John Wiley and Sons, US.

FALCONER, J., 1931.

Terrenos gondwánicos del Departamento de Tacuarembó: Memoria explicativa del Mapa Geológico. Instituto de Geología y Perforaciones del Uruguay Boletín 15: 1-17, Montevideo

FERRANDO, L. y R. ANDREIS, 1986.

Nueva estratigrafía en el Gondwana de Uruguay. Ier. Congreso Latinoamericano de Hidrocarburos 1: 295-323, Buenos Aires.

GONZAGA DE CAMPOS, L., 1889.

Seção Geológica. Comissao Geográfica e Geológica do Estado de Sao Paulo Anexo Relatório 1889: 21-34, Sao Paulo

GONZALEZ, N., M.A. HERNANDEZ y C. R. VILELA., 1986.

Léxico Hidrogeológico. comisión de Investigaciones Científicas de la prov. de Buenos Aires. Publicación Especial, La Plata, Argentina.

HAUSEN, J., 1919.

Contribución al estudio de la petrografía del Territorio Nacional de Misiones. Dirección General de Minas, Geología e Hidrología Boletín N° 21 Serie B (Geología): 1-39, Buenos Aires

HIDROSUD, 1988.

Desarrollo de la Actividad Termal. Informe 1., FONADER, MTU, Uruguay.

JACOB, C.E., 1940- On the flow of water in an elastic artesian acuífer. Transactions Am. Geophysicalical Union .

MONTAÑO, J., M. PESSI, 1985.

ORTIZ AGUIRRE, R., 1996.

Glosario Geohidrológico. Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis de Potosí. San Luis de Potosí, S.L.P., México.

RORABAUGH, M. I., 1953.

Graphical and Theoretical analysis of step drawdown test of artesian well. Proc. Am Soc. Civil Eng. vol 79.

SALAMUNI, R. y J. BIGARELLA, 1967.

The Botucatú Formation. Centro Nacional de Pesquisas. En: Bigarella, J., R. Becker e I. Pinto (Ed.) Problems in Brazilian Gondwana Geology: 197-206, Curitiba

SANTA CRUZ, J.N. y A. SILVA BUSSO. 1999.

Escenario hidrogeológico General de los Principales Acuíferos de la Llanura Pampeana y Mesopotamia Septentrional Argentina. II Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano Argentino sobre Temas Actuales en Hidrología Subterránea, Actas Tomo I, pag 461-473, Tucumán, Argentina.

SILVA BUSSO A., 2000.

Geologic and Hydrogeologic Aspects of the Thermal Aquifer System in Argentine Eastern Chacoparanense Basin. Primer Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas. Abstracts, pag: 134 en CD pag: . Fortaleza, Brasil. ALSHUD.AIH.

SILVA BUSSO, A. 1997.

Estratigrafía y Correlación de los Niveles Mesozoicos de las Captaciones del Agua Termal de la Región Mesopotámica Argentina y Litoral Uruguayo, Congreso Internacional Sobre Aguas, apartado II-3, UBA, UNESCO, Buenos Aires, Argentina.

SILVA BUSSO, A. 1999.

Contribución al Conocimiento Geológico e Hidrogeológico del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental Argentina. Tesis Doctoral, Facultad de Cs. Exáctas y Naturales, UBA (INEDITO)

SILVA BUSSO, A. y C. FERNÁNDEZ GARRASINO, 2004.

Presencia de las Formaciones Piramboiá y Botucatú (triasico – jurasico) en el subsuelo oriental de la Provincia de Entre Ríos, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina N°59 (1): 141-151.

TAHAL, 1986.

Proyecto Agrícola de Riego Basado en la Perforación de Pozos Profundos. Tomo 2, 4 y 5. Tahal Consulting Engineers. VERNON, ROU

THIEM, E. 1906.

Hydrologische Methoden. Gebhardt, Leipzig, pag 56-112.

VILLANUEVA MARTINEZ, M., IGLESIAS LOPEZ, A., 1984.

Pozos y Acuíferos. Técnicas de Evaluación Mediante Ensayos de Bombeo. ITGE, Madrid, España

YPF S.A., 1962.

Perforación ERN 1 (Nogoyá, provincia de Entre Ríos), Descripción de cuttings. YPF S.A., Buenos Aires.



EVALUACIÓN DE RIESGOS MÚLTIPLES DE LAS CUENCAS DE LOS ARROYOS LAS BRUSQUITAS, EL DURAZNO Y LA TOTORA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

del Río, J. L.^(1,5), Bó, M. J.⁽¹⁾, Martínez Arca, J.^(1,2), López de Armentia, A.⁽¹⁾, Camino, M.⁽¹⁾,
Maurel, D.⁽¹⁾, Drago, C.⁽³⁾, y D. Viola⁽⁴⁾.

Resumen

El partido de General Alvarado presenta en su porción nororiental un conjunto de actividades humanas, que al interactuar con distintos procesos naturales definen condiciones de riesgo ambiental.

El presente trabajo intenta aportar un conjunto de elementos conceptuales y metodológicos tendientes al análisis y a la evaluación de riesgos para nutrir a los estamentos de decisión comunales de herramientas que les permitan un manejo preventivo de situaciones ambientales de riesgo.

A tal fin se ha realizado una evaluación de riesgos múltiples basada en un mapa que combina la peligrosidad y la vulnerabilidad, sobre una base de mapeo geocientífico de tipo sintético elaborado específicamente para el municipio de General Alvarado.

En la zona de estudio se han considerado como de probable ocurrencia amenazas vinculadas con: inundaciones y anegamientos, contaminación de acuíferos, erosión y degradación costeras e incendios forestales.

Para cada una de las amenazas, y con criterios específicos para cada una de ellas, se realizaron tablas de clases de vulnerabilidad y peligrosidad.

La información elaborada posee elementos positivos destacables como presentar en un sólo mapa la composición del peligro y la vulnerabilidad para cada área de impacto, así como la probabilidad espacial de ocurrencia de riesgos múltiples naturales o inducidos antrópicamente.

La cartografía de riesgos múltiples es una herramienta analítica integral, especialmente cuando se combina con la cartografía geocientífica o de instalaciones críticas.

Esta herramienta lejos de ser un elemento definitivo debe ser aplicada, corregida y mejorada con su uso.

Palabras clave: Riesgo múltiples, Cartografía temática

ABSTRACT

In the Northeastern area of General Alvarado County, the interaction of a group of human activities with different natural processes defines conditions of environmental risk.

The present work tries to contribute with a group of conceptual and methodological elements for the analysis and evaluation of risks, in order to support

decision-makers with tools that allow them to manage preventively environmental situations of risk.

To such an end it was carried out an evaluation of multiple risks based on a map which combines hazard and vulnerability, on a Geo-scientific cartographic mapping-base (synthetic approach), previously made.

In the study area, the following were considered as threats of probable occurrence: floods, contamination of water sources, erosion and degradation of coasts and forest fires. For each of the threats, maps of vulnerability and hazard were made according to specific criteria.

The cartography of multiple risks is an analytic and integral tool, especially when it is combined with the Geo-scientific cartographic mapping or with the critical facilities one.

This tool far from being a definitive element, should be applied, corrected and improved with its use.

Entregado: 4 de Noviembre de 2004 • Aceptado: 14 de Diciembre de 2004

⁽¹⁾Grupo de Geología Ambiental, CGC y C, UNMDP;

⁽²⁾CONICET; ⁽³⁾Obras Sanitarias Miramar; ⁽⁴⁾Municipalidad de General Alvarado.

⁽⁵⁾Centro de Geología de Costas y del Cuaternario, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata. Funes 3350, Nivel + 1,80, 7600, Mar del Plata. Correo electrónico: jlr@mdp.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

El partido de General Alvarado presenta en su porción nororiental un conjunto de actividades humanas, que al interactuar con distintos procesos naturales definen condiciones de riesgo ambiental. En algunos casos la sociedad resulta vulnerable ante eventos fluviales, procesos erosivos de la zona costera o ante eventuales incendios de montes recreativos y en otros, es la sociedad la que puede incidir en la contaminación de los acuíferos por efecto de distintas actividades (Drago, et al. 2000).

El riesgo se compone de dos aspectos, uno es el agente activo que provoca o puede provocar el hecho o evento de deterioro ambiental que denominamos amenaza o peligrosidad, y el aspecto pasivo que es donde se concreta la amenaza al que designamos vulnerabilidad.

Callow (1998) puntualiza que el análisis y la evaluación de riesgos concierne al análisis y la evaluación de los procesos adversos de algún modo mensurables, mientras que el manejo de riesgos es una aproximación legal, política y administrativa.

El presente trabajo intenta aportar un conjunto de elementos conceptuales y metodológicos con el objetivo de analizar y evaluar riesgos para nutrir a los estamentos

de decisión comunales de herramientas que les permitan un manejo preventivo de riesgos ambientales.

A tal fin se ha realizado una carta de riesgos múltiples basada en los aportes metodológicos de De Giovanni y colaboradores (2001), sobre una base cartográfica geocientífica de tipo sintética elaborada específicamente para el municipio de General Alvarado (del Río et al, 2003)

2. UBICACIÓN

El área de estudio comprende las cuencas de los arroyos El Durazno, La Totorá y Las Brusquitas, situadas en la porción nororiental del Partido de General Alvarado. La superficie del área de estudio es de unos 460 km², localizándose el 81% de la misma en el Partido de General Alvarado y el 19% restante en el Partido de General Pueyrredon. En esta zona se encuentra la ciudad de Miramar, que cuenta con 19.573 habitantes y algunos asentamientos menores como Comandante Nicanor Otamendi (5.633 habitantes) y El Boquerón (334 habitantes) que pertenece al Partido de General Pueyrredon (Fig. 1).

FIGURA 1. MAPA DE UBICACIÓN

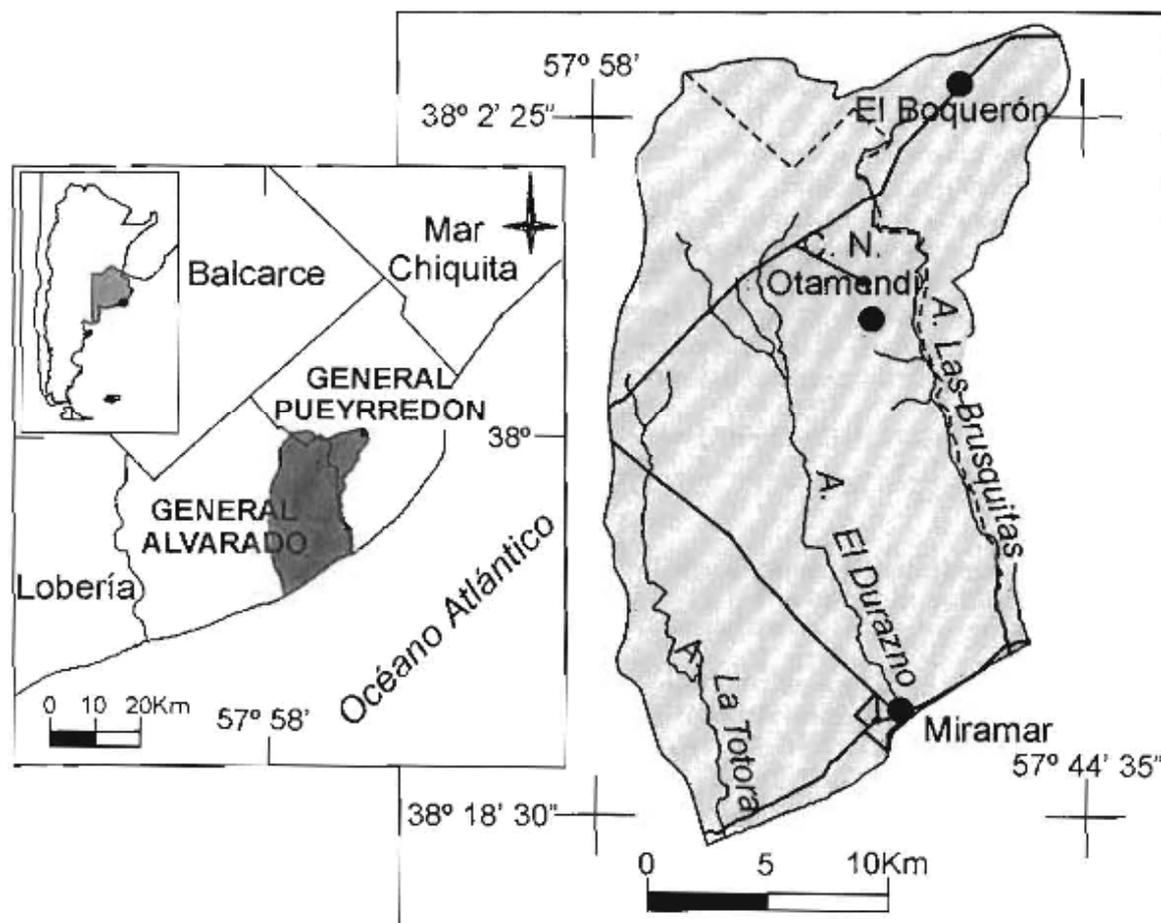


Fig. 1. Mapa de ubicación

3. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El clima del Partido de General Alvarado es del tipo templado húmedo con marcada influencia oceánica (Barry y Chorley 1980), la que se manifiesta especialmente en un atemperamiento del clima de la costa, con precipitaciones más o menos regulares, y con predominio de vientos suaves del oeste y sudoeste.

Según los datos obtenidos de la Chacra Experimental de Miramar, para el periodo 1971-2001, el módulo pluviométrico anual es de 955 mm y la temperatura media anual es de 14,4° C con un valor medio máximo de 15,9° C, y un valor mínimo promedio de 12,7° C.

La zona de estudio se encuentra sobre las estribaciones sudorientales de las sierras Septentrionales de la Prov. de Buenos Aires, y en el denominado ámbito de la llanura interserrana bonaerense (Rolleri 1975). Se caracteriza por la presencia de un Basamento cristalino, que no aflora en las cuencas estudiadas, y Sedimentitas eopaleozoicas (Fin Balcarce según Dalla Salda e Iñiguez 1978). Todo el conjunto está afectado por los sistemas de fracturas que caracterizan a las Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires y que en general permiten definirlos como un sistema de "montañas de bloque".

La zona comprende un sector de sierras, ámbitos periserranos y su transición hacia los de llanura, dentro de un relieve de baja altura, con un valor máximo próximo a los 300 msnm (metros sobre el nivel del mar), en las Sierras de La Peregrina (nacientes del Arroyo El Durazno).

Finalmente y cubriendo las formaciones Paleozoicas y Precámbricas se encuentran depósitos continentales Cenozoicos, conformados por un conjunto sedimentario predominantemente limo-loessosoide, de origen esencialmente eólico, con vidrio volcánico y carbonato de calcio pulverulento, en parte con intercalaciones de tosca distribuida en manchones irregulares y con diferente grado de compactación y desarrollo (Fidalgo et al. 1975, Teruggi y Kilmurray 1975, 1980, Zárate y Fasano 1984, 1989).

En la zona pedemontana aparecen lomas eólicas, que en la porción más proximal a la zona de sierras revelan un control tectónico de las redes de drenaje orientadas según los patrones de fracturación regionales. Las lomas se distribuyen desde los 60 a los 140 msnm y con pendientes del orden del 2 %. En porciones más distantes de la sierra las lomas pierden los patrones tectónicos y pasan a un ambiente más llano con gradientes de 0,3 a 0,7 % y se continúan, desdibujándose hasta casi alcanzar la costa (Kruse 1986).

La zona de llanura presenta un sistema de divisorias chatas, bajos, lagunas temporarias y zonas anegables, especialmente en la zona sur y centro del área de estudio. Estos bajos y bañados en muchos casos se alinean subparalelamente a los cursos fluviales. Los suelos son fundamentalmente molisoles que presentan, en general, un excelente desarrollo y fertilidad.

La hidrogeología de la zona, de acuerdo con Kruse (1986), se caracteriza por la presencia de dos grandes unidades "Basamento impermeable" y "Complejo Clástico Permeable", es un Acuífero multiunitario, que constituye un ambiente acuitado, de baja permeabilidad, dentro del cual se desarrollan lentes de mediana permeabilidad portadora de niveles productivos. Si bien se trata de una unidad con marcadas anisotropías locales, en su conjunto y especialmente a escala regional se comporta como homogéneo (Sala 1975, Kruse 1986). El espesor reconocido en las perforaciones es de 159,6 metros aproximadamente, de edad Cenozoica (C.F.I 1995).

El ambiente costero se encuentra definido por formas tanto constructivas como erosivas vinculadas a la acción de olas y de acumulación eólica que son asiento de la actividad turística de la ciudad. Este ambiente costero revela un carácter dominante erosivo que ha requerido ser estabilizado mediante sistemas de espigones.

La fuente principal de ingresos económicos en la zona de estudio es la actividad turística estival, le sigue la producción agrícola-ganadera extensiva, y existen algunas quintas con producciones intensivas.

4. METODOLOGÍA

Las cartas de riesgos múltiples surgen de la representación conjunta de algunos peligros existentes en una zona o unidad espacial con una vulnerabilidad determinada y específica (De Giovanni et al. 2001).

Si bien en este tipo de cartas se suelen analizar las distintas amenazas y vulnerabilidades focalizando la atención en las clases alta y muy alta, en nuestro caso se han considerado incluso las clases inferiores tanto de peligrosidad como de vulnerabilidad.

A los fines de indicar la magnitud del riesgo se ha generado una matriz que vincula la vulnerabilidad y la peligrosidad, donde se ha establecido una escala relativa de cuatro categorías: Muy alto, Moderado, Bajo y Muy bajo (Tabla 1).

Tabla 1. CATEGORIAS DE RIESGO SEGÚN LAS CLASES DE PELIGROSIDAD Y VULNERABILIDAD

CLASES RIESGO		Vulnerabilidad			
		A	M	B	MB
Peligro	A	A	A	M	M
	M	A	M	B	B
	B	M	B	B	MB
	MB	M	B	MB	MB

A= Alto, M= Moderado, B, Bajo, MB= Muy bajo

Tomando como base esta matriz se consideraron los siguientes riesgos: las inundaciones y los anegamientos, la contaminación de aguas subterráneas, la erosión costera y los incendios forestales.

Se ha considerado como unidad espacial de ocurrencia de una determinada amenaza o peligro, a las unidades cartográficas morfodinámicas elaboradas por del Río y colaboradores (2003).

En cada una de ellas se ha sobrepuesto una simbología que sintetiza la o las amenazas y las vulnerabilidades dominantes. El símbolo utilizado (Fig. 2) es una adaptación de los aplicados por Francés y Marcos García (1993), Cendrero y colaboradores (1990), Díez Herrero y Martín Duque (1993) y De Giovanni y colaboradores (2001). Este esquema es mejorable si además se incorpora un atributo colorimétrico como la denominada "regla del semáforo" de modo de reforzar visualmente los conceptos antes explicitados.

Cada cuadrante representa un tipo de riesgo, y la longitud de cada sector muestra la magnitud del peligro y la vulnerabilidad considerada como se muestra en la Fig. 2.

FIGURA 2. SIMBOLO QUE REPRESENTA LA VULNERABILIDAD, LA PELIGROSIDAD Y LAS CATEGORIAS DE LAS MISMAS

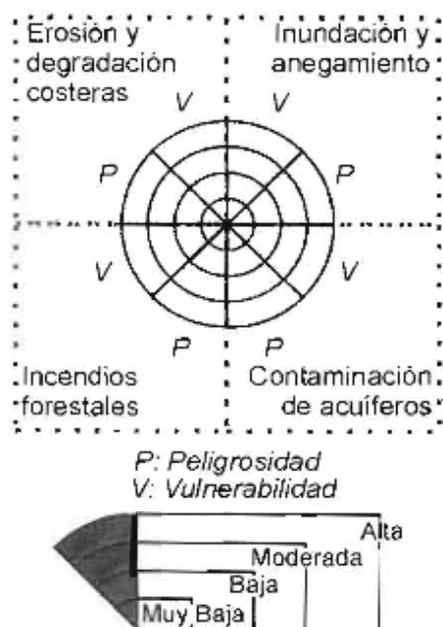


Fig. 2. Símbolo que representa la vulnerabilidad, la peligrosidad y las categorías de las mismas.

Estimación de la vulnerabilidad

Panizza (1993) y Cendrero y colaboradores (1987) coinciden en considerar a la vulnerabilidad como aquel atributo donde se incluyen los aspectos poblacionales, organización social, economía, programación, valores culturales, históricos y naturales de interés para la preservación.

Sin negar su origen natural existe un marcado consenso en considerar que los riesgos geoambientales surgen básica y prioritariamente de la vulnerabilidad de los asentamientos humanos, y en especial de los de carácter

precario, "como consecuencia de la fragilidad de las estructuras económicas y sociales" (Caputo et al. 1985) por exposición a los procesos geológicos.

Enfocar el tema del riesgo ambiental sólo desde una perspectiva geológica implica, entonces, un sesgo que distorsiona la verdadera raíz del problema, toda vez que los ocupantes de áreas de peligrosidad geológica suelen no tener la opción de elegir y son impelidos a exponerse a dichas condiciones geoambientales.

Este enfoque nos permite coincidir con Herzer (1990), cuando afirma que las disfunciones y problemas ambientales resultan de "la formación de un tipo de ciudad-región que combina las peores consecuencias de un crecimiento físico incontrolado". En particular son los asentamientos marginales los que suelen estar expuestos a distintas amenazas geoambientales, como las inundaciones, a los que se suele adicionar una mala gestión de los residuos sólidos urbanos y a la eliminación de las excretas, que se potencian con prácticas económicas cotidianas que se centran en el cartoneo y reciclado de residuos de modo informal (Ríos et al. 2000). Este tipo de prácticas como también es sabido, estimulan y favorecen la proliferación de vectores, y con ellos se incrementa la vulnerabilidad de la población.

En el presente trabajo, el análisis de vulnerabilidad frente a los peligros de origen geológico como las inundaciones y anegamientos se centró en aspectos poblacionales, socio-económicos y de infraestructura. Para la definición de las distintas clases se consideraron fundamentalmente: la densidad de población, la infraestructura de servicios, la accesibilidad (rutas de primer orden, puentes, vías de ferrocarril y densidad de caminos secundarios consolidados) y la calidad de la construcción de las viviendas.

Para esta última se siguió la tipificación surgida del análisis de las encuestas efectuadas y los estudios realizados por el Plan Estratégico Miramar (Viola 2002). Un criterio distinto se aplica a la contaminación del acuífero, en este caso la amenaza surge de las acciones humanas, es decir el acuífero es el elemento pasivo (vulnerable) y las acciones humanas son el elemento activo (peligrosidad o amenaza) en particular el uso del suelo y el manejo de residuos y efluentes. El criterio de vulnerabilidad utilizado en este caso es el espesor de la zona no saturada: a menor espesor mayor vulnerabilidad. En lo que respecta al riesgo de incendios, como consideración particular la vulnerabilidad corresponde a los montes de tipo recreativo y de protección pertenecientes al Vivero Florentino Ameghino, donde la mayor concentración de ejemplares de variedades altamente resinosas presentan alta susceptibilidad de sufrir incendios forestales. Por otro lado se consideran como escenarios de menor susceptibilidad a los parques con predominio de gramíneas y rodales pequeños o ejemplares aislados.

La zona costera del área de estudio como se ha dicho en puntos precedentes, ha sido definida por Schnack y colaboradores (1983) "como un ecosistema costero de uso múltiple donde la erosión es el proceso dominante"

En lo referente a la vulnerabilidad de la zona costera, su análisis se centra en el equipamiento turístico y la infraestructura desplegada sobre el sector.

Estas consideraciones relativas se sintetizan en la en la Tabla 2.

Tabla 2. CRITERIOS Y CATEGORÍAS DE VULNERABILIDAD

		FACTORES VULNERABLES					
		Población		Accesibilidad	Montes recreativos	Acuífero	Costa
CRITERIOS		Densidad poblacional (hab./km ²)	Tipología de Viviendas	Jerarquía vial	Condición forestal	Espesor no saturado del acuífero libre (m)	Equipamiento e infraestructura turística y de servicios
CLASES DE VULNERABILIDAD	Alta	>1000	Ranchada de chapa/ Cartón	Rutas Importantes	Montes cerrados de coníferas y eucaliptus	< 2	Equipamientos urbanos y turísticos altamente desarrollados
	Moderada	1000-500	Pre-fabricadas	Caminos secundarios	Monte abiertos de especies de acacias, coníferas y eucaliptus	2-5	Equipamientos urbanos y turísticos medianamente desarrollados
	Baja	500 - 100	Bloques	Caminos vecinales (tierra)	Montes abiertos con acacias y estepa de gramíneas	5-10	Equipamientos turísticos pobremente desarrollados
	Muy Baja	<100	Tradicional (ladrillos y cimientos)	Ferrovía	Parque con gramíneas dominantes	>10	Sin equipamientos turístico

Estimación de la peligrosidad

El concepto de peligrosidad, antes mencionado implica, según Hermelin (1991), la probabilidad de ocurrencia, en un lapso y en un área determinada, de un evento con potencialidad destructiva, que involucra la susceptibilidad geológica, geomorfológica, litológica o hidrológica.

En la zona de estudio se han considerado como de probable ocurrencia amenazas vinculadas con: inundaciones y anegamientos, contaminación de acuíferos, erosión y degradación costera e incendios forestales.

1.-Inundaciones y anegamientos

Las inundaciones y los anegamientos, están relacionados directamente con la geomorfología de la zona de estudio, donde a una extensa planicie de muy baja pendiente regional en su porción oriental, se suma la existencia de cauces poco profundos y angostos, labrados por los principales arroyos, la presencia de bajos cerrados y una freática sumamente somera, que en muchos sitios se encuentra a profundidades menores de 2 metros.

En este trabajo se han diferenciado los procesos de inundación y de anegamiento, mientras los primeros se relacionan con desbordes de arroyos y cursos de agua intermitentes; los segundos responden a la acumulación excesiva de agua en áreas con drenaje contrípeto y dificultades severas de infiltración y escurrimiento.

En este análisis se han tomado en consideración variables tales como: la geomorfología, la topografía, la morfología de las pendientes, la litología y los depósitos superficiales, y la hidrología superficial y subterránea.

La tabla 3, establece la ponderación de cada uno de estos factores para establecer las clases de peligrosidad estimadas.

2.-Contaminación de acuíferos

El riesgo de contaminación de un acuífero fue definido por Foster et al. (1987) como "la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con concentraciones por encima de los valores recomendados por la OMS (Organización Mundial de la Salud) para la calidad del agua de consumo humano".

Es, en consecuencia, el resultado de la concurrencia del peligro que es, será o probablemente sea impuesto al subsuelo como resultado de las actividades humanas y de la vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero ante la posibilidad de infiltración de eventuales contaminantes a través de la zona no saturada.

En tal sentido dos parámetros adquieren principal importancia: la carga contaminante (elemento activo o peligrosidad) y la potencia de la zona no saturada (factor pasivo que determina, entre otros, la vulnerabilidad intrínseca del acuífero).

Tabla 3. CRITERIOS Y CLASES DE PELIGROSIDAD PARA INUNDACIONES Y ANEGAMIENTOS

CRITERIOS	CLASES DE PELIGROSIDAD			
	Alta	Media	Baja	Muy Baja
Geomorfología	Cauces y planicies de inundación, bajos sin salida	Bajos	Flancos de valle	Divisorias
Sinuosidad de los cauces	Alta	Media a alta	Media- Baja	Baja-Rectos
Tipos de pendientes	Cóncava	Llana en depresiones	Recta	Convexa
Litología	Arcilíticas y limo-loessicas	Limo-loessicas	Ortocuarcíticas	Arenas
Hidrología subterránea (espesor no saturado)	< 1m	1-5m	5-10 m	>10m

El primero por tipo, calidad, y cantidad del aporte y el segundo por los procesos de atenuación y/o retardación del acceso de contaminantes al acuífero.

La tabla 4 establece las condiciones consideradas en

función de las actividades dominantes y el uso del suelo como agente activo en relación al riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

Tabla 4. CRITERIOS Y CLASES DE PELIGROSIDAD PARA CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

CRITERIOS	CLASES DE PELIGROSIDAD			
	Alta	Media	Baja	Muy Baja
Zonas rurales	Horticultura con uso intensivo de agroquímicos	Agricultura y ganadería extensivas	Criaderos de animales de granja	Cultivos orgánicos
Zonas periurbanas y urbanas	Zonas periurbanas sin servicios de agua y cloaca	Zonas periurbanas sin servicios de cloaca	Zonas periurbanas sin servicios de agua con alta densidad poblacional	Zona urbanas con todos los servicios
Actividades especiales y fuentes puntuales	Sitios de disposición de residuos	Actividades industriales sin servicios (agua y cloacas)	Tosqueras, cavas y cementerios	Parques forestales recreativos

3.-La erosión y la degradación costeras

En este aspecto si bien se han tomado en consideración la litología y la estructura geológico costera, su configuración natural y artificial, la orientación de la costa ante los agentes oceánicos y los procesos sedimentarios e históricos evidenciados en su geomorfología y las intervenciones humanas; los dos aspectos considerados críticos son las geoformas resultantes de los procesos costeros y el uso de la costa como inductora de procesos de degradación, dado que algunos de los factores antes enunciados presentan una baja variabilidad como la litología, la estructura geológica y la orientación de la costa.

El proceso erosivo de la costa se vincula a la restricción natural del aporte sedimentario y antropogénica como resultado de actividades mineras en la playa frontal al sur del Partido de General Alvarado (Camino et al. 2001), a la obstrucción de la deriva litoral por la construcción de un sistema de espigones en la zona céntrica de la ciudad de Miramar, y a desarrollos urbanos y paisajísticos como la generación del Vivero Forestal, que inhiben la dinámica del transporte de sedimentos en el sentido playa-médano-playa, además a esto se suma la inducción de la inestabilidad de los acantilados por la instalación de desagües.

La tabla 5 establece las relaciones de peligrosidad de la erosión y degradación costeras.

Tabla 5. CRITERIOS Y CLASES DE PELIGROSIDAD PARA EROSIÓN Y DEGRADACIÓN COSTERAS

Criterios	CLASES DE PELIGROSIDAD			
	Alta	Media	Baja	Muy Baja
Geoformas	Acantilados	Desembocaduras fluviales	Playas con Dunas vivas	Playas estabilizadas con defensas costeras
Actividades inductoras	Extractivas de áridos	Desagües pluviales	Circulación costeros y Unidades turísticas balnearias	Reservas forestales costeras y Zonas sin intervenciones

4.-Los incendios forestales

Se pueden producir en particular en el escenario creado para la protección urbana de los vientos del sur y sudeste. Este lugar es precisamente el Vivero dunicola Florentino Ameghino.

Las principales amenazas están vinculadas al uso por parte de la población de este sitio destinado a la recreación de fin de semana y veraniega (Tabla 6).

El riesgo se vincula especialmente a algunas actividades de tipo recreativo y turístico sobre montes de

particularmente susceptibles al fuego como los rodales de coníferas y eucaliptus. En particular la zona denominada bosque energético, situado en el extremo suroeste del vivero donde se acumulan restos forestales y foliares generando espesos mantillos de material combustible, y es a la vez uno de los lugares de mayor concurrencia por lo cual aparece como uno de los sitios de mayor riesgo.

Los lugares destinados a fogones, si bien están sectorizados, son por la actividad allí desarrollada sitios de particular amenaza.

Tabla 6. CRITERIOS Y CLASES DE PELIGROSIDAD PARA INCENDIOS FORESTALES

CRITERIOS	CLASES DE PELIGROSIDAD			
	Alta	Media	Baja	Muy Baja
Actividad dominante y accesibilidad	Fogones	Accesibilidad automotor	Accesibilidad peatonal	Acceso público restringido

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El producto obtenido de la aplicación de la metodología descripta se sintetiza en un mapa donde se muestra conjuntamente tanto la vulnerabilidad como el peligro de los procesos analizados, en una expresión espacial definida (Fig. 3).

En el mapa adjunto, cada símbolo va acompañado con un número de orden que remite a una descripción y explicación de los factores de riesgo analizados, destinado a los órganos de decisión municipales (Tabla 7).

La integración de la vulnerabilidad y la peligrosidad mediante la matriz de clases de riesgo, expuesta en la Tabla 1, posibilita la obtención de las categorías de riesgos de inundaciones y anegamientos, de contaminación de acuíferos, de erosión y degradación costeras, y de incendios forestales. De este modo la autoridad de aplicación municipal puede implementar y desarrollar campañas preventivas específicas para cada riesgo en particular o integrales utilizando todos los factores en un único producto cartográfico.

Este esquema de trabajo presenta además la ventaja de ser rápido y consistentemente actualizable en función de los cambios que eventualmente se produzcan en alguna unidad ambiental singular sin modificar la totalidad del mapa.

Las mayores condiciones de riesgo de inundaciones anegamientos se vinculan con la presencia de cauces de arroyos en áreas densamente pobladas, como es el caso del A. El Durazno en el área urbana de Miramar, en zonas costeras con equipamientos turísticos y por último a los cementerios de ambas ciudades.

Las zonas de acantilados ubicados tanto al noreste y al suroeste de la ciudad de Miramar son las áreas que presentan valores altos de riesgo de erosión y degradación costera que puede afectar fundamentalmente a la infraestructura de servicios, como el camino costero y el conducto de desagüe cloacal, así como equipamientos turísticos.

Los mayores valores de riesgo de incendios forestales se restringen a las dunas forestadas con pino y eucaliptus donde se realizan actividades recreativas y fogones con un uso intensivo.

La información sobre peligros naturales es a nuestro juicio, fundamental para evitar daños o para reducir pérdidas, pero esto requiere de un esfuerzo considerable por parte de los generadores como de los usuarios de la información. Su uso más efectivo se logra con mapas que muestren claramente la probabilidad de ocurrencia, su lugar y magnitud.

El tipo de análisis efectuado pretende ser una herramienta dinámica que le permita a los estamentos locales de decisión, afrontar una política

FIGURA 3. CARTA DE RIESGOS MÚLTIPLES

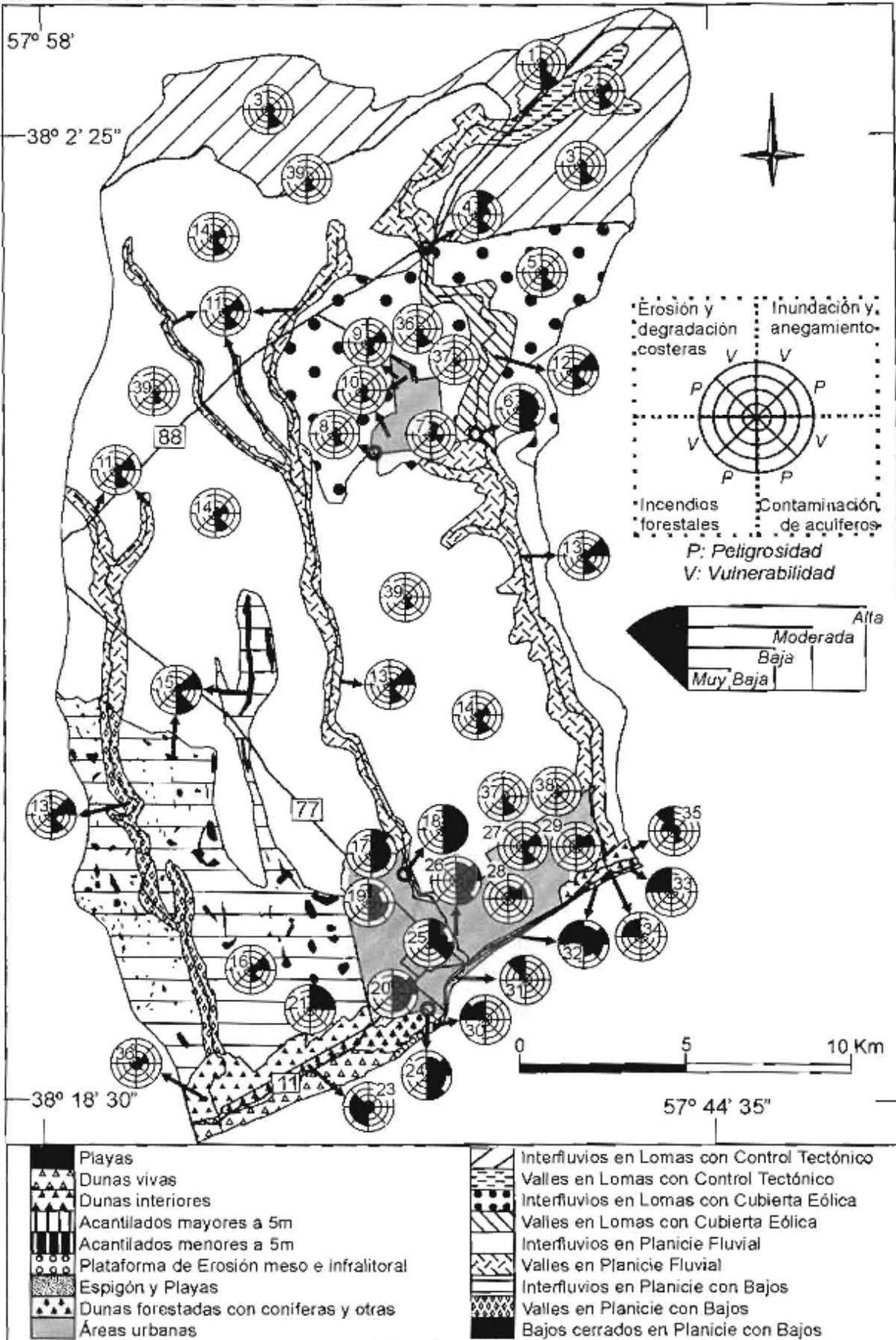


Fig. 3. Carta de riesgos múltiples

Tabla 7. DESCRIPCIÓN DE FACTORES DE RIESGO ANALIZADOS

1	El Boquerón	Sector con baja densidad poblacional.
2	Cabeceras del arroyo Las Brusquitas	Ubicadas en las lomas con control tectónico.
3	Interfluvio en las lomas con control tectónico	
4	Cruce de Ruta 88 con A. Las Brusquitas	
5	Interfluvios en lomas con cubierta eólica	
6	Sitio de disposición final de residuos de Otamendi	Área periurbana con escasa densidad poblacional, frecuentado por gente que vive de la basura.
7	Área urbana de Otamendi	Zona con servicios, con apreciable densidad habitacional.
8	Cementerio de Otamendi	
9	Sector inundable del Bajo Hondo	Está ubicado en el periurbano de Otamendi, en el norte de la ciudad. No cuenta con servicios de agua, cloaca ni desagües pluviales.
10	Periurbano de Otamendi	Zona sin servicios de agua y cloaca, y sin pavimento.
11	Cabeceras de los Arroyos La Totorá y El Durazno	
12	Valle del arroyo Las Brusquitas en las lomas con cubierta eólica	
13	Valles medios de los arroyos La Totorá, El Durazno y Las Brusquitas	
14	Interfluvio en la planicie fluvial	
15	Bajos cerrados de la planicie fluvial con bajos	
16	Interfluvio en la planicie con bajos	
17	Sector inundable en sectores afectados por terraplenes de rutas	Ruta 77 en el periurbano de Miramar.
18	Antiguo sitio de disposición final de residuos de Miramar	Basural de cuatro hectáreas parcialmente cubierto, sin el tratamiento de clausura correspondiente.
19	Periurbano de Miramar	Sector de la ciudad con densidad poblacional moderada, con escasos servicios cloacales y de agua corriente, y sin asfalto.
20	Zonas inundables en el periurbano de Miramar	Barrios La Palma, El Progreso y Barát. Zonas con frecuentes problemas de acumulación de agua durante lluvias copiosas.
21	Sector inundable en la ruta 11 entre Miramar y Mar del sur	Sector bajo afectado por la traza de la ruta 11, donde se producen endicamientos de agua por falta de alcantarillado suficiente.
22	Sector de dunas interiores edafizadas al sur de Miramar	Área ondulada, con suelos incipientes y parcialmente forestada.
23	Sector de dunas forestadas	Al suroeste de la ciudad de Miramar, forestado artificialmente, utilizado para esparcimiento (riesgos de incendio y de degradación por circulación de vehículos todo terreno y caballos)
24	Cementerio de Miramar	
25	Urbano de Miramar	Sector de la ciudad con todos los servicios. Con alta densidad población, con uso residencial predominante
26	Valle del arroyo El Durazno en la zona urbanizada de Miramar	Depresión que atraviesa la ciudad en zona densamente poblada, en algunos sectores con construcciones que suelen ser afectadas por avenidas de agua.

Tabla 7. CONTINUACION

27	Periurbano de Miramar, Barrios Parquemar y Bristol	Amplia zona residencial de la ciudad sin servicios de cloaca y parcialmente conectados a la red de agua corriente. Involucra dos zonas bajas que evacuan al mar mediante arroyos intermitentes.
28	Depresión del arroyo Seco	Sector bajo que recibe aportes pluviales y que encauza las mismas para desembocar en el mar. Aproximadamente a un kilómetro al este del arroyo El Durazno.
29	Depresión en el área urbana de Miramar	Depresión que recibe aportes pluviales y que encauza las mismas para desembocar en el mar. Aproximadamente 500 m al oeste del A. Las Brusquitas.
30	Acantilados menores a 5 metros de altura	Su retroceso afecta fundamentalmente a la infraestructura de servicios, como el camino costero y el conducto de desagüe cloacal. Barrancas de entre 3 y 5 metros de altura.
31	Sector costero céntrico de la ciudad de Miramar	Corresponde a playas con alta densidad de población durante la temporada estival.
32	Desembocaduras de cauces de agua en acantilados mayores a 5 metros de altura.	
33	Acantilados mayores a 5 metros de altura	Sector de barrancas, por lo general con altura superior a los 5 metros, muy expuesta a la erosión mecánica del mar, con escasas playas aisladas sujetas a las mareas.
34	Playas en las desembocaduras de cauces de agua del acantilado mayor a 5 metros de altura.	
35	Dunas interiores edafizadas al noreste de Miramar.	Sector parcialmente forestado y urbanizado, utilizado para esparcimiento (Golf).
36	Dunas interiores edafizadas al suroeste de Miramar.	Área ondulada, con suelos incipientes y parcialmente forestada.
37	Criaderos de animales	
38	Áreas de cultivos orgánicos	
39	Áreas de ganadería extensiva	

destinada a la minimización de los daños generados por los procesos analizados.

Esta herramienta lejos de ser un elemento definitivo debe ser aplicada, corregida y mejorada con su uso.

Consideramos que el uso de mapas individuales para dar a conocer la información sobre cada riesgo, puede conllevar a cierta complicación, por el número de mapas como por sus posibles diferencias con respecto al área cubierta, escalas y detalle.

El mapa elaborado posee elementos positivos destacables:

- Presenta la información relacionada con diferentes peligros y vulnerabilidades para el área de estudio en un sólo mapa, ofreciendo un cuadro compuesto de los riesgos naturales de diferentes magnitudes así como su área de impacto.
- Indica que un área determinada puede sufrir la presencia de varios riesgos naturales o inducidos antrópicamente.
- Muchos riesgos naturales pueden ser causados por un mismo evento natural. El mecanismo que origina el evento puede interconectar varios peligros y se le puede identificar más fácilmente mediante el uso de mapas de este tipo.

- Es un medio apropiado para crear conciencia respecto a la mitigación de riesgos múltiples.

- La cartografía de riesgos múltiples es una herramienta analítica integral para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo, especialmente cuando se combina con la cartografía geocientífica o de instalaciones críticas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestro reconocimiento al Dr. Héctor Massone, por sus críticas y sugerencias.

7. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BARRY, R. y R. CHORLEY, 1980.

Atmósfera, Tiempo y Clima. Omega. Barcelona.

CALOW, P., 1998.

Handbook of Environmental Risk Assessment and Management. Blackwell Science 590pp Oxford

CAMINO, M., LÓPEZ DE ARMENTIA, A., OYARBIDE, R.F. Y J.L. DEL RÍO, 2001.

Análisis de la variación de la calidad ambiental mediante la utilización de índices cuantitativos en el litoral atlántico del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina: el caso Mar del Sur. III Reunión Nac. de Geol. Ambiental y Ord. del Territorio y I del área del Mercosur. Simp. Esp. sobre Geoindicadores. Resúmenes. Pág. 32. ISBN 987-544-003-5.

CAPUTO, G., HARDOY, J., Y H. HERZER, 1985.

La inundación en el Gran Resistencia, Provincia del Chaco, Argentina. En G. Caputo, J. Hardoy y H. Herzer (eds.) Desastres Naturales y Sociedad en América Latina. Ediciones GEL, Buenos Aires.

CENDRERO A., 1987.

Riesgos Geológicos, Ordenación del Territorio y Protección del Medio Ambiente. I Curso de Riesgos Geológicos. Instituto Geológico Minero de España, Madrid.

CENDRERO A., J. SANCHEZ, C. ANTOLIN, S. ARNAL, J.R. DIAZ de TERAN, E. FRANCES, V. MARTINEZ, M. MOÑINO, M. NIETO, I. NOGALES, E. PÉREZ, C. RIOS, F. ROBLES, A. ROMERO and C. SUAREZ, 1990. Geocientific maps for planning in semi-arid regions: Valencia y Gran Canaria, Spain. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.

C.F.I., 1995.

Evaluación del recurso hídrico subterráneo en el Partido de General Alvarado, Informe Final Tomo I, Hidrología Subterránea. Informe inédito, 83pp.

DALLA SALDA, L. E. IÑIGUEZ, 1978.

"La Tinta", Precámbrico y Paleozoico de Buenos Aires. VII Congreso Geológico Argentino, Actas I: 539-550.

DEGIOVANNI, S., VILLEGAS, M., SAGRIPANTI, G., DOFFO, N. Y ORIGLIA, D., 2001.

Carta de Diagnostico Ambiental Regional: Consideraciones Metodológicas Derivadas de algunos casos de aplicación. En J. L. Del Río, A. López de Armentia, M. J. Bó y J. Martínez Arca (eds) III Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio y I del área del Mercosur. Trabajos en CD. ISBN 987-544-003-5.

del RÍO, J. L., CIONCHI, J. L., DRAGO, C., VIOLA, D., BÓ, M. J., LÓPEZ DE ARMENTIA, A., MARTÍNEZ ARCA, J., CAMINO, M. Y D. MAUREL, 2003.

Etapas Preliminares de Una Planificación Territorial de Las Cuencas de Los Arroyos Las Brusquitas, El Durazno y La Totorá, Partido de General Alvarado, Provincia de Buenos Aires. En M. M. Collantes, J. M. Sayago y L. Neder (eds) II Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Actas: 477-486. Tucumán.

DIEZ HERRERO A. y J. F. MARTIN DUQUE, 1993.

Fenómenos gravitacionales en el entorno de la ciudad de Segovia: Análisis de riesgos y aplicación a la ordenación territorial. En R. Ortiz Silla (ed) Problemática Geoambiental y Desarrollo, Tomo II: 681-692.

DRAGO, C., FREJO, A. SOSA, A., RODRÍGUEZ, R. Y M. CENTURIÓN, 2000.

Acciones Públicas y Privadas conducentes a la contaminación de suelos, aguas superficiales y subterráneas en General Alvarado. Informe inédito. 20pp.

FIDALGO, F., F.O DE FRANCESCO Y R. PASCUAL, 1975.

Geología superficial de la Llanura Bonaerense. VI Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 103-138. Buenos Aires.

FRANCÉS, F. S. y J. MARCOS GARCIA, 1993.

Cartografía temática de suelos y su aplicación a la ordenación del territorio del área periurbana de Salamanca. En R. Ortiz Silla (ed) Problemática Geoambiental y Desarrollo, Tomo II:553-564.

FOSTER, S., L. VENTURA Y R. HIRATA, 1987.

Contaminación de las Aguas Subterráneas; un enfoque ejecutivo de la situación en América latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable, CEPIS, 38pp. Lima.

HERMELIN, M., 1991.

Introducción a la Geología Ambiental. En J. E. López Rendon (ed) Geología Ambiental y Geomorfología Aplicada en Colombia. Report N° 16:3-20

HERZER, H. Y., 1990

Los desastres no son tan naturales como parecen. Desastres y Vulnerabilidad en América Latina. Medio Ambiente y Urbanización, Año 8 N° 30 (Número especial): 275 - 281.

KRUSE, E. E., 1986.

Aspectos hidrogeológicos de la región sudoriental de Tandilla – Cuencas de los Aos Vivoratá, Las Brusquitas y El Durazno. Revista de la Asociación Geológica Argentina, Tomo XLI (3-4): 367-374. Buenos Aires.

PANIZZA M., 1993,

Riesgo Geomorfológico y Vulnerabilidad Ambiental. QUADERNI IILA, SERIE SCIENZA 6. Mexico.

RÍOS, G., RÍOS, S. M., KARIS, O. Y E. MARTÍN, 2000.

Un aporte para el conocimiento y solución del tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos para la ciudad de Miramar y Olamendi. Informe inédito. 18pp.

ROLLERI, E. O., 1975.

Provincias Geológicas Bonaerenses. VI Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 30-53. Buenos Aires.

SALA, J. M. 1975.

Recursos Hídricos (Especial mención de las aguas subterráneas). VI Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 169-193. Buenos Aires.

SCHNACK, E.J., ALVAREZ, J.R. & J.L. CIONCHI, 1983.

El Carácter Erosivo de la Línea de Costa entre Mar Chiquita y Miramar, provincia de Buenos Aires. En Simposio "Oscilaciones del nivel del mar durante el último hem ciclo deglacial en la Argentina", Actas 118-130, Mar del Plata.

TERUGGI, M.E. Y J. KILMURRAY, 1975.

Tandilia. VI Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 55-77. Buenos Aires.

TERUGGI, M. E. Y J. KILMURRAY, 1980.

Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires. II Simposio Geológico Regional Argentino, Tomo II: 919-965. Córdoba.

VIOLA, D., 2002.

Plan Estratégico para el Partido de General Alvarado. Informe Inédito. 163 pp.

ZÁRATE M.A. Y J. L. FASANO, 1984.

Características de la sedimentación Pleistocena de la zona de Chapadmalal, Buenos Aires: significado de los paleosuelos y costras calcáreas. IX Congreso Geológico Argentino, Actas IV:57-75.

ZÁRATE M.A. Y J. L. FASANO, 1989.

The Plio-Pleistocene of the Central Eastern Pampas, Buenos Aires Province, Argentina. The Chapadmalal case study. Palaeogeography Palaeoclimatology Plaeoecology 72: 27-52.



ESTUDIO DEL DETERIORO DE LAS ROCAS EMPLEADAS EN OBRAS DE VALOR HISTORICO PATRIMONIAL

Ponce, María Beatriz¹ – INTEMIN – SEGEMAR

Resumen

Se presenta en este trabajo, varias de las conclusiones obtenidas a partir del estudio efectuado sobre el deterioro de diferentes variedades pétreas, presentes en monumentos y mausoleos situados en el predio del cementerio de la Recoleta. Atendiendo a la exposición de intemperismo natural al cual han estado expuestas las rocas, se analizan los cambios producidos evaluando el grado de intensidad alcanzado. Se incluye la metodología de estudio aplicada, la cual considera la acción del ambiente y sus agentes, la acción de intervenciones ya sea como restauración y/o mantenimiento y los correspondientes análisis mineralógicos.

De este modo se efectúa el relevamiento de las variedades de patologías encontradas en cada material lapídeo, identificando las causas posibles de su origen. Teniendo presente que las obras estudiadas forman parte de los declarados Monumento Histórico Nacional, es posible deducir según su fecha de construcción, la influencia de aspectos sociales en la selección de una determinada variedad petrográfica.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las rocas son empleadas cada vez más, en obras de arquitectura adquiriendo evidente importancia el interés por conocer sus propiedades y evaluar su empleo.

Este "descubrimiento" en el ámbito arquitectónico que se aplica en obras nuevas, probablemente esté relacionado con el interés de conservación de muchos edificios de valor histórico, los que poseen una amplia variedad de rocas tanto en revestimientos como en otras aplicaciones. Por otra parte, la Argentina es reflejo de la acción

desarrollada en los países europeos sobre el cuidado del patrimonio edificado donde las rocas poseen un lugar destacado.

Uno de los aspectos más relevantes está relacionado con el grado de deterioro que se observa en los diferentes materiales lapídeos, ya que de su diagnóstico y posterior tratamiento dependerá la neutralización o minimización de los agentes agresivos.

Una de las formas de conocer el desempeño de una roca es analizar su estado actual luego de un tiempo de estar sometida a intemperismo natural (De Maio et. al 1994)

Con este objetivo, se planteó el relevamiento de diferentes obras de interés histórico en el predio del cementerio de la Recoleta el cual ocupa aproximadamente 4.000 m² en la zona céntrica de la ciudad de Buenos Aires (Crespo et. Al 2000).

Hacia 1580 el área de Recoleta fue un sector que estaba situado fuera del ejido de la primitiva Buenos Aires.

Entregado: 25 de Noviembre de 2004 • Aceptado: 17 de Diciembre de 2004

Av. Gral. Paz 5445 , 1650, San Martín, Buenos Aires
e-mail: bea@inti.gov.ar

Paradójicamente, en la actualidad el cementerio y la Iglesia del Pilar se hallan en el centro de un entorno bullicioso donde se mezclan cafés y restaurantes de moda, jardines bordeando barrancas y residencias que históricamente, fueron reflejo del auge económico de algún sector social de los dos últimos siglos.

Originalmente, hacia el 1700 esta zona heredó su nombre por la primitiva construcción del convento destinado a los Monjes Recoletos por su retiro del centro urbano, suceso que evidentemente, con el correr del tiempo se revirtió hacia el extremo opuesto.

2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las características climáticas del predio donde se encuentra el cementerio, se encuentran en un rango entre máximos y mínimos de temperatura que oscila entre 12 y 22 °C, en tanto la humedad relativa puede variar entre 50 y 80 %. Estos valores no consideran en esta escala del estudio, el desarrollo de microclimas en determinados sepulcros y bóvedas.

Es sabido que en los últimos 10 años, la cantidad de precipitación anual ha aumentado estimándose en 1000 mm/año; además han adquirido frecuentemente características torrenciales habiéndose medido precipitaciones cercanas a los 170 mm/día.

Otro de los factores a tener en cuenta, si bien no forma parte de los parámetros climáticos aún cuando se encuentra en la atmósfera, es la contaminación producida por los gases generados por el intenso tránsito automotor que se produce en el entorno del cementerio. Entre compuestos se encuentran el SO₂, NO_x y el material en partículas que se encuentra en suspensión, a los que debe agregarse los iones metálicos que actúan como catalizadores en la oxidación de los dos primeros los que poseen carácter corrosivo para las rocas (Crespo et. al 2000).

3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

3.1 Reconocimiento preliminar del área con selección de casi 100 monumentos y mausoleos declarados Monumento Histórico Nacional. Las acciones desarrolladas en este nivel consistieron en:

- Observación visual del entorno en cada caso
- Posibilidad de intervenciones no destructivas "in situ"
- Recolección de trozos ya desprendidos para ser analizados en laboratorio
- Registro fotográfico de cada monumento/mausoleo
- Diseño de una ficha a ser empleada en el relevamiento de cada obra con la finalidad de identificar las patologías existentes. En tales fichas se incluyeron datos como:
 - Petrografía
 - Textura superficial
 - Antigüedad
 - Evaluación del deterioro de la roca
 - Tareas de mantenimiento (tipo y frecuencia de limpieza)
 - Presencia de eflorescencias
 - Desarrollo de fisuras (identificación sobre las posibles causas)
 - Pátinas

- Manchado
- Alteraciones cromáticas
- Presencia de costras
- Modalidad de alteración(es) de la superficie pétreo
- Desarrollo de colonias biológicas, plantas superiores
- Alteraciones debidas a los agentes biológicos
- Ubicación del monumento en el espacio con relación a los puntos cardinales
- Exposición de los diferentes planos del monumento a la acción de las precipitaciones, vientos y asoleamiento.

3.2 Búsqueda de información histórica sobre cada monumento, constructor, origen de la roca (cantera, país) así como cualquier otro dato considerado de interés (Crespo et. al 2001).

3.3 Búsqueda de datos ambientales referidos a compuestos contaminantes

3.4 Datos topográficos sobre el área motivo de estudio y su entorno

Debido a que el objeto de estudio comprende obras consideradas Monumento Histórico no es posible producir ninguna acción que incremente el deterioro, razón por la cual los procedimientos utilizados consistieron en el raspado de superficies pertenecientes a costras, sales y cualquier depósito extraño a la roca. Otro método consistió en la aplicación de apósitos de pulpa de papel.

3.5 Análisis en laboratorio consistentes en identificación mineralógica con empleo de lupa estereoscópica, microscopio de polarización, microscopio electrónico de barrido, análisis con microsonda, difracción por rayos X y fluorescencia y vía química húmeda.

3.6 Análisis de los datos recolectados y de los resultados obtenidos en laboratorio.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Se determinaron las variedades petrográficas con las cuales se realizaron las obras. Las mismas presentaron las siguientes características (De Maio et. al 1993):

4.1 Mármoles

Es la roca empleada con mayor frecuencia, en especial en los últimos años del siglo XIX y primeras décadas del XX. En la totalidad de los casos estudiados se identificó el mármol como originario de Carrara. Se determinaron dos variantes, uno de color blanco con suave vetado en gris y fina textura granoblástica, generada por la presencia de arcilla. El otro de color gris con tono azulado, frecuentemente asociado a mármol blanco conformando una variedad cromática la que es motivo de diseño en la obra. En ambos casos, la especie mineralógica de los mármoles es calcita recristalizada, asociada en algunos casos a muscovita y arcilla.

4.2 Granitos

Se detecta que aparecen en monumentos posteriores a 1850, siendo originarios de canteras argentinas. Los colores en obras de mayor antigüedad responden a los

grises, en tanto que los de edad más reciente son rojizos. Las terminaciones superficiales presentan trabajos de "martelinado" (de aspecto rústico) o pulidas. Las variedades graníticas grises muestran textura granular de variado desarrollo, identificándose con las especies comerciales Gris Mara y Gris Plata. La mineralogía reconocida es cuarzo, microclino perítico, plagioclasa, biotita y minerales opacos. Secundariamente, aparecen cloritas, muscovita y arcillas. En ciertos casos, los granitos se muestran con estructuras gnéissicas con bajo metamorfismo.

Las variedades de granitos rojizos presentan tonos rosados, rojos y marrones con textura de granos con desarrollo medio a grueso. La composición mineralógica se compone de cuarzo, microclino-ortoclasa, plagioclasa mirmequítica, biotita y opacos. Clorita, sericita y arcillas se presentan secundariamente.

4.3 Gabros

Identificados entre las obras más recientes. La mayoría son originarios de canteras de Uruguay y en menor cantidad, de Noruega. Los colores de las rocas varían desde el negro hasta un tono de base oscuro con venas marrones. La mineralogía se compone de cristales de labradorita con augita verdosa o enstatita y biotita. En otros casos, la presencia de largos cristales máficos orientados azarosamente en la matrix de la roca, le confieren una particular belleza.

4.4 Dioritas

Se reconocen dos variedades: una negra procedente de canteras argentinas y otra gris, de textura porfiroide de origen extranjero (aunque no se ha identificado el país).

La roca diorítica negra se caracteriza por presentar una textura medio-gruesa compuesta esencialmente por plagioclasa, biotita e hipersteno. Accesorariamente se identifica cuarzo, apatito, circón y opacos.

4.4 Sienita

Aparece en monumentos funerarios a partir de 1940. La textura es gruesa compuesta por feldespatos alcalinos y minerales máficos. La característica principal es la presencia de un anfíbol sódico, riebeckita, la cual le otorga un color azul irisado. En algunos casos se ha encontrado pirita euhedral y es común reconocer biotita.

4.5 Cordierita

Está formada por una textura de grano grueso, donde característicamente se reconoce cordierita, la cual está acompañada por biotita, clorita, sillimanita, apatito, muscovita y cuarzo en estructura de mortero. La roca se presenta con colores grises y azulados.

5. IDENTIFICACIÓN DE PATOLOGÍAS

Básicamente, las patologías identificadas fueron causadas por diferentes agentes los que pueden ser agrupados en cinco grandes grupos:

- * Características mineralógicas de la roca considerada
- * Componentes ambientales
- * Procedimientos constructivos
- * Escaso, nulo o mantenimiento inadecuado
- * Antigüedad del monumento

A continuación, en la Tabla 1 se mencionan las patologías detectadas en los mármoles.

Tabla 1. PATOLOGÍAS EN MÁRMOLES

TIPO DE PATOLOGÍA	ORIGEN
Costras blancas	* Formación de yeso A partir de SO ₂ atmosférico + CO ₂
Costras negras	* Productos de disolución de sales y suciedad Foto 1
Aumento de porosidad superficial	* Disolución química –
Relieve superficial irregular	* Heterogeneidad mineralógica (presencia de arcillas)
Microfisuración	* Heterogeneidad mineralógica
Fisuración	• Estructural • Acción antropogénica
Manchas	• Amarillentas: presencia de minerales con óxido de hierro • Blancas: depósitos carbonático-yesosos • Verdes: Oxidación de elementos de bronce
Pátinas ennegrecidas	* Zonas donde no llega el agua de lluvia- Foto 2
Pátinas orgánicas	* Entorno con escaso asoleamiento – Foto 3
Cristalización de sales	* Chorreaduras a partir de juntas
Deformación de placas - Combaniento	* Por temperatura en placas con 100 años de antigüedad

El resto de las variedades petrográficas presentan patologías variadas dependiendo más de sus características mineralógicas que de otros factores.

La Foto 1 muestra parte del monumento a Soler. La imagen de la cara presenta zonas oscurecidas y en la vista ampliada el detalle de la costra negra (Crespo et al 2002)

La Foto 2 corresponde al monumento a Nicolás Avellaneda donde se muestran zonas de ennegrecimiento por depósitos de suciedad en zonas donde las

precipitaciones no alcanzan a lavar (Crespo et al 2002).

En la Foto 3, se muestra el detalle de la superficie de un mármol a partir de una microfotografía obtenida en microscopio electrónico de barrido, donde es posible observar la alteración de la estructura cristalina. También se visualiza la presencia de hifas de hongos, las que al penetrar en la roca, aumentan el deterioro contribuyendo consecuentemente al incremento de la porosidad de la misma (Ponce, 2003).

FOTO 1. Monumento a Soler. Muestra la formación de costras negras y zonas ennegrecidas



En la Tabla 2, se mencionan las patologías encontradas en las rocas con excepción de los mármoles.

Tabla 2. PATOLOGÍAS EN ROCAS CON EXCEPCIÓN DE MARMOLES (Ponce 2003)

Tipo de roca	PATOLOGIAS
Granito	<ul style="list-style-type: none"> • Pátinas oscuras → Depósitos de suciedad por bajo o nulo mantenimiento • Picaduras → Deferrización de micas. Pirita alterada • Manchas rojizas → Deferrización de micas • Manchas blancas → Originadas en lechadas de cal para adherir placas • Microfisuración → Alteración en ferromagnesianos correspondientes a rocas de más de 50 años • Fisuración → Origen estructural
Gabro	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio de coloración → Alteración incipiente de plagioclasas en rocas de más de 50 años • Manchas blancas → Originadas en lechadas de cal usadas para adherir placas • Zonas ennegrecidas → Zonas protegidas de la lluvia
Diorita	<ul style="list-style-type: none"> • Manchas rojizas → Deferrización de micas • Picaduras → Deferrización de micas. Pirita alterada • Variación cromática → Alteración de plagioclasas en rocas de más de 100 años • Depósitos de suciedad
Sienita	<ul style="list-style-type: none"> • Picaduras → Alteración de pirita en variedades que la poseen • Manchas blancas
Cordierita	<ul style="list-style-type: none"> • No se detectaron patologías debido a la escasa antigüedad

De la totalidad de los datos registrados, fue posible conocer el proceso de cambio a través del tiempo en la elección de las rocas. Efectuando un análisis en períodos

de 50 años, se evidencia una mayor heterogeneidad petrográfica.

En la Tabla 3, se muestran los resultados (De Maio et al 1993).

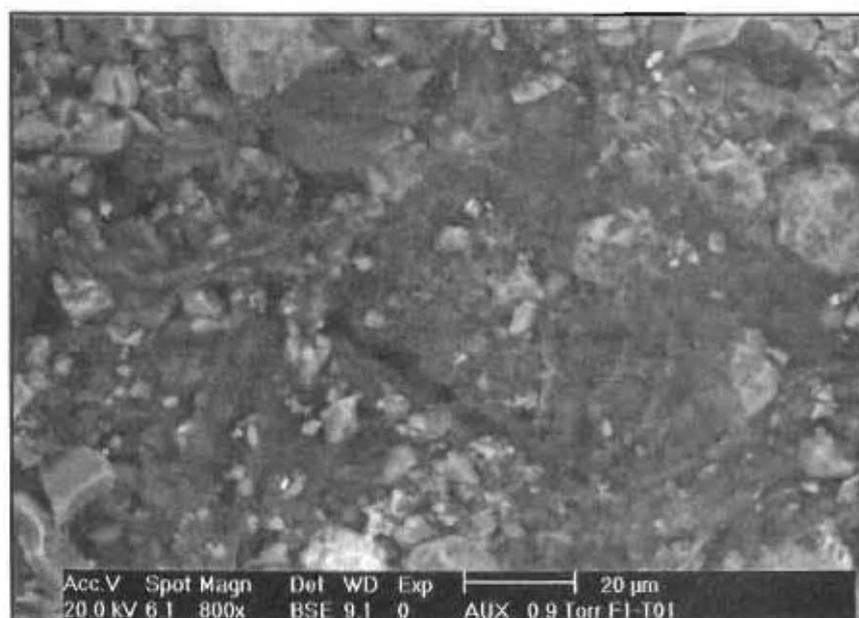
Tabla 3. VARIEDADES PETROGRÁFICAS SEGÚN SU ANTIGÜEDAD EN LOS MONUMENTOS

Tipo de roca	Antigüedad (% de variedad petrográfica)				
	1820-1850	1851-1900	1901-1950	1951-1992	TOTAL
Mármol	13	24	12	-	49
Granito	3	10	7	3	23
Gabro	2	2	5	4	13
Diorita	-	3	2	2	7
Sienita	-	-	4	2	6
Codierita	-	-	-	2	2

FOTO 2. Monumento a Avellaneda, donde se muestra el ennegrecimiento de zonas debido a la suciedad que no es lavada por el agua de lluvia.



FOTO 3. Obtenida con SEM (800X). Detalle de la pátina biológica donde se observan las hifas de hongos entre los cristales superficiales de la roca.



Analizando los datos de la Tabla 3, es evidente que entre 1820 y 1950, las preferencias netamente se inclinaron por el empleo del mármol esencialmente de origen italiano de Carrara.

A partir de mediados del siglo XX, el uso del granito supera ampliamente al mármol e incorpora otras variedades pétreas como gabro, diorita y sienita, quedando el primero inexistente.

Mucho más reciente, aparece la cordierita.

Finalmente, entre 1900 y 1950 existe una reducción en el uso del mármol, para aparecer en la estadística, casi inexistente en los últimos 40 años.

Por otra parte, también se estableció la relación entre el

estado de conservación de las rocas y el mantenimiento. Entendiéndose este último, como los procedimientos de limpieza aplicados.

En los registros efectuados, también se tomó nota del estado de fisuración, ya que es una característica bastante frecuente en los mármoles originada en la mayor antigüedad de las rocas que formaron parte del estudio. A ello, debe agregarse el nulo o escaso grado de mantenimiento.

Con estos criterios se elaboró la Tabla 4, donde se relacionaron antigüedad, estado de conservación y fisuración.

Tabla 4. RELACIÓN ENTRE EL ESTADO DE CONSERVACIÓN Y LA ANTIGÜEDAD DE LOS MONUMENTOS

ANTIGÜEDAD	CONSERVACION		FISURACION %
	REGULAR %	BUENA %	
1820 – 1850	28	4	41
1850 – 1900	46	4	26
1901 – 1950	7	11	33
1951 – 1992	-	-	-

6. CONCLUSIONES

Es notorio que los monumentos y mausoleos declarados Monumento Histórico Nacional, han sufrido el olvido y la falta de interés por su conservación, hecho que ha llevado al deterioro de las rocas empleadas en su construcción.

La acción de los agentes meteorológicos unido en muchos casos, al desconocimiento de las propiedades de las rocas (especialmente en los mármoles) son generados de gran parte de las patologías. A ello se agrega el desarrollo de fisuras como consecuencia de algún cálculo inadecuado relacionado con la capacidad portante (presencia de fisuras) de la roca y/o procedimientos

insatisfactorios en la sujeción de placas. En este último caso, la consecuencia es la aparición de depósitos blancos en la superficies pétreas, formación de costras y eflorescencias.

Es absolutamente necesario el planteo de un programa de mantenimiento que responda a tareas de limpieza, consolidación, preservación y eventualmente restauración, adecuadas a las características de cada variedad de roca.

Este último planteo debe ser encarado por aquellas instituciones técnicas que mediante un estudio sistemático y multidisciplinario, permitan recuperar y preservar obras de tan alto valor patrimonial.

7. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

CRESPO, M y PONCE, M.B. 2002

Las costras negras y su incidencia en el deterioro de monumentos pétreos del cementerio de la Recoleta. Actas VI Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio, Ayolas, Misiones, Paraguay

CRESPO, M.; DE MAIO, M.B.P de y ORSETTI, A., 2001

Biodeterioration Diagnosis of a Relief Belonging to the Grave of Olivera of Pignetto in Recoleta Cemetery, Argentina Fourth Latin American Biodeterioration and Biodegradation Symposium. CITEFA, Buenos Aires, Argentina

CRESPO, M.; ORSETTI, A.; ROSALES, B.; DE MAIO, M.B.P. de y RONCO, A., 2000

El deterioro del Patrimonio Escultórico

Revista Gerencia Ambiental, Año 7(66)456-462/508-510, Buenos Aires, Argentina.

CRESPO, M.; ROSALES, B y DE MAIO, M. B. P de, 2000

Predicción del deterioro de materiales escultóricos por acción de la lluvia y condensación ácida

Congreso Nacional de Química, Buenos Aires, Argentina

DE MAIO, M.B. PONCE y DOMÍNGUEZ, M., 1993

Durability Analysis of Ornamental Rocks vs. Natural Weathering Conditions

International Congress on the Conservation of Stone and Other Materials. UNESCO-RILEM, Vol I, Paris.

DE MAIO, M. B. P de y DOMÍNGUEZ, M., 1994

Natural Weathering of Stone Slabs

7º Congress of the International Association of Engineering Geology, Lisboa

PONCE, M.B., 2003

Estudio de la acción biológica en el deterioro de la piedra

Actas Miniforo IBERO00EKA en Mármoles y Granitos. CETEM/CYTED/CNPq, 160-168, Salvador Bahía, Brasil



COMENTARIO BIBLIOGRÁFICO

"Ingeniería Geológica" 2003 de: González Vallejo, Luis I; Ferrer Gijón, Mercedes; Ortuño Luis; Ortuño Abad, Luis; Oteo Mazo, Carlos; pp. I – XVII y 1 – 715 de la Editorial Prentice Hall, por autorización de la editorial Pearson Educación, S.A.

Se trata de una importante obra acerca del tema cuyo nombre lo indica, redactada en lengua castellana, sumamente completa, que viene a llenar un vacío sobre el tema de la geología ingenieril, y revela una puesta al día del tema abordado.

Es una obra que actualiza el conocimiento geológico, fundamental para el proyecto de obras de infraestructura, edificación y explotaciones mineras y la ordenación territorial o urbana.

El libro se encuentra estructurado en tres partes: la primera se refiere a los fundamentos de mecánica de suelos, mecánica de rocas, e hidrogeología y aporta métodos de investigación "in situ", reconocimientos geotécnicos y cartografía geotécnica. En la segunda parte se incluyen las aplicaciones más importantes: cimentaciones, taludes, túneles, presas y estructuras de tierra, y finalmente: la tercera parte está dedicada a los riesgos geológicos, particularmente a los deslizamientos y otros movimientos del terreno y riesgo sísmico.

El libro constituye una excelente referencia básica tanto para el geólogo, como para el ingeniero geólogo y el ingeniero geotécnico, así como también para el ingeniero civil y todos aquellos profesionales vinculados con las cimentaciones, excavación de taludes, túneles, minería, presas, obras de tierra y de materiales sueltos rocosos.

Como libro de texto desarrolla un programa de estudios avanzado en ingeniería geológica, geología aplicada y geotecnia.

Merece destacarse que los autores son profesores de Ingeniería Geológica y de Ingeniería del Terreno en las universidades Complutense y Politécnica de Madrid.

Finalmente cabe decir que todos los capítulos muestran innumerables ilustraciones que posibilitan la debida interpretación del temario desarrollado en cada uno de ellos. Resulta por todo lo comentado ampliamente recomendada y particularmente teniendo en cuenta su costo que no excede de \$ 180, puesta en Buenos Aires por la Editora.

Horacio V. Rimoldi

INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Editorial.		A-3
Instrucciones para autores.		A-4
Evaluación del riesgo de contaminación de acuíferos mediante una aproximación paramétrica en el partido de General Pueyrredón, Provincia de Buenos Aires, Argentina.	<i>del Río, J. L. - Cionchi, J.L. González, J. - Martínez Arca, J. Bó, M.J.</i>	1
Geología y Geotécnica preliminar del subsuelo del área Gran Resistencia y zonas aledañas, Provincia del Chaco, Argentina.	<i>Torra, Roberto</i>	11
Trazadores multielementales en las aguas subterráneas del partido de Escobar, Buenos Aires, Argentina.	<i>Silva Busso, Adrián Santa Cruz, Jorge - Heredia, Olga</i>	23
El comportamiento de la tosca en el proceso de infiltración.	<i>Giai, Santiago B. - Visconti, Graciela Ribero Luciaga, Pablo M.</i>	39
Contribución a la evaluación geotérmica del sudeste de Tucumán, Argentina.	<i>Vergara, G.A. - Mon, R. Gutiérrez, A. A.</i>	47
Evaluación de contaminación ambiental en los suelos, producida durante la fabricación del cemento pórtland.	<i>Karlsson, Alicia Ayala, Rosa</i>	57
Evaluación de anegamientos en la Ciudad de Buenos Aires.	<i>Nabel, Paulina E. Caretti, Magdalena</i>	63
Aspectos geotérmicos del sistema Acuífero Guaraní en el área Argentino-Uruguaya.	<i>Silva Busso, Adrián</i>	79
La sismicidad y sismotectónica de América del Sur.	<i>Suayter, L. - Torres de Plaza, M. Benítez de Parra, L.</i>	93
Ensayos triaxiales en rocas, modelización de resultados experimentales.	<i>Vendramini, Néstor Arcadio, Niell</i>	101
Cartografía geocientífica aplicada a la evaluación de amenazas geológicas en la cuenca del Río Purmamarca (Jujuy).	<i>Soler, Ramiro Daniel</i>	109
Análisis bloquimétrico de macizos rocosos fracturados.	<i>Vendramini, Néstor Jazan, Graciela</i>	125
Evaluación del riesgo de erosión en la cuenca del Río Purmamarca (Jujuy - Argentina).	<i>Soler, Ramiro Daniel</i>	131
Características hidráulicas del sistema Acuífero Guaraní en el área de Uruguay - Argentina.	<i>Silva Busso, Adrián</i>	149
Evaluación de riesgos múltiples de la cuencas de los arroyos Las Brusquitas, El Durazno y La Totorá, Provincia de Buenos Aires, Argentina.	<i>del Río, J.L. - Bó, M. J. - Maurel, D. Martínez Arca, J. - Camino, M. López de Armentia, A. - Drago, C. Viola, D.</i>	161
Estudio del deterioro de las rocas empleadas en obras de valor histórico patrimonial	<i>Ponce, María Beatriz</i>	173



ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

VIII° SIMPOSIO

DE GEOLOGÍA APLICADA a la INGENIERÍA y al MEDIO AMBIENTE

*"en conmemoración del 20° aniversario del
V° Congreso Internacional de la IAEG"*

Octubre de 2006

Buenos Aires - Argentina

A los fines de la impresión del presente volumen se ha recibido apoyo económico de las siguientes empresas y asociados:

EMPRESA MINERA TEA

Lic. Jorge Wexler

Copyright 2004 by Editorial ASAGAI
Maipú 645 - 1er piso - 1006 Buenos Aires
Printed in Argentina

PRODUCCION GRÁFICA Y EDITORIAL

Imprenta Sagitauru
Mitre 947 - Capital Federal
(11) 4393-3182
mitre947@fibertel.com.ar

Se terminó de imprimir en Enero de 2005
en *Imprenta Sagitauru*
Capital Federal - Buenos Aires
Argentina

FOTO DE TAPA

Basaltos con disyunción prismática irregular de las canteras Losi y La Milagrosa en Curuzú Cuatiá

Provincia de Corrientes - Argentina

Fotografía: Dr. Horacio Víctor Rimoldi