



ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

Número 23 · Mayo 2009

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Remediación de suelos contaminados con plomo. Primera parte

Vives, H. F. - Petelin, K. - Vives, A. M. - Silva, A.

Riesgo de anegamiento por una tormenta extraordinaria en la ciudad de Buenos Aires

Nabel, Paulina Esther - Becerra Serial, Rodrigo Martín - Caretti, Magdalena

Defectos petrogenéticos de las rocas metamórficas de Córdoba utilizadas en la construcción

Bonalumi, Aldo - Sfragulla, Jorge - Locati, Francisco - Campos, Darío

Caracterización de la piedra laja masiva y pulida de Olta, provincia de La Rioja. Su viabilidad económica

Carrizo, Ramón de la Cruz - Castro, Liliana - Delgado, Eduardo N.

Efectos provocados por las canalizaciones en la cuenca inferior del Arroyo del Tala. Provincia de Buenos Aires

Fucks, Enrique - Schnack, Enrique

Sismicidad y paleosismicidad en la región sur de la provincia de Córdoba.

Análisis del peligro y riesgo sísmico asociado

Sagripanti, Guillermo - Villalba, Diego - Bettioli, Anabela - Seitz, Carina

Aplicación de un sistema de geoindicadores para la evaluación de la calidad ambiental en agroecosistemas. Sudeste de la provincia de Buenos Aires, República Argentina

Bó, M. J.- del Río, J. L. - López de Armentia, A. - Cionchi, J. L. - Osterrieth, M., - Álvarez, M. F. - Camino, M.

Caracterización geomecánica de taludes en el camino entre Ciudad de La Punta - El Mirador.

Sur de la Sierra Grande de San Luis. Parte 1

Sales, Daniel A. - Mazzeo, Natalia - Pedersen, Oscar - Gómez Figueroa, Javier - Ferreyra, Franco - Origlia, Daniel

Manejo costero en la costa de dunas de Pehuen-có. Buenos Aires

Marcomini, Silvia Cristina - López, Rubén Alvaro - Uehara, Florencia

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

· Portada: Camino Merlo - Cumbre Comechingones, San Luis - Fotografía: Daniel A. Sales

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



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



ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

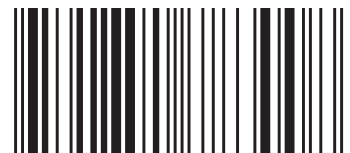


Publicación Oficial de la

ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

Número 23 2008

ISSN 1851-7838



REVISTA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA Y AL AMBIENTE

DIRECTOR

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

COMITÉ EDITORIAL

Dr. en Ciencias Naturales Julio Luis del Río
Centro de Geología de Costas y del Cuaternario.
Universidad Nacional de Mar del Plata

Lic. María Alejandra Gonzalez
Dirección de Geología Ambiental y Aplicada
IGRM - Instituto de Geología y Recursos Minerales
SEGEMAR - Servicio Geológico Minero Argentino

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

Lic. Rubén A. López
Departamento de Geología
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires

Lic. María Beatriz Ponce
CIGA - Centro de Investigación en Geología Aplicada
INTEMIN - Instituto de Tecnología Minera
SEGEMAR - Servicio Geológico Minero Argentino

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

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

COMISIÓN DIRECTIVA

PRESIDENTE *Norberto Jorge Bejerman*
VICEPRESIDENTE *María Beatriz Ponce*
SECRETARIO *María Alejandra Gonzalez*
PROSECRETARIO *Jorge Caló*
TESORERO *Rubén A. López*
PROTESORERO *Mirta Fresina*
VOCAL TITULAR *Alicia Fernández Cirelli*
VOCAL TITULAR *Fabio Luna*
VOCAL TITULAR *Julio Luis del Río*
VOCAL SUPLENTE *Adrián Silva Busso*
VOCAL SUPLENTE *Daniel Héctor Origlia*
VOCAL SUPLENTE *Ángel Marcos*
REVISORES DE CUENTAS *Guillermo Turazzini*
Fernando Díaz
Carlos Marconi
José L. Guerrero

DELEGADOS REGIONALES (2007-2009)

REGIÓN NOROESTE
Titular: *Felipe Rivelli*
Suplente: *Juan Carlos Valoy*
REGIÓN CENTRO NORTE
Titular: *Eliseo Popolizio*
Suplente: *Roberto Torra*
REGIÓN MESOPOTAMIA
Titular: *Luis Muñoz*
Suplente: *Eduardo Díaz*
REGIÓN LITORAL
Titular: *Oscar Albert*
Suplente: *Carlos Canoba*
REGIÓN CUYO
Titular: *Bernardo Zakalik*
Suplente: *Daniel Sales*
REGIÓN CENTRO
Titular: *Alberto Ruscullada*
Suplente: *Alicia Karlsson*
REGIÓN SUR
Titular: *Nestor Hirtz*
Suplente: *Mario Grizinik*

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 de hasta 250 palabras; el Abstract, en inglés, francés o portugués, de hasta 200 palabras, las Palabras Clave en un número entre 3 y 5 y las correspondientes Keywords.
- 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 1:10,000 in the area of Monachil (Granada, Spain). En R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha (eds.) 7th International Congress International Association of Engineering Geology, Volume III: 2059-2064, Rotterdam.
- Los libros de textos:
DEARMAN, W.R., 1991. Engineering geological mapping. Butterworth-Heinemann Ltd, 387 pp. Oxford.

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

INDICE

| Trabajo | Autor/es | Pág |
|---|--|-----|
| Staff | | |
| Instrucciones para autores | | |
| Remediación de suelos contaminados con plomo. Primera parte | <i>Vives, H. F. - Petelin, K. - Vives, A. M. - Silva, A.</i> | 1 |
| Riesgo de anegamiento por una tormenta extraordinaria en la ciudad de Buenos Aires | <i>Nabel, Paulina Esther Becerra Serial, Rodrigo Martín Caretti, Magdalena</i> | 7 |
| Defectos petrogenéticos de las rocas metamórficas de Córdoba utilizadas en la construcción | <i>Bonalumi, Aldo - Sfragulla, Jorge - Locati, Francisco - Campos, Darío</i> | 17 |
| Caracterización de la piedra laja masiva y pulida de Olta, provincia de La Rioja. Su viabilidad económica | <i>Carrizo, Ramón de la Cruz - Castro, Liliana - Delgado, Eduardo N.</i> | 29 |
| Efectos provocados por las canalizaciones en la cuenca inferior del Arroyo del Tala. Provincia de Buenos Aires | <i>Fucks, Enrique - Schnack, Enrique</i> | 39 |
| Sismicidad y paleosismicidad en la región sur de la provincia de Córdoba. Análisis del peligro y riesgo sísmico asociado | <i>Sagripanti, Guillermo - Villalba, Diego - Bettiol, Anabela - Seitz, Carina</i> | 45 |
| Aplicación de un sistema de geoindicadores para la evaluación de la calidad ambiental en agroecosistemas Sudeste de la provincia de Buenos Aires, República Argentina | <i>Bó, M. J.- del Río, J. L. - López de Armentia, A. - Cionchi, J. L. - Osterrieth, M. - Álvarez, M. F. - Camino, M.</i> | 55 |
| Caracterización geomecánica de taludes en el camino entre Ciudad de La Punta - El Mirador Sur de la Sierra Grande de San Luis. Parte 1 | <i>Sales, Daniel A. - Mazzeo, Natalia - Pedersen, Oscar - Gómez Figueroa, Javier - Ferreyra, Franco - Origlia, Daniel</i> | 67 |
| Manejo costero en la costa de dunas de Pehuen-có. Buenos Aires | <i>Marcomini, Silvia Cristina - López, Rubén Alvaro - Uehara, Florencia</i> | 75 |
| Institucional. Noveno Simposio de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente | | 85 |



Remediación de suelos contaminados con plomo

Primera parte

Vives, H. F.¹, Petelin, K.¹, Vives, A. M.¹, Silva, A.²

Recibido: 28 de Diciembre de 2006 • Aceptado: 26 de Febrero de 2007

Resumen

Se ha desarrollado un proceso de tratamiento a muestras de suelos contaminados con plomo, Las muestras de suelo de Villa Inflamable, Dock Sud, Argentina con tenores de plomo entre 160 y 2000 mg por Kg de muestra seca, fueron mezcladas y artificialmente contaminadas con óxido de plomo (p.a.). El proceso de remediación, consta de dos etapas: la primera etapa, se trata de un procedimiento físico-químico sobre el referido suelo contaminado, al que se le adicionó óxido de plomo hasta llegar a una concentración de plomo en un rango de 3500/3900 mg. de Pb/Kg de muestra seca. A esta muestra se la trató con una mezcla de haluros (Cl^- , Br^-) y mediante operaciones físicas de mezcla y calentamiento se establecieron las condiciones para la reacción de intercambio de cationes. En la segunda etapa se someterán los líquidos residuales a un tratamiento electroquímico haciendo pasar corriente a través de un cátodo de titanio y ánodo de titanio platinizado (DSA- O_2); luego de la remoción electroquímica se espera tener plomo depositado en el cátodo. Para las experiencias se ha utilizado un reactor químico a escala laboratorio, donde se trató el suelo artificialmente contaminado antes descrito. El plomo depositado, se recupera del electrodo por decapado mecánico y/o redisolución química o electroquímica. El plomo removido es destinado al proceso industrial de refinación para obtener metal de distintas calidades. El sólido tratado en la etapa química partiendo de concentraciones de entre 3500 y 3900 mg Pb/Kg M. S., en el total de los experimentos de esta etapa, llegó a concentraciones inferiores al nivel guía que se utiliza en EEUU, (130 mg/Kg M.S.) para suelos de uso residencial (US-EPA). El rendimiento del proceso de remoción arrojó valores de entre 95,5 y 98,8 % de reducción del plomo total de la muestra. Se prevé continuar el trabajo experimental variando estadísticamente los parámetros físico-químicos del tratamiento y llevando a cabo ajustes y variaciones en la etapa electroquímica hasta la optimización del método y verificar la reproducibilidad de los resultados.

Palabras clave: remoción de plomo, suelos, recuperación electroquímica.

Abstract

A treatment process has been applied over leaded contaminated soil samples. This process contains two stages, the first one is a chemist process over soil contaminated samples from "Villa Inflamable", Buenos Aires, Argentina, with the addition of Lead oxide to reach a range of lead concentration of 3500/3900 mg Pb/Kg of dry sample. A mix of Halide (bromide/chloride) has been added to this sample and the cation exchange reaction has been induced by mixing and heating operations. In the second stage the system will be submitted to an electrochemical treatment passing electric current between a titanium catode and a platinum titanium anode (DSA- O_2). Before electrochemical remotion, we wait to observe a lead deposited over the catode. For these experiences it will be use a laboratory prototype reactor where the soil which has been artificially contaminated, will be treat. The Lead deposited will be removed from the electrode by means of mechanic stripping and/or chemist or electrochemist dissolution. Removed Lead is used in refiner industrial process to obtain

1 Grupo Electroquímica Medio Ambiente, (GEMA)- Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Avellaneda (UTN-FRA), Av. Mitre 750 (1870), Avellaneda, Buenos Aires, Argentina.
✉ fvives@fra.utn.edu.ar.

2 Instituto Nacional del Agua (INA), Autopista Ezeiza-Cañuelas, Empalme J. Newbery Km. 1,620 Ezeiza, Bs. As., Argentina.
pntsas@ina.gov.ar .

metals of different qualities. The solid treated in the chemist stage starting from a lead concentration between 3500 and 3900 mg Pb/kg soil, in all the experiments of this step, it has reached at lead concentrations lower than the guide level that is been used in the USA for residential soil (130 mg Pb/kg soil, US-EPA, 1995). The removal process yield was 95,5 - 98,8 % of reduction of the total lead of the samples. It is thought to continue with the experimental work varying the experimental parameters statically and carrying out variations in the electrochemical stage till the method improvement and to verify the repeatability of the results.

Key words: lead removal, soils, electrochemical removal.

INTRODUCCIÓN

A escala mundial, la lucha contra el aumento del plomo en el ambiente se ha dado en varios frentes: Por una parte, la sustitución paulatina de los compuestos orgánicos de alquilo-plomo, utilizados como antidetonantes en las naftas (gasolinas) para automotores; y por otra procurar que la utilización del plomo se realice con una tecnología que asegure un ciclo de vida de los materiales o productos elaborados con plomo, de modo tal que asegure, no contaminar o que la recuperación del plomo de los residuos sea lo más eficiente posible Baird, C. 2001.

Un estudio de la Universidad de Cagliari, Italia, reportó plomo en sangre y pelos de 222 niños medidos en las ciudades de Portoscuso y Sestu, Cerdeña en 1998 (Sanna E. 2003). En nuestro medio similar hallazgo se encontró en niños de Villa Inflamable, Isla Maciel, Dock Sud (a 4 Km de Plaza de Mayo) y otros de Villa Corina, ambos del Partido de Avellaneda. La fuente presumible de dichas intoxicaciones es el polvo del suelo, por tratarse del único medio que arrojó elevadas concentraciones de plomo en polvo de esa zona residencial (Villa Inflamable). Detectado en primera instancia en la campaña exploratoria realizado por Brown & Caldwell (1996), corroborado posteriormente en el estudio ambiental Plan de Acción Estratégico (PAE) para la gestión ambiental sustentable de un área urbano-industrial. Plan de Monitoreo (2003) del Polo Petroquímico Dock Sud y recientemente en nuestra campaña de revisión exploratoria del Grupo Electroquímica y Medio Ambiente, GEMA (2005), Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Avellaneda.

Una fuente importante de este tipo de contaminación, son los residuos de emprendimientos donde se realiza el proceso de recuperación de baterías agotadas (Nebel, B.J and Wright R. T. 1999) y peor aún cuando las baterías son descartadas como basura sin ningún tipo de tratamiento, lo cual está prohibido en nuestro país por resolución de la Secretaria de Recursos Naturales (Resolución SRNAH N°544/94). Un estudio sobre remoción de plomo de suelos de sitios de recuperación de baterías agotadas en Norteamérica (Clifford, D., 1998) asegura que el lavado, del suelo contaminado, con soluciones de haluros y a determinadas temperaturas producen la disolución del plomo, el cual pasa al medio líquido para luego ser separado de ésta mediante precipitación como compuesto insoluble. Este trabajo de remediación es parcialmente coincidente con algunos métodos de recuperación de plomo de secundarios, la bibliografía describe este y otros métodos donde se utilizan haluros o ácido fluorborico para la etapa de leaching de los oxidos de plomo (Exposito, E. Et al., 1998; Cole E.R. et al., 1981-1984). A finales de la década de los 70, Prengaman R.D. y H.B. Mc Donald (1990) desarrollaron un proceso de recuperación de plomo utilizando ácido fluorosilícico (H_2SiF_6) o ácido fluorbórico (HBF_4) para la lixiviación y por último utilizar una etapa de remoción electroquímica. El estudio, cruzamiento y comparación de la información enumerada permite inferir la nece-

sidad de desarrollar un sistema de mayor eficiencia para la remediación de suelos contaminados con plomo, el cual prevé dos etapas: una química y la segunda electroquímica.

El diseño experimental de este proyecto se basa en: El método de obtención hidro-metalúrgica de plomo en medio háluro. Los resultados satisfactorios de nuestro proyecto de remoción de plomo de líquidos residuales del proceso de reciclado de baterías agotadas (Código:UTN- SeCyT, PQPRAV002T). El sistema de recuperación de plomo por métodos químicos, de suelos de sitios contaminados con plomo en Norteamérica, realizado por la Universidad de Houston en un programa de la Agencia Ambiental Norteamericana US-EPA (Clifford, D. 1998) y para la etapa electroquímica utilizaremos los conocimientos y experiencias aportadas por la tesis doctoral de Eduardo Exposito (1999), colega y amigo del Laboratorio de electroquímica Aplicada de la Universidad de Alicante, junto con la tecnología del proceso LEREFLOS (San Lorenzo D.M., 1991) (Lead Recovery From Lead Oxides Secondaries) en el cual, se utiliza la etapa electroquímica para la remoción y recuperación del plomo de los electrodos (secundarios en la jerga especializada) de las baterías plomo-ácido agotadas y desechadas; nuestro proyecto intentará combinar estos métodos para la remediación de suelos y residuos sólidos con altos tenores de plomo y como objetivo secundario extenderlo a la remoción del plomo de la escoria residual proveniente del proceso de recuperación de plomo de baterías por vía pirolítica realizado en nuestro medio, para de ese modo evitar o minimizar la contaminación mencionada.

MATERIALES Y MÉTODOS

La composición del suelo artificialmente contaminado se hizo seleccionando parte de las muestras extraídas para la citada caracterización de la contaminación del suelo en Villa Inflamable a la cual se le agregó óxido de plomo hasta llegar a una concentración entre 3500 a 3900 ppm.

Los constituyentes utilizados en la preparación del suelo artificialmente contaminado y de las diferentes soluciones fueron los siguientes: ; óxido de plomo (PbO), 98% de pureza (Panreac PRS, Barcelona, España); ácido clorhídrico 33% pureza (Panreac PRS); ácido nítrico 70% de pureza (Anedra ACS), Cloruro de sodio 99% de pureza (Merck), Bromuro de potasio 99% de pureza (Merck).

Para los análisis de plomo se utilizó un Espectrofotómetro de Absorción Atómica marca: Pelkin Elmer. Modelo AA-200 perteneciente a CORPLAB Latinoamérica, con sus curvas de calibración actualizadas. El método de análisis utilizado es el indicado por la literatura analítica de metales pesados (Beaty, 1987) y por (US-EPA, 1995) en el método analítico para determinación de metales Standard Methods 7420-86. Con los patrones y calibraciones actualizadas, toda vez, que este laboratorio cumple con las normas y certificaciones de calidad de Secretaría de Política Ambiental P.B.A.

EXPERIMENTAL

Los experimentos de la primera etapa o etapa química se llevaron a cabo en un reactor de vidrio a escala laboratorio (1000 cc.) con agitación mecánica provista por un agitador de marca PRECITEC AE-15-N (0-800 rpm.), calefaccionado a través de la manta calefactora del agitador magnético marca ZELTEC MS-5. En figura 1a. Se muestra el esquema del reactor químico. En tanto que los balances de materia se llevaron a cabo mediante balanza electrónica digital DENVER XP-3000.

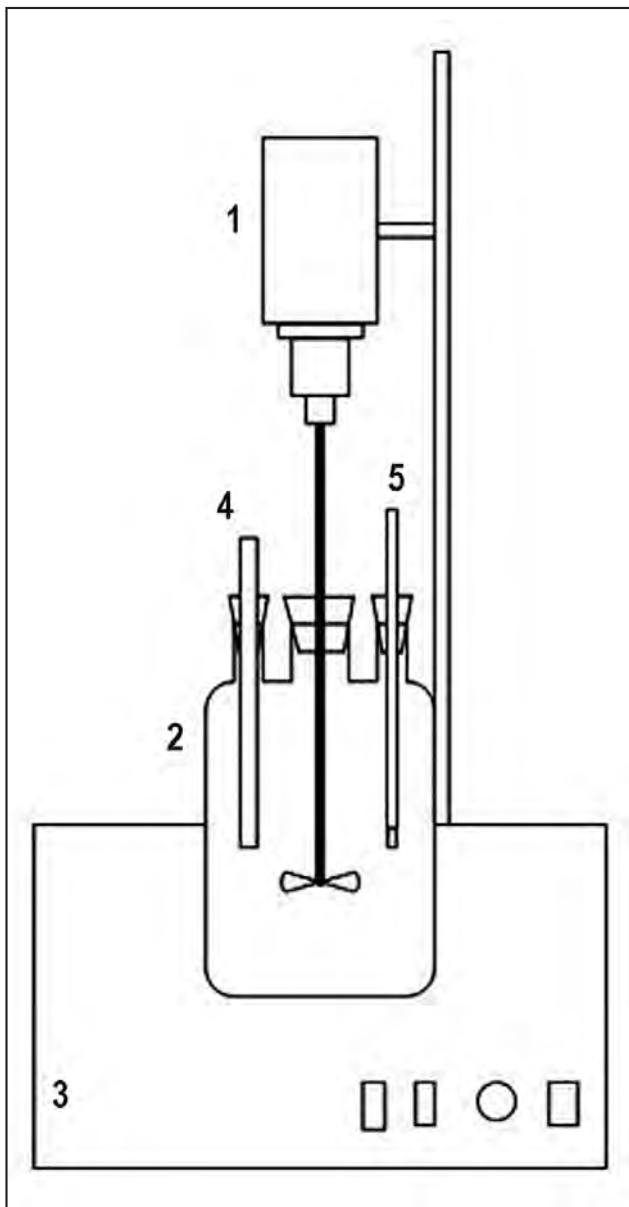


Figura 1. Esquema del micro-reactor químico utilizado en la primera fase de la remediación.

1. Agitador 2. Micro reactor p.d. 3. Manto calefactor.
4. Medición de pH. 5 Medición de temperatura.

Los experimentos electroquímicos también se realizarán en dos etapas con un mismo reactor prototipo: La primera etapa se realiza con un cátodo de malla de titanio y un ánodo dimensionalmente estable DSA-O₂, con el objetivo de separa plomo del electrolito hasta dejar concentraciones inferiores a 100 ppm. En la segunda etapa se utiliza el reactor antes

mencionado con un cátodo de fieltro de carbón dividido del ánodo DSA-O₂ por una membrana selectiva de cationes.

Prototipo Electroquímico escala laboratorio

El diseño general del proceso electroquímico experimental es mostrado en Figura 2.

El primer paso electroquímico se llevará a cabo con un reactor célula filtro prensa de 20 cm² de área electródica sin dividir, es decir se arma el reactor con una malla de titanio como cátodo y un DSA-O₂ como ánodo sin ningún tipo de membrana que los separen, este arreglo del reactor permite tratar líquidos con concentraciones de plomo superiores a 100 ppm. Para la segunda etapa electroquímica, se utiliza un reactor célula filtro prensa dividida con ánodo DSA-O₂; para evitar su envenenamiento debido a la formación de un depósito de PbO₂, se interpone una membrana catiónica (Nafion 450). El cátodo fieltro de carbón (Le Carbone Lorraine, París, Francia) con un colector de corriente de placa de titanio de 3 mm. de espesor. En todos los ensayos se utiliza un área electródica de 20 cm² (referida al colector).

La figura 3 muestra la configuración esquemática del reactor Célula Filtro Prensa (CFP-20) que se utilizará al momento de los experimentos de la segunda parte de este trabajo. Se utilizará una conformación de la célula La distancia entre la membrana catiónica y el colector de corriente catódica es de 10 mm. La distancia entre ánodo y membrana para la etapa con célula dividida, es de 10 mm.

Aunque el sistema no ha sido llevado a mayor escala, no habría dificultades en hacerlo utilizando cátodos de fieltro de carbón y ánodos DSA-O₂. El trabajo experimental se realiza en primer lugar con los líquidos de lavado provenientes de la etapa química de remoción realizados anteriormente en el laboratorio, con los resultados de estos experimentos se estudiarán los parámetros para reutilizar estos líquidos en posteriores tratamientos químicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se tomó un número de muestras por medio de un muestreo simple al azar, de modo tal que, la comprobación o refutación de nuestra hipótesis está dada por el procedimiento de muestreo y los análisis químicos realizados, se adoptó un tamaño de muestra tal que nos asegurara un nivel de confianza superior al 90%.

Los resultados de la remediación de las muestras de suelo en su etapa química, permiten inferir un nivel de incertidumbre menor del 4% ($m < 0,04$), toda vez que, el método arrojó eficiencias brutas entre 95,5 y 98,8 % en la reducción de plomo en las muestras de suelo original.

Los resultados de la remoción de plomo primera etapa química, realizada sobre las muestras secas de suelo en las condiciones antes descriptas, se muestran en la Tabla 1.

En esta comunicación se exponen solo los resultados de la etapa química, debido a un atraso en la importación el ánodo DSA-O₂ específico y el acondicionamiento de partes del equipo electroquímico para los experimentos de la etapa electroquímica planificada.

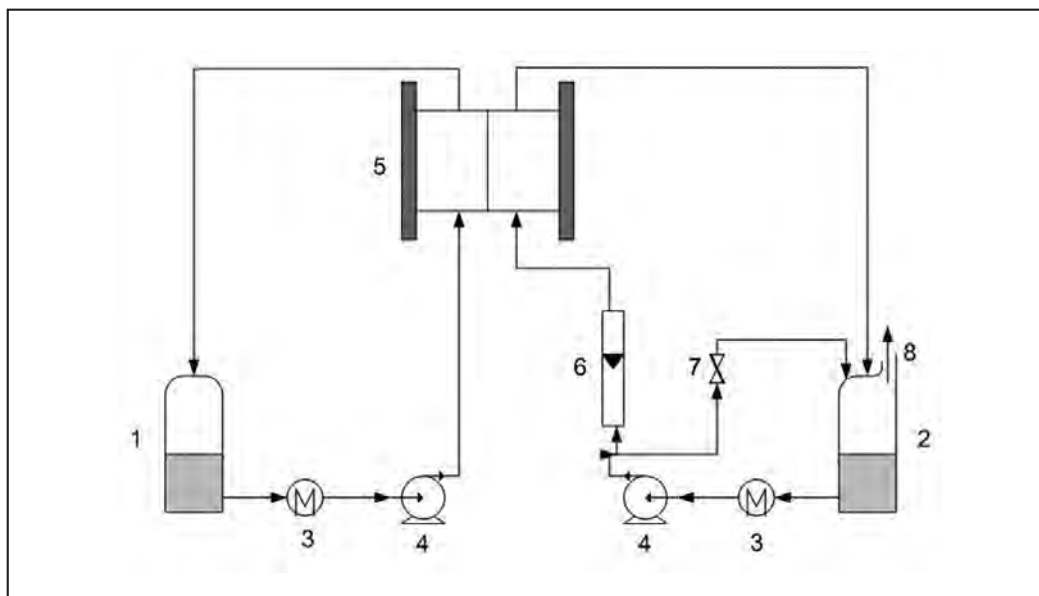


Figura 2. Esquema general del sistema electroquímico experimental. 1. Depósito de anolito. 2. Depósito de catolito. 3. Intercambiadores de calor. 4. Bombas. 5. Reactor célula filtro prensa. 6. Medidor de flujo. 7. Válvula regulación. 8. Salida de hidrógeno.

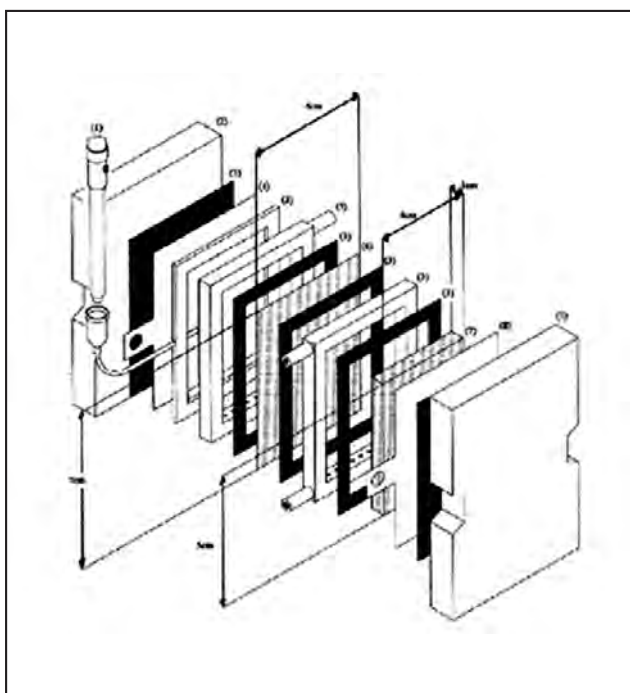


Figura 3. Esquema del reactor célula filtro prensa utilizado para la remoción de plomo del líquido de lavado de suelo, segunda etapa

Tabla 1. En esta tabla se exponen los resultados de los experimentos

| Muestra | Pb en suelo inicial mg/Kg. | Pb en suelo final mg/Kg. | Eficiencia Bruta de Remoción % |
|---------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Q01 | 3600,5 | 89,2 | 97,54 |
| Q02 | 3921,0 | 45,4 | 98,84 |
| Q03 | 3510,0 | 110,1 | 96,86 |
| Q04 | 3832,0 | 172,0 | 95,51 |

El análisis de los resultados expuestos en la Tabla 1 permite demostrar que la eficiencia bruta (entre 95,5 y 98,8 %) de remoción del plomo en la etapa química es muy satisfactoria y elevada, sin embargo, por una parte debemos tener en cuenta que cuando se lleve la remediación a mayor escala estos valores pueden disminuir y por otra parte, mediante este tratamiento se traspa el plomo de la tierra a la fase líquida, a partir de ese instante el problema es: extraer el plomo de la fase líquida y desarrollar el método que permita reacondicionar y reutilizar ese líquido residual en próximos procesos, para que de este modo se llegue a la remediación del suelo problema sin generar otro tipo de contaminación, este tipo de tratamiento será desarrollado por la vía electroquímica en la segunda parte de nuestra investigación. En referencia a la remediación de la tierra problema se observa lo siguiente: La mayoría de los resultados de plomo final en el suelo tratado, excepto uno, llegaron a niveles inferiores a los normalizados por *US-EPA 1995* y a valores límites mas restrictivos, tales como, los normalizados por el modelo del Plan Director para la Protección del Suelo, elaborado por el Departamento de Urbanismo, Vivienda y Medio Ambiente del gobierno Vasco, España (*Seoanez Calvo M., 1999*). Donde en los Valores Indicativos de Evaluación (VIE), se contempla el uso del suelo con las siglas (VIE-C) para el caso de tratarse de una ZONA DE USO INFANTIL igual a 150 mg/Kg de plomo sobre muestra seca de suelo (m.s.). En tanto, que para uso residencial a nivel general, establece la cantidad 500 mg Plomo por Kg. de suelo (m.s.). La remediación del suelo llevada a cabo muestra unos resultados satisfactorios, por lo cual nuestra tesis quedará totalmente convalidada o modificada, luego de conocer los resultados del tratamiento de los líquidos residuales de la primera etapa de remediación.

CONCLUSIONES

El método propuesto para la primera parte de la remediación de suelos contaminados con plomo, ha demostrado tener una excelente eficiencia de remoción de plomo (95,5 a 98,8 %) en suelos del tipo "rellenos no autorizados", es decir no

seleccionados, tal el caso de nuestro muestreo extraído de Villa Inflamable, Dock Sud, Argentina. En otros aspectos, se debe tener presente que los resultados hallados provienen de un muestreo probabilístico tomado al azar de un tipo de suelo particular. También, se deberá probar que la segunda etapa de tratamiento electroquímico de los líquidos residuales alcance una eficiencia

aceptable que permita su reutilización, hasta que se los deba volcar con parámetros que no indiquen contaminación, en este aspecto se tiene optimismo, toda vez que contamos con experiencia exitosa en el tratamiento de líquidos residuales con plomo de características similares a estos.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BAIRD COLIN, 2001
Química Ambiental
Ed. Reverté, Barcelona, 2001, p 414.
- BEATY R.D., 1987
Concepts, Instrumentation and Techniques In Atomic Absorption Spectrophotometry.
Pelkin Elmer.
- BROWN AND CALDWELL, 1996
Dock Sud Environmental Remediation and Pollution Abatement Project,
final report, prepared for Secretaría General de la Gobernación de la Provincia de Buenos Aires.
- CLIFFORD D. 1998
Recovery of Lead from Soil, EPA G.N. 094UHH2347.
University of Houston.
- EXPOSITO E., SÁEZ A., HERRERO E. Y A. ALDAZ, 1998
Water Environment Research, 1998, 70, 3.
- COLE E.R., LEE A.Y. AND D.L. PAULSON, 1981
“Electrolytic Method for recovery of lead from scrap batteries”.
Bur Mines Report R1 8602 Washington D.C. U.S. Bureau of Mines, 1981.
- COLE E.R., LEE A.Y. Y D.L. PAULSON
“Electrolytic Method for recovery of lead from scrap batteries scale up study”.
Bur Mines Report R1 8857 Washington D.C. U.S. Bureau of Mines, 1984.
- GEMA (2005)
Campaña Exploratoria en Villa Inflamable, Dock Sud, Avellaneda. Grupo Electroquímica y Medio Ambiente. UTN-Facultad Regional Avellaneda.
Plan de Monitoreo Continuo del Aire para el Área del Polo Petroquímico Dock Sud. Municipalidad de Avellaneda y Agencia de Cooperación Internacional del Japón en la Argentina, Avellaneda 2003.
- NEBEL B.J AND R. T. WRIGHT
“Ciencias Ambientales, 6ª.Ed. Prentice Hall, México, 1999, 348-349.
Resolución SRNAH N°544/94. “Obligación de recibir acumuladores usados, a la que se ajustarán los vendedores de acumuladores eléctricos en las operaciones de venta” Ley 24051.
- PRENGAMAN R.D. Y H.B. MCDONALD
Lead-Zinc 90. Ed T.S. Mackey and R.D.Pregaman.
Warrendale, PA, TMS,1990.
- SAN LORENZO D.M. Y G.D. NOGUEIRA. 1991
“Hydrometallurgical Treatment of lead secondaries”.
International Pb-Zn Study Group, Roma 11-13 Junio 1991.
- SANNA E. 2003
Liguori A., Palmas L., Soro M.R. and Floris G. Blood and Hair Lead Levels in boys and girls.
Ecotoxicology and Environmental Safety, 293-299.
- STANDARD METHOD 7420-86
Method for chemical Analysis of water and wastes.
Refer to EPA-600/4-82-055.
- SEOANEZ CALVO M., 1999
“Contaminación del Suelo” Estudios, tratamiento y gestión.
Ed. Mundi Prensa, Madrid, 257-266.
- TESIS DOCTORAL DE EDUARDO EXPOSITO
Dpto Química Física.
Facultad de Ciencias de la Universidad de Alicante, Enero 1999.
- US-EPA, 1995
Risk Assessment Guidance for Superfund:
Volume II, Environmental Evaluation.



Riesgo de anegamiento por una tormenta extraordinaria en la ciudad de Buenos Aires

Nabel, Paulina Esther ¹ - Becerra Serial, Rodrigo Martín ² - Caretti, Magdalena ²

Recibido: 11 de Abril de 2007 • Aceptado: 20 de Junio de 2007

Resumen

Este trabajo analiza la distribución de zonas con riesgo hídrico en relación con los rasgos geomórficos de la ciudad de Buenos Aires y evalúa su correlación con parámetros topográficos tales como altura y pendiente. El uso de herramientas geomáticas permite la consideración objetiva de valores topográficos numéricos georeferenciados y actualizados.

Las áreas inundables modeladas para un evento de precipitación de 123 mm caídos en 3 horas y recurrencia 100 años, representan más del 40% de la superficie de la ciudad. Según el modelo, en comparación, la Planicie Estuárica se inunda menos que la Planicie Pampeana (36,53 vs. 41,04%). En los valles de inundación de la Planicie Pampeana es donde aparece la mayor proporción de áreas inundadas (64,77%). Además, allí se dan los peores efectos con grandes áreas inundadas con 40 y 90 cm de agua sobre la acera. Aunque con bajo riesgo, los laterales de valle e interfluvios también se ven afectados en amplias zonas, debido a las bajas pendientes naturales y la escasa diferencia de altura de estos con las demás subunidades.

El índice de correlación si bien refleja que, a mayor altura y pendiente, menor es el riesgo hídrico, sus bajos valores absolutos revelan la posibilidad de anegamiento de las áreas de altura o pendiente relativamente elevadas, como los laterales de valle e interfluvios.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto el efecto de retardo del escurrimiento que provoca la urbanización (reducción de pendientes y de diferencia de altura natural y construcción de barreras para el desplazamiento del agua), reafirman la necesidad de realizar más obras de infraestructura en la ciudad y exigen una planificación de las urbanizaciones futuras teniendo en cuenta particularmente la complejidad del sistema hidrodinámico.

Palabras clave: riesgo hídrico, geomorfología, geomática, ciudad de Buenos Aires.

Abstract

The aims of this work it to analyze the distribution of flooding risk zones and its correlation with geomorphic features in the city of Buenos Aires. We also assess the relationship with topographic parameters such as height and slope. The use of geomatic techniques allows the consideration of numerical topographic values which are georeferenced and updated.

The floodable areas modeled for a rainfall event of 123 mm during 3 hours and a recurrence of 100 years; represent more than 40 % of the surface of the city. According to the model, in comparison, the Estuaric Plain flood less than the Pampean Plain

(36,53 vs. 41,04 %). In the fluvial valleys of the Pampean Plain it appear the major fraction of flooded areas (64,77 %) and the worst effects with big areas flooded with 40 and 90 cm of water over the sidewalk. Though with low risk, the valley margins and interfluves are also affected in wide zones, principally due to the low natural slopes and the scarce height difference between these and the fluvial valleys or the Estuaric Plain.

Laboratorio de Geología del Cuaternario y Centro de Integración Geoespacial
Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia"
Av. Ángel Gallardo 470, 4to piso
C1405DJR, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, ARGENTINA

✉ rodrigo@atlasdebuenosaires.gov.ar

¹ CONICET, Centro de Investigaciones Geoambientales, Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia"

² Centro de Investigaciones Geoambientales, Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia"

The low general correlation indexes between flooding risk and topographic parameters indicate that a relative high flooding risk might be present in zones relatively high or sloped such as fluvial valleys and interfluves.

Our results also show the delay effect on runoff caused by the urbanization (reduction of slopes and natural height difference, and construction of barriers for water drainage). They confirm the need of more infrastructures in the city and demand planning for future urbanization, considering particularly the complexity of the hydrodynamic system.

Key words: flooding risk, geomorphology, geomatic, Buenos Aires city

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones constituyen el problema ambiental más severo de la ciudad de Buenos Aires. Los daños que ocasionan sobre la infraestructura de servicios y vías de comunicación, producen un fuerte impacto negativo sobre la población (Pereyra 2004, Nabel y Pereyra 2000). Este hecho, agravado por el aumento que se está produciendo en las precipitaciones y por la falta de inversiones en obras de más de medio siglo (Bertoni et al. 2004), ha motivado que organismos responsables de la gestión ambiental, en particular la Subunidad de Protección contra Emergencias (SUPCE) del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires (GCBA), afrontara el problema elaborando el "Plan Director de Ordenamiento Hídrico y Control de Inundaciones para la Ciudad de Buenos Aires", que incluye estudios de diagnóstico detallados, evaluaciones de impactos sociales y económicos generados e implementación de medidas estructurales y no estructurales para la mitigación del riesgo hídrico (SUPCE 2005).

Las inundaciones son fenómenos relacionados simultáneamente con factores climáticos, geomorfológicos, hidrológicos y de infraestructura (Nabel y Pereyra 2000). Entre los primeros, en la ciudad de Buenos Aires, los principales causantes de inundaciones son las sudestadas y las lluvias (Falczuk 2001), éstas últimas, por su frecuencia e intensidad, son las más relevantes (Nabel y Caretti 2004).

En ambientes naturales, la extensión y distribución de las áreas inundadas depende fundamentalmente de las geoformas del terreno, y de atributos tales como las alturas relativas y la orientación y grado de las pendientes que definen la dirección y velocidad del agua. A estas características topográficas se suman las edáficas, determinantes de las diferentes capacidades de infiltración.

Sin embargo, en las áreas urbanas existen una serie de factores que alteran el patrón natural. En primer lugar, las construcciones y la pavimentación producen la impermeabilización de la superficie suprimiendo la posibilidad de infiltración. Además, las obras realizadas modifican los valores y la orientación de las pendientes, e incluso pueden convertirse en barreras para el libre desplazamiento del agua. Particularmente, en la ciudad de Buenos Aires, la infraestructura vial y urbana en general, no ha contemplado las características del sistema hídrico natural (SUPCE 2005). Por otra parte, la infraestructura de servicios sanitarios y la red pluvial y alcantarillado, han transformado la circulación del agua tanto en la superficie como en el subsuelo de la ciudad.

Las modificaciones mencionadas ponen de manifiesto que para realizar un análisis adecuado sobre el riesgo hídrico en un ambiente urbanizado, es necesario considerar simultáneamente

los aspectos naturales y los modificados. Resulta evidente que el análisis de las hipotéticas características naturales, por un lado, aisladas de las modificaciones posteriores, necesariamente producirá un mapa de riesgo distorsionado de la realidad. Asimismo, un análisis de la infraestructura que desconozca los aspectos naturales del sistema, arribará igualmente a resultados erróneos.

Este trabajo se propone determinar la relación existente entre la distribución de las unidades geomorfológicas presentes en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y el riesgo de inundación. Además, se analiza la relación entre riesgo hídrico y rasgos topográficos particulares, tales como altitud y pendiente del terreno.

ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Buenos Aires se encuentra ubicada a los 34° 35' S y 58° 22' O (Figura 1). Con casi 3.000.000 de habitantes es la más populosa de la Argentina. Además, el conglomerado urbano que la rodea, denominado "Gran Buenos Aires", alberga a otros 9.500.000 habitantes, lo que convierte al "Área Metropolitana" en uno de los centros urbanos más importantes del continente y del mundo.

Está emplazada en una región de clima húmedo subtropical, con una precipitación promedio anual de 1246,5 mm considerando el período 1980-2005 (Servicio Meteorológico Nacional 2006); aunque el análisis temporal muestra una variación con tendencia creciente (Minetti y Vargas 1998, Camilloni y Barros 2005). La época más lluviosa se da entre octubre y marzo, en tanto que los meses invernales son relativamente más secos (Camilloni y Barros 2005).

Los eventos de lluvias intensas, causantes de inundaciones en la ciudad, se relacionan con precipitaciones frontales o bien de tipo convectivo. Las primeras pueden ser de duración considerable y en general ocurren en otoño e invierno. Las lluvias de tipo convectivo, en cambio, son de menor duración, mayor intensidad y ocurren mayormente en verano (Pereyra 2004).

Descripción geomorfológica

La ciudad de Buenos Aires se asienta en su parte occidental sobre la Planicie Pampeana y hacia el este, en la zona costera baja, sobre la Planicie Estuárica. Ambas unidades geomórficas se caracterizan por su baja pendiente, representando una superficie sub-horizontal que tiene significativa importancia para comprender el diseño de la red hidrográfica existente, y también el comportamiento de los excedentes hídricos cuando se producen eventos de inundación.

La unidad más extensa es la Planicie Pampeana (Malagnino 2006), o Planicie loésica (Pereyra 2004). *El paisaje, de origen*

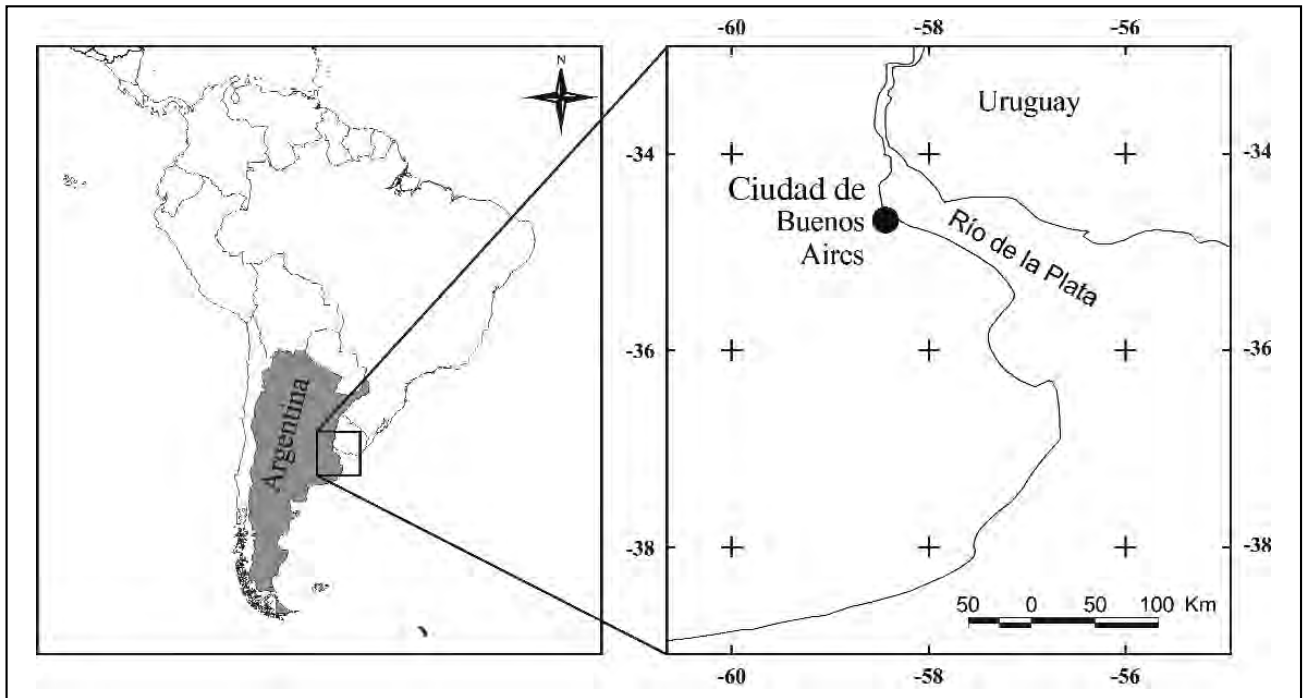


Figura 1. Ubicación del área de estudio

mixto, fluvial y eólico, presenta una sucesión de valles e *interfluvios* y, como consecuencia, una topografía suavemente ondulada, labrada sobre los Sedimentos Pampeanos y Post-Pampeanos. Antes de la urbanización del área, los agentes modeladores predominantes fueron los procesos fluviales, que determinaron la aparición de subunidades como llanuras aluviales, laterales de valles, terrazas, albardones y meandros de ríos. Su superficie se encuentra surcada por varios arroyos como el Medrano, Vega y Maldonado, hacia el Norte de la ciudad y los Terceros en el casco antiguo. Sin embargo, la cuenca más importante corresponde al río Matanza-Riachuelo que, en el área sur, presenta una extensa planicie de inundación labrada en condiciones climáticas más cálidas y húmedas que las actuales y con niveles del mar más elevados.

La Planicie Estuárica (Malagnino 2006), o Planicie Poligénica, (Pereyra 2004), por su parte, se extiende entre el margen sudoeste del Estuario del Río de la Plata y la Planicie Pampeana, con quien limita a lo largo de un Paleocantilado. En ella se reconocen una serie de paleoformas marino-litorales, como son los antiguos cordones litorales, llanuras intermareales, barras, canales y lagunas. En prácticamente toda la Planicie Estuárica se ha elevado la cota original mediante rellenos artificiales, que incluso fueron depositados sobre terrenos sumergidos para volverlos utilizables. Esto ha ocultado las formas originales volviéndolas imperceptibles.

La discontinuidad topográfica más importante de la ciudad es la denominada Barranca del Río de la Plata, que constituye el ya mencionado Paleocantilado o acantilado marino actualmente inactivo, ubicado entre las dos unidades principales. El mismo se formó por erosión marina unos 7000 años AP, cuando el nivel del mar era alrededor de 5 m más elevado que el actual. El Paleocantilado fue seccionado por los ríos y arroyos que surcaban la planicie, por lo que se encuentra atenuado o incluso desaparece donde éstos desembocan (e.g. intersección de Avenidas Santa Fe y Juan B. Justo). La pendiente natural del Paleocantilado ha sido en general, muy suavizada durante la

urbanización, sin embargo en algunas zonas de la ciudad todavía es claramente reconocible, presentando pendientes muy marcadas (Ej.: Parque Lezama, Barrancas de Belgrano, o en la intersección de Grecia y Gral. Paz en el barrio de Núñez). El crecimiento de la población, el aumento del valor de los terrenos y el desarrollo tecnológico que permitió, por ejemplo, entubar los cursos de agua dejándolos sepultados bajo el asfalto, permitieron que prácticamente todas las áreas de la ciudad, inundables o no, fueran ocupadas y que la influencia de los rasgos geomorfológicos en la ocupación del terreno fuera desapareciendo.

MÉTODOS

Definición de Unidades Geomórficas

Aún cuando en la actualidad existen varios mapas geomórficos de la Ciudad de Buenos Aires (Pereyra 2004, Malagnino 2006), para este trabajo se decidió elaborar uno utilizando información topográfica digitalizada y herramientas geomáticas, con el fin de poder determinar unidades y subunidades considerando valores precisos de atributos topográficos tales como altura, pendientes y medidas de curvatura de la superficie.

Las bases de datos geográficos digitales se integraron en un Sistema de Información Geográfica (SIG), donde fueron procesadas para generar nueva información; esto es, otorgar atributos antes inexistentes a elementos identificables en el terreno, luego sujetos de análisis.

De esta manera el mapa geomorfológico utilizado considera el grado de intervención y modificación producto de la urbanización de Buenos Aires, y entonces muestra las unidades efectivamente reconocibles en la ciudad, delimitadas objetivamente sobre la base del análisis de datos numéricos topográficos actualizados.

Para generar el mapa de Unidades Geomórficas se siguieron las siguientes etapas:

- a. Generación de un Modelo digital de elevación (MDE)
- b. Derivación de modelos topográficos a partir del MDE (modelado topográfico)
- c. Mapeo de unidades geomórficas
- d. Ajuste del mapa mediante modelado hidrológico

a. Modelo Digital de Elevación (MDE)

Éste fue del tipo “grilla regular”, creado a partir de una base topográfica georreferenciada de curvas de nivel de equidistancia 1 m. El método de interpolación usado fue uno no lineal y global (tendencia polinómica) denominado “non linear rubber sheeting”, que ajusta un polinomio de quinto orden a todos los puntos de las curvas de nivel usadas como base, mediante el software ERDAS imagine 8.3. En el modelo generado se eliminaron los valores de cota negativos (fueron llevados a 0) y se aplicó un filtro pasa bajo de 3 x 3 píxeles para suavizar las irregularidades que genera el método de interpolación.

En general puede decirse que en la ciudad de Buenos Aires existe una escasa variación altitudinal, sin embargo en zonas de barrancas esa situación cambia. Teniendo en cuenta esto se fijó un tamaño de píxel de 10 m x 10 m, al asumir que en esa superficie existe relativa homogeneidad de parámetros topográficos (altitud, pendiente, orientación y medidas de curvatura del terreno) (Arrell 2002). Además, consideramos que este cuadrado es suficientemente pequeño para representar las irregularidades del terreno observando a una escala regional (Pain 2005).

b. Modelado topográfico

En esta etapa se construyeron modelos de relieve *sombreado*, *pendientes* y *orientación de las pendientes* según la información del MDE. Además se generó un *modelo de curvatura* del terreno mediante la determinación de índices de convexidad del perfil. Estos índices permiten identificar los bordes superior e inferior del Paleocantilado (barranca del Río de la Plata), relacionados con superficies convexas y cóncavas, respectivamente (Becerra Serial et al. en prensa). El proceso de modelado topográfico se realizó usando la función “topographic modeling” de ENVI 4.0.

El modelo de representación del relieve mediante sombreado, si bien no genera valores numéricos para describir matemáticamente al área, permite identificar gráficamente los patrones generales y algunos rasgos geomorfológicos particulares (Pain 2005). Tanto el modelo de relieve sombreado como los de pendientes y orientación de pendientes se generaron utilizando un *elemento estructural* (kernel) de 3 x 3 píxeles (que es el mínimo tamaño posible) para intentar preservar la información geométrica existente entre píxeles contiguos en el MDE (Jordan et al. 2005). Para construir el modelo de convexidad del perfil se consideró un *elemento estructural* de 7 x 7 píxeles. Si bien esto produce un suavizado general, los valores máximos y mínimos de convexidad conservan su posición.

c. Mapeo de unidades geomórficas

Mediante análisis integrado de la información topográfica producida se generó un mapa de unidades geomórficas para la Ciudad de Buenos Aires. La principal información utilizada para la confección del mapa geomorfológico fue la pendiente en cada punto en relación a su contexto local; o sea, teniendo en cuenta las líneas de quiebre de pendientes, que se pueden considerar limítrofes entre unidades o subunidades geomórficas. Para lograr la máxima objetividad posible en la identificación

de dichas zonas, se superpuso al modelo de pendientes, el modelo de *convexidad del perfil* con zonas *cóncavas* (píxeles de valor menor a la media menos 5 desvíos estándar), *convexas* (píxeles de valor mayor a la media más 5 desvíos estándar) y *planas* (píxeles de valor intermedio entre convexas y cóncavas). Las zonas convexas no sólo marcan el borde superior del Paleocantilado sino que también en algunos sectores separan a los *laterales de valle* de los *interfluvios*. De la misma manera, las superficies cóncavas se usaron para definir el límite de la Planicie Estuárica y para apoyar la demarcación del límite entre los *valles de inundación* y los *laterales de valle*. Asimismo, se utilizó la información de las curvas de nivel y del modelo de relieve sombreado.

d. Ajuste del mapa mediante modelado hidrológico

Con el fin de reconstruir la red de drenaje original y definir el trazado de los cursos de agua de la ciudad que correrían a lo largo de los valles aluviales si no hubiera urbanización, se realizó un modelado hidrológico, a partir del MDE utilizando la extensión “basin01” para ArcView 3.3. Algunos de estos cursos corresponden a arroyos actualmente entubados, otros han desaparecido y sus aguas corren ahora por el alcantarillado.

Inicialmente el MDE original fue transformado para eliminar las hondonadas, mediante la aplicación de un filtrado morfológico de dilatación. El modelado hidrológico resultó adecuado para ajustar el mapa de unidades geomórficas mediante una mejor definición de las divisorias de aguas y el trazado de cursos de agua con su dirección de escurrimiento. Asimismo, se corrigieron los errores en la demarcación de algunas subunidades en zonas donde no existe un quiebre marcado de pendientes que permita ubicar claramente la línea divisoria.

MODELO DE RIESGO HÍDRICO

El modelo de Riesgo Hídrico (o riesgo de inundación) utilizado, fue provisto por la Subunidad de Protección contra Emergencias (SUPCE) del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, entidad en la que se elaboró el Plan Director de Ordenamiento Hídrico y Control de Inundaciones para la Ciudad de Buenos Aires.

Para la generación del modelo de áreas afectadas y nivel de afectación, se utilizó el programa Infoworks CS (SUPCE 2005). El modelado en este entorno considera información asimétrica (MDE), sus pendientes derivadas con su correspondiente orientación y la disposición, forma y sección de los conductos de desagüe, para la resolución de las ecuaciones completas de Saint Venant (SUPCE 2005). Así, el programa reproduce en forma precisa los efectos de remanso, escurrimientos no permanentes en canales abiertos y en redes de conductos a presión, así como obras secundarias e interconexiones complejas en la red de desagües. Ante un evento de precipitación determinado, la simulación de los procesos hidrológicos permite determinar la escorrentía originada en cada subcuenca del sistema (transformación de lluvia caída en caudal circulante). El conjunto de herramientas disponibles, permite considerar la mayor parte de las variables que intervienen en el complejo sistema hidrodinámico, simulando el drenaje en calles y conductos simultáneamente, así como la interacción existente entre ambos. El modelado del sistema se logra mediante la disposición de un número determinado de nodos y canales, con sus correspondientes niveles, caudales y geometrías, tanto sobre la red de calles y conductos como en la de sus elementos de vinculación (SUPCE 2005).

Los mapas de Riesgo hídrico o mapas de vulnerabilidad definen áreas con niveles de riesgo de inundación asociados con distintos eventos de precipitación o sudestadas. En este caso, para generar el mapa se consideró una tormenta (precipitación, sin evento de sudestada simultaneo) de 123 mm caídos en 3 horas, con una recurrencia de 100 años (SUPCE 2005); valores que se toman universalmente como "mapa de riesgo" para un entorno urbano (Bernardo Falczuk com. pers.). Es importante tener en cuenta que en el modelo no se han considerado las áreas verdes (plazas y parques) ni las denominadas áreas libres, entre ellas: terrenos propiedad de ferrocarriles, hospitales, clubes deportivos y otras instituciones, ya que las mismas no disponen de puntos acotados relevados a campo (Bernardo Falczuk com. pers.). Estas áreas sin datos, distribuidas heterogéneamente en la ciudad, totalizan 3844,15 ha lo que representa el 18.80% del área de la ciudad.

El mapa presenta 5 clases de riesgo de inundación o riesgo hídrico (RH), medido en altura en metros que alcanzaría el agua sobre la acera ante un evento de precipitación como el mencionado (SUPCE 2005). Dichas clases son, de menor a mayor riesgo hídrico, las siguientes:

- RH 1 = 0,15 a 0,25 m
- RH 2 = 0,25 a 0,40 m
- RH 3 = 0,40 a 0,90 m
- RH 4 = 0,90 a 1,60 m
- RH 5 = más de 1,60 m

Relación entre Riesgo Hídrico y Unidades Geomórficas

Con el fin de verificar la distribución de las áreas vulnerables ante una tormenta tipo como la mencionada, y analizar la afectación de las diferentes unidades y subunidades geomórficas, fue necesario hacer una estimación de la superficie anegable en las áreas verdes y libres (que ocupan el 10,27 y 8,56% de la superficie de la ciudad, respectivamente), no consideradas en el modelo de RH de la SUPCE. Para este estudio las áreas verdes fueron consideradas aquellos suelos con capacidad de infiltración, mientras que las áreas libres correspondieron al resto de las áreas sin datos, cuyas superficies poseen construcciones y suelos impemeabilizados.

Si no se tuvieran en cuenta estas áreas, una unidad como la Planicie Estuárica que presenta una gran superficie cubierta con áreas sin datos (45,13%), no podría compararse con las demás, en las que la superficie no considerada en el modelo de RH es mucho más pequeña (máximo 18,84% en valles de inundación). Además, las áreas verdes, o específicamente, su superficie con capacidad de infiltración, también ocupan distintos porcentajes en cada unidad o subunidad: 25,78% de la Planicie Estuárica y como máximo 10,28% en los valles de inundación.

Para la estimación del área inundada total en cada unidad y subunidad, o sea, considerando áreas verdes y libres, se asumieron dos supuestos:

- 1) En las áreas libres la superficie inundada es igual proporcionalmente al área inundada en el resto de la unidad o subunidad (área que ingresó en el modelo). Es decir, consideramos que se inunda el mismo porcentaje que en las áreas modeladas.
- 2) En las áreas verdes, en cambio, se inundaría una superficie menor, ya que hay que considerar la capacidad de infiltración de las mismas, estimada en un 20%

del agua caída (Auge 2004). Así el área inundada es igual al porcentaje inundado en el resto de las áreas modeladas de esa subunidad, menos un 20% que es lo que se infiltra.

Teniendo en cuenta esto se realizó el siguiente cálculo para estimar un valor de área inundada por unidad o subunidad geomórfica:

$$AIE = AIM + AIE_{\text{Sup. Lib.}} + AIE_{\text{Esp. Ver.}} \quad (1)$$

donde: AIE = área inundada estimada

AIM = área inundada modelada

$AIE_{\text{Sup. Lib.}}$ = área inundada estimada en superficies libres

$AIE_{\text{Esp. Ver.}}$ = área inundada estimada en espacios verdes

A su vez,

$$AIE_{\text{Sup. Lib.}} = \text{Sup. Lib.} \times p_{i.m.} \quad (2)$$

$$AIE_{\text{Esp. Ver.}} = \text{Sup. Ver.} \times p_{i.m.} \times (1 - p_{\text{inf.}}) \quad (3)$$

donde: Sup. Lib. = Superficies libres (en ha)

Sup. Ver. = Superficies de espacios verdes con capacidad de infiltración (en ha)

$p_{i.m.}$ = proporción de áreas inundadas modeladas

$p_{\text{inf.}}$ = proporción de agua infiltrada en espacios verdes (= 0,2)

De esta manera se llegó a estimar el área total inundada en cada unidad y subunidad, y luego, sumando éstas, el área inundada total estimada para la ciudad.

Análisis de la relación entre Riesgo Hídrico y parámetros topográficos

Se estudió la relación existente entre la altura (h) (en m s.n.m.) y la pendiente (p) (en grados) con el Riesgo Hídrico (RH). Para ello se realizó un muestreo al azar de los píxeles del MDE y del modelo de pendientes. La muestra representó el 2% del total de píxeles de las áreas con riesgo hídrico, con lo que quedó constituida por 2682 puntos. A cada uno de estos puntos con su correspondiente altura y pendiente, se le asignó un valor de riesgo de inundación al superponerles la capa de RH en el SIG.

Además se generó un tercer modelo, combinando en un valor único (al que denominamos *pen-alt*) los valores de altura y pendiente. El algoritmo utilizado para obtener este modelo fue:

$$\text{pen-alt} = (1 + p) \times (1 + h) \quad (4)$$

donde: *pen-alt* = valor del píxel

p = pendiente, medida en grados

h = altura, medida en metros sobre el nivel del mar

Sobre este modelo también se tomó la misma muestra de puntos que para el MDE y para el modelo de pendientes, y de la misma manera se les asignó a los puntos su correspondiente valor de RH.

Para analizar estadísticamente la relación entre las variables topográficas consideradas (h , p y *pen-alt*) y el riesgo hídrico (RH), se calculó el coeficiente de correlación para cada conjunto de pares de datos (Zar 1999).

RESULTADOS

Mapa geomórfico

En el mapa de unidades geomórficas (Figura 2) se muestra la ubicación de la Planicie Pampeana y la Planicie Estuárica. Dentro de la Planicie Pampeana se diferencian tres subunidades: *planicies* o *valles de inundación*, que ocupan el fondo de los valles, *interfluvios*, que representan las zonas más altas donde se encuentran las divisorias de aguas y *laterales de valle*, que son las superficies de pendiente relativamente mayor que se ubican entre los *valles* y los *interfluvios*. Estos últimos son la subunidad que ocupa mayor área (Tabla 1). Los *laterales de valle* y los *valles de inundación* ocupan una superficie muy similar, mientras que la Planicie Estuárica abarca menos del 19% del área de la ciudad.

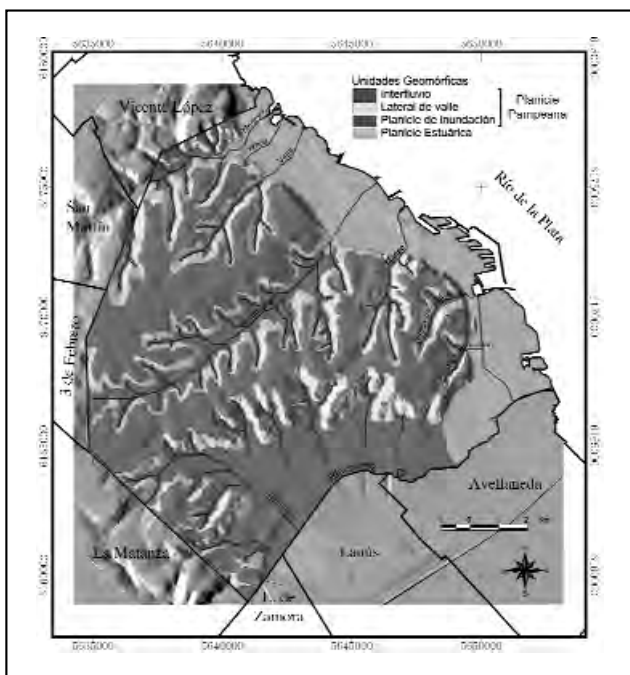


Figura 2. Mapa Geomórfico de la ciudad de Buenos Aires

En cuanto a sus valores topográficos los *interfluvios*, con poco más de 20 m s.n.m., son la subunidad de mayor altitud promedio (Tabla 2). Considerando las pendientes promedio, los *laterales de valle* presentan los valores mayores.

Riesgo hídrico vs. geomorfología

Ante un evento de precipitación intensa con 123 mm de agua caída, de 3 horas de duración, correspondientes a 100 años de recurrencia, el área inundada estimada es de 8215,40 ha; lo cual representa el 40,19% de la superficie total de la ciudad (Tabla 3). Se puede observar que las zonas más afectadas se encuentran principalmente siguiendo los *valles de inundación* del Maldonado y del Vega (Figura 3). Sin embargo, en el modelo aparecen grandes áreas inundadas en *laterales de valle* e incluso también en los *interfluvios* (Figura 3 y Tabla 3).

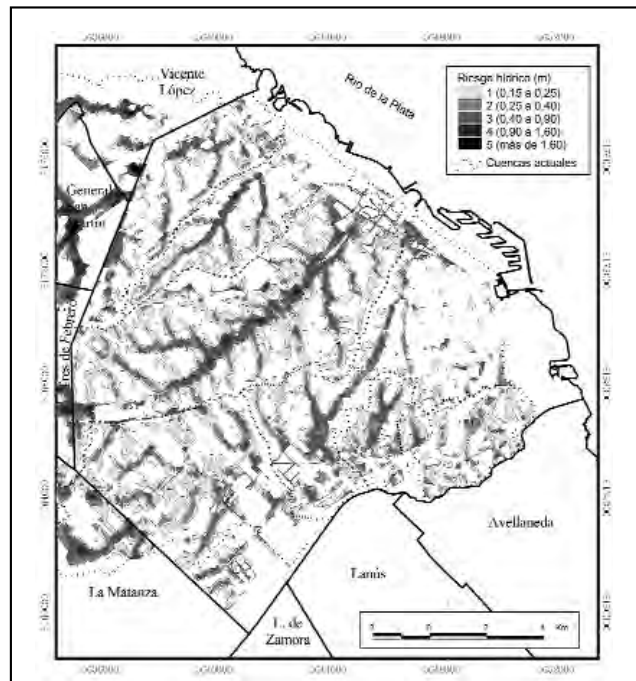


Figura 3. Modelo de riesgo hídrico para la ciudad de Buenos Aires, ante una tormenta de 123 mm caídos en 3 horas (recurrencia de 100 años), (según SUPCE,GCBA).

Tabla 1. Superficies ocupadas por las unidades y subunidades geomórficas diferenciadas en la ciudad de Buenos Aires y su respectivo porcentaje (%)

| | Interfluvio | | Lateral de valle | | Valle de inundación | | Planicie Estuárica | | Ciudad de Buenos Aires |
|-------------------|-------------|-------|------------------|-------|---------------------|-------|--------------------|-------|------------------------|
| | ha | % | ha | % | ha | % | ha | % | |
| Sup. Total | 6203,17 | 30,34 | 5215,46 | 25,51 | 5159,98 | 25,24 | 3864,27 | 18,90 | 20442,87 |

Tabla 2. Alturas y pendientes promedio de las unidades y subunidades geomórficas diferenciadas en la ciudad de Buenos Aires y su respectivo desvío estándar

| | Interfluvio | Lateral de valle | Valle de inundación | Planicie Estuárica |
|--|--------------|------------------|---------------------|--------------------|
| Altura media (m s.n.m.) | 20,13 ± 3,80 | 15,20 ± 4,63 | 8,49 ± 5,06 | 4,09 ± 0,77 |
| Pendiente media (grados centesimales) | 0,39 ± 0,30 | 1,12 ± 0,63 | 0,25 ± 0,24 | 0,13 ± 0,21 |

Tabla 3. Superficies inundadas estimadas. Se expresan los porcentajes respecto del total inundado estimado en la ciudad de Buenos Aires (%a) y respecto del área de cada unidad, subunidad o de la ciudad entera (%b) (valores de la Tabla 1)

| | Interfluvio | Lateral de valle | Valle de inundación | Planicie Estuárica | Ciudad de Buenos Aires |
|----------------------------|-------------|------------------|---------------------|--------------------|------------------------|
| Total Estimado (ha) | 1634,87 | 1826,87 | 3342,05 | 1411,60 | 8215,40 |
| %a | 19,90 | 22,24 | 40,68 | 17,18 | |
| %b | 26,36 | 35,03 | 64,77 | 36,53 | 40,19 |

En la Planicie Estuárica, que es la zona más baja y de menor pendiente (ver Tabla 2), se estimó que la superficie inundada ocuparía el 36,53% (Tabla 3) mientras que en la Planicie Pampeana se inundaría el 41,04%. Dentro de la Planicie Pampeana casi dos tercios (64,77%) de los *valles de inundación* quedarían cubiertos. De los *laterales de valle* se inundaría cerca del 35%, lo que representa una proporción 9% mayor que la inundada de los *interfluvios* (Tabla 3).

En la ciudad de Buenos Aires las áreas potencialmente inundables por una tormenta extrema, se encuentran mayormente en los *valles de inundación* (40,68%), aunque una importante proporción abarca también los *laterales de valle e interfluvios* (Tabla 3 y Figura 4). El total de áreas inundadas estimadas se reparte en un 17,18 y un 82,82% para la Planicie Estuárica y la Planicie Pampeana, respectivamente.

Analizando las áreas modeladas diferenciadas por clase de RH, en todos los casos a mayor riesgo hídrico corresponde una menor superficie inundada (Tabla 4). Así, en el modelo las áreas de RH 5 (más de 1,60 m de agua sobre la acera) sólo abarcan 0,75 ha en la ciudad, no encontrándose en los *interfluvios* ni en la Planicie Estuárica (Tabla 4). Este decrecimiento, sin

embargo, es mucho menos marcado en los *valles de inundación*, que en el modelo presentan grandes áreas severamente inundadas (con RH 2 y 3) (Tabla 4 y Figura 5).

Las áreas anegables con la menor gravedad (RH 1) son las más extensas en todas las unidades o subunidades. En los *interfluvios* y en los *laterales de valle* estas áreas representan una gran proporción, que alcanza el 82,73 y el 74,93%, respectivamente. En cambio, en los *valles de inundación* representan el 42,78% (Tabla 4).

Respecto del área total de la ciudad sin considerar áreas sin datos (libres y verdes), las áreas inundadas con menor riesgo (RH 1) representan casi el 25%, mientras que las de RH 2 y 3, representan poco más del 10 y 5%, respectivamente (Tabla 4).

Riesgo hídrico vs. Parámetros topográficos

El valor del coeficiente de correlación entre los parámetros topográficos considerados (altura, pendiente y *pen-alt*, ver métodos) y los datos de Riesgo Hídrico siempre resultó con valores negativos (Tabla 5). Entre estos, el coeficiente que relaciona *pen-alt* vs. RH, fue el de mayor valor en términos absolutos.

Tabla 4. Superficies inundadas modeladas, para un evento de precipitación de 123 mm en 3 horas (recurrencia 100 años), diferenciadas por clases de riesgo hídrico (RH) medido en m de agua sobre la acera (RH 1 = 0,15 a 0,25; RH 2 = 0,25 a 0,40; RH 3 = 0,40 a 0,90; RH 4 = 0,90 a 1,60 y RH 5 = más de 1,60). Se indican porcentajes: %a = respecto de los totales sin considerar áreas sin datos, y %b = respecto del total modelado en cada subunidad

| | Interfluvio | Lateral de valle | Valle de inundación | Planicie Estuárica | Ciudad de Buenos Aires |
|-------------|----------------|------------------|---------------------|--------------------|------------------------|
| RH 1 | 1234,83 | 1240,47 | 1185,00 | 449,41 | 4109,70 |
| %a | 22,01 | 26,53 | 28,26 | 21,19 | 24,76 |
| %b | 82,73 | 74,93 | 42,78 | 55,03 | 61,02 |
| RH 2 | 225,32 | 318,90 | 892,27 | 252,67 | 1689,15 |
| %a | 4,02 | 6,82 | 21,28 | 11,92 | 10,18 |
| %b | 15,10 | 19,26 | 32,21 | 30,94 | 25,08 |
| RH 3 | 31,28 | 87,64 | 653,72 | 112,47 | 885,11 |
| %a | 0,56 | 1,87 | 15,59 | 5,30 | 5,33 |
| %b | 2,10 | 5,29 | 23,60 | 13,77 | 13,14 |
| RH 4 | 1,14 | 8,37 | 38,28 | 2,12 | 49,91 |
| %a | 0,02 | 0,18 | 0,91 | 0,10 | 0,30 |
| %b | 0,08 | 0,51 | 1,38 | 0,26 | 0,74 |
| RH 5 | 0 | 0,05 | 0,70 | 0 | 0,75 |
| %a | 0 | < 0,01 | 0,02 | 0 | < 0,01 |
| %b | 0 | < 0,01 | 0,03 | 0 | 0,01 |

Tabla 5. Coeficientes de correlación (Zar 1999) entre las variables topográficas h (altura), p (pendiente) y pen-alt (combinación entre ambas, ver texto) y el Riesgo Hídrico (RH).

| | h | p | pen-alt |
|-----------------------------|--------|--------|---------|
| Coefficiente de correlación | -0.204 | -0.169 | -0.246 |

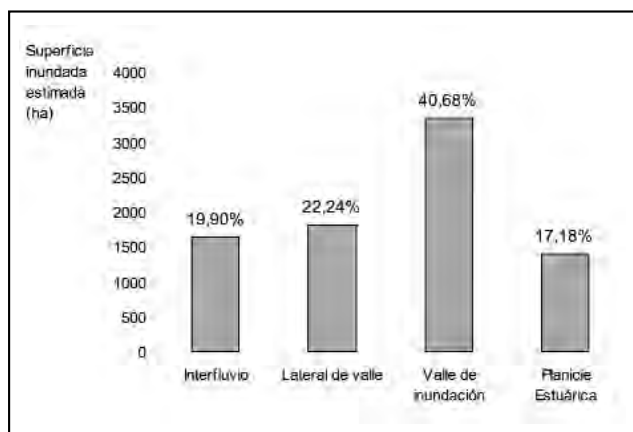


FIGURA 4. Superficie inundada estimada por una precipitación de 123 mm y 3 horas de duración (100 años de recurrencia) (según la SUPCE, GCBA), diferenciada por unidad o subunidad geomórfica. (Se indica la superficie absoluta (ha) y relativa (%) sobre el área total inundada estimada)

DISCUSIÓN

El área total inundable ante un evento de precipitación de 123 mm caídos durante 3 horas (100 años de recurrencia), representa una importante proporción dentro de la ciudad, estimándose en más del 40% de la superficie total.

Durante una tormenta extrema (sin sudestada) las áreas inundables en relación con las unidades geomórficas, se presentan distribuidas de manera relativamente homogénea, aunque proporcionalmente la Planicie Estuárica, que es la zona más baja y de menor pendiente, aparece inundada en un porcentaje menor (36,53%) que en la Planicie Pampeana (41,04%). Esta proporción levemente mayor a favor de la Planicie Pampeana, puede ser un indicador del efecto retardador del escurrimiento que ha tenido la urbanización, por un lado, con la disminución de pendientes naturales por alisado directo y por efectos del amanzanado, y por otro con la generación de barreras y su efecto de endicamiento. En este resultado también ha ejercido su influencia la infiltración calculada para las áreas verdes, siendo que éstas ocupan una gran superficie en la Planicie Estuárica.

Por otra parte, en la Planicie Pampeana las áreas con riesgo hídrico están distribuidas en general siguiendo el comportamiento de un sistema natural; esto es, las áreas más bajas y de menor pendiente son las que más se inundan. Así, los *valles de inundación* son la subunidad que mayor riesgo hídrico soporta (64,77%). El hecho de que los *laterales de valle*, que tienen la mayor pendiente promedio, se inundan más que los *interfluvios* indica que, en la ciudad de Buenos Aires, la pendiente es un factor menos importante que la altura para definir el Riesgo Hídrico.

Los resultados sugieren que el agua de lluvia caída tarda en escurrir desde las zonas altas (*interfluvios*), en las cuales las

bajas pendientes contribuyen a disminuir su velocidad. De igual modo, es factible que los valores de pendiente encontrados en los *laterales de valle* no sean lo suficientemente altos como para determinar un aumento sustancial en la velocidad de escurrimiento del agua. En consecuencia no toda el agua que desborda de los conductos lo hace en las zonas más bajas, sino que en realidad esto también ocurre en la unidad de mayor pendiente promedio.

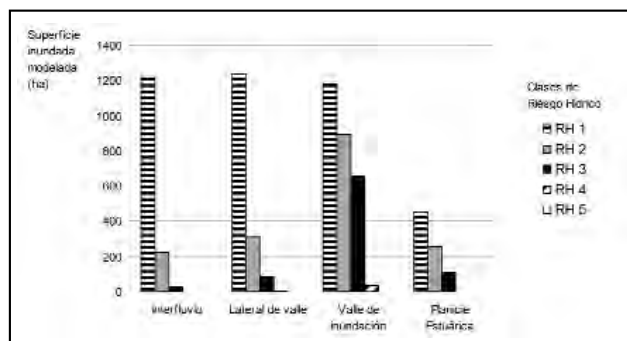


FIGURA 5. Superficie inundable modelada en la ciudad de Buenos Aires por clases de Riesgo Hídrico (ver texto) por unidad o subunidad Geomórfica. Los datos corresponden a una inundación producto de una precipitación de 123 mm y 3 horas de duración para 100 años de recurrencia (según la SUPCE, GCBA)

Considerando la distribución de las áreas anegadas estimadas se aprecia que a la Planicie Estuárica le corresponde el 17,18%, una proporción menor que la de su área en la ciudad (18,90%). Por el contrario a la planicie Pampeana le corresponden las proporciones complementarias: 82,82% anegado para un área que ocupa el 81,10% de la capital. Nuevamente, esto es un indicador del retardo que ocurre con el agua de lluvia caída, dado por las bajas pendientes y la escasa diferencia de altura, ambas además reducidas por la urbanización.

La severidad de la inundación que se produciría, según el modelo, en los valles de inundación (64,77%) se manifiesta al considerar la importante proporción de esta subunidad anegada con un riesgo hídrico clase 2 y 3 (0,25 a 0,40 m y 0,40 a 0,90 m, respectivamente). Contrariamente, las demás subunidades de la Planicie Pampeana, si bien resultan inundadas en proporciones importantes, la mayor parte queda afectada como máximo con 25 cm de agua sobre la acera (corresponden a RH 1). Este hecho resulta de la lógica interacción del agua con la fuerza gravitatoria y la pendiente del terreno.

En concordancia con lo antedicho, los valores negativos de los coeficientes de correlación calculados indican que, en términos generales, el riesgo de inundación (o riesgo hídrico) disminuye con la altura y con la pendiente. No obstante, los bajos valores absolutos encontrados (cerca de 0) indican un bajo efecto de los parámetros topográficos considerados sobre el riesgo hídrico.

En términos relativos, sin embargo, podemos señalar que la altura se correlaciona mejor con el RH que la pendiente. El bajo valor absoluto del coeficiente calculado entre RH y la pendiente explica los elevados porcentajes de áreas inundadas encontradas en los *laterales de valle*, que son las áreas de mayor pendiente. Dados estos resultados, se puede pensar que en esta subunidad los valores de pendiente encontrados, no son en general lo suficientemente elevados para que el agua sea evacuada rápidamente, por escurrimiento. Por último encontramos

que un valor sencillo (*pen-alt*) calculado en base a la altura y la pendiente resulta más expresivo que cualquiera de ellos por separado y describe mejor el riesgo hídrico de un sitio.

CONCLUSIONES

- El área inundable estimada en la ciudad de Buenos Aires, para un evento extremo con una precipitación de 123 mm en 3 horas de duración y recurrencia de 100 años, cubre más del 40% de la superficie.
- Ante el evento de precipitación considerado (en ausencia de sudestada simultánea), la Planicie Pampeana se inunda proporcionalmente más que la Planicie Estuárica (41,04% y 36,53%, respectivamente), a pesar de que esta última es más baja y de menor pendiente relativa. Esto sería consecuencia del efecto de la urbanización, es decir, reducción de pendientes y de diferencias de altitud e introducción de barreras para el escurrimiento del agua. Asimismo, la mayor proporción de áreas verdes en la Planicie Estuárica estaría mitigando el efecto de las inundaciones en esta unidad.
- Las áreas inundadas con mayor gravedad (RH 2 o mayor) se encuentran principalmente en los *valles de inundación* de los arroyos Maldonado, Vega y del Riachuelo, y en menor proporción del Medrano.
- Los *interfluvios* y los *laterales de valle*, si bien presentan bajo riesgo (RH 1), se verían afectados por un evento extremo como el modelado en una elevada proporción de su superficie. Esto indica que las diferencias de altura y las pendientes, modificadas por la urbanización, no son

suficientes para aumentar la velocidad de escurrimiento del agua permitiendo su rápida evacuación.

- Los resultados obtenidos para la ciudad de Buenos Aires son de utilidad para la realización de obras de infraestructura dentro de la ciudad, como así también para la planificación de nuevas urbanizaciones. El crecimiento demográfico y los procesos de descentralización industrial, generan la ocupación de áreas periféricas, las que debieran contar con pautas de uso de suelo que apunten a mitigar el efecto de los anegamientos en la población. Ello sería posible si se destinaran las áreas bajas y de escasa pendiente de los *valles de inundación* a espacios verdes, si el trazado de calles y amanzanado respetara, en lo posible, los valores de pendiente naturales y las obras como vías férreas y caminos, se construyeran evitando al máximo el efecto de endicamiento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto "Atlas Ambiental de Buenos Aires" en el Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia" (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET), con el soporte financiero del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCyT) y del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires.

Queremos agradecer especialmente al Dr. Bernardo Falczuk y a Reynaldo Vial y Alejandro Viana de la Subunidad de Protección contra Emergencias (SUPCE) del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires por habernos provisto el mapa de Riesgo Hídrico y por sus útiles comentarios.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ARRELL K.E., 2002

Geographical Information Systems (GIS): A useful tool for Geomorphologists?
Journal of the Durham University Geographical Society.
(Disponible en: www.geog.leeds.ac.uk/people/k.arrell/GeomorphologyAndGIS.pdf)

AUGE M., 2004

Hidrogeología de la Ciudad de Buenos Aires.
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 76 pp. Buenos Aires.

BERTONI J.C., AMBROSINO S., BARBEITO O., DANIELE A., MAZA J.A., PAOLI C.U. Y J.J. SERRA, 2004

Inundaciones urbanas en la Argentina.
Editorial Universitas, 253 pp. Córdoba, Argentina.

CAMILLONI I. Y V. BARROS, 2005

Clima. Atlas Ambiental de Buenos Aires.
(Disponible en: http://www.atlasdebuenosaires.gov.ar/aaba/index.php?option=com_content&task=view&id=26&Itemid=22)

FALCZUK B., 2001

Plan Director de ordenamiento hidráulico de la ciudad de Buenos Aires.
III Jornadas de Saneamiento Pluvial Urbano. Ponencias. Municipalidad de Rosario.

JORDAN G., MEIJNINGER B.M.L., VAN HINSBERGEN D.J.J., MEULENKAMP J.E. Y P.M. VAN DIJK, 2005

Extraction of morphotectonic features from DEMs: Development and applications for study areas in Hungary and NW Greece. International
Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 7 (3), 163-182.

MALAGNINO E., 2006

Geomorfología.
Atlas Ambiental de Buenos Aires. (Disponible en: http://www.atlasdebuenosaires.gov.ar/aaba/index.php?option=com_content&task=view&id=22&Itemid=18)

- MINETTI J.L. Y W.M. VARGAS, 1998
Trends and Jumps in the annual precipitation in South America, south of the 15°S.
Atmósfera 11: 205-221. México.
- NABEL P.E. Y F.X. PEREYRA, 2000
El paisaje natural bajo las calles de Buenos Aires.
Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia, 123 pp. Buenos Aires.
- NABEL P.E. Y M. CARETTI 2004
Evaluación de anegamientos en la ciudad de Buenos Aires.
Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente 20: 63:78.
- PAIN C.F., 2005
Size does matter: relationships between image pixel size and landscape process scales.
En: Zerger, A., Argent, R. M. (Eds.), MODSIM 2005 International Congress of Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc.: 1430-1436. Camberra.
- PEREYRA F.X., 2004
Geología urbana del área metropolitana bonaerense y su influencia en la problemática ambiental.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, 59 (3): 394-410.
- SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL, 2006
(Disponible en: <http://www.meteofa.mil.ar/>)
- SUPCE (SUBUNIDAD DE PROTECCIÓN CONTRA EMERGENCIAS), GOBIERNO DE LA CIUDAD DE BUENOS AIRES, 2005
Mapas de riesgo hídrico: implicancias urbanísticas y ambientales para la Ciudad de Buenos Aires.
Gerencia ambiental 12(120): 572-586.
- ZAR J.H., 1999
Biostatistical analysis. Cuarta edición.
Prentice-Hall, Upper Saddle River.



Defectos petrogenéticos de las rocas metamórficas de Córdoba utilizadas en la construcción

Bonalumi, Aldo¹ - Sfragulla, Jorge¹ - Locati, Francisco¹ - Campos, Darío¹

Recibido: 14 de Febrero de 2007 • Aceptado: 06 de Febrero de 2009

Resumen

En este trabajo se reconoce la reacción álcali-agregado en rocas metamórficas de Córdoba, que se utilizan como agregados para hormigón en obras civiles. A pesar de no poseer minerales considerados normalmente deletéreos, algunas de estas rocas se mostraron reactivas o potencialmente reactivas en los ensayos realizados. Se atribuye la reactividad a la presencia de cuarzo que ha sufrido procesos de deformación con reducción de tamaño del grano y recristalización, ya sea por esfuerzos o blastesis.

Palabras clave: petrogénesis, metamorfitas, Córdoba, reacción álcali agregado.

Abstract

In this paper the alkali-aggregate reaction in metamorphic rocks from Córdoba is described. These rocks are used as aggregates for concrete in public works. Despite not having minerals usually considered deleterious, some of these rocks have been reactive or potentially reactive in the tests carried out. This reactivity has been attributed to the presence of quartz which has undergone processes of deformation, with a decrease in grain size and re crystallization, either by strain or blastesis.

Keywords: petrogenesis, metamorphites, Cordoba, alkali aggregate reaction.

INTRODUCCIÓN

En los últimos cinco años, la fuerte demanda producida por la construcción civil ha puesto de manifiesto el problema de la reacción álcali-agregado (RAA) en algunos de los materiales pétreos utilizados como agregado grueso en la provincia de Córdoba. El alto nivel de crecimiento en el consumo ha sido potenciado por los actuales programas de obras públicas lanzados a nivel nacional, lo que de alguna manera ha provocado falta de control en la explotación, en cuanto al tipo de roca explotada y su calidad.

Las Sierras Pampeanas Orientales, en su sector conocido como Sierra Chica de Córdoba, es el cordón orográfico más cercano al litoral que posee la República Argentina, vale decir

que de estas formaciones geológicas se debe abastecer de materiales pétreos y minerales para la obra pública y civil a toda la provincia de Santa Fe, norte de Buenos Aires y Córdoba. Por otra parte, toda el área en su conjunto representa una de las zonas más productivas y densamente pobladas del país.

El aumento de la producción que este tipo de materiales experimentó se manifiesta de dos formas diferentes: por un lado las plantas de trituración ya instaladas aumentaron su producción al límite de sus posibilidades y en algunos casos, han invertido en mayor capacidad; por otra parte se abrieron nuevas canteras o se reactivaron algunas que estaban paralizadas. En todos los casos los avances en los frentes de explotación acusaron un fuerte incremento y, si se tiene en cuenta la heterogeneidad de las rocas metamórficas, algunos frentes alumbraron rocas de calidad notablemente menor y que potencialmente podrían afectar la durabilidad de la obra. El principal objetivo de esta investigación es definir los defectos de ciertas rocas que, por su composición mineralógica, no serían consideradas perjudiciales, pero que en realidad lo son.

¹ Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales -
Universidad Nacional de Córdoba
Av. Vélez Sársfield 1611. X5016GCA. Ciudad Universitaria.
Córdoba. Argentina.
✉ abonalumi@com.uncor.edu

ASPECTOS GEOLÓGICOS

Las Sierras Pampeanas Orientales están constituidas petrológicamente por unidades litológicas de origen ígneo, metamórfico y sedimentario en proporciones aproximadas del 30%, 65% y 5% respectivamente. Las rocas ígneas y metamórficas son las que se utilizan específicamente como agregados gruesos, aunque algunos sedimentos de tipo aluvional se suelen aprovechar también.

Las rocas metamórficas objeto de esta investigación cubren una gran superficie en la Sierra de Córdoba, y afloran en todos los cordones orográficos de la provincia, tanto en el extremo oeste, en las Sierras de Guasapampa y Pocho, como en el central, en las Sierras Grande y de Comechingones, y en el extremo este, en las Sierras Chica, de Los Cóndores y de Las Peñas. Por una razón esencialmente geográfica que incide directamente en los costos comerciales, en la actualidad las principales canteras se ubican en la Sierra Chica, y producen en conjunto casi el 40% del consumo argentino.

Los principales complejos metamórficos en Córdoba están constituidos por rocas de grado medio y alto, esquistos biotíticos, gneises y migmatitas anatócticas. Solo un bajo porcentaje está representado por afloramientos de grado bajo, de composición filítica.

La calidad de la roca

Los principales problemas de calidad que poseen las rocas metamórficas de Córdoba están relacionados a su petrogénesis, mineralogía y deformación, factores que a veces individualmente y otras potenciándose mutuamente convierten en prácticamente no utilizables a algunos agregados.

Petrogénesis

Todas las rocas investigadas son producto del metamorfismo regional o dinámico que provienen de sedimentos u otros protolitos preexistentes, que se han transformado por acción de factores tales como temperatura, presión y fluidos, los que mediante mecanismos de difusión iónica, nucleación y crecimiento mineral han generado un nuevo material pétreo.

Los protolitos de las rocas parametamórficas de Córdoba han sido sedimentos más o menos maduros muy ricos en aluminio, que responden a composiciones arcilíticas y en menor grado grauwáquicas. El metamorfismo regional es en esencia un fenómeno de transformación mineral de una roca preexistente, que ha producido el crecimiento paragenético de minerales ricos en aluminio, en los cuales el hierro y magnesio acompañan en proporciones significativamente menores, pero que permiten el crecimiento de minerales que causan problemas en la calidad de los agregados pétreos, tales como las micas. Estas rocas tienen un rango termobárico de formación que oscila entre los 400-820°C y 2.2-8.8 kBr, (Gordillo 1984, Gordillo y Bonalumi 1987, Martino et al. 1994). Estos indicadores petrogenéticos demuestran que la transformación de los sedimentos se ha experimentado a más de 25 Km de profundidad, y que posteriormente han sido exhumados durante la evolución del orógeno del que forman parte, para aflorar como metamorfitas.

El estrés soportado por estas unidades litológicas en su evolución geológica posterior a la formación de los minerales, (520 millones de años, Rapela et al. 1998) la fragilidad de algunos, la ductibilidad de otros y la generación de lineaciones, foliaciones, esquistosidad, etc., ocasionada por los factores

geológicos actuantes, hacen que estas rocas sean considerablemente heterogéneas, con concentraciones de minerales deformados, planos de esquistosidad formados por acumulación de minerales laminares y presencia de alteraciones meteóricas que integralmente son responsables de disminuir la calidad de algunos agregados pétreos. La Tabla 1 muestra cuatro análisis químicos de gneises ubicados en áreas diferentes y que podrían ser considerados como típicos. Esta geoquímica muestra una importante presencia de silicio, que satura la composición y es representada en gran parte por cuarzo. Si se observa el cálculo C.I.P.W. (Cross, et al. 1903) Este cálculo permite geoquímicamente, identificar los minerales que componen las rocas, cuando estos están muy deformados, son granulométricamente muy pequeños o no han alcanzado a cristalizar), se concluye que el cuarzo en las rocas metamórficas de Córdoba no sólo está presente, sino que es muy abundante (23,94% al 44,97%). Precisamente esta característica, asociada a problemas de deformación, hace que haya que tener cuidado en la utilización de algunas rocas ricas en cuarzo.

Tabla 1. Composición geoquímica de las rocas metamórficas potencialmente reactivas. 1. La Calera. 2. Río Avalos. 3. Calamuchita. 4. Punilla. Porcentaje en peso.

| Roca / Elemento | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 61,37 | 61,60 | 59,35 | 67,12 |
| TiO ₂ | 1,00 | 0,98 | 1,21 | 0,66 |
| Al ₂ O ₃ | 18,24 | 16,81 | 18,67 | 14,90 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,00 | 8,27 | 1,81 | 4,15 |
| FeO | 6,65 | | 9,29 | |
| MnO | 0,15 | 0,14 | 0,24 | 0,12 |
| MgO | 4,02 | 3,48 | 5,03 | 1,19 |
| CaO | 1,26 | 1,39 | 2,04 | 1,69 |
| Na ₂ O | 1,82 | 2,47 | 1,10 | 2,05 |
| K ₂ O | 3,39 | 3,74 | 0,45 | 1,86 |
| P ₂ O ₅ | 0,13 | 0,18 | 0,57 | 0,42 |
| H ₂ O | 1,05 | 1,17 | 0,35 | 0,96 |
| C.I.P.W. | | | | |
| Cuarzo | 29,50 | 23,94 | 44,97 | 41,78 |
| Feldspatos estables | 46,08 | 55,19 | 21,27 | 42,78 |
| Ferromagnesianos estables | 13,83 | 12,61 | 19,08 | 5,14 |
| Oxidos estables | 10,31 | 7,88 | 13,04 | 9,30 |
| Otros (Fosfatos y Oxidos) | 0,27 | 0,38 | 1,28 | 1,01 |

Mineralogía

Se puede afirmar que las rocas metamórficas que afloran y son explotadas en Córdoba en su gran mayoría no poseen minerales deletéreos que estén fuera de las exigencias de las normas que actualmente rigen las calidades de las rocas y sus componentes (Tabla 2). La mayoría de las rocas metamórficas de diferentes grados están compuestas por cuarzo, plagioclasa y feldespato potásicos (feldspatos estables), granate, cordierita, biotita y estauroilita (ferromagnesianos estables), biotita y clorita (micas ferromagnesianas inestables), sericitita y muscovita (micas inestables),

magnetita e ilmenita (óxidos estables), y otros minerales metamórficos asociados que tienen un impacto insignificante, tanto desde el punto de vista reactivo o perjudicial como de su volumen. Por lo tanto, y si se está frente a rocas que no presentan procesos de alteración visible, de estructura maciza o levemente esquistosa, y sin deformación acentuada, desde el punto de vista mineralógico éstas no presentan inconveniente alguno para su utilización industrial. Como se dijo, siempre y cuando sus estructuras y procesos de deformación no alteren la mineralogía primaria, ya que en general estos aspectos no son contemplados por las normas en su real dimensión. Con frecuencia se considera utilizable una roca que no contiene minerales potencialmente reactivos en los porcentajes indicados, sin considerar los coeficientes de alteración, el grado de deformación o la propia estructura de la roca.

Tabla 2. En condiciones normales de alteración, deformación estructural, y granulometría, no existen en las rocas metamórficas de Córdoba minerales potencialmente reactivos o perjudiciales.

| Minerales potencialmente reactivos y perjudiciales | Minerales de las rocas metamórficas de Córdoba |
|--|--|
| Chert | Cuarzo |
| Pedernal | Plagioclasas |
| Calcedonia | Ortoclasa |
| ridimita | Microclino |
| Cristobalita | Granates |
| Vidrio volcánico | Sillimanita |
| Cuarzo criptocristalino | Disteno |
| Cuarzo muy tensionado | Andalucita |
| Cuarzo recristalizado fino | Cordierita |
| Esmectita | Muscovita |
| Montmorillonita | Biotita |
| Micas de grano muy fino | Clorita |

Es importante dejar en claro que la reacción álcali-agregado se produce solo en presencia de tres factores principales que deben converger: humedad, agregados con suficiente cantidad de minerales potencialmente reactivos y suficiente cantidad de álcalis disponibles en los poros del hormigón.

Se acepta generalmente que esta reacción comprende a dos tipos principales de agregados: los agregados de reacción rápida y los de reacción lenta/tardía (Wigum, 1995). En principio, los agregados reactivos fueron relacionados a varios minerales de sílice de estructura heterogénea, porosos y a veces hidratados, tales como ópalo, calcedonia, chert y a algunos tipos de vidrio volcánico, los que fueron hallados como fuertemente reactivos en condiciones adecuadas. Mas recientemente se demostró la reactividad de ciertos tipos de rocas cuarzosas bien cristalizadas y mas densas (p.ej. metagrauvascas, metaareniscas, filitas, cataclasitas y otros tipos de rocas con signos de deformación), tal como se observa en la Figura 1, aunque en este caso los mecanismos de reacción son mas lentos y producen expansión y daños retardados. Precisamente a este tipo de reacción es al que se asocia al cuarzo deformado.

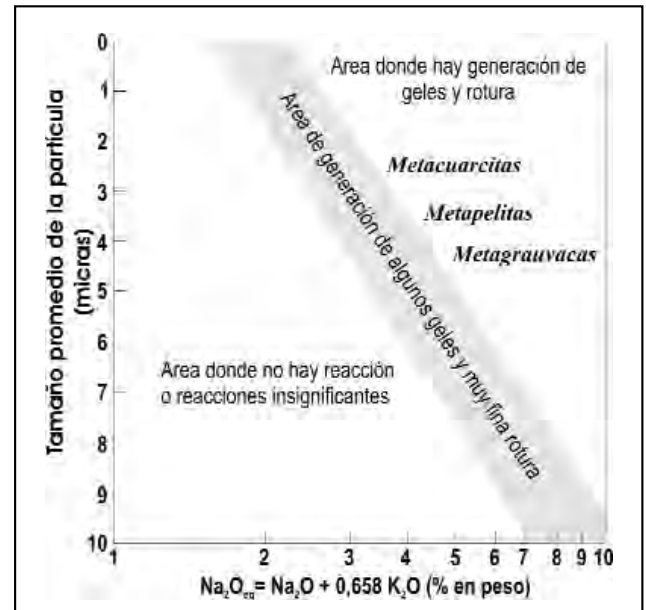


Figura 1. Tamaño de la partícula vs. reactividad de Na equivalente (French 1992)

Un dato geológico a tener en cuenta es la presencia de rocas con diverso grado de deformación en todos los complejos metamórficos de Córdoba. Las rocas deformadas conforman los principales lineamientos y fracturas que permitieron la elevación de la sierra. Esta deformación se refleja en el cambio de volumen o de forma por aplicación de una tensión y son el resultado de movimientos diferenciales sobre superficies en el interior de la roca. Este proceso produce cataclasis, que es la deformación de una roca acompañada por fractura y rotación de granos minerales caracterizada por granulación mecánica y que finaliza generando una textura de "flujo" o foliación cataclástica o bandeado con laminación de color o composición que se presenta en las rocas denominadas cataclásticas (Tabla 3). Si estas rocas presentan cohesión primaria darán lugar a agregados compactos y aparentemente de buena calidad, pero en realidad todo el cuarzo que las compone está reticularmente alterado y convertido en lo que internacionalmente se denomina *strained quartz*, el que es considerado potencialmente reactivo.

Tabla 3. Clasificación de las rocas cataclásticas (Higgins 1971)

| Rocas sin cohesión primaria | Rocas con cohesión primaria | | | |
|-----------------------------|--|--------------------------------|--|----------------|
| | Cataclasis dominantes sobre neomineralización - recristalización | | Neomineralización - recristalización domina sobre cataclasis | |
| | Rocas sin estructuras de flujo | Rocas con estructuras de flujo | | |
| Brechas de falla | Microbrecha | Protomilonita | Gneis milonítico | |
| | Granulometría visible a simplevista | | | |
| Harina de falla | Cataclasita | Milonita Ultramilonita | >2mm Filonitas | Blastomilonita |

Origen de la reacción álcali-agregado tardía (Wigum, 1995 y bibliografía allí citada)

En 1973, Gotge (*en Wigum, 1995*) señaló que la reactividad de ciertos tipos de rocas cristalinas de la India estaba relacionada a la cantidad relativa y efectos de deformación en el cuarzo. Ha sido luego reconocido que la reactividad de ciertas rocas con reactividad tardía se debe a rasgos microestructurales de la misma, mas que a su composición mineralógica y clasificación petrográfica.

Se ha reportado la RAA tardía en agregados portadores de cuarzo, que exhiben rasgos microestructurales tales como extinción ondulosa, bandas de deformación, desarrollo de lamelas y subgranos. Todos estos rasgos se producen durante los períodos de deformación y recuperación, y todos ellos pueden influenciar la reactividad del cuarzo.

Algunos autores sugieren que mas que a la extinción ondulosa en el cuarzo, la reactividad se debería a la presencia de cuarzo microcristalino en los agregados, aunque otros afirman que cualquier roca conteniendo cuarzo deformado es potencialmente reactiva ya sea que ellos exhiban lamelas de deformación, estén cataclásados o contengan granos microcristalinos en límites de granos mayores o a lo largo de planos de fractura de varios tipos.

Otros estudios sugieren que la fuente de reactividad en algunos agregados está en conexión con áreas con gran cantidad de límites de grano, dadas por granos de tamaño pequeño y en la alta densidad de dislocaciones presente dentro de muchos de esos granos. En la investigación sobre reactividad de milonitas se ha demostrado que, además de los efectos del cuarzo microcristalino, la reactividad depende del grado de foliación de la roca, y que la reacción ocurre en los límites de grano del cuarzo microcristalino formado por recristalización dinámica de cuarzo deformado (Figura 6). En otros trabajos se investigó la reactividad de varios componentes texturales y mineralógicos de rocas metamórficas deformadas. Los estudios mostraron que el componente mas reactivo parece ser el cuarzo microcristalino que ha sufrido gran desarrollo de subgranos, pero no recristalización. También se vio que zonas con notable extinción ondulosa no eran significativamente mas reactivas que otras de cuarzo no deformado.

Sitios preferenciales de reacción

Se ha establecido que una reacción debe superar una cierta energía de activación y tiene lugar a una cierta velocidad bajo una cierta fuerza motriz. La energía de activación puede ser vista como una barrera que la reacción debe superar para tener lugar y será diferente dependiendo del tipo de sílice. Los cambios y reacciones están también acompañados por la nucleación de nuevas fases. *En la presencia de impurezas, tales como partículas, límites de grano, dislocaciones y áreas deformadas, la nucleación ocurrirá con energías de activación más bajas que en cristales homogéneos.* La formación de un núcleo en una superficie existente o dislocación involucra la destrucción de parte de dicha superficie. La nucleación se favorece en puntos triples, esquinas, o límites de alto ángulo y es ayudada por la densidad de dislocaciones producidas durante la deformación. Wintsch y Dunning (1985, *en Wigum, 1995*) calcularon los efectos de la densidad de dislocación sobre la solubilidad en agua del cuarzo deformado y demostraron que a muy altas densidades de dislocación la solubilidad del cuarzo aumentó significativamente. Sin embargo, el volumen total de cuarzo con estas características es bastante pequeño, y se encuentra principalmente en las

paredes de los subgranos, lo que produce un incremento de solubilidad en esos sectores.

Accesibilidad del reactante

Para producir la reacción (RAA) los alcalis y iones hidroxilos deben poder llegar desde la pasta de cemento al interior del agregado. Entre varios tipos de defectos microestructurales en cristales, las fracturas y cavidades pueden actuar como vías de acceso para los álcalis. Los planos de clivaje y microfracturas, rasgos muy comunes en las rocas, ayudan a la difusión, y muchas de las cavidades que se encuentran en los límites intergranulares son sólo visibles con microscopio electrónico. La accesibilidad de los álcalis puede ocurrir a lo largo de planos de debilidad producidos durante la trituración, o a través de planos naturales de debilidad, tales como planos de estratificación o foliación, en muchos casos por alineamiento preferencial del cuarzo y filossilicatos paralelamente a la foliación milonítica (Figura 2). Kerrick y Hooton (1992, *en Wigum 1995*) encontraron una marcada dependencia entre expansión y estructura foliada en la roca.

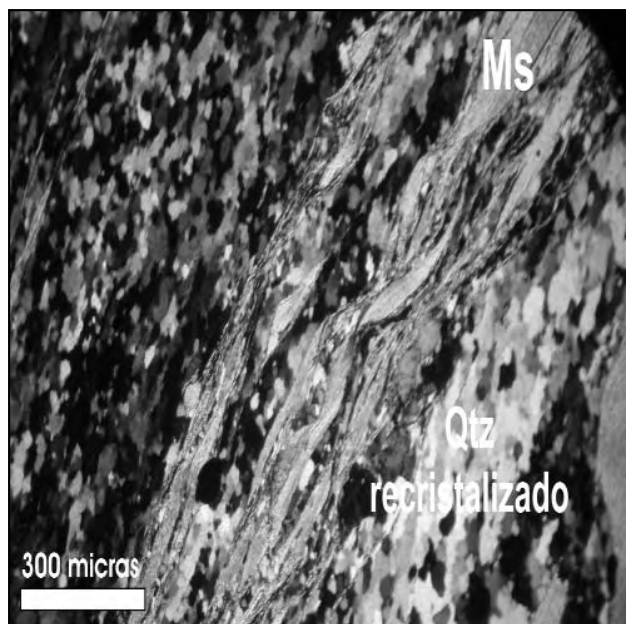


Figura 2. Fotomicrografía de la milonitización de una roca donde se observa colas de micas y recristalización de cuarzo. Este cuarzo es potencialmente reactivo. Nicoles cruzados

El cuarzo como mineral problema

El cuarzo está presente en mayor o menor medida en las rocas metamórficas que se explotan en Sierras Pampeanas e integra como promedio casi el 30% del volumen total de la roca (Tabla 1). Texturalmente es uno de los componentes más abundantes y refleja sin excepción la historia geológica de la propia roca, indicando con su granulometría no solo el grado metamórfico alcanzado, sino además el nivel de deformación, si ha habido segregaciones secundarias producidas por presiones, milonitización o fusión parcial. En otras palabras, el cuarzo junto a otros minerales críticos de origen metamórfico define con precisión los valores termobáricos, el nivel de blastesis, la deformación, la cataclisis frágil o dúctil y el alcance de la recristalización en caso de haberse producido.

El cuarzo microcristalino y/o cuarzo con defectos estructurales causados por algún tipo de deformación ha sido determinado como el principal responsable de la reactividad de los agregados de reacción lenta/tardía.

La aparición de productos de reacción (gel) en microfracturas es el principal rasgo diagnóstico de la RAA. La microfracturación asociada a esta reacción se genera por fuerzas debidas a la expansión de partículas de agregados y/o el cambio de tamaño del gel dentro y alrededor de las partículas reactivas.

Los agregados de reacción rápida ya citados reaccionan por disolución para formar un gel de álcali-silice en la superficie y el interior del agregado. La reacción aparece en zonas o parches dentro del agregado, asociada en ambos casos a microfracturación y procesos de disolución que transforman partes de la partícula en gel. Las partículas pequeñas con mayor superficie específica reaccionarán más rápidamente. Este fenómeno no se observa en las rocas metamórficas de Córdoba ya que estas no presentan minerales reactivos tales como ópalo, calcedonia, chert, vidrio u otros.

En los agregados de reacción lenta/tardía la reacción se origina probablemente en grietas originales, variedad mineralógica y límites de granos, los que actúan como vías de circulación para las soluciones alcalinas presentes en los poros del hormigón, y sólo algunos sectores de las partículas deben ser considerados reactivos. En tal caso, solo se produce una mínima formación de gel, el que sin embargo es capaz de separar los límites de grano y producir la expansión y agrietamiento del agregado. Las fisuras resultantes aparecerán más marcadas, largas y definidas, y serán más susceptibles a los esfuerzos dentro de la estructura de concreto. Este es el tipo de reacción potencial presente en las rocas de Córdoba y que tienen como principal fuente al cuarzo deformado.

Influencia del tamaño de la partícula

Varios investigadores han demostrado que la RAA depende del tamaño de la partícula de agregado. La influencia es diferente según si el agregado es de reacción rápida o tardía. Se ha observado que en agregados muy reactivos, tales como chert y vidrio volcánico, el rango granulométrico más peligroso está entre 3 y 7 mm. En areniscas y metacuarcitas esto ocurre con partículas entre 10 y 20 mm. En rocas tales como grauvacas y arcilitas los efectos más nocivos ocurren en agregados de varios cm de diámetro.

Trabajos experimentales (Wigum, 1995 y bibliografía allí citada) revelaron que hormigones confeccionados solo con agregados reactivos finos mostraron un rápido incremento de la expansión durante la parte inicial de la reacción. Por el contrario, la expansión del concreto con agregado grueso reactivo aumentó lentamente al inicio, pero continuó durante un largo periodo de tiempo. Para un contenido dado de agregado reactivo, la reactividad se incrementaba a medida que bajaba el tamaño del agregado, lo que sugiere que la reactividad era función del volumen de la partícula y no de su superficie.

Para agregados de reacción tardía se observó que ciertas fracciones contribuyen a la RAA más que otras. Como se ha visto, este tipo de reacción tiene lugar a lo largo de discontinuidades estructurales del agregado, tales como límites de granos y foliación, y el ingreso de álcalis y reacción se producirá donde esas estructuras contienen gran cantidad de granos finos y subgranos. Para contener esas estructuras, los granos deberán ser de un determinado tamaño; las partículas más pequeñas que el ancho de la foliación de la roca no tendrán discontinuidades y no darán acceso a los álcalis.

En petrología metamórfica las causas del tamaño que alcanza un cristal de cuarzo en el proceso de blástesis son bien conocidas; en primer lugar hay que destacar que la granulometría de una roca es función directa del grado metamórfico, y a mayor tamaño de grano, mayor grado metamórfico. En segundo lugar, el tamaño de grano también es función directa del grado de deformación alcanzada, pero en este caso, a mayor deformación, hay mayor destrucción de minerales frágiles, y el cuarzo es el más afectado. Este mineral no solo ve reducido su tamaño, y alcanza granulometrías que oscilan entre 3 μ y 10 μ , sino que generalmente recrystaliza y alcanzan tamaños similares o aún menores a los producidos por cataclisis. Así dadas las cosas, la potencialidad en la reacción está demostrada ampliamente, en cuanto al tamaño del grano, ya que como se muestra en la Figura 2, la deformación alcanza a las micas que generan "colas" criptocristalinas de tamaños menores a 1 μ , aportando nuevos elementos minerales como son los filosilicatos (micas) a la potencial reactividad.

Texturas mirmequíticas

Se denomina mirmequita al intercrecimiento simplectítico de cuarzo vermicular y plagioclasa, resultante del reemplazo retrogrado de feldespatos potásico. Las mirmequitas son un rasgo común en muchas rocas de diferentes orígenes, son muy frecuentes en rocas plutónicas graníticas, en rocas metamórficas de grado medio alto, en rocas parcialmente fundidas (migmatitas) y también en rocas deformadas, donde el proceso generado por los esfuerzos que conducen a la deformación parece contribuir a la nucleación de las mirmequitas (Vernon, 1991), ya que la concentración de esfuerzos pueden destruir el equilibrio Kfs-Qtz-Pl e inducir el reemplazo. Debido al estado de inestabilidad de las mirmequitas, se ha observado que éstas son unos de los primeros componentes que recrystalizan en las rocas deformadas. El estado de inestabilidad del cuarzo y su probable baja cristalinidad son rasgos a tener en cuenta para considerar a un agregado como potencialmente reactivo.

Las mirmequitas son frecuentes en rocas cuarzosas de los diferentes complejos metamórficos de Sierras Pampeanas. La figura 3 muestra las características texturales y el tamaño de estos intercrecimientos minerales. Un detalle muy importante a los fines prácticos es que si bien los mismos son muy frecuentes, en muy pocos casos superan el 5% del volumen total de la roca, lo que minimizaría el riesgo de reacción.

Ejemplificación de la problemática en rocas de la provincia de Córdoba

Campos (2005) y Locati (2006), realizaron una primera aproximación sobre los defectos que presentan las rocas de un sector de la Sierra Chica de Córdoba. El área estudiada se encuentra ubicada en el sector sur del flanco oriental del sistema orográfico mencionado, y comprende una serie de bancos calco-dolomíticos asociados a cuerpos anfibolíticos, de orientación general N 310°/64° O, los cuales se disponen en contacto neto con gneises biotíticos granatíferos-sillimaníticos deformados, de similar orientación y mayor extensión areal. También se han identificado rocas con acentuada deformación que se clasificaron como protomilonitas (leucogranito), las cuales podrían estar asociadas a las ya descritas en el sector de Calmayo por Martino y Fagiano (1982), luego enmarcadas dentro de la Faja Soconcho por Martino (2003).

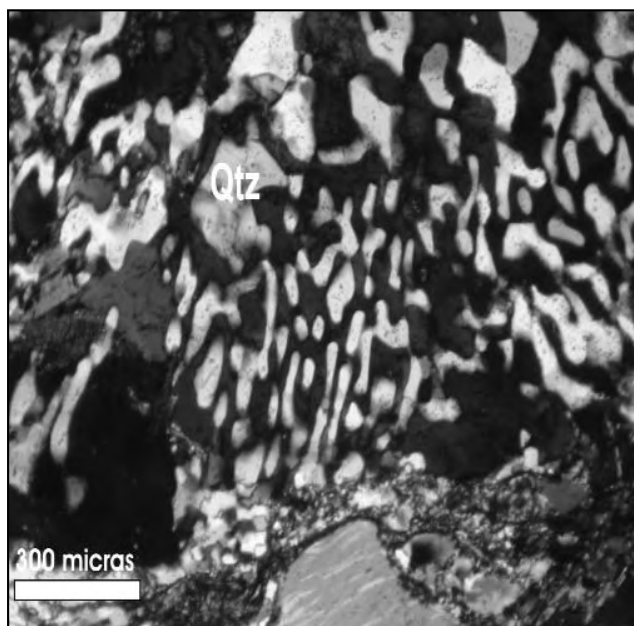


Figura 3. Fotomicrografía de texturas mirmerquíticas. Nícoles cruzados

Dicha faja fue definida por *Martino et al. (1995)* como una zona de aproximadamente 2 km de ancho y 35 km de largo, que corta completamente la Sierra Chica y que internamente presenta gneises granatíferos bandeados, con venas foliadas de granitos biotíticos desmembrados con forma de ojos y pliegues intrafoliares, que definen un boudinage con cuellos orientados N 344°/30° O. Los gneises son encajonantes de clastos sigmoidales de mármoles forsteríticos y anfibolitas deformadas internamente (*Martino 2003*). Este dato es de suma importancia ya que posiblemente sea el proceso geológico que generó la mayor parte de las evidencias de deformación en las rocas estudiadas.

A su vez, todo el complejo se encuentra intruído por diques y filones de composición granítica. *Martino y Fagiano (1982)*, también destacaron en las proximidades de Calmayo la presencia de migmatitas (desembocadura del Arroyo Tacurú), gneises sin granate, gneises con disteno y esquistos.

Durante el estudio se han podido identificar dentro de las rocas, zonas de importante recrystalización, principalmente en los dominios cuarzosos de las protomilonitas (leucogranito) y del gneis biotítico granatífero-sillimanítico deformado, asociadas a mineralogías de connotación hidrotermal (epidoto, clorita, calcita, sericita, cuarzo); en los mármoles olivínicos con flogopita se destaca la serpentización del olivino y recrystalización intercrystalina de calcita-dolomita.

En los calcáreos se han encontrado además zonas de fallamiento intenso, con material triturado principalmente sericitico. Esto podría corresponder a la reactivación en un régimen frágil de la Faja Soconcho, nucleando sobre su margen nororiental al lineamiento Soconcho (*Martino y Fagiano 1982, Martino et al. 1995, Bonalumi et al. 2000*), que controla el arroyo del mismo nombre en la llanura Chaco-Pampeana adyacente al este. Esta reactivación se manifiesta en forma de clivaje de fractura penetrativo en las rocas ígneas de la región, principalmente en el margen nororiental de la Tonalita Calmayo y en las numerosas aplitas que se encuentran en la región. La orientación general de este clivaje es N 350° y buza 60° O a subvertical (*Martino 2003*). No se conoce la edad de la faja Soconcho,

si bien puede asegurarse que el clivaje de fractura es posterior al magmatismo trondhjemítico de la región, asignado al período cámbrico-ordovícico (480-500 Ma, *Rapela et al. 1998, en Martino 2003*).

Muestreo

Se recolectaron un total de 9 muestras en nueve pilas de acopio, respetándose lo descrito en la Norma IRAM 1509, para la obtención de muestras de material. Las mismas fueron extraídas de distintas alturas y lugares de la pila principal, de la cual se obtiene una mezcla compuesta de campo.

Además se coleccionaron 4 muestras de mano en frentes de cantera, tratando de escoger las litologías mayoritarias, de modo de poder lograr una caracterización representativa, realizándose idéntico tratamiento que a las muestras de los acopios. La cantidad de material recolectado fue de aproximadamente 50 kg para cada muestra.

En laboratorio cada muestra se dividió dos grupos, de los cuales uno se utilizó para la descripción macroscópica y análisis petrográfico.

Análisis microscópico

Se realizaron 65 análisis petrográficos sobre cortes delgados realizados en las muestras recolectadas en acopios y frentes de cantera con el fin de determinar los diferentes litotipos presentes en el área de estudio (Tabla 4).

Ensayos

En primer lugar se efectuó la caracterización tecnológica de los agregados y el cemento utilizado (Tablas 5 y 6):

Posteriormente se confeccionaron un total de 39 probetas, que fueron sometidas al ensayo acelerado de la barra de mortero (*según Norma IRAM 1674*), con el objeto de evidenciar el comportamiento de las muestras recolectadas frente a la reacción álcali-agregado (Tabla 7). Las características de los morteros son: Número de morteros realizados con cada muestra: 13. Materiales de cada mortero: 990 gr de agregados, 440 gr de cemento y 206,8 gr de agua. Relación a/c: 0,47 %

Cantidad de probetas por mortero: 3

Los diferentes comportamientos pueden observarse en los gráficos de variación de la longitud. En la figura 4 se puede observar el comportamiento inocuo ($n < 0,10$ % de variación según *Norma IRAM 1674*) para la Muestra C2; el comportamiento potencialmente reactivo a 16 días ($0,10$ % $< n < 0,20$ % de variación), pero deletéreo a 28 días ($n > 0,20$) para la Muestra A-07; y el comportamiento deletéreo ($n > 0,20$) para la Muestra A-06.

Microscopía sobre probetas

Se realizaron un total de 38 análisis petrográficos sobre cortes delgados efectuados en las probetas previamente sometidas al ensayo acelerado de la barra de mortero. Analizando el conjunto de la figura 4 (gráfico de la variación de la longitud), en la tabla 8 puede observarse el trabajo desarrollado sobre tres morteros de diferente comportamiento frente a la reacción álcali-sílice, (mortero 11), donde se usaron agregados de la muestra C2 dando comportamiento inocuo; mortero 7, donde se usaron agregados de la muestra A-07 mostró comportamiento potencialmente reactivo a 16 días y deletéreo a 28 días; y mortero 6, donde se usaron agregados de la muestra A-06 acusando comportamiento deletéreo. También se determinaron tamaños y formas de los agregados, se describieron los espacios vacíos

Tabla 4. Litotipos identificados en las muestras recolectadas en pilas de acopio y frentes de cantera

| Muestras | Litotipos identificados |
|--------------------------|---|
| A-01 (pila de acopio) | Mármol, Protomilonita (Leucogranito), Mármol olivínico flogopítico serpentizado con y sin espinelo, Gneis granatífero sillimanítico deformado |
| A-02 (pila de acopio) | Mármol, Mármol olivínico flogopítico serpentizado, Agregado granítico, Protomilonita (Leucogranito) |
| A-03 (pila de acopio) | Agregado granítico, Mármol olivínico flogopítico serpentizado, Gneis biotítico deformado |
| A-04 (pila de acopio) | Agregado granítico, Mármol olivínico flogopítico serpentizado, Protomilonita (Leucogranito) |
| A-05 (pila de acopio) | Mármol olivínico flogopítico serpentizado |
| A-06 (pila de acopio) | Agregado piroxenítico, Mármol olivínico flogopítico serpentizado, Protomilonita (Leucogranito), Agregado granítico, Agregado sericítico |
| A-07 (pila de acopio) | Agregado sericítico, Agregado granítico cataclastizado, Protomilonita (Leucogranito), Gneis biotítico deformado, Mármol olivínico flogopítico serpentizado, Agregado piroxenítico |
| A-08 (pila de acopio) | Agregado piroxenítico, Mármol olivínico flogopítico serpentizado, Protomilonita (Leucogranito), Agregado sericítico, Agregados serpentínicos, Mármol, Agregado graníticos, Agregado anfibolítico, Mármol tremolítico, |
| A-09 (pila de acopio) | Protomilonita (Leucogranito), Agregado sericítico, Gneis granatífero biotítico deformado, Mármol |
| C1 (frente de cantera) | Mármol olivínico flogopítico serpentizado con espinelo |
| C2 (frente de cantera) | Mármol olivínico flogopítico serpentizado |
| D-01 (frente de cantera) | Gneis granatífero biotítico-sillimanítico deformado |
| D-02 (frente de cantera) | Protomilonita (Leucogranito) |

Tabla 5. Caracterización tecnológica de los agregados

| Nº | Agregado | M. Fina | T. Máx. (mm) | Observ. | Nº | Agregado | M. Fina | T. Máx. (mm) | Observ. |
|----|----------|---------|--------------|---------|------|----------|---------|--------------------------------|---------|
| 1 | A-01 | 4,26 | Fino | 8 | A-08 | 3,42 | Fino | | |
| 2 | A-02 | 5,81 | 4,75 | 2 | 9 | A-09 | 3,41 | Fino | |
| 3 | A-03 | 5,09 | 12,5 | 3 | 10 | C1 | | Muestreo en frentes de cantera | Grueso |
| 4 | A-04 | 6,40 | 19 | 4 | 11 | C2 | | | |
| 5 | A-05 | 7,28 | 19 | 5 | 12 | D-01 | | | |
| 6 | A-06 | 7,00 | 12,5 | 6 | 13 | D-02 | | | |
| 7 | A-07 | 7,32 | 25 | 7 | | | | | |

Tabla 6. Características físicas y químicas del cemento utilizado. Según protocolo

| Cemento 1. Cemento Pórtland con Filler Calcáreo CPF 40 | | | |
|--|--------------------|-------------|---------------|
| Análisis Químico | Um | Resultados | Req. Iram |
| Pérdida de calcinación | % | 3,70 | < 12 |
| Trióxido de Azufre | % | 2,66 | < 3,5 |
| Óxido de Magnesio | % | 1,09 | < 6 |
| Dióxido de Silicio | % | 20,62 | No hay |
| Óxido de Calcio | % | 61,38 | No hay |
| Óxido de Aluminio | % | 4,30 | No hay |
| Óxido de Hierro | % | 4,19 | No hay |
| Óxido de Sodio | % | 0,36 | No hay |
| Óxido de Potasio | % | 0,85 | No hay |
| Óxido de sodio equivalente (Na₂O + 0.658 K₂O) | % | 0,92 | No hay |
| Residuo insoluble | % | 2,46 | < 5 |
| Ensayos Físicos | Um | Resultados | Req. Iram |
| Retenido Tamiz 75 mm | % | 2,0 | < 15 |
| Super. Específica Blaine | M ² /Kg | 384,8 | < 250 |
| Expansión en autoclave | % | 0,02 | < 1 |
| Tiempo de fraguado inicial | H:min. | 02:45 | > 0:45 |
| Tiempo de fraguado final | H:min. | 03:45 | < 10:00 |

del mortero y las manifestaciones reactivas cuando estuvieron presentes en la muestra. Esto sirvió para identificar y caracterizar las mineralogías potencialmente reactivas, para caracterizar el gel de RAA producto de la reacción, para determinar cuáles fueron los procesos geológicos que afectaron las litologías potencialmente reactivas y para estimar cuáles serían los porcentajes que podrían permitirse para que los agregados potencialmente reactivos no produzcan expansiones de importancia cuando son utilizados en estructuras de hormigón.

Tabla 7. Resumen del comportamiento reactivo de los materiales (según NORMA IRAM 1674)

| Mortero | Resultados IRAM – 1674. |
|-------------------|--|
| 1 (muestra A-01) | INOCUO |
| 2 (muestra A-02) | INOCUO |
| 3 (muestra A-03) | INOCUO |
| 4 (muestra A-04) | INOCUO |
| 5 (muestra A-05) | INOCUO |
| 6 (muestra A-06) | DELETÉREO |
| 7 (muestra A-07) | POTENC. REACTIVO –DELETÉREO (a 28 días del ensayo) |
| 8 (muestra A-08) | INOCUO |
| 9 (muestra A-09) | POTENC. REACTIVO (a 28 días del ensayo) |
| 10 (muestra C1) | INOCUO |
| 11 (muestra C2) | INOCUO |
| 12 (muestra D-01) | DELETÉREO |
| 13 (muestra D-02) | POTENC. REACTIVO (a 28 días del ensayo) |

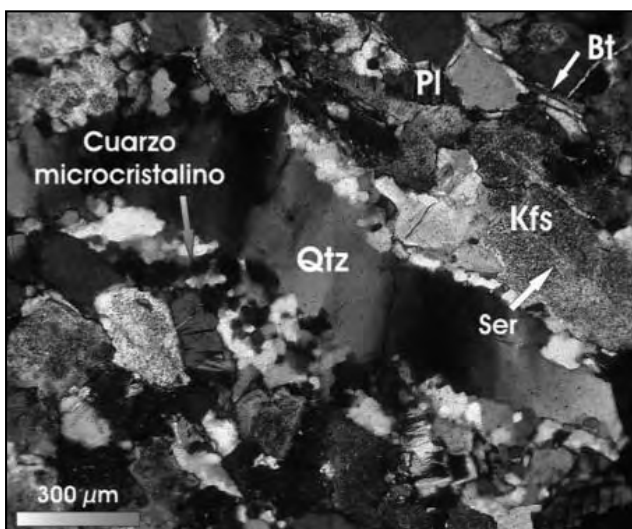


Figura 5. Fotomicrografía de un agregado leucogranítico milonitizado con cuarzo muy deformado. Roca reactiva. Nícoles cruzados

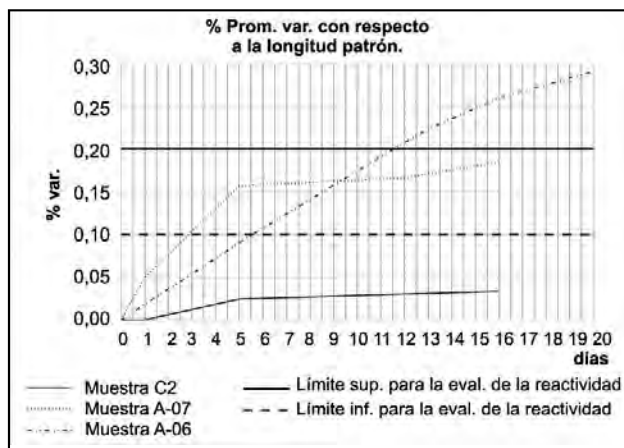


Figura 4. Variación de longitud del mortero.

CONCLUSIONES

- Los agregados que manifestaron reactividad frente a la Reacción Álcali-Agregado y que fueron identificados mediante los análisis petrográficos son: Protomilonita (Leucogranito), (Figuras 5 y 6) Gneis granatífero biotítico-sillimanítico deformado, Agregado sericítico, (Figura 8)
- El agregado sericítico sufrió principalmente microfisuración de tipo intragranular y perigranular (Figura 8), y en la mayor parte de los casos es el que proporciona el espacio donde precipita el gel producido por la reacción (conjuntamente con los espacios vacíos propios del hormigón).
- Como componente mineral de importancia del gneis granatífero biotítico-sillimanítico deformado (en menor proporción) y de la protomilonita (leucogranito), en mayor proporción, *aparece el cuarzo comprendido entre 0 y 100 μm*. Este último es el que actúa al ser sometido a reacción acelerada, produciendo el gel generador de microfisuras por expansión, el que posteriormente rellena, parcial o totalmente, los espacios vacíos propios del hormigón y los producidos principalmente por el agregado sericítico (Figura 7-8).

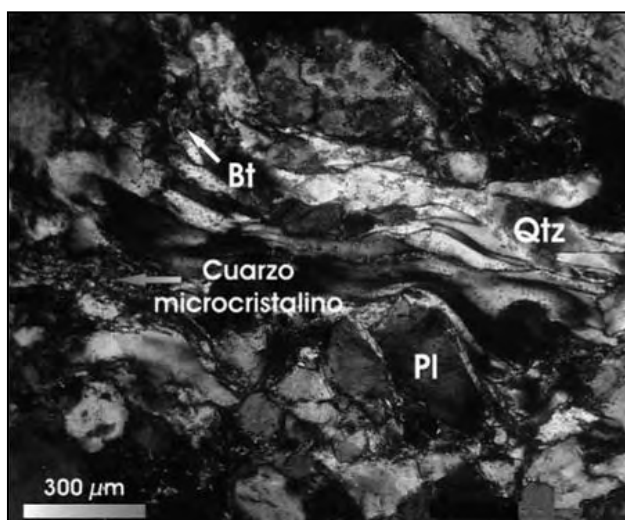


Figura 6. Fotomicrografía de un agregado leucogranítico muy deformado. Roca reactiva. Nícoles cruzados

Tabla 8. Distribución porcentual aproximada de agregados, espacios vacíos y pasta o matriz

| Distribución | Muestra C2 | | Muestra A-07 | | Muestra A-06 | |
|-----------------|--|---|--|---|--|---|
| | % aproximados (sobre el total de la muestra) | % aproximados (sobre el total de los agregados) | % aproximados (sobre el total de la muestra) | % aproximados (sobre el total de los agregados) | % aproximados (sobre el total de la muestra) | % aproximados (sobre el total de los agregados) |
| Agregados | Mármoles | 40,00% | 100,00% | 10,00% | 17,86% | 23,81% |
| | Granitoides | - | - | 35,00% | 62,50% | 59,52% |
| | Metamorfitas | - | - | 1,00% | 1,79% | - |
| | Agregados Piroxeníticos | - | - | 3,00% | 5,36% | 5,00% |
| | Agregados Sericíticos | - | 7,00% | 12,50% | 2,00% | 4,76% |
| Espacios vacíos | 10,00% | - | 10,00% | - | 7,00% | - |
| Pasta o matriz | 50,00% | - | 34,00% | - | 51,00% | - |
| Total | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 40,00% |

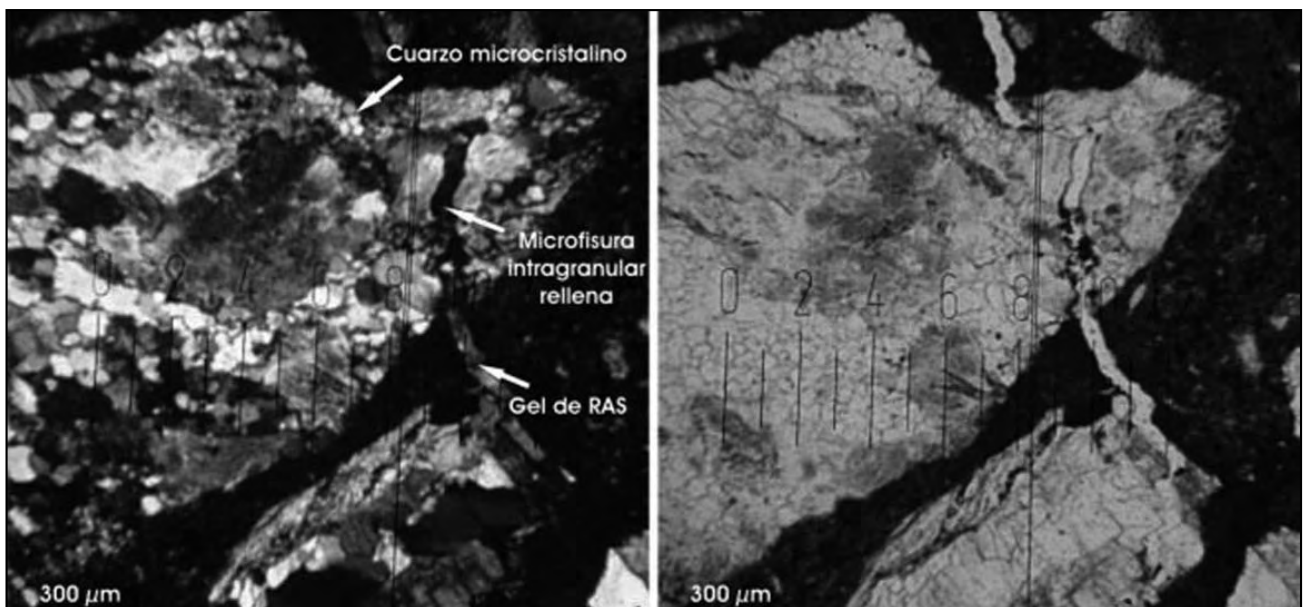


Figura 7. Fotomicrografía de un agregado leucogranítico milonitizado microfisurado. Roca reactiva. Nicoles cruzados y paralelos

- Los tres tipos de agregado producen expansiones de importancia cuando se encuentran en un porcentaje aproximado del 30% o más, del total de la probeta, lo que debería tenerse en cuenta a la hora de analizar los métodos extractivos y/o los porcentajes utilizados en mezclas de diferentes litologías correspondientes al área de explotación. A partir de estos datos, fue posible identificar y caracterizar agregados reactivos y otros que son potencialmente reactivos, que provienen de rocas metamórficas comunes de la provincia de Córdoba:

Agregados que poseen cuarzo de tamaño menor a 90 μm, con extinción ondulosa y con signos de recristalización.

Agregados que forman venas, fajas o recristalizaciones perigranulares que adoptan formas alargadas (cintas de cuarzo) o en mosaicos microcristalinos y criptocristalinos con bordes suturados producto de procesos cataclásticos particularmente intensos.

Agregados que son el producto de recristalizaciones por tensión y deformación (Figuras 5 y 6).

Este estudio establece un antecedente respecto a la existencia de agregados potencialmente reactivos en las Sierras Chi-

cas de la Provincia de Córdoba, proporcionando una primera aproximación sobre los causantes de la misma, información esencial para efectuar acciones tendientes a remediar los efectos producidos por la Reacción Álcali-Agregado.

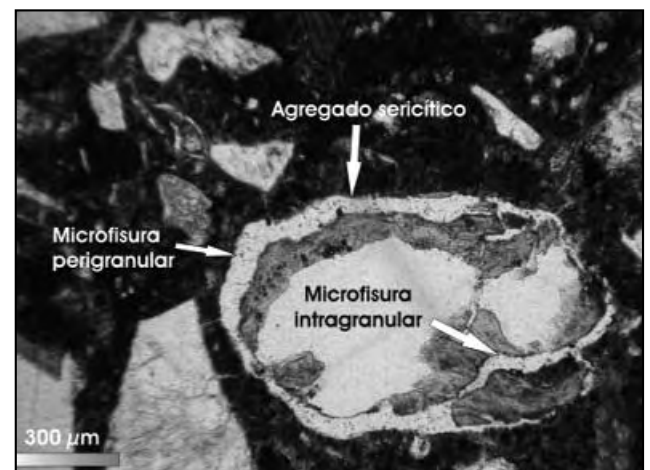


Figura 8. Fotomicrografía de un agregado sericítico microfisurado. Roca reactiva. Nicoles paralelos

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BONALUMI A., MARTINO R., SFRAGULLA J., CARIGNANO C. Y A. TAUBER, 2000
 Hoja Geológica 3363-I (Villa María). Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina.
Esc. 1:250.000. SEGEMAR. Boletín N°:347. 74 pp. Bs. As.
- CAMPOS D. G., 2005
 Estudio potencial de la reacción álcali-agregado con agregados de la provincia de Córdoba (Cantera 1).
Trabajo Final (inérito). Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. 131 pp.
- CROSS W., IDDIGS J., PIRSSON L. Y H. WASHINGTON, 1903
 Quantitative Classification of Igneous Rocks.
 286 p. *William Wesley & Son. London.*
- FRENCH W., 1992
 The characterization of potentially reactive aggregate.
In Poole, A. (Editor), Proc, 9th Conf Alkali-aggregate Reactions in Concrete, Concrete Society Publications CS.104, Vol.1, London. 338-346.
- GORDILLO C., 1984
 Migmatitas cordieríticas de las Sierras de Córdoba; condiciones físicas de la migmatización.
Miscelánea 68: 1-40, Academia Nacional de Ciencias. Córdoba.
- GORDILLO C. Y A. BONALUMI, 1987
 Termobarometría de la faja migmatítica de “La Puerta”, Departamento Cruz del Eje. Provincia de Córdoba.
Revista de la Asociación Geológica Argentina. XLII (3-4): 255-259. Buenos Aires.
- HIGGINS M., 1971
 Cataclastic Rocks. U.S.
Geological Survey Professional Paper. 687.
- IRAM (NORMA) 1509
 Agregados para hormigones.
Muestreo. 1987.
- IRAM (NORMA) 1674
 Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero.
Junio 1997.
- LOCATI F., 2006.
 Estudio de la potencialidad de la Reacción Álcali-Agregado usando agregados de la provincia de Córdoba, un enfoque petrológico.
Trabajo Final (inérito). Escuela de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. 169 pp.
- MARTINO D. R. Y R. M. FAGIANO, 1982
 “Los intrusivos de la Sierra Chica Sur de Córdoba”.
Trabajo Final, U. N. C., F. C. E. F. y N., Escuela de Geología. Pág. 1-58. (Inérito).
- MARTINO R., MUNN B., KRAEMER P., ESCAYOLA M. Y A. GUERESCHI, 1994
 Thermobarometry at 32° LS in the Pampean Ranges near Córdoba, Argentina.
Abstracts GSA with programs, A-226.
- MARTINO R., KRAEMER P., ESCAYOLA M., GIAMBASTIANI M. Y M. ARNOSIO, 1995
 Transecta de las Sierras Pampeanas de Córdoba a los 32°LS.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 50 (1-4): 60-77.
- MARTINO R., 2003
 Las fajas de deformación dúctil de las Sierras Pampeanas de Córdoba: Una reseña general.
Revista de la Asociación Geológica Argentina. v. 58. n. 4. p. 549-571.
- RAPELA C.W., PANKHURST R. J., CASQUET C., BALDO E., SAAVEDRA J., GALINDO C. Y C. M. FANNING, 1998
 The Pampean orogeny of the southern proto-Andes: evidence for Cambrian continental collision in the Sierras de Córdoba.
En: Pankhurst, R.J y Rapela, C.W. (Eds.) The Proto-Andean Margin of South America, the Geological Society London, Special Publication N° 142: 182-217.
- WIGUM B.J., 1995
 Alkali-aggregate reactions in concrete. Properties classification and testing of norwegian cataclastic rocks.
Tesis Doctoral, Universidad de Trondheim, Noruega.



Caracterización de la piedra laja masiva y pulida de Olta, provincia de La Rioja

Su viabilidad económica

Carrizo, Ramón de la Cruz ¹ - Castro, Liliana ² - Delgado, Eduardo N.³

Recibido: 19 de Diciembre de 2007 • Aceptado: 06 de Marzo de 2009

Resumen

Se presentan los resultados de la caracterización realizada sobre limolita arenosa silícea extraída como estéril y reconocida en campo como laja masiva, procedente de Olta, provincia de La Rioja. El relevamiento de los frentes de explotación y muestreo del manto de laja masiva (limolita arenosa silícea), así como del nivel de laja estratificada (arenisca muy fina tobácea) en la cantera Don Nino, indican que ambas rocas, tanto desde el punto de vista litológico como estructural, presentan características comparables. Los ensayos petrofísicos especifican que ambas rocas tienen similar peso específico, con un valor promedio del índice de carga puntual como el de tensión de rotura levemente inferior en la laja masiva que en la laja estratificada (-11%), en tanto los ensayos de desgaste indican un índice de durabilidad similar, solo con una variación en el índice de desgaste 0,09% versus 0,98%. Los pulidos en la laja masiva otorgan un brillo semi-brillante a mate, con colores inalterables, además es compacta y coherente lo que brinda buena aptitud como roca ornamental. La posibilidad de explotación de un volumen de 250.800 m³ beneficiará el mercado local. Además, su bajo costo de explotación y de belleza brinda una buena opción para distintas aplicaciones.

Palabras clave: Piedra laja estratificada, laja masiva, tipificación, Olta, La Rioja.

Abstract

A comparative study of mineralogical, structural, lithological characteristics and mechanical tests of both rocks, the massive slate extracted as sterile rock and the stratified mined slate in Olta, La Rioja province shows similar behaviour. The field work was consisted in mapping and sampling the working face of Don Nino quarry. The massive slate is classified as massive sandy siltstone meanwhile the stratified slate is described as fine tuffaceous sandstone. Petrophysics tests of both rocks reveal similar specific weight with an average testing of loads index as well as fracture stress index (Modulus of Rupture) are slightly lower in the massive slate than the stratified one (-11%). Both rocks do not present chemical reaction in any acid. Specifically the massive slate is defined by its compact and coherent characteristics and also the unalterable colours, its

hardness and its abrasion resistance which gives as a result good aptitude as ornamental rock. The possible operation of a volume of 250,800 m³ will benefit the local market. Considering its low operation cost and its beauty, this massive slate will be a good option for different applications.

Keywords: Stratified mined slate, Massive slate, Petrophysics behaviour, Olta, La Rioja.

1 UNLaR- Instituto Tecnológico de Investigaciones Mineras Laprida y Favaloro, 5300 La Rioja. 03822-457081
✉ rccarrizo@unlar.edu.ar

2 Universidad Nacional de Buenos Aires Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria Pab 2. Piso 1. 1428. Buenos Aires, Argentina.
lilianacastro@fibertel.com.ar

3 UNLaR- Instituto Tecnológico de Investigaciones Mineras Laprida y Rene Favaloro. 5300- La Rioja- 03822-457081.
edelgado@unlar.edu.ar.

INTRODUCCIÓN

Las explotaciones de piedra laja en la provincia de La Rioja se encuentran localizadas en el distrito Ilear, departamento General Belgrano, 7 km al sur de la localidad de Olta (Figura 1).

El objetivo del presente trabajo consiste en determinar las propiedades y características de la unidad de piedra laja masiva y definir específicamente si es apta como roca ornamental, tal como la piedra laja estratificada de Olta actualmente en explotación.

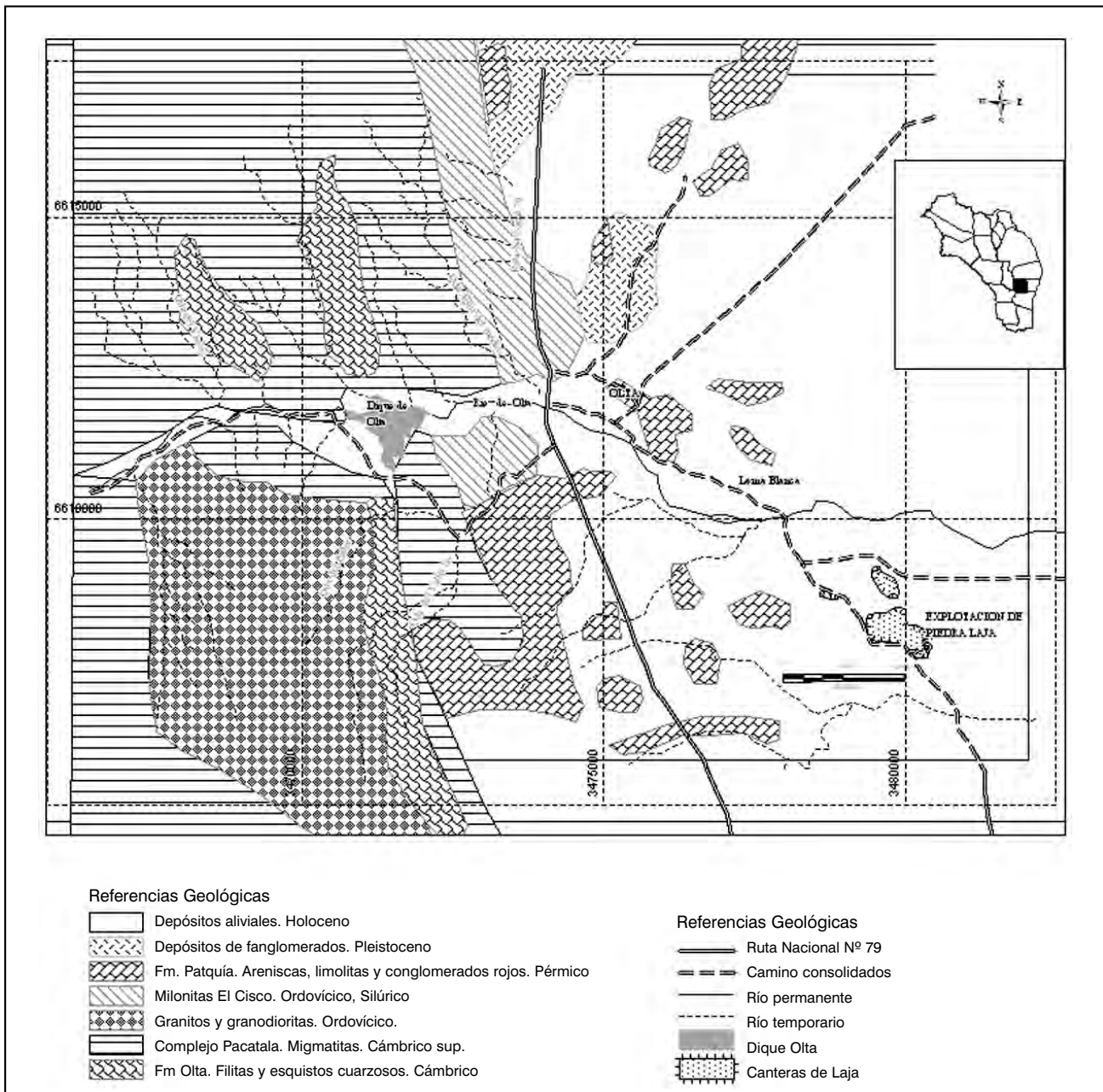


Figura 1. Mapa de ubicación y geología regional del área de Olta

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Este trabajo se inició con la recopilación y análisis de la información geológica minera disponible de la piedra laja y la selección de canteras de laja a muestrear. En octubre del 2006 se realizó la visita a las canteras de la localidad de Olta y luego del relevamiento de frentes de explotación y análisis del grado de alteración y diaclasamiento del manto de laja masiva se procedió al muestreo de la cantera de laja Don Nino. Se extrajeron 20 muestras de laja estratificada y de la laja masiva de tamaño variable, recolectando bloques de hasta tamaños de 50 x 40 x 40 cm.

Para la tipificación de la piedra laja masiva de Olta se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad Nacional de La Rioja, probetas para ensayos físico-mecánicos a fin de determinar parámetros que permitieron caracterizar y comparar la laja estratificada con la masiva.

GEOLOGÍA

El ambiente geológico del área corresponde al de la Sierra de Los Llanos. El basamento cristalino de la región, de edad Proterozoico superior-Cámbrico inferior (Poma et al., 2002),

está representado por filitas y meta cuarcitas de la Formación Olta y por tonalitas, granodioritas y granitos que integran las distintas facies de la Formación Chepes. Este basamento está intruido por granitos leucocráticos de grano grueso correspondientes a la Formación Asperizas. Durante el Paleozoico superior se depositó una gruesa secuencia de sedimentitas continentales correspondientes a los Estratos de Paganzo (*Azcuy y Morelli 1970*), representados por materiales de la Formación Malanzán (*Di Paola 1972; Andreis et al. 1986*) compuesto por conglomerados, limolita arenosas y pelitas carbonosas del Carbónico y Formación. La Colina (*Andreis et al. 1986, 1991*) del Pérmico. Hoy esta última unidad formacional se conoce con el nombre de Fm. Patquía (*Limarino et al, en prensa*) representado por fangolitas, areniscas rojizas con estratificación entrecruzada, niveles de tobas y areniscas tobáceas de colores blanco grisáceo hasta rosado y morado y de textura oolítica a nodular. Las rocas tobáceas se disponen en finos bancos de 2 a 10 cm de espesor, en cuya superficie se distinguen ondulitas, calcos de carga y restos de plantas. Las características y disposición indican un origen fluvio lacustre con aporte de material volcánico (*Di Paola, 1972*). Dentro de este grupo de rocas se encuentra el banco de areniscas silicificadas con material volcánico, bien estratificadas, que son comercializadas como piedra laja estratificada. Los sedimentos más modernos cuaternarios cubren en forma lenticular a estas rocas. (*Limarino et al., en prensa*). El mapa de la Figura 1 muestra la geología del área de Olta y la ubicación de las canteras.

DESCRIPCIÓN DEL DEPÓSITO DE PIEDRA LAJA REGIONAL

El distrito abarca un área de 150 km², con un relieve caracterizado por planicies con suaves lomadas. Los aspectos geológicos más relevantes de estos depósitos son los elementos relacionados con la extensión geográfica de la unidad identificada, potencia, y continuidad del banco hacia el este. El material que se explota corresponde a *areniscas finas tobáceas* de colores grisáceos hasta rosado, que se disponen en una posición horizontal a subhorizontal y se presentan en bancos con espesores que varían entre 1 a 4 metros. Estas rocas se habrían formado en un ambiente continental (fluvio lacustre) con aporte de material volcánico (*Schalamuk et al. 1983*).

Una de las principales características de estos depósitos es que no afloran y es necesario realizar destapes para liberar los niveles de *areniscas finas tobáceas*. La explotación de piedra laja se realiza a cielo abierto, utilizándose, para el destape de estéril, palas cargadoras frontales para remover los primeros metros de relleno moderno y mediante perforación con martillos neumáticos manuales y explosivos se realiza la liberación del banco de piedra laja. La extracción de la misma es manual, utilizando barretas para despegar las lajas del piso y una selección posterior de acuerdo a calidad color y espesor. Las lajas obtenidas presentan espesores que van de 0,02 a 0,10 m. Entre el 50 y 60% de la producción corresponde a lajas comercialmente de primera con espesores menores a 0,04 m empleadas principalmente en veredas, fachadas, techos y accesos. Por el otro lado, entre el 20 y 30% de la producción se compone por piezas que oscilan entre los 0,04 a 0,07 m (denominadas de segunda) y las mayores de 0,07 m (10-30%) son empleadas para obtener listones, escalones, mochetas.

La explotación se realiza hace más de 55 años, aunque con intermitencias, en varias canteras. En la actualidad se encuentran en explotación tres canteras; Santa Rita de Cacia, Las Mellizas y Don Nino.

La cantera Santa Rita de Cacia se localiza a los 30°39'48" y 66°12'27", a una altitud de 520 m s.n.m.. El banco de piedra laja comercial es de 2 m, donde se puede diferenciar un sector de laja fina (0,01 a 0,04 m) de otro grueso (0,05 a 0,07 m). El sector de laja fina tiene una potencia de 1 metro. La cubierta de estéril es de aproximadamente de 10 m, pero esta se encuentra muy fracturado y diaclasada.

La Cantera Las Mellizas localizada inmediatamente al norte de Don Nino se emplaza a los 30°39'53" LS y 66°12'16" LO, a una altitud de 520 m s.n.m.. El encape de estéril es de aproximadamente 10 metros. El banco de piedra laja comercial es de 2 metros, donde se diferencian un sector de laja fina (0,01 a 0,04 m) de otro grueso (0,05 a 0,07 m). El sector de laja fina presenta una potencia de 1 metro.

La cantera Don Nino se emplaza a los 30°39'54" LS y a 66°12'13" LO, a una altitud de 516 m s.n.m.. Ocupa una superficie de 6 has y muestra características similares a las canteras anteriores. El horizonte explotable de la *limonita arenosa tobácea* presenta una potencia de 2,5 metros, obteniéndose lajas de espesores entre los 0,02 a 0,06 cm. Se ha estimado una reserva total aprovechable de 130.000 m³. Este frente de cantera presenta una cubierta estéril de 13 m donde se encuentra emplazado el banco de limolita arenosa silíceo (laja masiva), sujeto a caracterización (Figura 2). A los fines de la presente investigación se extrajeron muestras de la Cantera Don Nino, ya que es la que presenta un banco más potente y menos diaclasado.



Figura 2. Frente de explotación cantera Don Nino

ENSAYOS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS

Petrografía

Se realizaron descripciones petrográficas de dos muestras representativas pertenecientes a los dos niveles (laja estratificada y laja masiva) de la Cantera Don Nino. La denominada laja estratificada es una roca de color pardo rosado a pardo amarillento claro, muy compacta y coherente, de grano fino; se escinde en planos paralelos de superficie levemente ondulada; en los cortes transversales se distingue la presencia de pequeños nódulos aplanados, paralelos, de pocos mm de diámetro (Figura 3).

Al microscopio la fracción clástica es de granulometría arena muy fina (0,08 mm), con selección buena a mediana, llegando a arena fina. La mayoría son de formas angulosas, no observándose una orientación marcada. El componente clástico

dominante es el cuarzo, desde granos redondeados hasta astillosos, algunos con extinción ondulosa. Se observan escasos fragmentos de plagioclasa y largas laminillas de muscovita; biotita oxidada y escasa clorita. Los minerales accesorios son escasos reconociéndose granate, circón y hornblenda. Dentro de la matriz de composición arcillosa se observan trizas desvitrificadas, el cemento de composición silícea ocupa los espacios intergranulares. Clasificación petrográfica: *arenisca fina tobácea*.

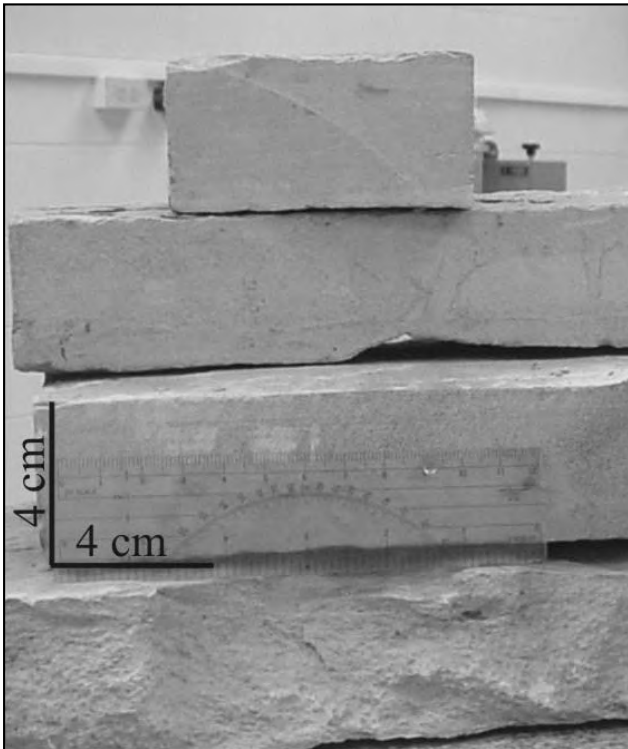


Figura 3. Laja estratificada explotada en cantera Don Nino



Figura 4. Laja masiva (limonita arenosa silícea)

La laja masiva es una roca de grano fino, compacta y coherente, de tonalidad pardo rojiza, más oscura que la anterior, varía de un sector a otro de la muestra (Figura 4). Al microscopio presenta textura clástica, con pequeños granos subangulosos comprendidos en la fracción limo (diámetro aproximado 0,03mm), de tamaño uniforme. Granos aislados exceden este tamaño. Su componente clástico dominante es el cuarzo, en menor proporción muscovita, biotita oxidada, clorita; grumos

de óxidos de hierro y magnetita. Los clastos con una textura flotante dentro de una matriz microcristalina, posiblemente compuesta por un mineral arcilloso (caolinita) que ha sufrido recristalización parcial produciendo extinción simultánea. En esta matriz se encuentran abundantes nódulos de posible origen concrecional, cementados por ópalo, sin cambios en la textura de la fracción clástica. Dichos nódulos son de formas redondeadas, ovals, subparalelos, con frecuencia se unen entre ellos formando cortos lentes irregulares. Clasificación litológica: *Limonita arenosa silícea*.

Factores físico mecánicos

Peso específico

Se analizaron muestras de laja estratificada (*arenisca muy fina tobácea*) y de la laja masiva (*limolita arenosa silícea*). El peso específico se determinó por separado, para saber si existe diferencia. Se realizaron diez determinaciones por muestra, utilizando matraces aforados de 25, 50 y 100 ml, y balanza de precisión. Posteriormente se efectuó el cálculo del peso específico para cada una y por último se calculó el promedio del peso específico de cada una de ellas. El resultado obtenido para la *arenisca muy fina tobácea* es de 2,15 gr/ml y el de la *limolita arenosa silícea* 2,16 gr/ml.

Resistencia a la compresión. Determinación del índice de carga puntual y tensión de rotura

Este ensayo se realizó bajo la Norma IRAM 10608 utilizando la técnica e instrumental que consiste en determinar el valor de la compresión simple σ , a partir de pruebas de carga puntual, sobre muestras de rocas representativas del macizo rocoso.

En este caso como no se cuenta con núcleos de perforación de diamantina, se tomaron muestras de roca de la Cantera Don Nino y se procedió de la siguiente manera: se seleccionaron muestras de *arenisca muy fina tobácea* y de la *limolita arenosa silícea*. Con un disco de corte diamantado, se realizaron dos cortes a la muestra con el fin de lograr dos caras paralelas, para facilitar la sujeción en la máquina saca testigos. Se introdujo la muestra en la máquina saca testigo, provista de diferentes herramientas de perforación con corona de insertos de diamantes, cuyos diámetros varían desde 30 a 55 mm. Se colocó la probeta entre las dos puntas de acero del equipo y antes de empezar se verificó que todas las agujas testigo se encuentren en cero. El último paso consistió en bombear aceite para que las puntas de acero compriman la probeta hasta lograr su rotura. Se tomó la lectura de la carga de rotura P y se confeccionó una planilla de datos, con el número de muestra, diámetro D y longitud L de la probeta. Se ensayaron 6 muestras de *laja estratificada* (muestras 1-6) y cuatro de *laja masiva* (muestras 7-10). Los resultados se muestran en las Tablas 1 y 2.

El valor promedio del índice de carga puntual como así también el de tensión de rotura en la *limolita arenosa silícea* es levemente inferior que el obtenido en la *arenisca muy fina tobácea* (-11%). A pesar de esta diferencia se considera que los valores de la limolita arenosa silícea reflejan buena aptitud ornamental de esta piedra estratificada (Figuras. 5 y 6).

El Índice de carga puntual es un excelente indicador de la calidad del material ornamental. Carr (1994) dice que toda roca que supere los 35 MPa de resistencia es lo suficientemente apta para cualquier tipo de aplicación, inclusive la ornamental. La Tabla 2 muestra algunos valores superan el 40MPa en ambas rocas.

Tabla 1. Ensayo de carga puntual

| Ensayo de Carga Puntual | | | | | | | | |
|-------------------------|------|---------|------|----------|-------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Mtra | Ri | Rd | | Ri+Rd | Carga de rotura P | | | |
| N° | | x 50 KN | | x 0.5 KN | KN | (N) | (Kgf) | MPa |
| 1 | 3,70 | 185,0 | 5,8 | 2,9 | 187,88 | 1878,8 | 191,52 | 19,15 |
| 2 | 3,80 | 190,0 | 5,8 | 2,9 | 192,88 | 1928,8 | 196,62 | 19,66 |
| 3 | 3,65 | 182,5 | 10,0 | 5,0 | 187,50 | 1875,0 | 191,13 | 19,11 |
| 4 | 4,05 | 202,5 | 4,0 | 2,0 | 204,50 | 2045,0 | 208,46 | 20,85 |
| 5 | 2,90 | 145,0 | 4,5 | 2,3 | 147,25 | 1472,5 | 150,10 | 15,01 |
| 6 | 3,35 | 167,5 | 4,5 | 2,3 | 169,75 | 1697,5 | 173,04 | 17,30 |
| 7 | 4,25 | 212,5 | 5,0 | 2,5 | 215,00 | 2150,0 | 219,16 | 21,92 |
| 8 | 3,15 | 157,5 | 4,0 | 2,0 | 159,50 | 1595,0 | 162,59 | 16,26 |
| 9 | 2,90 | 145,0 | 3,0 | 1,5 | 146,50 | 1465,0 | 149,34 | 14,93 |
| 10 | 2,35 | 117,5 | 4,5 | 2,3 | 119,75 | 1197,5 | 122,07 | 12,21 |
| | | | | | | Laja Estratificada | 185,14 | 18,51 |
| | | | | | | Laja Masiva | 163,29 | 16,33 |

Tabla 2. Índice de carga puntual

| Índice de Carga Puntual | | | | | | | | |
|---------------------------|----|----------|---------------|--------------|---------------------|-------------|---------------------|--------------|
| Mtra | D | Longitud | P | Ic | | c | | |
| N° | mm | mm | Kgf | MPa | Kgf/cm ² | MPa | Kgf/cm ² | MPa |
| 1 | 30 | 55 | 191,52 | 19,15 | 21,28 | 2,13 | 409,64 | 40,96 |
| 2 | 30 | 55 | 196,62 | 19,66 | 21,85 | 2,18 | 420,54 | 42,05 |
| 3 | 30 | 55 | 191,13 | 19,11 | 21,24 | 2,12 | 408,81 | 40,88 |
| 4 | 30 | 55 | 208,46 | 20,85 | 23,16 | 2,32 | 445,87 | 44,59 |
| 5 | 30 | 55 | 150,10 | 15,01 | 16,68 | 1,67 | 321,05 | 32,11 |
| 6 | 30 | 55 | 173,04 | 17,30 | 19,23 | 1,92 | 370,11 | 37,01 |
| 7 | 30 | 75 | 219,16 | 21,92 | 24,35 | 2,44 | 468,77 | 46,88 |
| 8 | 30 | 65 | 162,59 | 16,26 | 18,07 | 1,81 | 347,76 | 34,78 |
| 9 | 30 | 70 | 149,34 | 14,93 | 16,59 | 1,66 | 319,42 | 31,94 |
| 10 | 30 | 80 | 122,07 | 12,21 | 13,56 | 1,36 | 261,09 | 26,11 |
| Laja estratificada | | | 185,14 | 18,51 | 20,57 | 2,06 | 396,00 | 39,60 |
| Laja masiva | | | 163,29 | 16,33 | 18,14 | 1,81 | 349,26 | 34,93 |

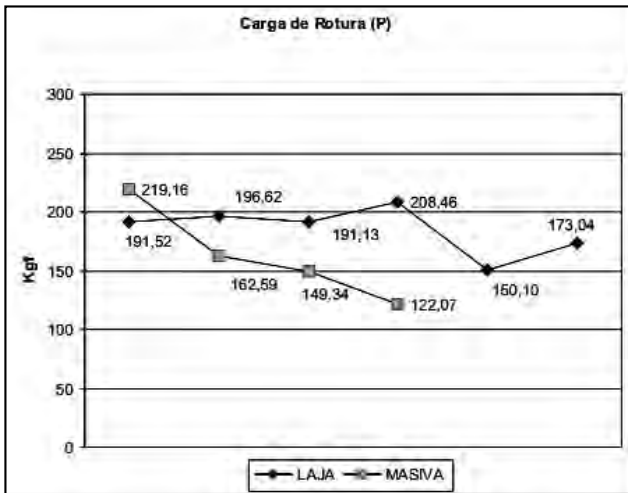


Figura 5. Curva de valores de carga de rotura

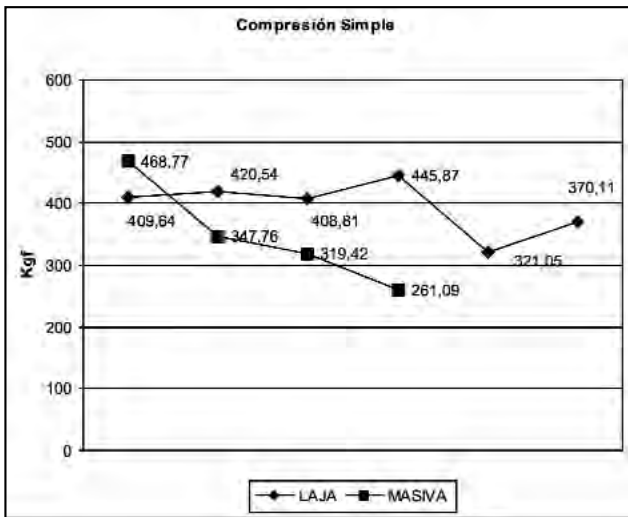


Figura 6. Curva de valores compresión simple

Reacción al ataque de ácidos

Se ensayaron muestras de roca “fresca”, las que fueron sometidas a la acción de tres tipos de ácidos: clorhídrico, nítrico y sulfúrico. Como era de esperar por su composición silícea ambas rocas no presentaron reacción alguna independientemente de cual fuese el ácido y su concentración.

Ensayos de desgaste

Este ensayo se realizó bajo la Norma IRAM 10606, utilizando la técnica e instrumental allí descrita. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Pulido

Se practicaron pulidos sobre la laja masiva lográndose un brillo semi-brillante a mate, en colores pardo- rojizos y pardo-



Figura 7. Laja masiva pulida

amarillentos. El aspecto de la laja masiva pulida se observa en la figura 7.

La Tabla 4 resume las características de ambos tipos de rocas.

ESTIMACION DEL RECURSO GEOLOGICO

Existe un estudio Geológico Económico de la Cantera Don Nino (Castaño, 1979) y de Los Dos Amigos (Carrizo, 2004), estimando una reserva económica de la laja estratificada de 133.312 m³ de mineral, y una vida útil de la cantera de 133 años al ritmo de explotación de 1.000 m³. El banco de laja masiva tiene un espesor de 4 metros y se encuentra inmediatamente por encima de la laja estratificada.

Considerando la característica geológica de este tipo de depósito marcada por la continuidad, homogeneidad en los parámetros físico mecánicos y en la buena extensión geográfica de sus afloramientos se estima un volumen de laja masiva (*limolita arenosa silícea*). Del relevamiento de campo realizado surge que el frente de explotación de la cantera Don Nino, Los Dos Amigos es la mejor exposición del banco de *limolita arenosa silícea*. Esta cantera tiene una superficie libre a explotar de 62.700 m² que multiplicado por una potencia media de

Tabla 3. Ensayos de desgaste

| | Durabilidad: Id1 | Desgaste: D1 = 1- Id1 |
|--------------------|------------------|-----------------------|
| Laja Estratificada | 99,91% | 0,09% |
| Laja Masiva | 99,02% | 1 - 99,02% = 0,98% |

Tabla 4. Cuadro comparativo de las características petrográficas y petrofísicas de la laja estratificada (arenisca muy fina tobácea) y la laja masiva (limolita arenosa silícea)

| Factores | Elementos | Calidad | | Observaciones |
|------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------|--|
| | | Laja Estratificada | Laja Masiva | |
| Litológicos | Color | pardo amarillento | pardo rojizo | |
| | Inclusiones | no tiene | tiene | |
| | Rugosidad | rugosa | lisa | |
| | Granulometría | 0,08 mm | 0,03 mm | |
| | Dureza | medianamente dura | Medianamente dura | La muestra requiere más de un golpe de martillo para ser fracturado. Escala de Moss (4.5 - 6). |
| Estructurales | Meteorización | no posee | no posee | No meteorizada. Conserva el color lustroso toda la masa |
| | Fallas | si | si | |
| | Diaclasas | si | si | Se debe conocer intensidad y extensión en profundidad de la fracturación deducir el tamaño orientativo de los bloques que se pueden extraer. |
| Físico Mecánicos | Espaciados de las Diaclasas | amplias | Varía entre 0,5 y 2 m | |
| | Pliegues Kink bands | no | no | |
| | Peso Especifico | 2,15 | 2,16 | |
| | Resistencia a la Compresión | 39,6 Mpa | 34,9 Mpa | Indice de carga puntual |
| | Reacción a los ácidos | No reacciona | No reacciona | No reacciona con HCl, H ₂ NO ₃ , H ₂ SO ₄ |
| | Desgaste | 0,09% | 0,98% | |

4 metros arroja un volumen de 250.800 m³ de reserva de laja masiva. La fotografía muestra frente de explotación de laja cantera "Los Dos Amigos", (Figura 8).

ESTUDIO DE MERCADO

Los datos de la producción minera nacional para el período 2001-2006 (Figura 9, *Secretaría de Minería de la Nación*,



Figura 8. Foto del frente de explotación de la cantera Los Dos Amigos al sur de la localidad de Olta

2007). En particular, la producción de Piedra Laja se incluye en el rubro rocas de aplicación. En líneas generales se observa que en este lustro mientras la tendencia (valores \$ 1992) disminuyó en un 10-15 % en el mercado de los metalíferos, ésta se incrementó sostenidamente en el campo de las rocas de aplicación (de 21% en el 2001 a un 32% en el 2006) y algo menor en el campo de los no metalíferos (de 9% a 12%).

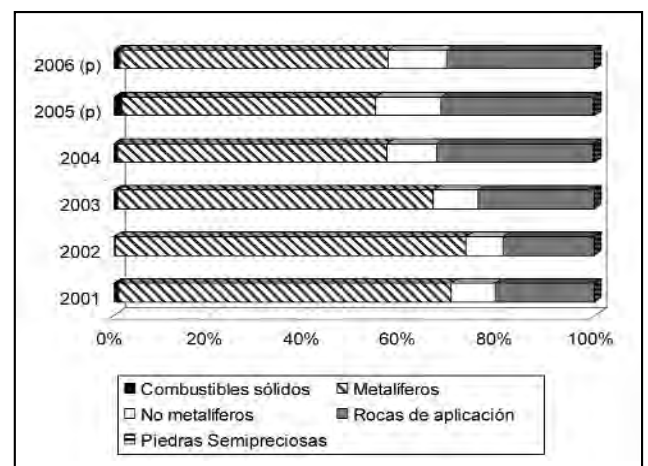


Figura 9. Producción minera argentina 2001-2006

De la producción total de rocas de aplicación existió un marcado repunte entre el 2001 y el 2004, con un inflexión en el 2005 y una tendencia alcista en el 2006. Las estadísticas 2005 y 2006 contienen cifras provisionarias. (Figura 10 y Tabla 5).

Tabla 5. Variación anual de la producción de piedra laja
(fuente secretaria de minería de la nación)

| Año | Vol (t) | Valor \$ de 1992 |
|----------------------|---------|------------------|
| 2001 | 60.592 | 5.574. 464 |
| 2002 | 76.769 | 7.062. 748 |
| 2003 | 300.292 | 27.626. 846 |
| 2004 | 439.901 | 40.470. 892 |
| 2005 p (provisorios) | 93.431 | 8.595. 652 |
| 2006 p (provisorios) | 385.156 | 35.434. 352 |

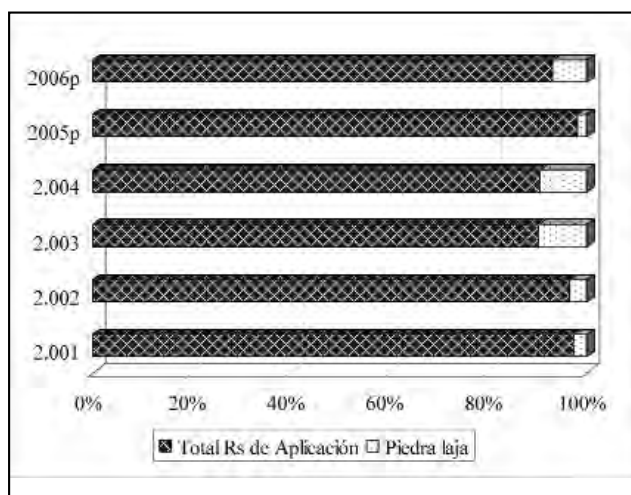


Figura 10. Incidencia de la piedra laja en la producción nacional de rocas de aplicación (período 2001-2006 p (provisorias))

Al analizar la producción nacional de Piedra Laja, se observa que son diez (10) las provincias productoras de este tipo de material, con valores muy dispersos. En el mismo se muestra estadísticamente que La Rioja es el principal productor de Piedra Laja del país seguido por Catamarca y luego San Luis (Figura 11). Los valores indicados en la estadística minera dados por la Secretaría de Minería de la Nación muestran una gran fluctuación en la producción de las provincias productoras (Tabla 6). Mientras en el año 2004 para San Luis se indican 33.017 t cercano a solo el 10% de lo indicado para La Rioja (366.000 t), en el último bienio esta tendencia se revierte.

Se presume que no se cuenta con datos totales para La Rioja, ya que los valores indicados son significativamente bajos frente a otras provincias como Catamarca y San Luis, incluso Río Negro y sus valores anteriores (Tabla 6). De todos modos, la producción general tiene una marcada tendencia ascendente con una inflexión en el 2005, que como se dijo probablemente esté vinculada a la falta de datos definitivos.

La curva ascendente de los volúmenes de producción motivados por la creciente demanda de los materiales pétreos utilizados fundamentalmente por la industria de la construcción; que es una de las primeras actividades en reaccionar ante las mejores condiciones socioeconómicas de nuestro país produciendo un incremento de esta actividad y por ende una reactivación

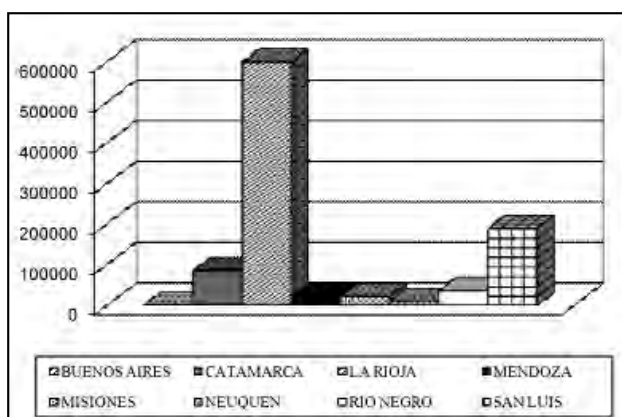


Figura 11. Producción por provincia de piedra laja (período 2001-2006 parcial)

Tabla 6. Producción por provincia de piedra laja -período 2001-2006 parcial

| | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 (p) | 2006 (p) |
|---------------------|--------|--------|----------|---------|----------|----------|
| Buenos Aires | 90 | 75 | 86 | 0 | 0 | 0 |
| Catamarca | 1.200 | 35.750 | 41.113 | 2.485 | 4.655 | 306.480 |
| Jujuy | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| La Rioja | 14.696 | 4.842 | 211. 635 | 366.000 | 2.092 | 2.314 |
| Mendoza | 0 | 1.804 | 2.075 | 12.900 | 2.975 | 3.421 |
| Misiones | 0 | 0 | 0 | 10.875 | 10.875 | 675 |
| Neuquén | 2.150 | 430 | 1.285 | 1.880 | 4.704 | 2.938 |
| Río Negro | 2.003 | 3.105 | 8.721 | 12. 023 | 10.314 | 14.558 |
| San Juan | 545 | 545 | 627 | 721 | 4.800 | 5.520 |
| San Luis | 39.900 | 30.218 | 34.751 | 33.017 | 53.016 | 49.250 |

(p) provisorios

del resto de las industrias que se encuentran relacionadas con la misma; entre ellas minería y dentro de ésta las rocas ornamentales. (Figura12).

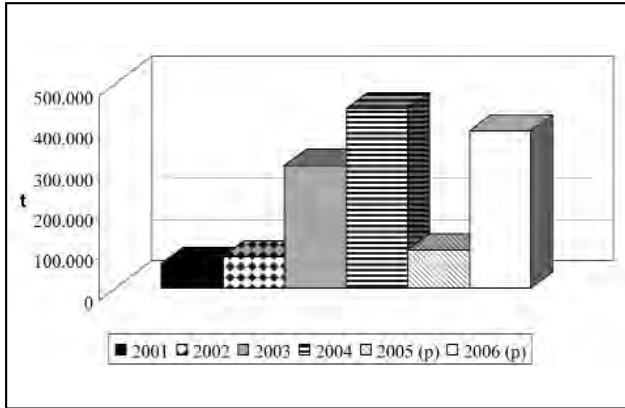


Figura 12. Producción nacional de piedra laja (2001-2006 parcial)

Producción en La Rioja

Del análisis de las estadísticas publicadas por la Dirección de Minería de la Provincia de La Rioja para el período 2002-2005, se puede observar como ha variado la producción local de Piedra Laja en este intervalo de tiempo y que porcentaje le corresponde a cada uno de los productores locales. Como se mencionó existen en la provincia tres productores de Piedra Laja, los que se encuentran en la localidad de Olta. (Figura13).

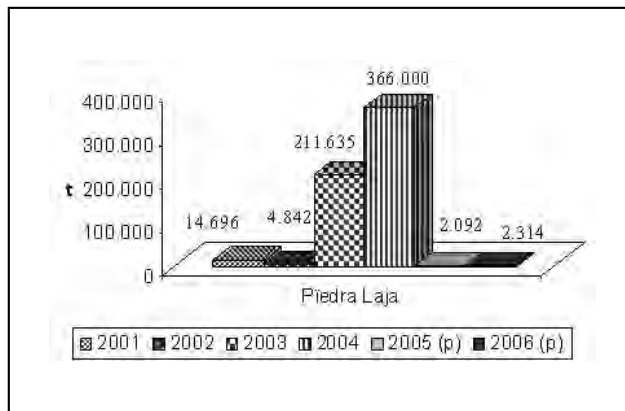


Figura 13. Variación de la producción de piedra laja en La Rioja 2001-2006p (provisorios) estadística minera 2006, Secretaría de Minería

Cantera Santa Rita de Cacia

En esta cantera se ve que en el periodo 2002- 2005 los valores medios de laja comienzan con una producción de 5.800 m³ que gradualmente avanza hacia los 7.500 m³; el valor unitario es de \$50,00 por m³. Mientras que la laja aserrada parte de 1700 m³ en el año 2002; luego experimenta un notable aumento en la producción en el año 2003 llegando a casi duplicar lo del año anterior, con 3400 m³; para los años siguientes se estabiliza la producción en 4800 m³ por año (Tabla 7 y Figura 14).

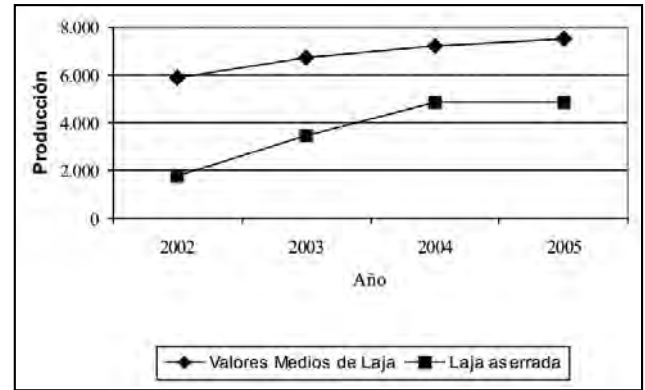


Figura 14. Producción mina Santa Rita de Cacia

Cantera Don Nino

La cantera Don Nino presenta para los valores medio de laja una producción de 6.200 m³ en el año 2002; para los años siguientes se mantiene constante con una producción de 7.500 m³. En lo que respecta a la Laja Aserrada es notable el incremento constante de la producción partiendo de los 2.800 m³ en el año 2002 y luego experimenta un sostenido crecimiento hasta los 5.000 m³ en el año 2005. (Figura15 y Tabla 8)

Cantera Las Mellizas

Esta cantera es la de menor producción con valores medios de laja que van desde 4.800 m³ para el año 2002, que luego va en aumento hasta el año 2005 donde alcanza los 6.200 m³. La Laja Aserrada tiene una producción de 1.300 m³ en el año 2002; gradualmente se va incrementando hasta el año 2004 donde se duplica la producción del 2002 con 3. 200 m³ y desde entonces se mantienen constantes los valores de producción. (Figura 16 y Tabla 9).

Tabla 7. Valores de producción cantera Santa Rita de Cacia

| Año | Valores Medios de Laja | | | Laja Aserrada m ² | | |
|------|------------------------------|-------------------|---------------|------------------------------|-------------------|---------------|
| | Producción (m ³) | \$/m ³ | Valor | Producción (m ³) | \$/m ³ | Valor |
| 2002 | 5.890 | \$ 50,00 | \$ 294.500,00 | 1.760 | \$ 80,00 | \$ 140.800,00 |
| 2003 | 6.748 | \$ 50,00 | \$ 337.400,00 | 3.480 | \$ 80,00 | \$ 278.400,00 |
| 2004 | 7.230 | \$ 50,00 | \$ 361.500,00 | 4.850 | \$ 80,00 | \$ 388.000,00 |
| 2005 | 7.500 | \$ 50,00 | \$ 375.000,00 | 4.830 | \$ 80,00 | \$ 386.400,00 |

Tabla 8. Valores de producción cantera Don Nino

| Valores Medios de Laja | | | | Laja Aserrada m ² | | |
|------------------------|------------------------------|-------------------|---------------|------------------------------|-------------------|---------------|
| Año | Producción (m ³) | \$/m ³ | Valor | Producción (m ³) | \$/m ³ | Valor |
| 2002 | 6.215 | \$ 50,00 | \$ 310.750,00 | 2.890 | \$ 80,00 | \$ 231.200,00 |
| 2003 | 7.190 | \$ 50,00 | \$ 359.500,00 | 3.720 | \$ 80,00 | \$ 297.600,00 |
| 2004 | 7.980 | \$ 50,00 | \$ 399.000,00 | 4.980 | \$ 80,00 | \$ 398.400,00 |
| 2005 | 7.900 | \$ 50,00 | \$ 395.000,00 | 5.110 | \$ 80,00 | \$ 408.800,00 |

Tabla 9. Valores de producción cantera Las Mellizas

| Valores Medios de Laja | | | | Laja Aserrada m ² | | |
|------------------------|------------------------------|-------------------|---------------|------------------------------|-------------------|---------------|
| Año | Producción (m ³) | \$/m ³ | Valor | Producción (m ³) | \$/m ³ | Valor |
| 2002 | 4.810 | \$ 50,00 | \$ 240.500,00 | 1.350 | \$ 80,00 | \$ 108.000,00 |
| 2003 | 5.180 | \$ 50,00 | \$ 259.000,00 | 1.900 | \$ 80,00 | \$ 152.000,00 |
| 2004 | 6.100 | \$ 50,00 | \$ 305.000,00 | 3.200 | \$ 80,00 | \$ 256.000,00 |
| 2005 | 6.230 | \$ 50,00 | \$ 311.500,00 | 3.300 | \$ 80,00 | \$ 264.000,00 |

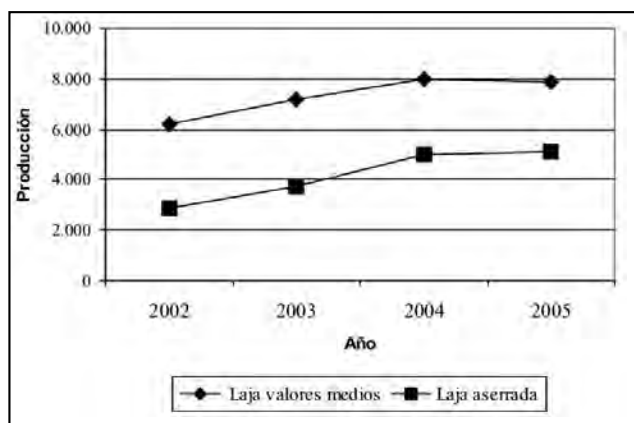


Figura 15. Producción mina Don Nino

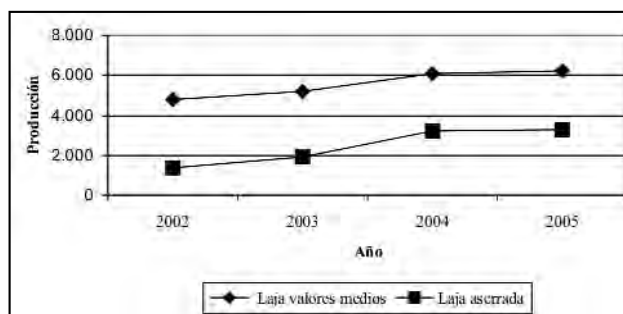


Figura 16. Producción mina Las Mellizas

DISCUSIÓN

Hasta el momento esta laja masiva extraída de las canteras como material estéril no había sido caracterizada desde punto de vista petrofísico, ni tampoco evaluada económica y ambientalmente.

A partir de este análisis se establecen las siguientes consideraciones:

Por un lado, a partir de los ensayos se determinó que la *laja masiva* tiene una aptitud como roca de ornamental, con características petrofísicas similares a la *laja estratificada* hoy en explotación.

Por el otro, dicha *laja masiva de Olta* tratada en la cual como estéril, se suma a los costos de extracción y además genera grandes escombreras que impactan sobre el paisaje y el ambiente en general. El incorporar la *laja masiva* a la explotación por lo tanto no solo reduce el costo de explotación (al considerar este banco como mineral aprovechable) sino también incrementa las reservas de laja sosteniendo así para la provincia el primer lugar en producción. Esto también suma un beneficio

adicional que implica la necesidad de mayor mano de obra en las distintas etapas del proceso.

A pesar que este nivel de *laja masiva* posee menor dureza, resistencia y brillo que los granitos, es un producto que entraría al mercado a competir a bajo precio, con otros materiales de construcción que son utilizados para revestimiento y decoraciones.

CONCLUSIONES

Las rocas estudiadas en este trabajo son sedimentarias clásticas y se clasifican como *arenisca muy fina tobácea (Laja masiva)* y *limolita arenosa silícea (Laja Estratificada)*.

Los ensayos petrofísicos indican que ambas rocas tienen similar peso específico, con un valor promedio del índice de carga puntual como el de tensión de rotura levemente inferior en la laja masiva que en la laja estratificada (-11%). Los valores del ensayo de compresión simple superan en algunos casos 40MPa (valor mínimo recomendado para calidad del material ornamental. 35 MPA).

Los ensayos de desgaste indican un índice de durabilidad similar, con una variación 0,09% versus 0,98%. Los pulidos practicados en la laja masiva otorgan un brillo semi-brillante a mate.

Por lo tanto, la *laja masiva* es un producto noble que mantiene sus características de inalterabilidad de su color y resistencia al desgaste; haciendo de este un material de excelentes cualidades constructivas, con buena aptitud como roca ornamental.

La posibilidad de explotación de un volumen de 250.800 m³ beneficiará el mercado local. Además su bajo costo de explotación y su belleza le brindan una buena opción para

distintas aplicaciones en un sin número de obras publicas y privadas.

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Claudio Nadal por su colaboración en los ensayos físicos mecánicos realizados en el laboratorio de Mecánica de Rocas. Se agradece a la Lic. Ana Prieri (Cátedra de Petrología de la UNLAR) quien participó en proyecto de investigación que desarrollo en ITIM en el período 2005-2007, por su colaboración en las descripciones petrográficas para este trabajo experimental. En este trabajo participaron becarios de la Carrera de Ingeniería de Minas de la UNLAR, Gustavo Arias, Pablo Ávila, José Gómez y Ernesto Castro.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ANDREIS R.R., LEGUIZAMÓN R. Y S. ARCHANGELSKY, 1986

El paleovalle de Malanzán: nuevos criterios para la estratigrafía del neopaleozoico de la Sierra de los Llanos, La Rioja, República Argentina.
Anales de la Academia Nacional de Ciencias 57,122 pp, Córdoba.

ANDREIS R.R., BENSEL C.A., ARCHANGELSKY S., SIANO S., PAZOS P. Y L. LUNA, 1991

Stratigraphy, paleoenvironment and paleogeography of the Late Paleozoic sequences at the Sierra de Los Llanos, intramountain basin and wearward areas, Eastern Paganzo Basin, La Rioja Province, Argentina,
Congreso Internacional de los sistemas Carbonífero y Pérmico. Abstract: 14, Buenos Aires.

AZCUY C.L. Y J.R. MORELLI, 1970

Geología de la Comarca Paganzo Amaná. El Grupo Paganzo: formaciones que lo componen y sus relaciones.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 25: 411- 427.

CARR D. D., 1994

Industrial Minerals and rocks.
Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, 1196 p.

CARRIZO R.N., 2004

Estudio y evaluación económica de la Cantera Los Dos Amigos.
Dirección Provincial de Minería. Informe Inédito.

CASTAÑO O., 1979

Estudio Geológico Económico de la Cantera de Laja Don Nino.
Dirección Provincial de Minería. Informe Inédito.

DI PAOLA E., 1972

Litología de la sección media del Grupo Paganzo en las comarcas de Paganzo - Amaná y Olta Malanzán, provincia de la Rioja, República Argentina.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 27: 179 - 187.

LIMARINO C., PAGE S., LITVAK V., NET L., CASELLI A. Y P. GUTIÉRREZ, EN PRENSA

Hoja geológica 3166 -I Chamental, Prov. de la Rioja y San Juan.
Boletín N° 257. Instituto de Geología y Recursos Minerales Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires.

PAGE S., LITVAK V. D. Y C.O LIMARINO, 2002

Nueva edad en el basamento de la sierra de Los Llanos, La Rioja: Intrusividad pampeana en el arco famatiniano.
Revista Asociación Geológica., 57, 3:345-348. Buenos Aires.

SCHALAMUK I, FERNÁNDEZ R., Y R. ECHEVERRY, 1983

Los yacimientos no metalíferos y rocas de aplicación de la región NOA.
Anales XX: 193-195. Buenos Aires.

SECRETARÍA DE MINERÍA DE LA NACIÓN, 2007

Estadística Minera 2001-2006.



Efectos provocados por las canalizaciones en la cuenca inferior del Arroyo del Tala

Provincia de Buenos Aires

Fucks, Enrique ¹ - Schnack, Enrique ²

Recibido: 26 de Junio de 2008 • Aceptado: 20 de Marzo de 2009

Resumen

Hace más de 100 años Florentino Ameghino expuso las desventajas que presentaba para la llanura pampeana la construcción de canales tendientes a drenar los excesos hídricos durante los períodos lluviosos y no prever su contención para ser utilizados durante las secas, que a su entender producían mas pérdidas económicas que las mismas inundaciones. Este trabajo tiene como objetivo presentar un ejemplo de las implicancias negativas que ha producido la construcción de estos canales en un sector del complejo planicie de inundación - paleoestuario en la cuenca del Arroyo del Tala, Provincia de Buenos Aires.

Uno de los aspectos negativos, producto del drenaje de un importante bañado que servía de nivel de base al arroyo del Tala, ha significado para el sector el descenso del nivel freático, produciendo inconvenientes para el mantenimiento y crecimiento de la vegetación utilizada principalmente en la ganadería extensiva y además generó el cambio del espesor de la zona de aireación. Asimismo, al reducirse las inundaciones, también se han reducido los nutrientes que éstas depositaban, aumentando de esta forma la discontinuidad en su reposición natural.

Palabras clave: *Canalizaciones, inundaciones, paleoestuario, planicie de inundación.*

Abstract

More than a hundred years ago, Florentino Ameghino stated that the construction of channels to drain the exceeding water during rainy periods, resulted in disadvantages for the Pampean plains, because they produced more economical damage than the flooding itself, if the storage of water to be used during dry periods, was not considered. This paper has the objective to show an example of the negative consequences produced by the construction of these channels on an area of the floodplain-paleoestuary complex in the Arroyo del Tala's basin, Buenos Aires Province.

One of the negative aspects produced by the drainage of a large swamp that acted as the base level of the Arroyo del Tala, implied the drawdown of the water table, disturbing the growth of vegetation used mainly in extensive farming. On the other hand, since flooding does not occur in space and time, the soil profile can gain water only from rainfall, causing the thickening of the aeration zone. Likewise, the reduction of flooding implied the reduction of nutrient deposition, increasing the discontinuity of their natural reposition.

Keywords: *Channeling, flooding, paleoestuary, floodplains.*

1 Facultad de Ciencias Naturales y Museo y Ciencias Agrarias y Forestales. LATYR. UNLP.

2 CIC. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Calle 64 N°3. La Plata

✉ efucks@fcnym.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Ya en 1884, Florentino Ameghino expuso en su disertación sobre las “secas y las inundaciones de la provincia de Buenos Aires” las ventajas y desventajas que acarrearía la construcción de canales tendientes a evacuar rápidamente los excedentes hídricos de los sectores inundables hacia fuera del límite continental. El conjunto de elementos enumerados por el citado naturalista permitía evaluar los pros y contras que produciría la evacuación de las aguas superficiales en épocas de importantes precipitaciones, en relación con las épocas donde éstas disminuían y generaban sequías.

En la desembocadura del río Salado, la concreción de numerosos canales con sus sucesivas ampliaciones y profundizaciones produjo cambios ecológicos, socioeconómicos e hidrológicos significativos (Conzonno, et al., 2001, 2002).

Algunas de estas problemáticas han podido observarse en el sector inferior de la cuenca del Arroyo del Tala, aledaña a la cuenca del Río Arrecifes, al noreste de la provincia de Buenos Aires (Figura 1).

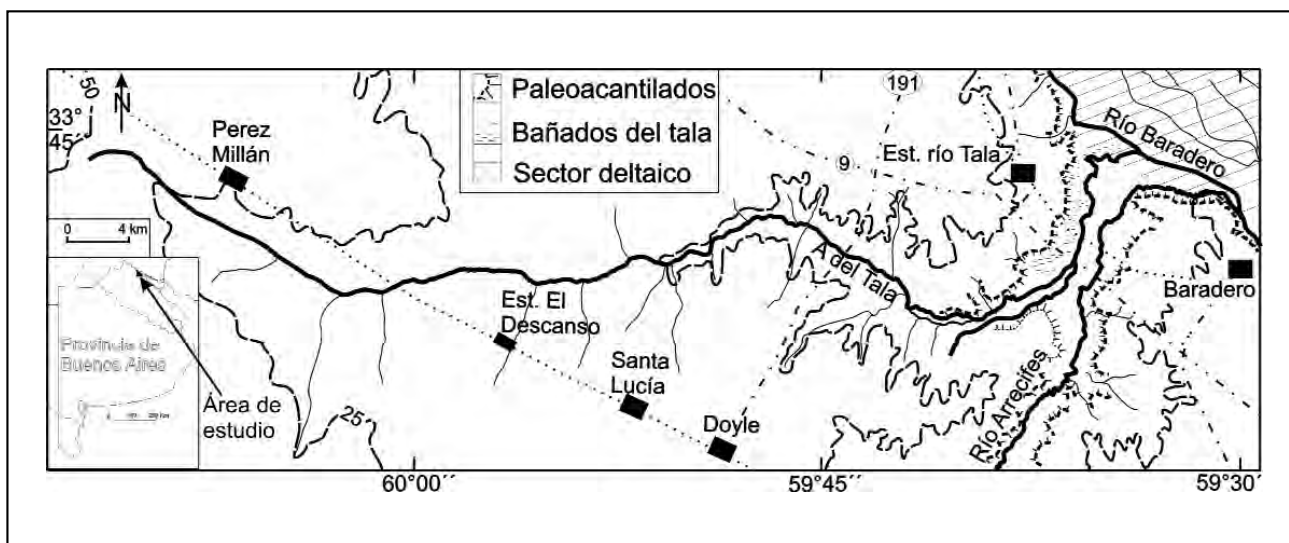


Figura 1. Ubicación y características geológicas-geomorfológicas de la cuenca del Arroyo del Tala

AMBIENTE GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICO

La cuenca del A° del Tala ha sido influenciada durante el Holoceno por la elevación del nivel del mar, conformando un ambiente con características complejas. Si bien la superficie de esta cuenca es de menor tamaño (865 km²) que las cuencas vecinas (Arrecifes, Areco hacia el S y Ramallo y del Medio hacia el N), los rasgos y procesos geomórficos actuales y pasados que llevaron a la configuración actual de la cuenca son en muchos aspectos similares.

El curso principal presenta su cabecera en cercanías de la localidad de Pérez Millán a una cota de 52 m s.n.m. para escurrir la mayor parte con rumbo EO y NS su tramo final a lo largo de unos 13 km, desembocando en el río Baradero en cercanías de la localidad homónima. Presenta un diseño de drenaje de tipo dendrítico e individual apenas sinuoso, aumentando gradualmente las sinuosidades para presentar en su parte terminal un diseño meandroso.

Desde sus nacientes (52 m s.n.m.) hasta la cota de 10 m recorre 51,5 km con una pendiente del orden de 0,08% y desde los 10 m hasta su desembocadura (2,7 m s.n.m.) con una pendiente de 0,035% recorriendo una longitud total de 73,5 km.

El curso presenta un canal bien definido, exhibiendo en cercanías de los 10 m s.n.m. bifurcaciones y uniones, y ya dentro del estuario relicto que comparte con el Río Arrecifes, confluye en un bañado, constituyendo el lugar donde se han realizado las mayores canalizaciones.

De acuerdo a los procesos evolutivos actuantes, se puede separar la cuenca en dos zonas: la superior, desde sus nacientes hasta los 10 m y la inferior, desde esta cota hasta su desembocadura.

La parte superior del valle principal, genéticamente relacionada a procesos continentales, presenta paredes de valle con pendientes suaves y regulares, desarrollándose el talweg y algunos rápidos sobre los limos loessoides de la Formación Pampeano (González Bonorino, 1965), pudiendo observarse, sobre ésta, facies de canal con conglomerados de tosca clastos sostén, infrayaciendo a los sedimentos aluviales de facies de desborde y de planicies de inundación, de texturas fangosas y estructuras laminares. El conjunto se asigna al Holoceno tardío.

El sector inferior del curso constituye una extensa superficie plana a plano cóncava, limitada por paleoacantilados, que en planta presenta forma de embudo constituyendo un *estuario relicto* asociado con el río Arrecifes, rasgos que comparte con una gran cantidad de cursos de la región (Fucks y De Francesco, 2000) (Figura 1). El extremadamente escaso gradiente topográfico de esta zona ha determinado que el A° del Tala, y fundamentalmente el A° Arrecifes, hayan desarrollado un diseño meandroso, produciéndose en algunos casos por erosión lateral el acortamiento de los cursos debido a estrangulamientos de meandros, conformándose lagunas de forma semicircular.

Los sedimentos de la ingesión holocena depositados en todo el paleoestuario están constituidos por fangos de colores grises, esencialmente arcillosos, los que se encuentran en su parte más interior, y limosos a limo arenosos en la boca. Estos sedimentos son correlacionables con la Formación Campana (Fucks y De Francesco, 2003).

Sobre estos depósitos, en el ámbito de contacto entre ambos ambientes, se han depositado 1,5 a 2 m de sedimentos aluviales, que en gran medida corresponden a depositaciones del Holoceno tardío (Figura 2).

En el sector exterior del paleoestuario se desarrolla un importante bañado que concentra las aguas de este curso y de los provenientes de la pared izquierda del valle. Este curso se desarrolló debido a la mayor capacidad de transporte y acumulación del río Arrecifes, generando sus albardones un dique natural al A° del Tala y de otros cursos menores (cursos yazoo), haciendo que estos escurran paralelos y desagüen en forma independiente en el río Baradero.

En líneas generales puede observarse que los suelos no presentan un gran desarrollo, tanto en profundidad como en la diferenciación de estructura y horizontes, caracterizándose aquellos desarrollados sobre sedimentos litorales, ubicados en la boca de los paleoestuarios y llanura litoral por el elevado contenido de sales solubles (Bonfils, 1962) (Figura 2).

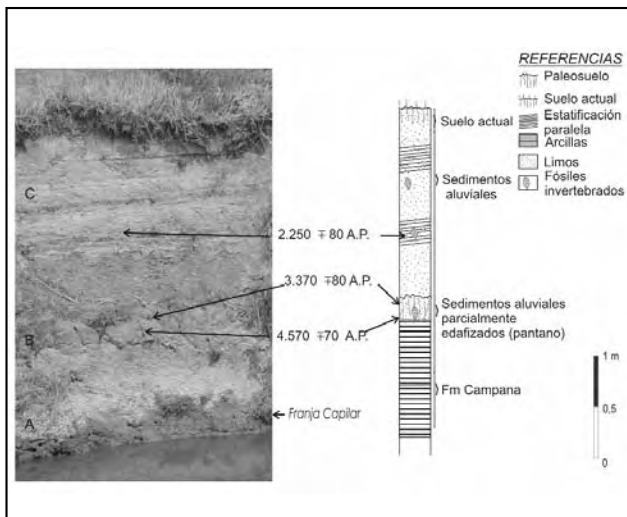


Figura 2. Fotografía y perfil estratigráfico del Arroyo del Tala en la zona de estudio (tomada de Fucks et al., 2007)

El clima de la zona, de acuerdo a los datos obtenidos de la Estación Buenos Aires, ubicada en el observatorio astronómico, a 110 km de la zona de estudio, es cálido templado con precipitaciones medias del orden de los 1070 mm para los últimos 100 años, mientras que la temperatura media anual para el mismo período es de 17,0°C observándose un aumento sistemático de ambas variables (Figura 3 a,b) (Fucks, 2005).

ANTIGUA PROBLEMÁTICA DEL SECTOR

Dadas las características físicas de la cuenca en relación a su constitución litológica y geomorfológica, las mayores problemáticas estaban referidas a las extensas inundaciones que se producían en la zona inferior, originadas esencialmente en el cambio de pendiente hacia un ambiente geomorfológico muy llano (estuario relicto).

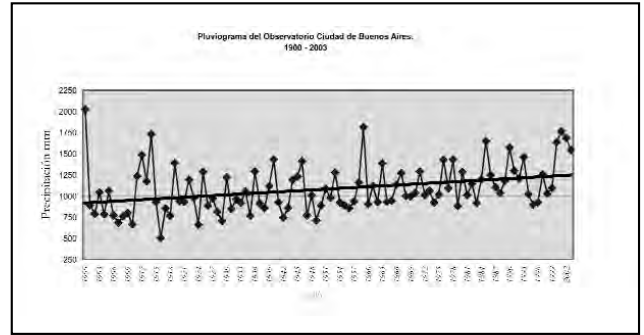


Figura 3 a. Pluviograma de la Estación Observatorio de la Ciudad de Buenos Aires.

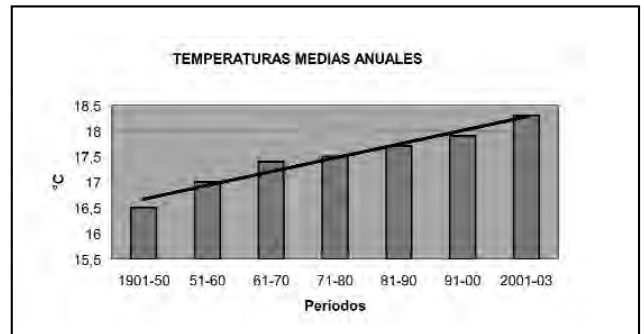


Figura 3 b. Histograma de temperaturas medias para los diferentes periodos de registro de la Estación Observatorio

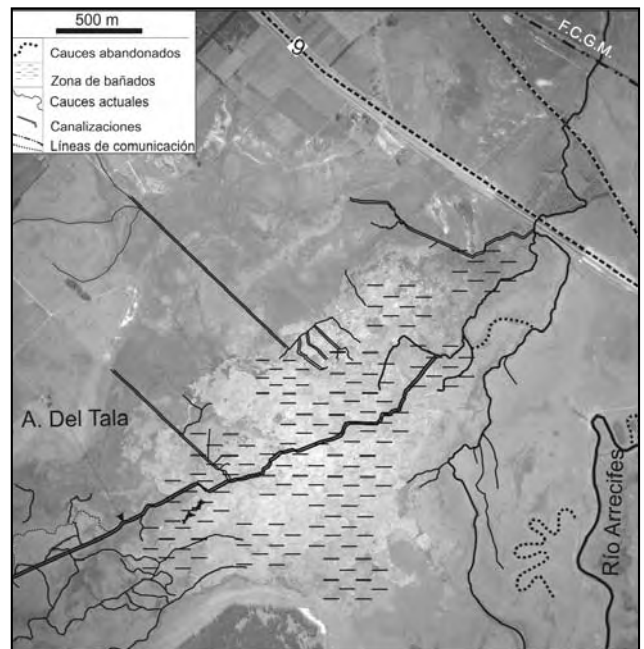


Figura 4. Fotografía aérea del sector de estudio, resaltando el bañado y las diferentes formas de escurrimiento lineal

Bajo estas condiciones se fueron depositando sucesivamente los sedimentos fluviales, en algunos casos con intercalaciones de sedimentos eólicos, y en otros, parcialmente edafizados, indicando superficies de estabilización en respuesta a las diferentes condiciones climáticas (Figura 2).

Desde el retiro del mar se han acumulado en el sector, aproximadamente, 2 m de sedimentos, mostrando lo proclive del ambiente a la depositación sedimentaria

En la década del '70 un grupo de propietarios de "estos sectores inundables", propiciaron el financiamiento para que la Dirección de Hidráulica de la provincia de Buenos Aires realizara una serie de obras tendientes a minimizar las inundaciones a través de rectificaciones del cauce del A° del Tala, su profundización y la construcción de canales. Este conjunto de medidas ha llevado a que prácticamente en la zona de bañados (Figura 4) no se produzcan más inundaciones, y si lo hacen, sean por un escaso período de tiempo. A pesar de las obras y de sus resultados (en función de los objetivos iniciales muy satisfactorios), estos campos y un conjunto los campos situados aguas arriba siguen siendo utilizados para ganadería extensiva, igual uso al que se le venía haciendo antes de la realización de las acciones mencionadas.

PROBLEMÁTICA ACTUAL DEL SECTOR

A pesar de lograr lo que se creía era la solución a "la problemática" para la zona, desde hace algunos años los mismos propietarios que propiciaron esos cambios están impulsando la idea de volver a la situación original (*Martínez Sobrado, com. pers.*) mediante la construcción de un dique.

La problemática actual del sector de estudio se relaciona al escaso contenido de agua del perfil del suelo, motivando el dificultoso crecimiento y mantenimiento de las pasturas naturales, a lo que se debería sumar los contenidos de materia orgánica (resaca) que ya no son acumulados en el sector durante las inundaciones y se pierden directamente hacia el sector deltáico. De acuerdo a la información suministrada, (se carece de datos específicos del sector) el nivel freático se encuentra a aproximadamente 1 m por debajo de los valores en los que se encontraba antes de la realización de las obras hidráulicas. Esto puede observarse a lo largo de la barranca del arroyo del Tala, por debajo de los 2 m desde la superficie, dentro de los sedimentos arcillosos de la ingresión holocena.

De acuerdo a lo observado, y teniendo en cuenta que no se han producido variaciones significativas de precipitación anual desde la ejecución de las obras, podrían considerarse como causas probables para el cambio de escenario las siguientes:

- Al haberse profundizado el canal y produciéndose nuevas canalizaciones, el nivel del agua del arroyo ha descendido, constituyéndose un nuevo nivel de base para el agua freática del bañado.
- Asimismo, este drenaje permitió que la zona del bañado no actuara más como nivel de base, sino que lo hiciera el río Baradero, asociado a la profundización y creación de canales, aumentado la cantidad de agua de escorrentía, agua que antes se esparcía y ocupaba gran parte de la planicie de inundación y del paleoestuario. Este nuevo escenario ha impedido la recarga directa de agua del perfil de suelo en periodos mas extensos de inundación, dándose en la actualidad exclusivamente a través de las precipitaciones, restando aquellas que se evaporaran o escurren superficialmente hacia el curso principal.

DISCUSIÓN SOBRE LA EJECUCIÓN DE ESTAS OBRAS

La presente problemática constituye un caso concreto sobre las consecuencias que determinadas obras hidráulicas pueden ocasionar al ambiente. La gran cantidad de obras similares o incluso de mayores dimensiones que se han realizado en toda la llanura pampeana, evidentemente aun no han recibido la co-

rrespondiente evaluación global. Seguramente muchas de éstas han logrado el objetivo por las que fueron planificadas y concretadas, pero que por diferentes razones las consecuencias negativas aún no han sido detectadas.

Asimismo, este contexto se da con el comienzo de un período caracterizado por lluvias más significativas a partir de 1974 (*Borús y Goniadzki, 2002*). Relacionado a este factor, Ameghino (1884) manifiesta lo significativamente perjudicial que representan los déficits de agua contra los excesos en la región pampeana y la necesidad de construir grandes receptáculos para ser utilizados en los primeros casos.

Es claro que también interviene el factor político, ya que la responsabilidad de las inundaciones suele atribuírsele al gobierno de turno y a los que lo precedieron por la no concreción de las obras tan largamente planificadas, mientras que las sequías son atribuidas exclusivamente a factores climáticos.

Es necesario analizar el conjunto de variables al momento de realizar cualquier obra de canalización o rectificación de cauces y actividades conexas, evaluando y valorando precisamente los objetivos e impactos al ambiente no solamente en el momento, sino y fundamentalmente a lo largo del tiempo. En áreas con tendencia a la salinización (la zona de estudio presenta sedimentos marinos), la disminución en la recurrencia de las inundaciones por obras hidráulicas, pueden producir rápidos procesos de salinización secundaria y disturbar ambientes naturales (*Gabellome et al., 2001*).

La rectificación artificial de los meandros, el dragado sistemático de cauces fluviales y la construcción de canales, constituyen gravísimas afecciones ambientales (incisión lineal de las corrientes, con el consiguiente descenso del nivel freático y en consecuencia, problemas de sequía en las zonas aledañas, alteración y destrucción de biotopos) favoreciendo el aumento de la energía y velocidad de las aguas de escorrentía, aumentando su poder erosivo y por tanto su capacidad de destrucción de infraestructuras construidas en o cerca del cauce, como alambrados y puentes. De acuerdo a lo expuesto, estas acciones sólo deberían ser aplicadas de forma puntual donde sea necesario la protección de poblaciones, previo al pertinente estudio de las posibles consecuencias aguas arriba y aguas abajo del tramo a intervenir.

USOS RECOMENDADOS

- En líneas generales, se deberían fomentar las funciones naturales de las llanuras de inundación y sectores inundables como el expuesto, favoreciendo el escurrimiento en manto de las aguas y garantizar la persistencia del uso agrícola extensivo tradicional. Este comportamiento de las aguas superficiales en la llanura de inundación es potencialmente muy efectiva ya que esta situación produce acumulación de nutrientes e incluye la disipación de la energía de las inundaciones y por tanto de su capacidad erosiva, debido a la fricción con la vegetación y al trazado meandri-forme del curso.
- La recuperación de la funcionalidad ecológica de la llanura de inundación y otras áreas inundables, junto con la preservación de un uso agrícola tradicional permitiría la explotación económica y sustentable de las actividades recreativas (navegación, esparcimiento, pesca, senderismo, etc), siendo un factor de diversificación económica y por tanto de desarrollo rural en las zonas inundables.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AMEGHINO F., 1884
Excursiones geológicas y paleontológicas en la provincia de Buenos Aires.
Boletín Academia Nacional de Ciencias. Córdoba- VI:161-257.
- BONFILS C., 1962
Los suelos del Delta del río Paraná.
Revista de Investigaciones Agrícolas. XVI (3). INTA.
- BORÚS J. Y D. GONIADZKI, 2002
Eventos Severos del Niño en el Delta. El Niño: Sus Impactos en el Plata y en la Región Pampeana.
CIC-ABC-FCNM. La Plata
- CONZONNO V., MIRETZKY P. Y A. CIRELLI, 2001
The impact of man-made hidrology on the lower stream bed of the Salado River dreainage basin (Argentina) *Environ. Geol., 40:968-972.*
- CONZONNO V., MIRETZKY P. Y A. CIRELLI, 2002
Estudio y planteo de solución para la región carente de agua en la cuenca Baja del Río Salado (Buenos Aires).
Natura Neotropicalis 33 (1 y 2):71-79.
- FUCKS E.
Estratigrafía y Geomorfología en el ámbito del curso inferior del Río Luján, Provincia de Buenos Aires. 2005.
Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP, 857, 239p. (Inédito).
- FUCKS E. Y F. DE FRANCESCO, 2000
Unidades marinas cuaternarias en el cuenca inferior del Río Luján. Prov. de Buenos Aires.
IX Congreso Geológico Chileno. Puerto Varas. Chile- Actas, Vol 1: 467-470.
- FUCKS E. Y F. DE FRANCESCO, 2003
Ingresiones marinas al norte de la ciudad de Buenos Aires. Su Ordenamiento Estratigráfico.
IIº Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. San Miguel de Tucumán. Actas, 101-109.
- FUCKS E., HUARTE R., CARBONARI J. Y A. FIGINI, 2007
Geocronología, Paleoambientes y Paleosuelos Holocenos en la Región Pampeana.
Revista de Asociación Geológica Argentina. 62 (3): 425-433.
- GABELLOME N. A., SARANDÓN R. Y C. CLAPS.
Diagnóstico y dinámica ambiental. Caracterización y evaluación ecológica de la cuenca del Río Salado.
Jornada sobre Inundaciones en la Región Pampeana. Buenos Aires, Argentina. 2001.
- GONZÁLEZ BONORINO 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.
Revista de la Asociación Geológica Argentina. Tomo 20 (1): 67-148.



Sismicidad y paleosismicidad en la región sur de la provincia de Córdoba

Análisis del peligro y riesgo sísmico asociado

Sagripanti, Guillermo ¹ - Villalba, Diego ¹ - Bettioli, Anabela ¹ - Seitz, Carina ¹

Recibido: 20 de Diciembre de 2007 • Aceptado: 23 de Marzo de 2009

Resumen

La presente contribución resume los avances en el conocimiento de la sismicidad y paleosismicidad en la región sur de la provincia de Córdoba, y sobre el peligro y riesgo sísmico asociado a esta actividad.

Los antecedentes de sismicidad y paleosismicidad, con epicentro en esta región, indican una importante actividad sísmica a esta latitud. La zona fue epicentro de una importante crisis sísmica, cuyo evento principal fue el Gran Terremoto de Sampacho en 1934, de magnitud M 6,0 (Richter), que destruyó el 90% de las construcciones de la época. En la actualidad la actividad sísmica superficial es frecuente, registrándose más de cien microsismos que no superan la magnitud (Richter) de M 3,0. Además, las evidencias cosísmicas reconocidas en sedimentos cuaternarios, revelan la ocurrencia de fuertes paleoterremotos en este sector de la intraplaca.

El potencial sismogénico de la región sería mayor que el considerado actualmente y por lo tanto es probable que un terremoto fuerte, con epicentro en la región, exceda las aceleraciones esperadas, afectando en mayor grado a las construcciones edilicias, dado que, probablemente la resistencia de las mismas sería menor a la que deberían tener.

Palabras clave: Terremoto, paleoterremoto, falla, intraplaca, vulnerabilidad.

Abstract

The present contribution summarizes the advances in the knowledge of the seismicity and paleoseismicity in southern region of Córdoba province, and also about the danger and seismic risk associated to this activity.

The records of seismicity and paleoseismicity with epicenter in this region indicate an important seismic activity at this latitude. The zone was epicenter of an important seismic crisis, whose main event was the Gran Sampacho earthquake in 1934, of M 6,0 (Richter) magnitude, which destroyed 90% of that time buildings. At present, the superficial seismic activity is frequent, registering more than one hundred microseisms that don't surpass M 3,0 (Richter) magnitude. Besides, the coseismic evidences recognized on quaternary sediments reveal the occurrence of strong paleoearthquakes in this sector of the intraplate.

The seismogenic potential of the region would be greater than the one considered nowadays, and due to this, it is probable that a strong earthquake, with epicenter in the region, exceeds the awaited accelerations, affecting in higher grade the buildings, given that it is probable that the buildings resistance is less than they should have.

¹ Universidad Nacional de Río Cuarto.
Ruta Nacional N° 36, km 601. CP 5800. Córdoba.

✉ gsagripanti@exa.unrc.edu.ar

Keywords: Earthquake, paleoearthquake, fault, intraplate, vulnerability

INTRODUCCIÓN

El levantamiento del basamento de las Sierras Pampeanas entre los 28°-33° de latitud S, durante el Mioceno tardío, Plioceno y Cuaternario sugiere que la deformación del mismo, de algún modo, está condicionada por la subducción subhorizontal de la placa de Nazca (Jordan *et al.* 1983; Jordan y Almendinger 1986). La horizontalización de dicha placa, se manifiesta en la intraplaca con una sismicidad superficial, moderada a fuerte, concentrada a los 33° de latitud S entre la Precordillera y las Sierras Pampeanas de Córdoba (Costa y Vita Finzi, 1996; Ramos 1999). Además, a esta latitud y entre los 64°-66° de longitud O, se manifiesta con expresiones morfológicas superficiales, frecuente actividad sísmica y con la ocurrencia de terremotos destructores, como por ejemplo, el Gran Terremoto de Sampacho (Córdoba) en 1934 de magnitud (Richter) M 6,0, y el de San Francisco del Monte de Oro (San Luis) en 1936, de magnitud (Richter) M 6,0 (Sagripanti *et al.* 2001).

Las deformaciones neógenas más importantes reconocidas, entre las latitudes de 28° y 33° S, en Argentina, están concentradas mayormente en la región comprendida entre el frente orogénico Andino y las Sierras Pampeanas. Como así también, en el sector de estudio, ubicado en el extremo sur de las Sierras Pampeanas de Córdoba, se han relevado evidencias de paleoterremotos en el registro estratigráfico, reconocido morfologías superficiales y estructuras deformacionales en sedimentos sueltos y de licuefacción, esto hace suponer que la actividad tectónica neógena-cuaternaria ha sido intensa. Por otra parte, el potencial sismogénico de las fallas presentes, es conocido sólo parcialmente, estimándose que no existe un conocimiento concreto sobre el riesgo sísmico en la mayoría de las poblaciones que tienen su emplazamiento en la región.

En la República Argentina los estudios de zonificación y microzonificación sísmica han sido realizados por el *Instituto*

Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). La zonificación propuesta ha sido elaborada a partir de un inventario de información histórica e instrumental de terremotos destructores y de un análisis probabilístico de los datos, para el período entre los años 1920 y 1976, dejando de lado los aspectos tectónicos y neotectónicos. Los mapas de zonificación y los coeficientes sísmicos determinados en esa época son los mismos que se usan en la actualidad.

En regiones de intraplaca, como la de estudio, solamente contar con el registro sísmico histórico e instrumental es insuficiente para reconstruir y comprender la sismicidad de una zona, ya que los intervalos de recurrencia de terremotos fuertes exceden ampliamente este período de registro, por lo tanto, se supone que el peligro sísmico podría estar siendo subestimado, como así también el riesgo sísmico asociado. Debido a esto, se considera que sumar información paleosísmica a los antecedentes sísmológicos, permite hacer un análisis con mayor certidumbre acerca del peligro sísmico asociado a fallas con actividad cuaternaria.

La región que comprende el departamento Río Cuarto, sur de la provincia de Córdoba, posee importantes antecedentes sísmológicos, ya que, fue epicentro de dos de los terremotos más destructivos ocurridos en esta zona, con magnitudes (Richter) M 5,5 y M 6,0. Asimismo, en este sector, han tenido ocurrencia al menos seis eventos sísmicos que superaron la magnitud (Richter) M 4,0 y más de cien microsismos superficiales de magnitud (Richter) M < 3,0 (Sagripanti *et al.* 2001), sin embargo, el mismo se encuentra dentro de la Zona 1, de Peligrosidad Sísmica Reducida de la República Argentina, establecida por el INPRES (Castano 1977).

El registro sísmico histórico e instrumental, que se ha logrado reconstruir, para la región comprende desde el año 1826 hasta el año 2006, superando el número de 130 entre sismos y

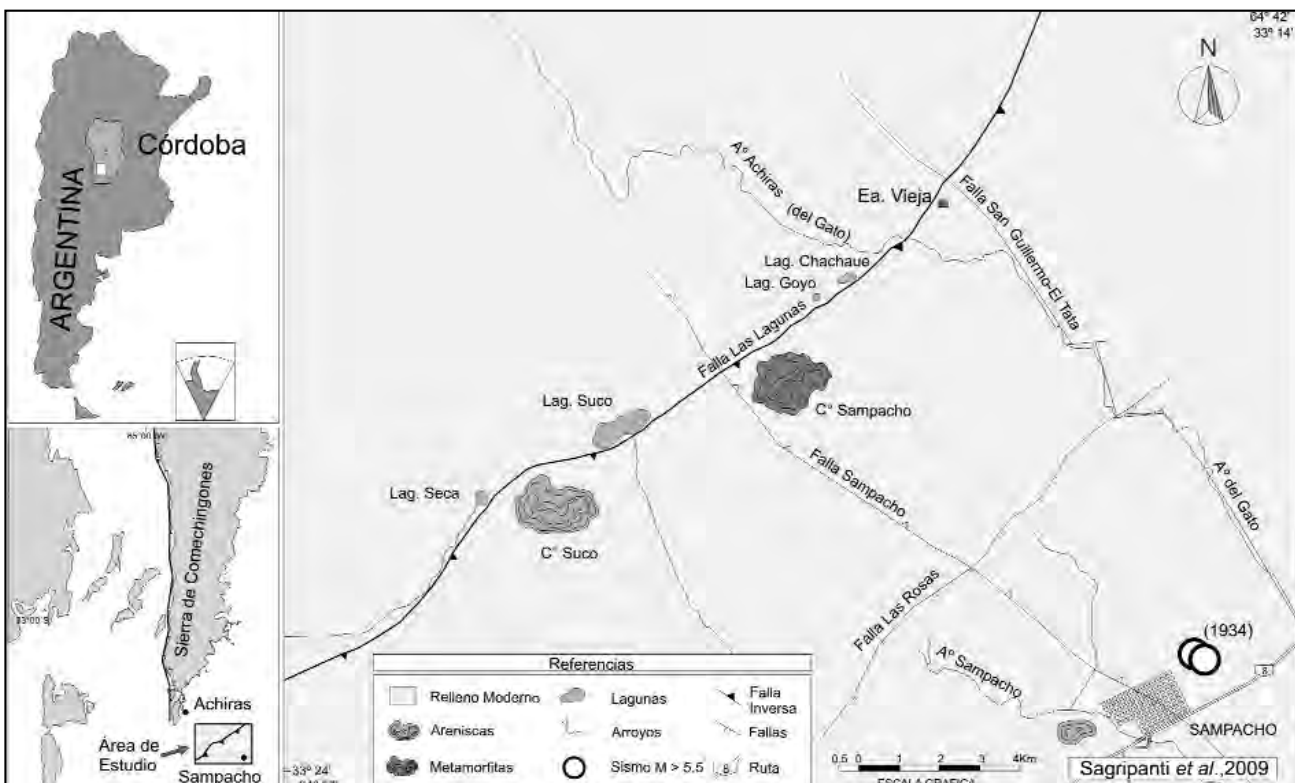


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio

microsismos. Por otra parte, por medio de investigaciones paleosismológicas se ha logrado reconstruir, parcialmente, la sismicidad prehistórica, que pone en evidencia la ocurrencia de paleoterremotos cuyas magnitudes (Richter), se estima, han sido entre $M 6,6$ y $M 6,9$ (Sagripanti 2006).

Los objetivos de la presente contribución son presentar los avances en el conocimiento de la sismicidad y paleosismicidad de un sector de la intraplaca Argentina y hacer un análisis sobre el estado del peligro y riesgo sísmico en la región sur de la provincia de Córdoba.

El área de estudio se ubica entre los $33^{\circ} 14' - 33^{\circ} 24'$ de latitud S, en el extremo sur de las Sierras Pampeanas de Córdoba y comprende el sector entre las últimas estribaciones de la sierra de Comechingones y la localidad de Sampacho, donde se encuentra la falla Las Lagunas con probada actividad cuaternaria. Esta estructura posee importantes expresiones morfológicas que ofrecen una invaluable información para lograr una mejor comprensión de la sismicidad y la paleosismicidad, de intraplaca, dentro de un contexto tectónico de subducción subhorizontal. Además, se presume que esta falla es la responsable del terremoto de magnitud (Richter) $M 6,0$ (1934), que destruyó en un 90% la localidad de Sampacho (Figura 1).

ANTECEDENTES

La creciente necesidad de aumentar el conocimiento sobre el potencial sismogénico asociado a fallas con actividad cuaternaria y el riesgo sísmico a la que están expuestas algunas poblaciones en la actualidad depende, en su gran mayoría, de los avances que se logren con las investigaciones paleosismológicas.

En regiones donde se dispone de escasa información sísmológica y donde las fallas no presentan evidencias claras de deformaciones recientes en superficie, la información obtenida por medio de estudios paleosismológicos posibilita la reconstrucción de la sismicidad prehistórica de una región (Bonilla 1988; Mc Calpin 1996).

Las zonas de borde de placa son las que, hasta la actualidad, han tenido un mayor desarrollo de estudios paleosismológicos, donde la actividad sísmica es frecuente y de mayor magnitud con relación a las zonas de intraplaca. En estas últimas, si bien los terremotos son de menor energía, no dejan de ser una importante amenaza para las poblaciones asentadas en las mismas, en algunos casos potenciadas por la falta de conocimiento y subestimación del peligro sísmico (Crone et al. 1997).

En la actualidad se ha concentrado la atención en estructuras de intraplaca y en regiones continentales estables, caracterizadas por sismicidad moderada o ausente, debido a la ocurrencia de terremotos sin actividad sísmica previa (Camelbeek y Meghraoui 1996; Crone et al. 1997). Esto pone de manifiesto la capacidad sismogeneradora de estructuras con largos intervalos de recurrencia, en las que la sismicidad por sí sola no permite estimar el peligro sísmico asociado. En regiones de intraplaca donde la recurrencia puede ser de varios miles de años, la estructura más activa (aquella, que registra movimientos más recientes) no suele ser la más peligrosa en términos de mayor probabilidad de ocurrencia de un evento (Costa 2004).

Las evidencias paleosísmicas recolectadas en la sierra de Comechingones y Sierra Chica de Córdoba permiten suponer la ocurrencia de terremotos que han tenido una magnitud Richter superior ($M \geq 6,5$) a los registrados en el período histórico (Costa y Vita Finzi 1996; Costa et al. 2001; Costa 2004). Además,

si se considera el contexto tectónico, los valores umbrales de magnitud estimados y la identificación de rupturas cosísmicas generadas por paleoterremotos, todo esto permitirá vincular con mayor certeza a eventos de magnitud (Richter) $M \geq 7,0$ en el ambiente precordillerano y de magnitud (Richter) $M \geq 6,5$ en las Sierras Pampeanas. Esto, sin dudas, es muy importante ya que podría modificar la zonificación sísmica vigente (Costa 2004).

Las contribuciones realizadas por estudios sísmológicos y neotectónicos desarrollados en el sector oriental de las sierras de Comechingones no son numerosos, sin embargo son importantes los trabajos realizados por Olsacher (1935), Mingo-rance (1987, 1991), Sagripanti et al. (1998, 2001, 2003, 2005), Sagripanti (2006) y Sagripanti y Villalba (2006).

MARCO GEOLÓGICO

Las unidades estratigráficas aflorantes en el área de estudio son el basamento cristalino Precámbrico-Paleozoico inferior-medio, compuesto por metamorfitas intruidas por cuerpos graníticos; sedimentitas pérmicas formadas por areniscas cuarcíticas de grano fino a medio y sedimentitas cenozoicas (arenas, limos y arcillas) de origen fluvial, eólico y lagunar.

En esta área ubicada en el borde suroccidental de la sierra de Comechingones, que comprende un sector entre las localidades de Achiras y Sampacho, se reconocen fallas cuyos rumbos preferenciales son en promedio de $030^{\circ}-050^{\circ}$ N y 120° N. Algunas de estas estructuras presentan evidencias de actividad neotectónica y en algunos sectores ejercen un importante control al escurrimiento superficial y al flujo del agua subterránea, favoreciendo el emplazamiento de lagunas en cadena.

Entre estas estructuras, la falla Las Lagunas es la más importante por su expresión y actividad cuaternaria manifiesta; es inversa de plano buzante al SE con rumbo NE-SO y su traza alcanza los 24 kilómetros de longitud. La morfología superficial de esta falla es una escarpa rectilínea, desarrollada en sedimentos loésicos, orientada enfrentando al noroeste y cuya altura varía entre 1 y 8 metros en sus distintas secciones. Asociadas a la escarpa principal se reconocen escarpas pequeñas, de aproximadamente 30 centímetros de altura, que se preservan a pesar de la erosión y de la importante intervención antrópica a la que están sometidas.

Además de esta expresión morfológica superficial, se reconocen estructuras cosísmicas tanto deformacionales como de licuefacción en sedimentos no consolidados. Todo esto hace suponer que la actividad neógena tiene continuidad hasta el presente en este sector de la intraplaca, y que afecta al basamento y a los sedimentos cuaternarios (Sagripanti 2006).

SISMICIDAD

El mapa vigente de Zonificación de la Peligrosidad Sísmica de la República Argentina está dividido en cinco zonas, denominadas 0, 1, 2, 3 y 4, correspondiendo a peligrosidad muy reducida, reducida, moderada, elevada y muy elevada, respectivamente (INPRES-CIRSOC-103 1983). Estas zonas resultan de la combinación de datos sísmológicos tanto históricos como instrumentales (Castano 1977; Castano y Giuliano 1994).

Sismicidad Regional

El área de las Sierras de Córdoba y San Luis se encuentra en una región en la cual los intervalos de recurrencia, de fuertes terremotos, normalmente superan los registros de la

sismicidad histórica y donde no se ha constatado, a excepción del Gran Terremoto de Sampacho de magnitud (Richter) M 6,0 (1934), que los eventos de mayor energía ocurridos hayan generado rupturas cosísmicas, como los terremotos de Deán Funes de magnitud (Richter) M 6,5 (1908), San Francisco del Monte de Oro de magnitud (Richter) M 6,0 (1936), Villa Giardino de magnitud (Richter) M 5,6 (1947) y Cruz del Eje de magnitud (Richter) M 6,7 (1955).

A los fines de poder realizar un análisis de la distribución epicentral de la sismicidad en la región, se realizó el inventario y clasificación de datos sismológicos históricos, instrumentales y de parámetros macrosísmicos, a partir de los catálogos del INPRES, de "Parámetros Sísmicos de Argentina" (Gregori y Kronrod, 1994) y de "Sismos del Dpto. Río Cuarto, Córdoba" (Sagripanti et al., 1998). Los registros recopilados son entre el año 1900 y 2003 para el Área Sismotectónica de las Sierras de Córdoba y San Luis y desde el año 1826 hasta el 2006 para la zona de estudio. Es oportuno aclarar que si bien se intentó disponer de la mayor cantidad de datos confiables, seguramente no se han obtenido la totalidad de los registros sismológicos existentes en esta región de la República Argentina. Sobre la base de los parámetros sismológicos disponibles de cada terremoto, se procedió a posicionarlos geográficamente en un mapa (Figura 2) de acuerdo a las coordenadas epicentrales asignadas, utilizando la simbología (círculos) apropiada para representar su tamaño o magnitud y tonos de grises para representar la profundidad hipocentral.

La determinación de las coordenadas de eventos sísmicos, normalmente, se realiza con distintos grados de precisión. Las coordenadas epicentrales por ejemplo varían entre unos pocos hasta 100 kilómetros, normalmente $\pm 10 - 20$ km. En tanto la profundidad hipocentral se determina con un grado menor de precisión que las coordenadas epicentrales. Para profundidades mayores de 70 km la exactitud es $\pm 10 - 20$ km y para menores de 70 km solo una red local de sismógrafos muy densa puede localizar hipocentros con una exactitud de $\pm 5 - 10$ kilómetros de profundidad, según *Karnik y Algermissen (1980)*. Esto indica que existe un importante grado de incertidumbre en la determinación de la posición del epicentro e hipocentro de un evento. Es probable que esta incertidumbre sea aún mayor en las provincias de San Luis y Córdoba, ya que no cuentan con una red sismológica adecuada.

Se suma a lo anterior que, para lograr un efectivo posicionamiento, como también la determinación del mecanismo focal correspondiente a un evento, es necesario que los sismógrafos que forman la red estén bien distribuidos en la esfera focal (360° de barrido), tengan una sensibilidad adecuada y trabajen en forma sincrónica. Esto no ocurría a principios del siglo pasado, en esa época los instrumentos eran de menor sensibilidad y estaban ubicados principalmente en el hemisferio Norte (*com. verb.*, Dra. Cristina Dimate). Por ello es posible que la determinación de los parámetros de los sismos más antiguos, ocurridos en Argentina, posean algún grado de inexactitud.

El análisis de la distribución epicentral de la sismicidad, indica que, en general la región sur de Córdoba y San Luis, está caracterizada por sismos cuyos epicentros, en su mayoría, están alineados con las sierras de San Luis y de Comechingones, con profundidades hipocentrales que corresponden a sismos superficiales e intermedios. Además, se puede reconocer que esta distribución posee un límite meridional, oriental, aproximadamente a la longitud de $63^\circ 45' O$, dado que al E de este límite no se ha registrado sismicidad histórica o instrumental.

La actividad sísmica presenta una mayor concentración, entre las localidades de Achiras y Sampacho, sector delimitado por dos importantes estructuras con rumbo meridional, la falla de Comechingones al O y la falla del Tigre Muerto al E. En este sector se registran sismos y microsismos con mayor frecuencia, cuya distribución hipocentral corresponde a sismos de foco superficial, entre 15 y 33 kilómetros de profundidad, estando ausentes los de foco profundo (Figura 2).

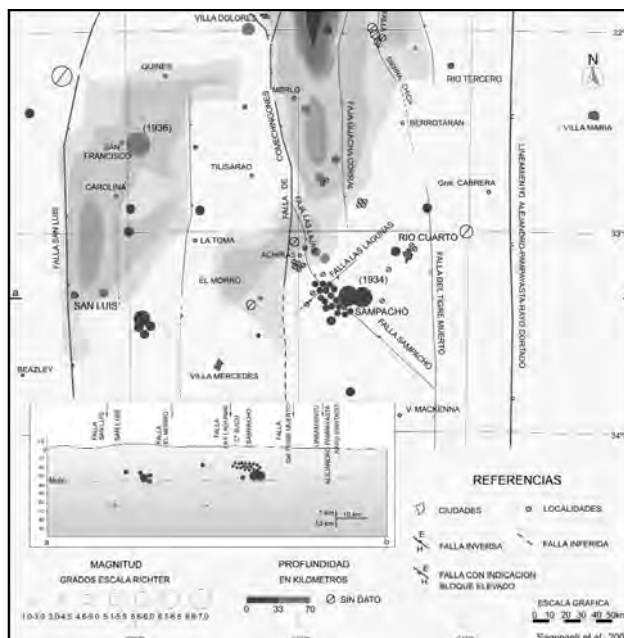


Figura 2. Distribución de sismos con epicentros en la región sur de Córdoba. Perfil con la distribución hipocentral a la latitud de $33^\circ 20' S$

Si bien el registro de eventos sísmicos en la región occidental de Córdoba y oriental de San Luis es numeroso, esta actividad es generalmente aislada. No obstante es importante resaltar períodos donde ésta ha sido más frecuente. Un período de mayor actividad sísmica se registró en proximidades de las localidades Fraga y Eleodoro Lobos (San Luis), con cuatro movimientos sísmicos importantes, los días 29 de Julio, 03, 05 y 06 de Agosto de 1996, alcanzando la magnitud (Richter) de M 5,1, M 3,9, M 4,2 y M 4,1 respectivamente, con intensidades epicentrales que varían entre III y V en la escala Mercalli Modificada (MM), en ningún caso la profundidad de los hipocentros superó los 33 kilómetros.

En la región del valle de Calamuchita entre los meses de Julio y Agosto del año 1997, han tenido ocurrencia tres eventos que fueron registrados próximos a la localidad de Santa Rosa, cuyas intensidades epicentrales fueron entre III y IV (Mercalli Modificada) y sus magnitudes (Richter) entre M 3,6 y M 4,1.

Otra situación de similares características ocurrió en la localidad de Alpa Corral, a 50 kilómetros al NO de la ciudad de Río Cuarto. El día 06 de Julio de 1997 tuvo ocurrencia un sismo de magnitud (Richter) M 4,3 e intensidades que variaron entre III y IV (Mercalli Modificada) y dos fuertes remezones asociados a este evento principal de intensidades II y III (Mercalli Modificada). La profundidad hipocentral expresada en la parte de la fecha por el INPRES fue de 35 kilómetros.

Sismicidad Local

Si bien el área de estudio se encuentra dentro de la zona de peligrosidad reducida, ha sido epicentro en el mes de Junio de 1934, de una de las más importantes crisis sísmica acontecida en la intraplaca de Argentina, con la ocurrencia de dos terremotos destructores considerados de los más fuertes registrados en la Zona 1. Además, en la región han tenido ocurrencia al menos seis sismos que superaron la magnitud (Richter) M 4,0 y la actividad microsísmica es frecuente (Sagripanti et al. 2001).

Sismicidad histórica

El día 31 de Enero de 1826, se produjeron dos fuertes movimientos que afectaron a la población de Río Cuarto, ocasionando serios daños en la iglesia principal, construida en 1820 (Bischoff 1970). En una carta del cura párroco de Río Cuarto de esa época (Com. verb. Sr. Héctor Amaya, Diario Puntal), consta que los terremotos habrían tenido origen en Sampacho, que hasta ese momento estaba conformado solo por un caserío y el fuerte San Fernando. Este registro sismológico, hasta la actualidad, sería el más antiguo. De acuerdo a los daños causados, citados en la carta, se estima que la intensidad probablemente haya sido entre VIII y IX (Mercalli Modificada).

Sismicidad instrumental

Los sismos con epicentro en la región, de magnitud (Richter) $M > 4,0$, que han sido registrados en forma instrumental, se presentan resumidos a continuación:

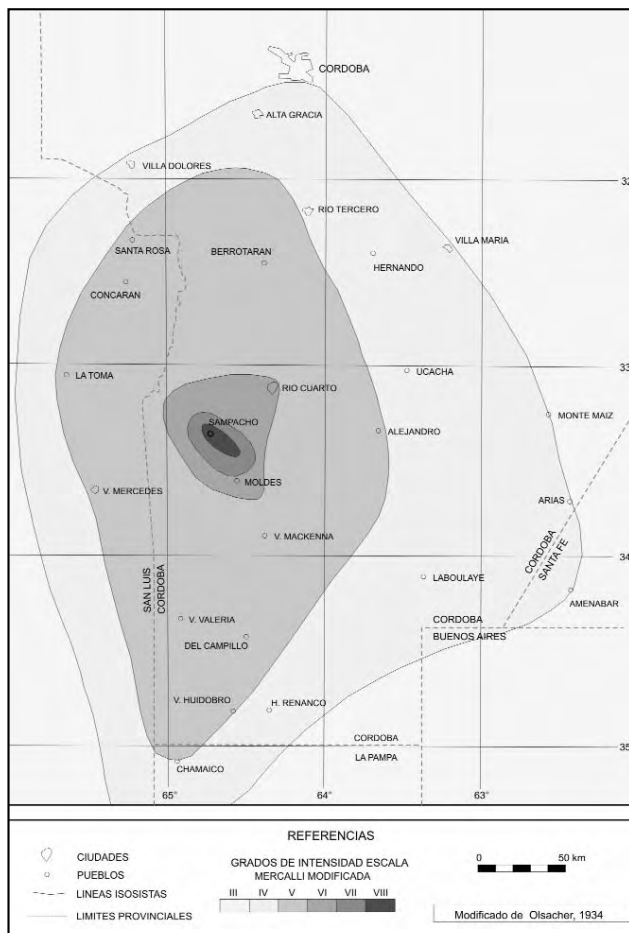


Figura 3. Mapa de isosistas correspondiente al Gran Terremoto de Sampacho del año 1934

En los días 10 y 11 de Junio de 1934, con un intervalo menor a tres horas, ocurrieron en la localidad de Sampacho dos terremotos superficiales. Las magnitudes (Richter) fueron de M 5,5 y M 6,0 y la intensidad epicentral asignada entre VIII-IX (Mercalli Modificada). Esta situación de crisis fue conformada también por dos sismos premonitores con epicentro en la localidad de Achiras y Cerro Áspero (ubicado a 15 kilómetros al NO de Sampacho) el día anterior y más de cien réplicas (aftershocks) en los días siguientes.

El valor tan alto de intensidad se estima que se debe a la acción de distintos factores: 1) cuando ocurrió el segundo sismo, de una magnitud mayor, según el análisis de los sismogramas de Villa Ortúzar, la mayoría de las construcciones ya se encontraban fisuradas y debilitadas, 2) la mayoría de las construcciones eran de adobe y ladrillos de primera cocción y 3) además el pueblo estaba edificado sobre arenas finas, que poseen un alto potencial de licuefacción (Olsacher 1935).

La energía liberada por estos terremotos destruyó el 90% de las construcciones del pueblo, los muros más afectados fueron los transversales a la falla Sampacho que se derrumbaron, mientras que los muros paralelos a ésta se agrietaron formando un ángulo de 45° con la horizontal. La zona de máxima conmoción quedó restringida a una elipse de 25 por 5 kilómetros, lo que hizo suponer que los hipocentros de los terremotos fueran de una profundidad aproximada 20 kilómetros, considerados superficiales (Olsacher 1935).

La agitación generada por el Gran Terremoto de Sampacho, considerado superficial, fue percibida en sitios bastantes distantes del epicentro con cierta intensidad. Entre éstos, se pueden citar numerosas localidades de la provincia de Córdoba como Moldes, Villa Valeria, Del Campillo, Alejandro, Río Cuarto, Monte Maíz, Arias, Laboulaye y Hernando. En la provincia de La Pampa, en Chamaicó y Telén, y en las provincias de San Luis, Buenos Aires y Santa Fe. Las curvas isosistas (Figura 3) correspondientes a la distribución de las intensidades de este terremoto, adquieren una forma asimétrica. Estas curvas se extienden tanto al N, E y S, hasta al menos 250 kilómetros del epicentro, mientras que hacia el O sólo alcanzan hasta unos 100 kilómetros. Probablemente esta asimetría en la distribución de las intensidades está condicionada por los distintos medios (zócalo cristalino y paquete sedimentario) que atraviesa el frente de ondas sísmicas.

El día 19 de Junio de 1967, a la hora 15:13:56, un sismo de magnitud (Richter) M 4,4, con epicentro próximo a la localidad Paunero, produjo mucha alarma en el sur del departamento Río Cuarto.

El día 4 de Noviembre de 1967, a la hora 13:00:45, un movimiento sísmico de magnitud (Richter) M 5,1, ocurrió próximo a la ciudad de Río Cuarto, cuyo epicentro fue en las inmediaciones de la localidad de Charras.

El día 14 de Febrero de 1970, a la hora 07:51:47, ocurrió un sismo de magnitud (Richter) M 4,5, cuya profundidad hipocentral fue de 30 kilómetros, con epicentro en el sur cordobés, en la zona de Washington, produciendo mucha alarma en las localidades vecinas.

El día 28 de Enero de 1975, a la hora 02:32:00, un movimiento sísmico de magnitud (Richter) M 4,1, cuya profundidad hipocentral fue de 33 kilómetros, tuvo ocurrencia en la zona de San José, distante a 15 kilómetros al Oeste de la ciudad de Río Cuarto.

El 25 de Marzo de 1987, a la hora 22:43:00, se registró un sismo de magnitud (Richter) M 4,5, cuya profundidad hipocentral fue de 33 kilómetros, con epicentro próximo a la localidad de Baigorria. Se percibió en la ciudad de Río Cuarto un ruido subterráneo acompañado por una leve vibración que causó mucha alarma en la población.

El día 06 de Julio de 1996, a la hora 02:58:00, en Alpa Corral, localidad ubicada en la ladera oriental de las sierras de Comechingones, ocurrió un sismo de magnitud (Richter) M 4,3 e intensidad entre III y V (Mercalli Modificada), cuya profundidad hipocentral fue de 35 kilómetros.

Microsismicidad

El registro de la microsismicidad, aporta una valiosa información sobre los parámetros sísmicos de eventos de magnitud (Richter) $M < 3,0$, permitiendo obtener un mayor conocimiento acerca de la sismicidad local.

En el entorno de la localidad de Sampacho la actividad microsísmica es muy frecuente. Se manifiesta con ruidos subterráneos y microtemblores de los que no se tiene registro instrumental, debido a que el sector cuenta con un sismógrafo que registra solamente eventos de magnitud (Richter) $M \geq 3,0$. Es por ello que a partir del año 1986 se lleva un registro de parámetros macrosísmicos en la zona rural y la localidad de Sampacho, y desde 1995 se sistematizó la adquisición de datos utilizando una planilla que se distribuyó en la zona rural y en todos los destacamentos de policía de los departamentos Río Cuarto y Juárez Celman. El registro actualmente supera los cien microsismos (Sagripanti et al. 2001).

Sobre la base de la información que aportan los parámetros macrosísmicos, recolectados, se estima que el tamaño de los microsismos es de magnitud (Richter) $M < 3,0$. La intensidad que se les asigna, siguiendo el criterio de Bolt (1995), a estos eventos es entre II y III (Mercalli Modificada) y III en la escala Medvedev-Shponcheuer-Karpik (MSK-64).

Paleosismicidad

La falla Las Lagunas, ubicada en el área de estudio, presenta importantes evidencias de actividad cuaternaria, como su expresión morfológica superficial y deformaciones, de escala mesoscópica, en sedimentos no consolidados. Debido a la importancia y a las características de estas evidencias, asociadas a esta estructura, se la escogió para realizar estudios paleosismológicos, tendientes a reconstruir su pasado sísmico, por medio de la apertura de trincheras a lo largo de su traza (Sagripanti 2006).

En el relevamiento de las paredes de las trincheras se identificaron estructuras deformacionales de sedimentos lagunares y loésicos, y paleolicuefacción de arenas finas. Estas estructuras cosísmicas, consideradas "sismitas", reveladas son inyecciones de arena (diques clásticos, volcanes, cráteres), pliegues, grietas de tensión y fallas.

La información paleosismológica obtenida permitió extender el registro temporal de la sismicidad de la falla Las Lagunas y posibilitó avanzar en la caracterización de su potencial sismogénico. Como resultado de la reconstrucción de la sismicidad prehistórica e histórica, surgieron un total de, al menos, seis eventos fuertes que han tenido ocurrencia en el sector.

Se interpretó que un evento hipotético, denominado Ev1, ocurrió con anterioridad al límite Plioceno-Pleistoceno. Un segundo evento, denominado Ev2, afectó a las formaciones Pam-

peano (Pleistoceno medio) y Chocancharava (Pleistoceno medio-superior).

Posteriormente, un tercer evento denominado Ev3, ocurrió entre los 3.700 y 2.820 a AP, afectando a la formación Laguna Oscura, cuya edad es 3.700 a AP (datación TL), la formación de una protoescarpa monoclin y de fisuras de tensión subverticales, constituyen fenómenos asociados. La componente vertical, de este evento, es un desplazamiento de 0,30 metros. Un cuarto evento sismogénico, denominado Ev4, ocurrió entre 2.820 y 1.780 a AP, éste habría sido el disparador que afectó, de manera importante, toda una secuencia lagunar (edad radio-carbónica 2.820 ± 60 a AP). Otro evento sismogénico, identificado como Ev5, ocurrido entre 1.780 y 1.000 a AP, se reconoció en un nivel de arcillas deformado (edad radio-carbónica 1.780 ± 50 a AP). Finalmente, tiene ocurrencia otro evento destructor histórico en el año 1934, identificado como Ev6, asociado a esta falla (Sagripanti 2006).

En la gráfica (Figura 4) se presenta en forma sintetizada la distribución temporal de los terremotos interpretados.

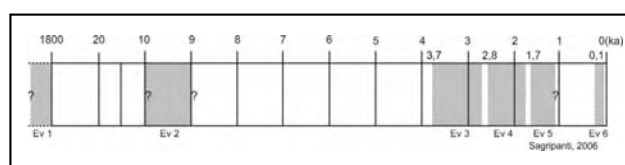


Figura 4. Distribución temporal de terremotos interpretados

El intervalo de recurrencia de fuertes paleoterremotos, se considera uno de los parámetros fundamentales que describe la paleosismicidad de una falla y un componente crítico de la evaluación del peligro sísmico (Mc Calpin, 1996). Se ha determinado que el período de recurrencia, principalmente, para la última parte del Holoceno (3.700 - 4.000 a AP) es entre 925 y 1.233 años, aproximadamente. Se interpretó también que puede ser éste un período de mayor actividad de la falla en el cual existe una tendencia a que los sismos se concentren, generando un patrón de agrupamiento (*clustering*) temporal de terremotos (Sagripanti 2006). Si bien el intervalo de recurrencia es prolongado, se desconoce el pasado sísmico de otras fallas geológicas ubicadas en la región pudiendo estar alguna de estas estructuras en su etapa pre-sísmica.

La magnitud de un paleoterremoto es considerada como otro de los parámetros necesarios para determinar el potencial sismogénico de una falla. Por lo tanto la posibilidad de examinar el desplazamiento producido por paleosismos, que usualmente se manifiesta como superficies de rupturas o deformaciones asociadas, permite escalar el tamaño del terremoto por medio de formulas empíricas (Bonilla 1988; Reiter 1988).

Es por ello que, se determinó la paleomagnitud de uno de los eventos, interpretados con mayor certidumbre, aplicando formulas empíricas (Bonilla et al. 1984; Wells y Coppersmith 1994) que consideran el desplazamiento vertical y longitud de ruptura. Los valores de magnitud (Richter) obtenidos son entre M 6,6 y M 6,9, y la magnitud del momento sísmico $M_w = 7,0$.

ANÁLISIS DEL PELIGRO Y RIESGO SÍSMICO EN LA REGIÓN

Los antecedentes sismológicos y paleosismológicos, puestos en esta contribución, ponen en evidencia que la sismicidad de la región es importante, como así también, que el

potencial sismogénico de algunas fallas geológicas se conoce sólo parcialmente. Esto hace suponer que no se conoce, con total certeza, el estado del peligro y del riesgo sísmico al que están expuestas las poblaciones emplazadas en la región.

En la zonificación de la peligrosidad sísmica de Argentina, realizada por el *INPRES*, la metodología usada no ha contemplado los aspectos tectónicos y geotectónicos, solamente ha considerado los registros sismológicos entre los años 1920 y 1976. Con éstos, se realizó un análisis probabilístico que consideró las intensidades máximas registradas dentro del territorio nacional (*Castano 1977; INPRES-CIRSOC-103 1983*). Debido a esto, se supone que, el peligro sísmico podría estar siendo subestimado en algunas regiones.

El grado de peligrosidad, de cada zona, fue calculado mediante la aplicación de formulas empíricas, que utilizan como valor de entrada la intensidad máxima registrada en cada una de ellas. De esto resultó la aceleración sísmica correspondiente a cada zona y que se expresa como un porcentaje de la aceleración de la gravedad (*g*). De este análisis se desprende que la aceleración asignada a la zona, donde se encuentra el área de estudio, ha sido considerando una intensidad de VII (Mercalli Modificada), a la que le corresponde una aceleración de 0,10 *g* (*Castano 1977*).

La estimación de la aceleración, para la zona de estudio, se puede abordar también con valores de intensidades correspondientes al Gran Terremoto de Sampacho, de magnitud (Richter) M 6,0, citadas en los reportes de *Ólsacher (1935)* y *Zamarbide y Castano (1978)* que alcanzaron entre VIII y IX (Mercalli Modificada). Si se usa el criterio aplicado para el cálculo de la aceleración, a partir de la intensidad máxima (*Zamarbide y Castano 1978*), a las intensidades citadas les correspondería una aceleración entre 0,15 *g* y 0,30 *g*.

Otra forma de estimar la aceleración, para establecer un marco comparativo, es utilizando la escala de Intensidades Mercalli Modificada Abreviada de Bolt (1995), que establece para una intensidad de VIII una aceleración entre 0,25 *g* y 0,30 *g*.

El valor de la aceleración esperada también se estimó a partir de la información paleosísmica obtenida, esta indica que la magnitud para un terremoto potencial, cuya fuente sea la falla Las Lagunas, puede ser entre M 6,6 y M 6,9 (Richter). Aplicando estos valores de magnitud en las formulas empíricas utilizadas para cálculo de la aceleración de *Castano (1977)*, se determinó que la aceleración máxima, para un terremoto de estas características, sería entre 0,21 *g* y 0,27 *g*.

Los valores obtenidos, en los análisis anteriores, permiten plantear que el valor de aceleración, esperado para la zona de estudio y su entorno, será aproximadamente entre 0,15 *g* y 0,30 *g*.

En el análisis del riesgo sísmico se reconoce, en la mayoría de las poblaciones, un importante grado de vulnerabilidad. Esto es debido, principalmente, a que no se realizan actividades de prevención sísmica, hay una falta de control en la aplicación de las normativas de construcción sismorresistente y un estado de negación sísmica de los habitantes. Sumado a esto, los coeficientes sísmicos de diseño asignados a cada zona con los que se calculan las "fuerzas horizontales equivalentes o esfuerzo de corte en la base de la construcción", están en función de las aceleraciones esperadas en las distintas zonas sísmicas (*INPRES-CIRSOC-103 1983*).

Por lo tanto, sobre la base de lo anteriormente planteado, es probable que la resistencia de las construcciones edilicias

sea sensiblemente menor a la que deberían tener y su respuesta será de mayor debilidad frente a la agitación de un potencial terremoto fuerte. Todo lo anterior, pone de manifiesto un importante grado de vulnerabilidad sísmica.

Finalmente, si consideramos que el riesgo sísmico está en función de variables como el peligro (amenaza), la susceptibilidad y la vulnerabilidad sísmica, suponemos que la única forma de reducir el riesgo es disminuyendo la vulnerabilidad. Esto, se debe a que las primeras variables dependen de la ocurrencia del fenómeno natural y de la respuesta del medio físico; por lo tanto no se pueden modificar y solamente podemos avanzar en su conocimiento, mientras que la variable en la que podemos trabajar para disminuirla es la vulnerabilidad.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

- Se propone considerar como "límite meridional, oriental, de sismicidad" para la latitud de 33° S, a la dislocación del zócalo correspondiente al lineamiento Alejandro - Pampayasta - Rayo Cortado.
- Se considera que probablemente la influencia de la horizontalización de la placa de Nazca, en la intraplaca de Argentina a los 33° de latitud S, puesta de manifiesto por deformaciones y la frecuente actividad sísmica superficial, es hasta la longitud de 63° 45' O.
- La falla Las Lagunas evidencia una importante actividad sísmica, entre leve, moderada y fuerte, desde al menos el Pleistoceno hasta la actualidad.
- Los antecedentes de sismicidad y paleosismicidad de este sector de la intraplaca, están indicando que el potencial sismogénico de la región, no se corresponde con el asignado a la Zona 1, el mismo es mayor.
- Es probable que un terremoto potencial, destructor, con epicentro en la región suroeste de Córdoba, exceda en un 100% la aceleración esperada.
- Los antecedentes sismológicos y paleosismológicos están indicando que, terremotos futuros, en este sector de la intraplaca a la latitud de 33° S, podrían alcanzar magnitudes (Richter) \geq M 6,5 (*Costa 2004; Sagripanti 2006*).
- Es opinión de los autores que, la ocurrencia de un evento sísmico con epicentro en el extremo sur de las sierras de Córdoba, que alcance una magnitud (Richter) \geq M 6,5, podría afectar a un mayor número de poblaciones, ubicadas al S de la provincia de Córdoba, al E de San Luis, al N de La Pampa, al NO Buenos Aires y al SO de Santa Fe. Probablemente genere mayor conmoción y daños, que el Gran Terremoto de Sampacho, debido a la presencia de estructuras edilicias construidas en forma inapropiada para resistir el *shaking* generado por un terremoto de esta magnitud y también por la falta de conciencia sísmica de la población. Por lo tanto, es necesario comenzar a planificar, proyectar y construir, tanto viviendas y edificios, como puentes, diques, etc., de manera que resistan este eventual nivel de energía sísmica.
- Si bien se ha avanzado en el conocimiento del potencial sismogénico de una estructura con actividad cuaternaria, ubicada en la zona de estudio, que ha permitido estimar el período de recurrencia y un umbral de magnitud mínima esperada, se desconoce el pasado sísmico de otras secciones de la falla en estudio, como de otras fallas

geológicas ubicadas en la región, pudiendo estar alguna de estas estructuras en su etapa pre-sísmica. Por lo tanto es necesario avanzar con estudios para aumentar el conocimiento sobre el peligro sísmico y con actividades de prevención en las poblaciones de la región.

El riesgo sísmico que probablemente poseen algunas ciudades o pueblos de la región, podría ser reducido si se realizan estudios y trabajos para disminuir la vulnerabilidad sísmica.

Es opinión de los autores que se debería, en forma urgente, analizar y evaluar la posibilidad de modificar la categoría de peligrosidad sísmica, vigente, en la región suroeste de Córdoba. Esto, sobre la base de los antecedentes de sismicidad y paleosismicidad, que, están indicando mayores niveles de energía que los considerados antiguamente, en la zonificación sísmica. Por lo tanto, se estima que el sector tendría que ser categorizado como zona de peligrosidad moderada a elevada (Zona 2 ó 3).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BISCHOFF, E., 1970

Historia de la Provincia de Córdoba.
Tomo I.

BOLT, B A., 1995

Earthquakes.
W.H-Freeman and Co. 331p. New York.

BONILLA, M., 1988

Minimum earthquake magnitude associated with coseismic surface faulting.
Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 25, p. 17-29.

BONILLA, M., R. MARK Y J. LIENKAEMPER, 1984

Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement.
USGS. *Open-File Report 84-256. Version 1.1.*

CAMELBECK, T. Y M. MEGRHAOU, 1996

Large earthquakes northern europe: More likely than once thought.
OS, 42: p. 405-409.

CASTANO, J. C., 1977

Zonificación sísmica de la República Argentina.
Instituto Nacional de Prevención Sísmica. Publicación Técnica N° 5, 42 p.

CASTANO, J. C. Y A. GIULIANO, 1994.

La prevención sísmica en la República Argentina.
Conferencia interamericana sobre reducción de desastres naturales. Cartagena de Indias Colombia. 24 p.

COSTA, C. Y C. VITA FINZI, 1996

Late holocene faulting in the southeast Sierras Pampeanas of Argentina.
Geology, v 24, n12, p. 1127-1130.

COSTA, C., V. MURILLO, G. SAGRIPANTI, Y C. GARDINI, 2001

Quaternary intraplate deformation in the southeastern Sierras Pampeanas, Argentina.
Journal of Seismology 5:p. 399-409.

COSTA, C., 2004

¿Microtectónica en el Cuaternario?: Métodos y aplicaciones de la paleosismología.
Rev. Asoc. Geol. Arg., Serie D: Publicación Especial N° 7: p. 9-19.

CRONE, A., MACHETTE, M., Y R. BOWMAN, 1997.

Episodic nature of earthquake activity in stable continental regions revealed by paleoseismicity studies of Australian and North American Quaternary faults.
Australian Journal of Earth Sciences, 203-214.

GREGORI, D. Y T. KRONROD, 1994

Catálogo de parámetros sísmicos de Argentina.
Revista de Ciencias de la UNSJ.

INPRES-CIRSOC-103, 1983.

Normas Argentinas para Construcciones Sismorresistentes. Construcciones en General.
INPRES. Centro de investigación de los reglamentos nacionales de seguridad para las obras civiles. Parte I. 109 p.

JORDAN, T., B. ISACKS, R. ALLMENDINGER, J. BREMER Y V. RAMOS, 1983

Andean Tectonics related to geometry of subducted Nazca Plate
Geological Society of America Bulletin, 94, p. 341-361.

JORDAN, T. Y R. W. ALLMENDINGER, 1986

The Sierras Pampeanas of Argentina; a modern analogue of Rocky Mountain foreland deformation.
American Journal of Science 286, p. 737-764.

- KARNIK, V. y S. T. ALGERMISSEN, 1980
Zonificación sísmica. Terremotos: Evaluación y mitigación de su peligrosidad.
Public. UNESCO. Ed. Blume. 360 p.
- MC CALPIN, J., 1996
Paleoseismology, Acad Press. 587 p.
- MINGORANCE, F., 1987
Operativo sísmológico móvil con motivo del sismo ocurrido el 24 de Marzo de 1987 en Sampacho, Córdoba.
INPRES. Informe Técnico 14 p.
- MINGORANCE, F., 1991
Análisis y evaluación del tectonismo reciente asociado a la falla Sampacho, provincia de Córdoba, Argentina Central.
Instituto Panamericano de Geofísica e Historia de México. N° 35. p. 13-39.
- OLSACHER, J., 1935
El terremoto de Sampacho, Pcia. de Córdoba.
Revista del Museo de Ciencias Naturales. Año 1 N° 1. Córdoba. 19 p.
- RAMOS, V., 1999.
Rasgos estructurales del territorio argentino. Geología Argentina.
Anales 29 (24): p. 715-784. Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- REITER, 1988
Earthquake hazard analysis.
Columbia University Press. 241p.
- SAGRIPANTI, G., ORIGLIA, D. y O. CAMPANELLA, 1998
Sismicidad de una región de intraplaca, departamento de Río Cuarto, Provincia de Córdoba. Argentina.
Actas Conferencia Internacional "Sistemas modernos de preparación y respuesta ante riesgos sísmicos, volcánicos y tsunamis". Santiago. Chile. P. 281-293.
- SAGRIPANTI, G., COSTA, C., ORIGLIA, D. y H. SCHIAVO, 2001
Avances en la caracterización del peligro sísmico en el dpto. Río Cuarto, Córdoba. Argentina.
IV Congreso de Geología y Minería de la sociedad Cubana de Geología, GEOMIN 2001 Cuba. Actas: CD.
- SAGRIPANTI, G., D. VILLALBA, V. GROSSO y R. DAGA, 2003.
Análisis morfológico de escarpas, aplicado a la reconstrucción de la sismicidad prehistórica de la falla Las Lagunas, Sampacho, Córdoba.
II Congreso Nacional de Cuaternario y Geomorfología. Tucumán. Argentina. Tomo de Actas, p. 369-377.
- SAGRIPANTI, G., H. SCHIAVO, C. COSTA, D. VILLALBA, R. DAGA y C. RODRÍGUEZ, 2005.
Paleoterremoto en el sector sudeste de las sierras Pampeanas Orientales, revelado por deformaciones de depósitos lagunares Holocenos.
XVI Congreso Geológico Argentino. La Plata. Tomo 4: p. 457-462.
- SAGRIPANTI, 2006
Neotectónica y peligro sísmico de la región de Sampacho, departamento Río Cuarto. Provincia de Córdoba.
Inédito. UNRC. Tesis Doctoral. 300 p.
- SAGRIPANTI, G., y D. VILLALBA, 2006.
Estructuras deformacionales en sedimentos no consolidados asociadas a terremotos prehistóricos.
Falla Las Lagunas, Sampacho. Córdoba.
III Congreso Nacional de Cuaternario y Geomorfología. Córdoba, 1, p. 377-386.
- WELLS, D. y K. COOPERSMITH, 1994
New empirical relationships among magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture area and surface displacement.
Bull Seism Soc. Am. 84, p. 974-1.002.
- ZAMARBIDE, L. y C. CASTANO, 1978.
Determinación de los coeficientes sísmicos zonales para la república Argentina.
Publicación Técnica N° 6, INPRES. 20p.



Aplicación de un sistema de geoindicadores para la evaluación de la calidad ambiental en agroecosistemas

Sudeste de la provincia de Buenos Aires, República Argentina

Bó, M. J.^{1,4}, del Río, J. L.¹, López de Armentia, A.¹, Cionchi, J. L.^{1,2}, Osterrieth, M.¹, Álvarez, M. F.³ - Camino, M.¹

Recibido: 02 de Mayo de 2007 • Aceptado: 06 de Abril de 2009

Resumen

El presente trabajo propone el desarrollo de un sistema de indicadores ambientales a fin de establecer la calidad ambiental de los recursos suelo y agua, en la cuenca del arroyo y la laguna de Los Padres. Además se analizan los cambios en la calidad del agua en los últimos 20 años. La citada cuenca se localiza en el Partido de General Pueyrredón, en el sudeste bonaerense.

La metodología aplica el modelo de Presión, Estado y Respuesta sobre los recursos mencionados, los cuales se evalúan para las funciones del ambiente, Fuente de recursos y Sumidero. Especialmente los resultados se expresan a nivel de Unidades Geoambientales (escala 1:50.000) establecidas a partir del uso del suelo.

La aplicación de los índices en la actualidad reveló que la mayor calidad ambiental de los recursos suelo y agua se registró en la unidad Conservación. En oposición se observó que los suelos y el agua en los cultivos intensivos presentaron el valor más bajo.

La aplicación de los indicadores de Estado al agua como recurso indicó que las zonas ganaderas y las agrícolas ganaderas presentaron una disminución significativa en este índice. En cambio las áreas restantes se han mantenido en valores semejantes.

La aplicación de un sistema de indicadores ambientales en agroecosistemas como el de la cuenca de la Laguna de los Padres ha permitido establecer con claridad los efectos de las distintas prácticas productivas sobre los recursos suelo y agua. El empleo de indicadores de modo diacrónico presenta la dificultad de la obtención de valores históricos confiables y apropiados.

Palabras clave: Indicadores, Agroecosistemas, Recursos suelo y agua .

Abstract

The present work proposes the development of a system of environmental indicators in order to establish the environmental quality of water and soil resources in "de Los Padres" watershed. Changes in the water quality during the last 20 years are also analysed. The studied area is located in General Pueyrredón County, in the Southeast of Buenos Aires Province.

The methodology applies the model of Pressure, Condition and Response on the mentioned resources, which are evaluated for the environmental functions, Source of resources and Drain. Spatially the results are expressed at level of Geoenvironmental Units determined by soil use (scale 1:50,000) and revealed that greater environmental quality of water and soil resources was registered in the Conservation unit. In contrast, the same quality values in intensive farming areas were the lowest.

The application of the Condition indicators to water as a resource revealed that stockbreeding and agricultural areas presented a significant reduction of this index. The remaining areas have conserved similar values.

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.

✉ mjbo@mdp.edu.ar

The application of an environmental indicators system to agro-ecosystems as the one of the Laguna de los Padres basin has allowed setting the effects of different productive practices on water and soil resources. The use of indicators in a diachronic way presents difficulty to obtain appropriate and accurate historical values.

Keywords: indicators, agro ecosystems, soil and water resources.

INTRODUCCIÓN

En 1992, the International Union of Geological Sciences (IUGS) impulso a través de su comisión COGEOENVIRONMENT (Comisión on Geological Sciences for Environmental Planning) el desarrollo de indicadores geológicos para ser aplicados a reportes ambientales y manejo de ecosistemas (Berger y Lams, 1996).

Los agroecosistemas de la llanura pampeana han sufrido un uso intensivo e incremental de sus recursos naturales, en particular el agua y los suelos, que puede tener como consecuencia el deterioro de su calidad ambiental desde la segunda mitad del siglo XX a la fecha.

El presente trabajo trata sobre la aplicación de un sistema de indicadores geoambientales en la cuenca de la Laguna de Los Padres a los fines de establecer la calidad geoambiental de los recursos suelo y agua, y en segundo término analizar los cambios en la calidad del agua en los últimos 20 años.

La cuenca del arroyo y la laguna de los Padres ha sido objeto de estudios de índole geoambiental desde hace más de 20 años (Cionchi et al., 1982; del Río et al., 1993, Giampietri, 1995). A lo largo de su historia reciente la cuenca ha sido objeto de una intensa actividad agrícola y ganadera. En la actualidad, en el área coexisten diferentes tipos de usos y explotaciones entre las que se destacan: asentamientos urbanos, explotaciones agrícola-ganaderas extensivas e intensivas y reservas naturales.

OBJETIVO

Aplicar un sistema de indicadores ambientales a los efectos de cuantificar la calidad ambiental en los recursos suelo y agua, y estimar la variación espacio temporal para este último recurso.

ANTECEDENTES Y MARCO CONCEPTUAL

Un indicador ambiental es una variable que provee una información agregada, sintética sobre un proceso o fenómeno determinado más allá de su propio significado. Debe además atender a un claro interés social ya que asisten potencialmente a la toma de decisiones. Asimismo, para que sean aplicables, han de ser claros, simples y universales. En particular para el recurso agua deben ser parámetros representativos de los procesos claves, susceptibles de cambios en el tiempo, aceptables y prácticos de medir (SCOPE, 1995).

Según Edmunds (1996), la variación en la calidad de los recursos hídricos puede ser evaluada a través de indicadores ambientales donde los cambios en los procesos físicos y químicos pueden ser considerados como probables indicadores. Los indicadores son medidas de los procesos y fenómenos que ocurren en la superficie o sub-superficiales cercanos a ésta que varían significativamente en un periodo inferior a 100 años y proveen información relevante para la evaluación ambiental, tal la definición de la International Union for Health Sciences (IUGS).

Por su parte los suelos, sometidos a prácticas agrícolas continuas, intensivas y altamente mecanizadas, presentan variaciones en parámetros indicadores de degradación física; de degradación química por desbalances entre la intensidad del cultivo y uso de fertilizantes y enmiendas y de degradación biológica por pérdidas de diversidad y/o predominio de grupos bióticos menos beneficiosos.

UBICACIÓN

La zona de estudio comprende la cuenca del arroyo y la laguna de los Padres cuya superficie total es de 105.5 km², la cual se encuentra en el Partido de General Pueyrredón, en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. Esta cuenca se encuentra a unos 25 Km de la ciudad de Mar del Plata y sus coordenadas extremas son 37° 55' y 38° 02' sur y 57° 34' y 57° 33' oeste (Figura 1).

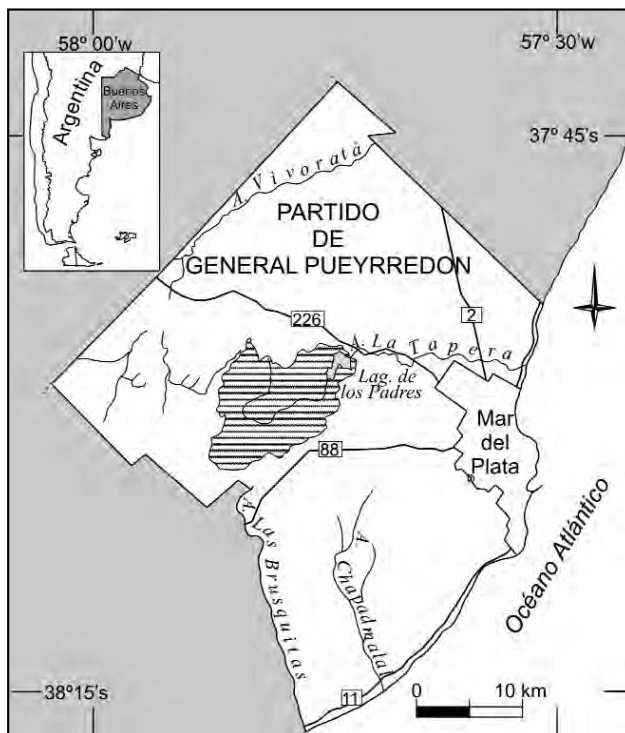


Figura 1. Mapa de ubicación

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo, los sistemas de indicadores utilizados para los recursos suelo y agua siguen el modelo Estado-Presión-Respuesta (EPR, Cendrero, 2002) y son evaluados para las funciones del ambiente, Fuente de recursos y Sumidero de residuos (Ortolano, 1984). Los indicadores empleados son los propuestos por Cantú et al. (2005). A partir de estos indicadores se obtuvieron índices mediante procesos de agregación lineal. El Índice de Calidad Ambiental se obtuvo por la integración de los Índices de Fuente de Recursos y Sumidero, a su vez cada uno de estos resultado de la integración de los Índices respectivos de Presión, Estado y Respuesta.

Los valores de los parámetros fueron calculados para distintas unidades geoambientales las cuales se plasmaron cartográficamente sobre mapas de unidades basados en el uso del suelo real a escala 1:50.000, generado sobre información de fotos aéreas, imágenes satelitales y relevamientos de campo.

A los fines comparativos se tomó como horizonte temporal el estado del recurso agua en 1982 (Cionchi et al., 1982). A tal fin se compararon los parámetros obtenidos de pozos de agua y arroyos por estos autores con datos obtenidos de muestras colectadas para este trabajo en el periodo 2005-2007.

En cuanto a los suelos, se han considerado como indicadores de Presión sobre el recurso a la densidad de explotaciones, las tierras bajo agricultura, la traficabilidad y la carga animal.

Para el análisis del *Estado* del recurso suelo se contemplaron el contenido de C orgánico, la resistencia mecánica, la densidad aparente (PEA) y el pH. En lo referente a las *respuestas* se utilizó como único parámetro el ensayo de prácticas de conservación de suelos. Considerando al suelo como sumidero, los indicadores de *Presión* fueron la cantidad de agroquímicos utilizados por hectárea y la carga animal. El único indicador de *Estado* propuesto por *Cantú et al. (2005)* que es el contenido de agroquímicos en suelos, no ha podido ser ensayado debido a que no se han encontrado laboratorios que estén en condiciones de medir en dicho medio los numerosos biocidas que se aplican en la zona. El indicador de *Respuesta* considerado ha sido la existencia de normativas preventivas que penen la contaminación de suelos.

Para el recurso agua, los parámetros considerados como indicadores de *Presión* sobre la fuente de recursos son: el consumo de agua superficial, el consumo de agua subterránea, la cantidad de agroquímicos aplicados por hectárea y la carga animal. Para monitorear el *Estado* se han utilizado: los caudales líquidos del arroyo, el volumen de la laguna, la recarga del acuífero, los sólidos disueltos totales (SDT) y los nitratos (NO_3); para considerar las respuestas se ha previsto como único parámetro la aplicación de técnicas de conservación de aguas como por ejemplo la aplicación de riego por goteo.

Para el análisis de la capacidad de sumidero del recurso agua se consideraron como indicadores de *Presión*: el número de establecimientos con consumo intensivo de agroquímicos y la alta carga animal (tambos y "feed lot"). Para determinar el *Estado* se utilizaron como parámetros: SDT, NO_3 y fluor (F). Como *Respuesta* se ha considerado la existencia de normas con tasas de contaminación.

En las tablas 1, 2 y 3 se listan, agrupados por funciones (Presión, Estado y Respuesta), los parámetros, las unidades de medición, los criterios para establecer los valores mínimos y máximos, las fuentes de datos y los métodos aplicados para la obtención de los indicadores.

La determinación de los indicadores de *Estado* en el recurso suelo se basó en la toma de 5 muestras para cada una de las unidades geoambientales. En cada muestra se hicieron las siguientes determinaciones: Carbono orgánico, pH, Densidad aparente (PEA) y Resistencia mecánica (RM) (Tabla 2).

Con respecto al recurso agua, las muestras fueron obtenidas según las normas de uso corriente en estudios de aguas subterráneas. En ambas ocasiones las muestras fueron analizadas en el laboratorio de la Empresa de Obras Sanitarias Sociedad de Estado (OSSE) perteneciente al municipio de General Pueyrredón.

La medición de los parámetros para evaluar la calidad del agua se realizó por medio de estudios hidrogeoquímicos en 30 muestras de agua tomadas en las distintas unidades.

Los análisis fueron realizados de acuerdo con la metodología del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1999)*.

Para la determinación del valor del parámetro medido por unidad geoambiental se tomó el promedio de los valores obtenidos en la misma. En el caso de los valores mínimos, tanto para el recurso suelo como para el agua, se consideraron los valores mínimos medidos. En cuanto a los valores máximos, para la calidad del agua, corresponden a los valores límites establecidos para la calidad del agua para bebida de acuerdo con

el *Código Alimentario Argentino (2007)*. En el caso del suelo se consideraron los valores máximos medidos.

Los indicadores fueron normalizados utilizando una escala 0-1. Los valores 0 y 1 representan, respectivamente, la peor y la mejor condición desde el punto de vista de la calidad de los recursos suelo y agua, no teniendo en cuenta las medidas absolutas obtenidas para cada indicador. Cuando el valor máximo medido del indicador corresponde a la mejor situación (Directo) el valor normalizado será:

$$Vn = (I_m - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (1)$$

Cuando el valor máximo medido corresponde a la peor situación (Inverso) el valor normalizado se calcula:

$$Vn = 1 - [(I_m - I_{min}) / (I_{max} - I_{min})] \quad (2)$$

Donde:

Vn = valor normalizado;

I_m = valor medido del indicador;

I_{max} = valor máximo del indicador y

I_{min} = valor mínimo del indicador.

Los índices de Presión (I_p), Estado (I_e) y Respuesta (I_r) se obtuvieron al aplicar:

$$I_e = \sum (V_i \times W_i) / n \quad I_p = \sum (V_i \times W_i) / n \quad I_r = \sum (V_i \times W_i) / n \quad (3)$$

Donde:

I = índice;

V_i = valor individual normalizado;

W_i = peso del indicador (en este caso los pesos otorgados a cada parámetro son iguales);

n = número de indicadores y

$$\sum W_i = 1$$

Los índices de Fuente de Recursos y de Sumidero para los recursos suelo y agua resultan de la aplicación de:

$$IFR_m = (IEfr_m + IPfr_m + IRfr_m) / 3 \quad ISm = (IEs_m + IPS_m + IRS_m) / 3 \quad (4)$$

Donde:

m = suelo o agua

IFR_m = índice función Fuente de Recursos;

$IEfr_m$ = índice de Estado, Fuente de Recursos;

$IPfr_m$ = índice de Presión, Fuente de Recursos;

$IRfr_m$ = índice de Respuesta, Fuente de Recursos;

IS_m = índice función Sumidero;

IEs_m = índice de Estado, Sumidero;

IPS_m = índice de Presión, Sumidero;

IRS_m = índice de Respuesta, Sumidero.

Por último se calcularon los Índices de Calidad Ambiental (ICA) para los recursos suelo y agua de la siguiente manera:

$$ICA_m = (IFR_m + IS_m) / 2 \quad (5)$$

Tabla 1.

INDICADORES DE PRESIÓN

| Atributo | Parámetro | Unidades | Criterios | Fuentes de datos/Métodos |
|---|--|--|---|--|
| Tamaño de las explotaciones | Densidad de explotaciones | Nº /km ² | El valor mínimo es 0 (ningún establecimiento) y el máximo es el mayor valor obtenido (Agricultura intensiva) dividido la superficie de la unidad | Obtenido del censo a productores de la zona |
| Agriculturización | Tierras bajo agricultura | Km ² tierra Agrícola / Km ² total unidad | El valor mínimo es 0 y corresponde a zonas sin agricultura y el máximo es la mayor superficie medida (corresponde a agricultura extensiva) | Obtenido del censo a productores de la zona |
| Tráfico | Traficabilidad | Nº de veces que ingresa la maquinaria/año | El valor mínimo es 0 (zonas sin tráfico) y el máximo es el máximo medido (corresponde a la agricultura intensiva) | Obtenido del censo a productores de la zona |
| Ganadería | Carga animal | Nº cabezas Ha/año | El valor mínimo es 0 (zonas sin animales) y el máximo corresponde al número entero inmediatamente superior al obtenido | Obtenido del censo a productores de la zona |
| Cantidad de agroquímicos | Cantidad de agroquímico | Tonelada de ingrediente activo/ha | Mínimo es 0 y máximo corresponde al total de agroquímicos aplicados | Según Censo a productores los productos aplicados incluyen 22 herbicidas, 15 insecticidas, 22 fungicidas y 8 fertilizantes. |
| Explotación de las reservas de agua superficial | Consumo de agua superficial | Hm ³ /año | El criterio para establecer el valor mínimo (0) es que el ganado presente no consume agua superficial y el máximo que todo el ganado presente en la cuenca la consume | Surge del censo a los productores |
| Explotación de las reservas de agua subterránea | Consumo de agua subterránea | Hm ³ /año | El valor mínimo (0) se estableció de agua subterránea en la zona. Para el máximo se sumo el volumen de agua consumida para regar toda la superficie con uso agrícola con valor equivalente al cultivo de papa (150 mm) + el consumo de todo el ganado + el consumo humano | Inferido respecto al riego de papa (150 mm anualizado), más el consumo de animales (30 l por día por animal en cada unidad) más 150 l por persona por unidad considerando que no hay consumo |
| Consumo de agroquímicos con consumo intensivo de agroquímicos | Establecimientos con consumo intensivo de agroquímicos | Nº de Estab./Km ² | El mínimo es 0 (ningún establecimiento) y el máximo el máximo medido (corresponde a la unidad de Agricultura Intensiva). | Obtenido del censo a productores de la zona |
| Ganadería intensiva | Alta carga animal | Km ² de Feed Lot y tambos/ Km ² | El mínimo es 0 (ningún establecimiento) el máximo es 1 (un establecimiento por unidad de superficie) | Obtenido del censo a productores de la zona |

Tabla 2.

| INDICADORES DE ESTADO | | | | |
|--|---|----------------------------|--|--|
| Atributo | Parámetro | Unidades | Criterios | Fuentes de datos/Métodos |
| Fertilidad | C orgánico | % en horizonte superficial | El valor mínimo es 1 y el máximo es el máximo medido | Determinado por el método de Walkley y Black (1965). |
| Limitaciones para el desarrollo de plantas | Resistencia Mecánica Penetrabilidad | Mpa | El mínimo valor es 1,7 y el máximo corresponde al máximo valor medido | Medido mediante un penetrómetro e como según normas ASAE, S 313 (American Society of Agricultural Engineering, 1992). |
| Compactación / porosidad | PEA | g/cm ³ | Los valores mínimo y máximo corresponden a al mínimo y al máximo medidos | Medido según el método del cilindro (Blake y Harge, 1986). |
| Acidificación / Alcalinización | pH | - | Valor mínimo son los valores menores a 4,5; valor máximo mayores a 8,5. Lo mejor (1) corresponde al intervalo 5,5-7,5, bueno (0,5) 4,5-5,5 y 7,5-8,5, malo (0) <4,5 y > 8,5 | Medido con plmetro digital en cada muestra con una relación suelo-agua 1:2,5. |
| Agroquímicos | Contenido de agroquímicos | (mg / l) | ? | No se ha medido hasta el presente |
| Reservas de agua superficial | Caudales líquidos | m ³ /seg | El mínimo es 0, el máximo es un valor superior al máximo medido y que es compatible con estimaciones de crecida por precipitación pluvial. | Medición de caudales en diferentes tramos rectos y sin obstáculos del arroyo mediante el uso de flotadores. |
| Reservas de agua subterránea | Volumen | hm ³ | Corresponde al volumen de la laguna de Los Padres. El valor mínimo es 0 e implicaría que la laguna se seque, el máximo es el valor del volumen calculado. | Calculado como el producto entre profundidad media por la superficie medida sobre mapa digitalizado de red de drenaje. |
| Calidad del agua | Recarga de acuífero | hm ³ /año | El valor mínimo es 0 y el máximo el valor de la recarga calculada | La recarga se calculó en base al excedente de agua y el área de las unidades menos el consumo humano+ganado+riego |
| | SDT | mg/l | El mínimo es 0 y el máximo es el establecido por el Código Alimentario Argentino (CAA) para el agua potable | Los análisis se efectuaron de acuerdo con "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater" (1999) |
| Agroquímicos | Tenor de agroquímicos en aguas superficiales y subterráneas | mg/l ug / l | El mínimo es 0 y el máximo es 45 mg/l (CAA) ? | <i>No se ha medido hasta el presente</i> |
| Contaminación | (SDT + NO ₃ + F)/3 | mg/l | El valor mínimo es 0 y el máximo es el promedio de los máximos establecidos por el CAA para SDT, NO ₃ y F | Se ha aplicado el promedio según modelo propuesto por Blarasin et al. (2001) adaptado a la zona |

Tabla 3

| INDICADORES DE RESPUESTA | | | | |
|---|-----------------------------------|---|---|--|
| Atributo | Parámetro | Unidades | Criterios | Fuentes de datos/Métodos |
| Conservación del suelo | Prácticas de conservación | % de Tierras con Prácticas de Conservación | El mínimo valor es 0 (zonas sin practicas) y el máximo es 100, toda la zona con prácticas conservacionistas | Según censo a productores se tomaron aquellas áreas con rotación de cultivos, labranza según curvas de nivel y establecimientos con siembra directa. En el caso de la Cuenca, por su pendiente y por las precipitaciones anuales, son consideradas prácticas que reducen la erosión hídrica. |
| Legislación | Normativas preventivas | Tasas de contaminación | Mínimo 0 y Máximo 1 | |
| Uso sustentable de la reserva Legislación | Prácticas de conservación | % tierras sometidas a prácticas conservacionistas de agua | El mínimo e 0 y el máximo 100 de la superficie con prácticas conservacionistas | Se consideró como riego eficiente la superficie sometida a riego por goteo y además se consideró la normativa municipal que se aplica en el ámbito de la laguna para evitar la contaminación del cuerpo de agua con hidrocarburos (50% de la totalidad del área de conservación) |
| Legislación | Normas con tasas de contaminación | Actas de infracción de contaminación | El mínimo es 0 (ningún acta de infracción) y el máximo es 1 (se ha labrado algún acta de infracción) | Consulta a la Gerencia de Recursos Naturales de Obras Sanitarias Sociedad de Estado |

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-AMBIENTALES

El clima en la zona corresponde al tipo “templado con influencias oceánicas”, con un continuo intercambio de masas de aire en la interfase tierra - mar. Para el período 1961 - 1990 la temperatura media anual presentó un valor de 14 °C con un valor máximo medio de 15 °C (año 1980) y un valor mínimo medio de 12,9 °C (año 1964). Según la clasificación de Thornthwaite, el área corresponde a un clima “sub húmedo - húmedo mesotermal con poca o nula deficiencia de agua” (Bocanegra et al., 1989).

Las precipitaciones en el Partido de General Pueyrredón (Estación Mar del Plata Aero- SMN) presentan para el período 1971-2000 una media anual de 939 mm. Para igual período la evapotranspiración real es de 731 mm anuales, registrándose el exceso de agua para la recarga entre abril y noviembre. En la cuenca se cuenta con una estación pluviométrica, situada en la Estancia La Serrana, que ha registrado en forma continua desde 1961. Estos registros indican una preeminencia de valores más altos de precipitación en la última década (Figura 2).

La cuenca del arroyo y la laguna de los Padres se sitúa en el ámbito de las Sierras Septentrionales de la provincia de Buenos Aires, que si bien se habrían comportado como un área positiva ya desde el Mesozoico, fueron afectadas por un levantamiento posterior durante el Mioceno temprano producido por la colisión de la placa de Nazca, que produjo un evento epirogénico remoto en la sierras de Tandil (Demoulin et al., 2005).

La fuerte sedimentación loéssica que caracterizó a los ambientes sedimentarios de la región pampeana estuvo regulada principalmente por los cambios climáticos que operaron durante el Cenozoico tardío.

Un período de clima árido determinó, en la dinámica de dicho relieve, zonas de depositación de sedimentos eólicos que hoy son la base de sustentación de los fértiles suelos agro-ganaderos de la región. (Martínez, 2001) La depresión de 2 km² que ocupa la laguna de los Padres actual sería consecuencia de la erosión eólica del período árido. La laguna se formó posteriormente, cuando retornó, en el Holoceno un clima de mayor humedad (Martínez, 2001).

Los suelos del área de estudio pertenecen a la denominada Serie Mar del Plata 26 (INTA, 1987), una consociación dominada por Argiudoles típicos, ubicados en los sectores más elevados de las lomas loéssicas, Hapludoles thaptoárgicos en las partes llanas y Argiudoles ácuicos en los bajos, molisoles cuyos epipedones mólicos se destacan por tener un desarrollo considerable. En base a lo establecido por el *Soil Survey Staff* (1975), la temperatura del suelo para la zona de interés es de tipo “mésico”, y el régimen de humedad de tipo “údic” en el sector continental del área de estudio y “acuico” en las “microdepresiones”.

El área de estudio se caracteriza por la presencia de las unidades hidrogeológicas *Basamento Impermeable y Complejo Clástico Permeable* diferenciadas por Salá (1975).

El *Basamento Impermeable* está conformado por rocas del Basamento cristalino (que en el ámbito del Partido de General Pueyrredón prácticamente no aflora) y las ortocuarcitas eopaleozoicas de la Fm Balcarce (*Dalla Salda e Iníguez, 1978*). Poseen permeabilidad secundaria, asociada a 4 juegos de diaclasas (3 verticales y el restante horizontal) de direcciones coincidentes con los sistemas de fallamiento que caracterizan a las Sierras de Tandilia. Presentarían escasas posibilidades acuíferas. Cubriendo la secuencia mencionada se encuentran los sedimentos del Complejo Clástico Permeable (según *Sala, 1975*). Se trata de sedimentos loessoides, limo arenosos finos, en parte arcillosos. Hidrogeológicamente se lo puede definir 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. En decir, configura una sucesión medianamente acuífera con intercalaciones acuitardas. La recarga del sistema acuífero se produce en forma autóctona, a partir de los excesos hídricos generados a partir de las lluvias, los que se incorporan por infiltración a través del nivel freático.

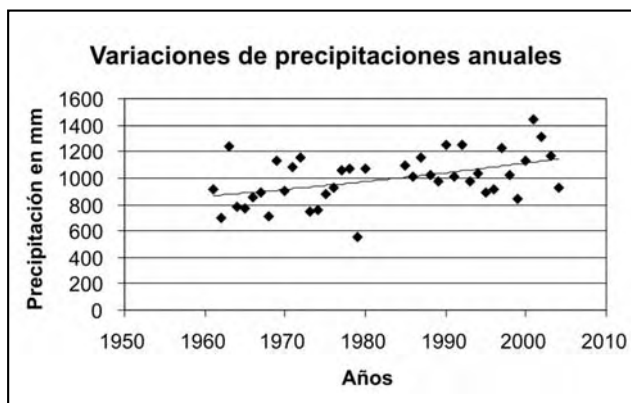


Figura 2. Variaciones pluviométricas 1961 - 2004

La red de drenaje de la cuenca de Laguna de Los Padres está integrada por diversos colectores, entre los que se destaca el arroyo homónimo, que constituye el único afluente permanente representa más del 90 % del área total de aporte a la laguna. En la zona del piedemonte los cauces poseen cauces más nítidos, por lo general angostos y con pequeñas barrancas de poca altura (1 a 3 metros) que decrece rápidamente a medida que se aleja del área pedemontana. En general los caudales son muy pequeños. Aforos efectuados en diciembre de 2005 indican caudales medidos en distintos tramos del arroyo valores $0,4 \text{ m}^3/\text{seg}$, $0,1 \text{ m}^3/\text{seg}$, $0,035 \text{ m}^3/\text{seg}$, $0,11 \text{ m}^3/\text{seg}$ y $0,1 \text{ m}^3/\text{seg}$, mientras que en septiembre de 1982 se midieron los siguientes valores: curso superior $0,03 \text{ m}^3/\text{seg}$; curso medio $0,17 \text{ m}^3/\text{seg}$ y curso inferior $0,19 \text{ m}^3/\text{seg}$ (*Cionchi et al., 1982*).

CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÓMICAS

La zona de estudio se encuentra situada en el partido Partido de General Pueyrredón, a 16 km de la ciudad de Mar del Plata.

La población de la zona de estudio no supera las 1000 personas, la mayor parte de las cuales se encuentra asentada en la villa de Sierra de los Padres (*Rivas et al, 2006*).

En la actualidad diferentes tipos de usos y explotaciones entre las que se destacan: asentamientos urbanos, explotaciones agrícola-ganaderas, explotaciones agrícolas intensivas (quintas),

tambos y ganadería extensiva (se incluye en este rubro al menos tres haras) y la única reserva natural integral del partido de General Pueyrredón que coincide fundamentalmente con la laguna y áreas periféricas (*del Río et al., 1995*).

RESULTADOS

Las unidades geoambientales definidas, sobre las cuales se determinaron los índices de los recursos suelo y agua, tanto para el año 1982 como para el periodo 2005/2007, fueron: Agricultura extensiva (AE), Agricultura extensiva/Ganadería (AE/G), Agricultura intensiva (AI), Conservación (C, representada por la Reserva Natural de laguna de los Padres) y Ganadería (G) (Figuras 3 y 4).

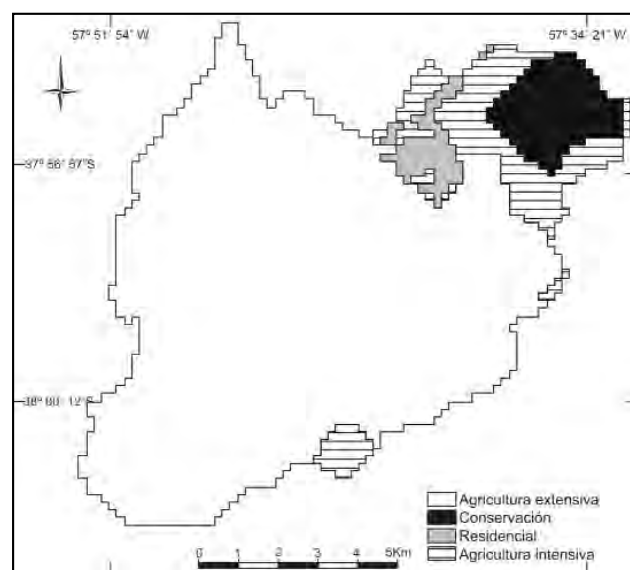


Figura 3. Mapa para unidades geoambientales para el año 1982

Los valores de los indicadores aplicados para el recurso suelo y agua en las distintas unidades geoambientales se listan en la Tabla 4 y 5, respectivamente y en la Figura 5 se muestra un comparativo de los mismos para cada función.

Los resultados observados (Tabla 4) para la fuente de recursos en el suelo indican que las zonas sometidas a agricultura intensiva son las que registran la mayor *presión* (0,45), el peor *estado* (0,43), al igual que agricultura extensiva (0,46), y la inexistencia de respuestas (0) como las zonas destinadas a la ganadería. Por el contrario, en la zona de conservación los índices revelan la ausencia de *presión* (1), el mejor *estado* (0,73), como ocurre con AE/G (0,74), y la máxima *respuesta* (1).

En la función sumidero, para el recurso suelo, se observa una presión con valores medios de 0,56 y 0,58 para la AI y AE/G, respectivamente y una menor *presión* para las unidades geoambientales restantes. En cuanto a la *respuesta* es nula en todas las unidades con excepción del área destinada a conservación.

Con respecto al recurso agua, los valores (Tabla 5) indican en todas las unidades geoambientales que la *presión* es baja con valores del índice que oscilan entre 0,75 y 1. Los valores de *estado* son bajos en todas las unidades excepto un valor medio para la zona de conservación (0,49) que también registra la única *respuesta* para esta función. Como sumidero, el índice de *presión* muestra valores similares a los de la *presión* en fuente de recursos, ocurriendo lo contrario para el *estado* que muestra en este caso valores entre 0,76 y 0,91. El índice de *respuesta* es 0 en los distintos usos del suelo.

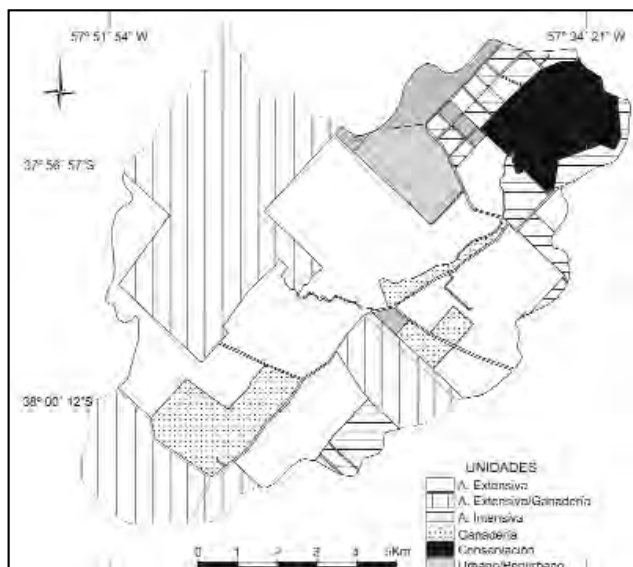


Figura 4. Mapa de unidades geoambientales actual

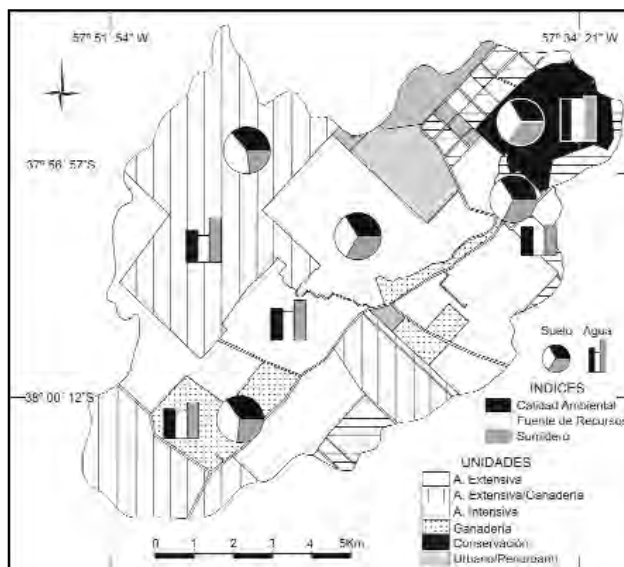


Figura 5. Comparación de índices para los recursos suelo y agua por unidad

Tabla 4. Indicadores, índices y valores mínimos y máximos en cada unidad para el recurso suelo

| RECURSO SUELO | | VALORES UNIDADES | | | | | MIN | MAX | IR=1 INV=0 | |
|--|---------------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|---------|---------------|---|
| | | AE | AE/G | AI | C | G | | | | |
| FUENTE DE RECURSO | PRESION | Densidad de explotaciones | 0,92 | 0,97 | 0 | 1 | 0,88 | 0 | 4,36 | 0 |
| | | Tierras bajo agricultura | 0 | 0,71 | 0,81 | 1 | 1 | 0 | 40,84 | 0 |
| | | Traficabilidad | 0,80 | 0,80 | 0 | 1 | 0,92 | 0 | 20 | 0 |
| | | Carga animal | 1 | 0,47 | 1 | 1 | 0,47 | 0 | 3 | 0 |
| | ESTADO | C orgánico | 0,29 | 0,51 | 0,28 | 0,56 | 0,35 | 1 | 15,2 | 1 |
| | | Resistencia Mecánica | 0,49 | 0,46 | 0,43 | 0,75 | 0,50 | 1,7 | 4,3 | 0 |
| | | Penetrabilidad | 0,55 | 1 | 0 | 0,61 | 0,88 | 0,9 | 1,23 | 0 |
| | | pH | 0,50 | 1 | 1 | 1 | 1 | < a 4,5 | > a 8,5 | 1 |
| RES | Prácticas de conservación | 0,34 | 0,21 | 0 | 1 | 0 | 0 | 100 | 1 | |
| SUMIDERO | PRES | Cantidad de agroquímico | 0,65 | 0,65 | 0,15 | 1 | 1 | 0 | 0,04 | 0 |
| | | Carga animal | 1 | 0,47 | 1,00 | 1,00 | 0,47 | 0 | 3 | 0 |
| | EST | Contenido de agroquímicos | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | 0 |
| | RES | Normativas preventiva | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Índice de Presión Fuente de Recursos | | 0,68 | 0,74 | 0,45 | 1 | 0,82 | | | | |
| Índice de Estado Fuente de Recursos | | 0,46 | 0,742 | 0,43 | 0,729 | 0,68 | | | | |
| Índice de Respuesta Fuente de Recursos | | 0,34 | 0,21 | 0 | 1 | 0 | | | | |
| Índice de Presión Sumidero | | 0,83 | 0,56 | 0,58 | 1 | 0,73 | | | | |
| Índice de Estado Sumidero | | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | | | | |
| Índice de Respuesta Sumidero | | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | | | | |
| INDICE DE FUENTE DE RECURSOS | | 0,54 | 0,68 | 0,39 | 0,88 | 0,67 | | | | |
| INDICE DE SUMIDERO | | 0,55 | 0,37 | 0,38 | 1,00 | 0,49 | | | | |
| INDICE DE CALIDAD AMBIENTAL | | 0,55 | 0,53 | 0,39 | 0,91 | 0,58 | | | | |

AE: Agricultura extensiva, AE/G: Agricultura extensiva/Ganadería, AI: Agricultura intensiva, C: Conservación y G: Ganadería.
SD: Sin datos. DIR: indicador directo. INV: indicador inverso

Tabla 5. Indicadores, índices y valores mínimos y máximos en cada unidad para el recurso agua

| FUENTE DE RECURSO | | RECURSO AGUA | VALORES UNIDADES | | | | | MIN | MAX | IR=1 INV=0 |
|-------------------|---------|--|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----|-------|---------------|
| | | | AE | AE/G | AI | C | G | | | |
| FUENTE DE RECURSO | PRESION | Consumo de agua superficial | 1 | 0,94 | 1 | 1 | 0,89 | 0 | 0,07 | 0 |
| | | Consumo de agua subterránea | 0,88 | 0,92 | 0,93 | 1,00 | 1,00 | 0 | 14 | 0 |
| | | Cantidad de agroquímico | 0,65 | 0,65 | 0,15 | 1,00 | 1,00 | 0 | 0,04 | 0 |
| | | Carga animal | 1 | 0,47 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| | ESTADO | Caudales líquidos | 0,17 | 0,03 | 0,49 | 0 | 0 | 0 | 1,5 | 1 |
| | | Volumen | 0 | 0 | 0 | 0,72 | 0 | 0 | 5 | 1 |
| | | Recarga de acuífero | 0,34 | 0,31 | 0,05 | 0,03 | 0,07 | 0 | 36,4 | 1 |
| | | SDT | 0,63 | 0,71 | 0,67 | 0,71 | 0,26 | 0 | 1.500 | 0 |
| | | NO ₃ | 0 | 0,16 | 0,09 | 0,97 | 0,48 | 0 | 45 | 0 |
| | RES | Prácticas de conservación | 0 | 0 | 0,01 | 0,5 | 0 | 0 | 100 | 1 |
| SUMIDERO | PRESION | Establecimientos con consumo intensivo de agroquímicos | 0,77 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 4,36 | 0 |
| | | Alta carga animal | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,6 | 0 | 1 | 0 |
| | EST | Tenor de agroquímicos en agua superficiales | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | 0 |
| | | Tenor de agroquímicos en agua subterráneas | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | 0 |
| | | (SDT + NO ₃ + F)/3 | 0,87 | 0,90 | 0,88 | 0,91 | 0,76 | 0 | 1.546 | 0 |
| | RES | Normas con tasas de contaminación | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | | Índice de Presión Fuente de Recursos | 0,88 | 0,75 | 0,77 | 1 | 0,84 | | | |
| | | Índice de Estado Fuente de Recursos | 0,23 | 0,24 | 0,26 | 0,49 | 0,16 | | | |
| | | Índice de Respuesta Fuente de Recursos | 0 | 0 | 0,01 | 0,5 | 0 | | | |
| | | Índice de Presión Sumidero | 0,89 | 1 | 0,50 | 1 | 0,80 | | | |
| | | Índice de Estado Sumidero | 0,87 | 0,90 | 0,88 | 0,91 | 0,76 | | | |
| | | Índice de Respuesta Sumidero | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| | | INDICE DE FUENTE DE RECURSOS | 0,47 | 0,42 | 0,44 | 0,69 | 0,42 | | | |
| | | INDICE DE SUMIDERO | 0,66 | 0,73 | 0,47 | 0,73 | 0,59 | | | |
| | | INDICE DE CALIDAD AMBIENTAL | 0,56 | 0,57 | 0,45 | 0,71 | 0,50 | | | |

AE: Agricultura extensiva, AE/G: Agricultura extensiva/Ganadería, AI: Agricultura intensiva, C: Conservación y G: Ganadería.
SD: Sin datos. DIR: indicador directo. INV: indicador inverso

Tabla 6. Índices de estado recurso agua 1982 y 2005/2007

| Año | AE | AE/G | AI | C | G |
|-----------|------|------|------|------|------|
| 1982 | 0,25 | 0,33 | 0,21 | 0,48 | 0,33 |
| 2005/2007 | 0,23 | 0,24 | 0,26 | 0,49 | 0,16 |

AE: Agricultura extensiva, AE/G: Agricultura extensiva/Ganadería, AI: Agricultura intensiva, C: Conservación y G: Ganadería.

Los índices de Fuente de Recursos y Sumidero, tanto para el agua como para el suelo, resultan ser los más altos, con valores de 0,88 y 1, respectivamente (Tabla 4 y 5) en el área protegida. Una situación similar se registró con el índice de Sumidero para el agua en la AE/G. Los menores valores de los índices para el recurso suelo se registraron en las unidades AI y AE/G en tanto que para el agua se hallaron en AE/G y G, con un valor de 0,42.

En esta aplicación de indicadores, se observa para ambos recursos que la mayor calidad ambiental se encuentra en la zona de conservación y que por el contrario la zona de quintas, donde se realizan cultivos intensivos, presenta la menor calidad ambiental.

Al analizar de modo diacrónico el recurso agua en dos momentos diferentes (años 1982-2005/7) y al comparar los indicadores de *Estado* en ambos periodos (Tabla 6), se advierte una disminución del índice tanto en la unidad AE/G como en G, registrándose en esta última un deterioro importante del estado que disminuye de 0,33 a 0,16.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los suelos de las lomas eólicas han sufrido fuertes procesos de erosión, degradación, pérdida de materia orgánica, arcillas, limos, arenas muy finas y fertilidad, entre otros, efectos que se magnifican por el uso intensivo de prácticas de riego. Resultados obtenidos por *Osterrieth et al (1995, 1998, 2002)* indican, que luego de 30 años de uso, la pérdida de arcillas, preferentemente esmectíticas e interstratificados Illita-esmectita, llegó al 50% en los niveles superficiales y la materia orgánica disminuyó en un 40%. Estas pérdidas han generado una considerable disminución de la estabilidad estructural, *Osterrieth y Maggi, (1996), Osterrieth (2002), Scampini et al. (1999)*; y una importante pérdida de la diversidad biológica (Martínez et al. 1999). También se han detectado serios problemas de acumulación de pesticidas en la macrofauna y horizontes con altos contenidos de materia orgánica y arcillas (*Miglioranza et al., 1999*).

En el lapso que transcurre entre los relevamientos efectuados en 1982 y el momento actual, se han producido en la cuenca del arroyo de Los Padres cambios que si bien no pueden ser considerados dominantes en el uso del suelo, lo son en la tecnología productiva.

En efecto, en la década de 1980 las actividades agrícolas intensivas se circunscribían al ambiente de lomas, en particular su porción oriental formando un anillo en derredor de la zona de la laguna de Los Padres. Las lomas de la porción occidental se encontraban afectadas a una agricultura extensiva y una ganadería del mismo tenor. En el sistema serrano paleozoico, donde las ortocuarcitas se encuentran a profundidades muy someras o expuestas predominaba una ganadería vacuna de baja presión de uso con pocas cabezas por hectárea.

En la actualidad se pudo determinar que en la zona de explotación agrícola intensiva se han incorporado a las actividades hortícolas ya instaladas cultivos bajo cubierta, como la floricultura. En la porción central y oriental de las lomas se ha incorporado el paquete tecnológico asociado a las explotaciones de soja transgénica conocido como labranza "cero", con variedades genéticamente modificadas y resistentes al herbicida glifosato.

A su vez y en función de las variables económicas dominantes se ha incorporado a la ganadería extensiva tradicional y tambos de corte extensivo el desarrollo de "feed lots" cuya permanencia se encuentra supeditada al costo de insumos tales como el maíz u otros granos.

La aplicación de los índices en el momento actual reveló la mayor calidad ambiental de los suelos, como resultado de su alta calidad como recurso y sumidero, la cual se concentra en

la Reserva Natural de Laguna de Los Padres (zona de Conservación, ICA 0,91), hecho previsible dado que los suelos de este sector no están sometidos a laboreo. En oposición podemos ver que los suelos del área de cultivos intensivos como la franja hortícola presenta el valor de ICA más bajo (0,39). Las áreas de cultivos extensivos, ganaderos o mixtos presentan valores intermedios (entre 0,55 y 0,58).

En lo referente al recurso agua se observa nuevamente que el mayor ICA corresponde al área de la Reserva Natural, con un valor de 0,71 y la peor calidad corresponde a la zona de agricultura intensiva con un valor de 0,45. Esto es ocasionado por la baja respuesta en las funciones Fuente de Recursos y Sumidero y el bajo índice de Estado de la primera función.

Sin embargo en este recurso natural esta merma en la calidad ambiental no difiere demasiado de la zona ganadera donde el valor de ICA es apenas un poco mayor (0,47). Las áreas sometidas a ganadería y agricultura extensiva con y sin ganadería presentan una condición muy similar con valores próximos a 0,5.

Si bien no contamos con datos de todos los parámetros a lo largo de las últimas décadas, la aplicación de los indicadores de Estado al agua como recurso indica que las zonas ganaderas y las agrícolas con ganadería presentan una merma significativa en el índice de Estado.

En cambio las restantes zonas se han mantenido en valores semejantes. Se observa una leve mejora del índice en las zonas de conservación y agricultura intensiva y prácticamente el mismo guarismo en la zona de agricultura extensiva.

Las explotaciones agrícolas intensivas son probablemente las que mayor efecto perjudicial provoquen en la cuenca de la Laguna de Los Padres como consecuencia de un alta trafabilidad, laboreos en la misma dirección que la pendiente, uso intensivo de agroquímicos y biocidas y una significativa explotación de aguas subterráneas.

Con respecto a la actividad ganadera y en particular aquella que se realiza de modo concentrado genera una severa distorsión en la calidad del sistema hídrico y sobre los suelos de uso agrícola, hecho que parece manifestarse en la merma de los indicadores de estado del recurso agua.

Finalmente, consideramos que la aplicación de un sistema de indicadores ambientales en agroecosistemas como el de la cuenca de la Laguna de los Padres permite establecer con claridad los efectos de las distintas prácticas productivas sobre los recursos suelo y agua. La aplicación de los indicadores de modo diacrónico se encuentra con la dificultad que habitualmente no es factible hallar valores confiables y apropiados de luenga data.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su reconocimiento a la Agencia de Nacional de Promoción Científica y Tecnológica que ha financiado a través del Proyecto REDESAR, asimismo agradecemos a la Universidad Nacional de Mar del Plata que ha financiado a través del proyecto EXA 258/03 el presente trabajo.

Agradecemos también la colaboración en los trabajos y relevamientos de campo al Lic. Jorge Rubén Álvarez y a la Dra. Silvia De Marco. Finalmente nuestro reconocimiento a las Autoridades y Docentes de la Escuela Agropecuaria de Laguna de Los Padres por su amplia colaboración y apoyo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BERGER, A.R. Y W. J. LAMS., 1996
Assessing rapid environmental geoindicators changes in earth systems.
Editors. Balkema, 466pp. Rotterdam.
- BLAKE, G.R. Y K.H. HARTGE, 1986
Bulk density. En Klutr (Ed.) *Methods of Soil Analysis. A. Part 1. Agron. Monog 9: 363-375 Am. Soc. Agron. Madison, Wisconsin.*
- BLARASIN M., CABRERA A., S. BETTERA, C. FRIGERIO Y M. PAGLIARICCI, 2001
Escenarios e indicadores de contaminación urbana en medio anaerobio y aerobio en el acuífero freático, Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
Las Caras del agua subterránea. Volumen 1:17-25.
- BOCANEGRA E.M., CIONCHI J.L., FASANO J.L., OSTERRIETH M.L. Y SCHNACK E.J., 1989
Geología Ambiental del área urbana marplatense, provincia de Buenos Aires. Caracterización preliminar.
I Jornada geológicas Bonaerenses, Actas: 663-682. Tandil.
- CANTU, M., DEL RIO, J. L., BLASARIN, M., OSTERRIETH, M., BOUZA, P., BECKER, A., DEL VALLE, H, DIAZ, E. Y D. BUSCHIAZZO, 2005
Metodología para la evaluación de la sustentabilidad ambiental en agroecosistemas.
11º Congreso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental ABGE. Anais. ISBN 85-7270-017-x
- CENDRERO, A.; FANCÉS, E.; LATRUBESSE, E. M.; PRADO, R.; FABBRI, A.; PANIZZA, M.; CANTÚ, M. P.; HURTADO, M.; GIMÉNEZ, J. E.; MARTINEZ, O; CABRAL, M; TECCHI, R. A.; HAMITY, V.; FERMAN, J. L.; QUINTANA, C.; CECCIONI, A.; RECATALA, L.; BAYER, M.; AQUINO, S., 2002
Projeto RELESA-ELANEM: Uma nova proposta metodológica de índices e indicadores para avaliação da qualidade ambiental.
Revista Brasileira de Geomorfologia, Ano 3, Nº 1: 33-47.
- CIONCHI, J. L., E. J. SCHNACK, J. R. ALVAREZ, E. BOCANEGRA, E. BOGLIANO Y J. L. DEL RIO. 1982
Caracterización hidrogeológica y física-ambiental preliminar de la Laguna de Los Padres, Partido de General Pueyrredón. Provincia de Buenos Aires.
Convenio M.G.P.-U.N.M.D.P., Informe inédito, Mar del Plata, 44 pp.
- CÓDIGO ALIMENTARIO ARGENTINO, 2007
Resoluciones conjunta 68/2007 y 196/2007, de las Secretarías de Políticas, Regulación y Relaciones Sanitarias y de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación
Cap XII, artículo 982.
- DALLA SALDA, L. H. Y IÑIGUEZ, A. M., 1979
La Tinta, Precámbrico y Paleozoico de Buenos Aires.
VII Congreso Geológico Argentino. Actas I: 539- 550. Neuquén
- DEL RÍO, J. L., MASSONE, H. E., BÓ, J., MARTÍNEZ ARCA, J., BERNASCONI, V., BOCANEGRA, E., OSTERRIETH, M., FARENGA, M., FERRARO, R., LÓPEZ DE ARMENTÍA, A., Y M. TOMÁS, 1993
Planificación territorial sobre criterios geoambientales en la cuenca del arroyo y laguna de Los Padres.
XIII Congreso Geológico Argentino Actas del, Mendoza
- DEL RIO, J. L., BO, M. J., MARTINEZ ARCA, J. Y M. V. BERNASCONI, 1995
Editores. Carta Ambiental del Partido de General Pueyrredón.
Convenio Universidad Nacional de Mar del Plata-Municipalidad de General Pueyrredón. Tomo I y II, 225 pp. Mar del Plata. Inédito.
- DEMOULIN, A., ZARATE, M. Y M. RABASSA, 2005
Long-term landscape development: a perspective from the southern Buenos Aires ranges of east central Argentina.
Journal of South American Earth Sciences Volume 19: 2: 193-204
- EDMUNDS, W. M., 1996.
Indicators in groundwater environment of rapid environmental change.
En Berger, A.R. y Iams, W. J. (eds) Assessing rapid environmental geoindicators changes in earth systems. Balkema. 135-154. Rotterdam.
- GIAMPIETRI, L., 1995
Calidad de Paisaje en la Cuenca del arroyo y Laguna de los Padres.
Tesis, inédita Licenciatura Geografía, Facultad de Humanidades Universidad Nacional de Mar del Plata
- I.N.T.A., 1987
Unidad de recursos de suelos: Mapa geomorfológico y de suelos de la provincia de Buenos Aires.
Escala 1:50.000. Castelar.

- MARTÍNEZ, G. A., 2001
Geomorfología y Geología del Cenozoico Superior de las Cuencas de Drenaje de los Arroyos Los Cueros y Seco, Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires.
Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur. 320 pp. Bahía Blanca. Inédito.
- MARTINEZ, P.; OSTERRIETH, M.; FERNANDEZ, C.; CASASOLA, A. Y V. BERNAVA L., 1999
Pérdida de Diversidad de mesofauna en suelos (Argiudoles típicos) afectados por prácticas hortícolas, en el sudeste de Buenos Aires, Argentina.
XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. CD-ROM: 4pp. Pucón
- MIGLIORANZA, K., AIZPUN, J., MORENO, J., OSTERRIETH, M. Y A. ESCALANTE, 1999.
Fate organochlorine pesticides in soils and terrestrial biota of Los Padres pond watershed, Argentina.
Environmental Pollution Volume 105: 91-99
- ORTOLANO, L. 1984.
Environmental planning and decision making.
Edit. John Wiley and Son, 431pp. New York
- OSTERRIETH, M., FERNANDEZ, C., BILAT, Y., MARTINEZ, P. Y G. MARTINEZ, 1995
Interacción entre parámetros bióticos y abióticos en Argiudoles afectados por prácticas agrícolas en Laguna de los Padres, Buenos Aires.
XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas: 60-61.
- OSTERRIETH, M., MARTINEZ, P., MARTINEZ, G., FERNANDEZ, C., M. TRASSENS, M., BILAT, Y V. BERNAVA L. 1998.
Geoecología de Argiudoles afectados por prácticas hortícolas en la llanura pampeana. Buenos Aires, Argentina.
XVI Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo, SIMP.32, CD: 1- 8. Montpellier, Francia
- OSTERRIETH, M., SCAMPINI, E., BORRELLI, N., GARCIA CALDERÓN, N., MARTINEZ, P., MIGLIORANZA, K. Y M. V. BERNASCONI, 2002
Geoecología y degradación de Argiudoles típicos afectados por prácticas hortícolas, en áreas sub-urbanas de Buenos Aires, Argentina.
XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Resúmenes: 115. 2002.
- OSTERRIETH, M. Y J. MAGGI, 1996
Variaciones cuali-cuantitativas de la fracción arcilla en Argiudoles afectados por prácticas agrícolas en Laguna de los Padres. Buenos Aires.
VI Reunión Argentina de Sedimentología. Actas: 337-342.
- OSTERRIETH, M, 2002
Suelos, evolución y degradación, en el sudeste bonaerense.
L. B. Teruggi (Ed). Manejo Integral de Cuencas Hidrográfica y Planificación Territorial, Workshop, (1): 70-84. Necochea,
- RIVAS, V., CENDRERO, A., HURTADO, M., CABRAL, M. GIMENZ, J. FORTE, L., DEL RIO, L., CANTÚ, M Y A. BECKER, 2006
Geomorphic consequences of urban development and mining activities; an analysis of study areas in Spain and Argentina.
Geomorphology Vol. 73:185-206.
- SALA, J. M., 1975
Recursos Hídricos (Especial mención de las aguas subterráneas).
VI Cong. Geol. Arg., Relatorio "Geología de la Provincia de Buenos Aires": 169-193. Buenos Aires.
- SCAMPINI, E., OSTERRIETH, M. Y P. MARTINEZ, 1999
Relación entre propiedades físico-químicas y mesofauna asociada de una bordura en Argiudoles de la Llanura pampeana, Argentina.
XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Actas en CD: 5pp Pucón Chile.
- SCOPE, 1995
Environmental indicators; a systematic approach to measuring and reporting on the environment in the context of sustainable development. In; Indicators of sustainable development for decision-making,
Eds. N. Gouzee, B. Mazijn and S. Billharz, Federal Planning Office, Brussels: 25 p
- SOIL SURVEY STAFF, 1975
Soil Taxonomy. Agric.Handbook, USDA. Washington D.C. USA, 436-754.
Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Ed. 20, 1999. APHA- AWWA- WEF
- WALKLEY, AY C.A. BLACK, 1965
En C.A. Black (Ed.) Methods of Soil Analysis.
American Society of Agronomy. pp 1372-1375.



Caracterización geomecánica de taludes en el camino entre Ciudad de La Punta - El Mirador

Sur de la Sierra Grande de San Luis. Parte 1

Sales, Daniel A. ¹ - Mazzeo, Natalia ¹ - Pedersen, Oscar ¹ - Gómez Figueroa, Javier ¹ - Ferreyra, Franco ¹ - Origlia, Daniel ²

Recibido: 25 de Marzo de 2008 • Aceptado: 18 de Mayo de 2009

Resumen

La construcción del nuevo camino que une la Ciudad de La Punta con la villa turística de Potrero de los Funes, sobre el faldeo occidental al sur de la Sierra de San Luis, presenta taludes de precorte en rocas graníticas proclives a caída de bloques principalmente por rotura planar. La elevada pendiente del frente serrano donde se construyó la traza vial y el alto grado de disgregación mecánica de la roca, influenciada por fallas inversas con rumbo predominante NNO-SSE y fallas extensionales NO-SE, determinan la inestabilidad de los taludes del sector de estudio.

Se estudiaron 24 taludes a lo largo de la traza vial mediante la descripción cuantitativa de las discontinuidades aflorantes y se clasificó el macizo rocoso usando la clasificación geomecánica CSIR, variando los resultados entre las clases 4 a 5 según el índice RMR.

Palabras clave: Macizo rocoso, taludes, caracterización geomecánica.

Abstract

The construction of a new road between the city of La Punta and the tourist village of Potrero de Los Funes, on the western hillside at southern of San Luis Range, shows precut slopes in granitic rocks which are prone to rock falls, mainly due to planar failure. The steep slope of the range front crossed by the road and the high level of rock mechanical disintegration, influenced by NNW-SSW reverse and NW-SE normal faults, determine the instability of the slopes in the study area.

24 slopes along the road trace were studied using the quantitative description of the outcropping discontinuities; the rock mass was classified using the CSIR geomechanical classification; the results varies from class 4 to 5 according the RMR Index.

Keywords: Rock mass, slopes, geomechanical characterization

¹ Departamento de Geología, Universidad Nacional de San Luis, Chacabuco 917, (5700) San Luis

✉ E-mail: sales@unsl.edu.ar

² Departamento de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto

INTRODUCCIÓN

La presente contribución analiza las características geomecánicas de los taludes generados por la construcción del nuevo camino entre Ciudad de La Punta y la villa turística de Potrero de los Funes, inaugurado a principios del año 2006.

El camino se inicia a una altitud de 900 m s.n.m., a 10 kilómetros al norte de la Ciudad de San Luis, en la intersección con la ruta provincial N° 3 (coordenadas 33° 11' 14" Latitud Sur y 66° 17' 01,73" Longitud Oeste) y asciende por la ladera occidental del extremo sur de la Sierra Grande de San Luis; su pendiente promedio es de 8 %. El tramo de estudio comprende 5 km de una traza vial total de 11 km y culmina en el sector de máxima cota (1220 m s.n.m.), en el paraje denominado "El Mirador" (Figura 1).



Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio (modificado de Google Earth)

RASGOS GEOLÓGICOS Y ESTRUCTURALES DEL ÁREA

La geología del área de estudio está constituida por rocas del basamento cristalino, representado principalmente por la terminación austral del granito La Escalerilla, de edad devónica (404 ± 5 Ma) (Camacho and Ireland, 1997). Estas rocas fueron atravesadas por la nueva traza vial y sobre ellas se desarrollan los taludes de precorte analizados en este trabajo.

Los granitoides presentan tonalidad grisácea con variaciones rosadas y su composición varía entre monzogranitos, tonalitas y granodioritas. Se reconocen cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, moscovita y biotita, acompañados por minerales secundarios como sericita y clorita. En la mayoría de los afloramientos se observó que los minerales más propensos a la alteración son las micas (vermiculita, clorita) y el feldespato potásico, generando minerales arcillosos. La biotita está orientada y coincide con la estructura interna regional NE-SO. Predominan las texturas granudas a porfíricas de tamaño medio a grueso. En contraste se hallan las inyecciones satélites donde se observan texturas aplíticas y pegmatíticas resistentes (Sales et al., 2001).

El macizo rocoso se encuentra afectado por fallas inversas de alcance regional y que caracterizan el estilo de fracturación de los bloques pampeanos, basculados por ascenso diferencial durante la orogenia Andina, lo que generó perfiles asimétricos con pendientes abruptas en su margen occidental (sector de estudio) y suaves en su margen oriental (González Bonorino 1950, Criado Roqué et al. 1981, Costa 1992, Sales et al. 2001).

También interviene localmente un sistema de fallas extensionales, cuyo rumbo varía entre 290° y 310°, con buzamiento hacia el NE (Costa y Cortés 1993, Sales et al. 2001) y

cuyos rasgos tectónicos continúan hacia el sur, en la depresión de Las Chacras, en cercanías del lago Cruz de Piedra (Figura 1).

METODOLOGÍA APLICADA

La descripción geomecánica del macizo se llevó a cabo a partir de la descripción cuantitativa de una muestra compuesta por 492 discontinuidades distribuidas en 24 taludes a lo largo de la traza del camino. En cada talud, se definieron paneles de muestreo de 5 m de longitud, intercalados aproximadamente cada 20 m, que se tomaron como representativos de cada sector.

Para la calidad del macizo rocoso se utilizó la clasificación geomecánica CSIR (Bieniawski, 1979) mediante la determinación del índice RMR (Rock Mass Rating) haciendo uso de los seis parámetros que lo componen y que fueron determinados según se describe a continuación.

Las discontinuidades se analizaron aplicando la metodología sugerida por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1981) para la descripción cuantitativa de macizos rocosos. Los datos relevados para cada discontinuidad fueron: orientación, espaciamiento, continuidad, rugosidad, resistencia de la matriz rocosa, abertura y relleno.

La determinación de la resistencia de la matriz rocosa se pudo estimar a partir de la respuesta a los golpes de martillo que ofrecieron las superficies expuestas de discontinuidades y bloques, siguiendo el método de campo sugerido por Ferrer y González de Vallejo (1999).

El cálculo del Índice de Calidad RQD (Rock Quality Designation Index) fue estimado en afloramiento a partir de la expresión empírica de Palmstrom (1975), que involucra el total de discontinuidades por metro cúbico (J_v).

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad (\text{ecuación 1})$$

Por último, se observó la condición de las paredes de las discontinuidades respecto a la condición de las aguas subterráneas (secas, húmedas, flujos).

CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

Los taludes tienen direcciones predominantes ONO-ESE (entre 270° y 280°), mostrando una cara libre coincidente con la dirección de ascenso de la traza por la quebrada principal. En menor proporción existen taludes con direcciones NO-SE (entre 340° y 350°) y NE-SO entre (10° y 40°) (Figura 2a). En general los taludes presentan inclinaciones entre 70° y 80° hacia el camino (Figura 2b).

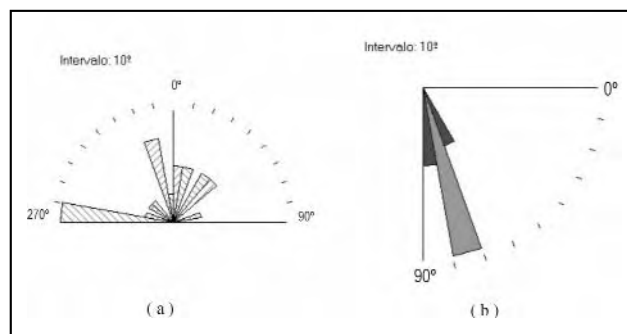


Figura 2. a) Distribución de las direcciones de los planos de taludes; b) Distribución de los valores de inclinación de la cara libre de los taludes

Los taludes de precorte analizados coinciden con el sector interno de la traza vial, que es donde mejor se exponen las discontinuidades producto de la apertura del camino. Las longitudes de su cara libre varían de 30 a 135 m. El 88 % de los 24 taludes tienen longitudes que varían entre 50 y 100 m, 8 % entre 101 y 150 m y el 4 % restante entre 30 y 50 m de longitud (Figura 3). La altura promedio de los taludes es entre 10 y 35 m sobre el nivel del camino.

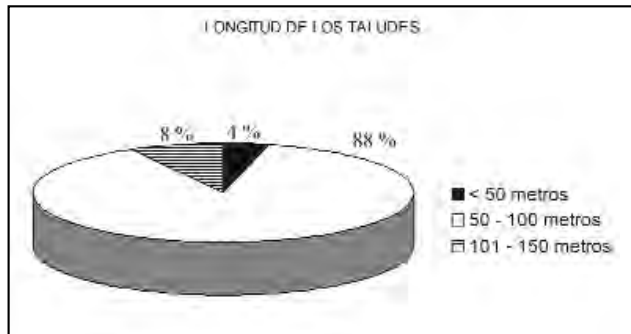


Figura 3. Distribución de longitudes de los taludes de precorte

La caracterización estructural del macizo se realizó mediante el análisis estadístico de las orientaciones de las 492 discontinuidades. Los resultados permitieron reconocer dos familias predominantes de planos de fractura. En el análisis de los histogramas circulares (Figura 4) se observa que el sistema principal posee rumbo NO-SE (entre 340° y 350°) y representa los planos de las fallas extensionales con buzamientos que varían entre 30° y 80° hacia el NE. El segundo sistema representa a diaclasas con rumbo NE-SO (entre 20° y 50°) y buzamientos entre 50° y 70° tanto al NO como al SE. En forma subordinada se reconocen las fallas inversas con rumbo NNO-SSE.

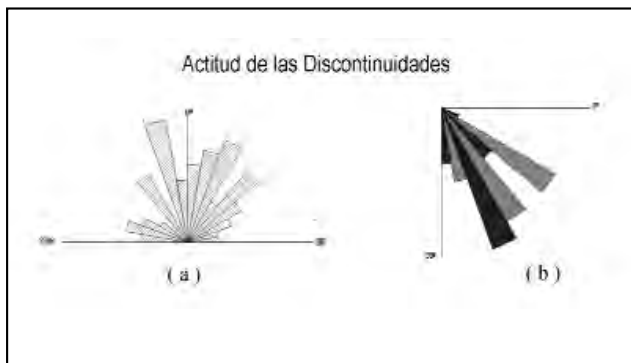


Figura 4. a) Distribución de rumbos de los planos de las discontinuidades; b) Predominio de los buzamientos de los planos de fractura

En la Figura 5 se presenta el análisis del comportamiento de los parámetros cuantitativos de las discontinuidades para completar la descripción del macizo rocoso.

La distribución del *Espaciamiento* entre planos de una misma familia de fractura muestra que el 30% corresponde a distancias de 0,06-0,2 m, el 28% con separaciones entre 0,2 - 0,6 m, el 22% entre 0,6-2 m y el 16% entre 0,02-0,06 m. Escasamente el 4 % muestra espaciamientos mayores a 2 m (Figura 5a). El predominio de espaciamientos menores está vinculado a los planos pertenecientes a la falla extensional, los que fueron

generados por cizalla frágil, teniendo en gran parte orientación similar a la cara de los taludes.

La *Continuidad* representa la extensión observable de los planos de discontinuidad, tanto de aquellos que coinciden con la cara libre del talud como de los que la cortan. La Figura 5b refleja la “baja” continuidad de los planos de fracturas, donde el 45% tienen longitudes observables entre 1-3 m, 21% continuidad “muy baja” (< 1 m), 18,5% clasificadas como “alta” (10 - 20 m), 15% continuidad “media” (3-10 m) y el 0,5% continuidad “muy alta” (> 20 m).

La *Rugosidad* de la superficie de las discontinuidades fue estimada cualitativamente y los resultados para el macizo se presentan en la Figura 5c. El 67% del total de las discontinuidades se ubica en la categoría “media”; el 29% de los planos presentaron rugosidad “alta”. Mayoritariamente, estas rugosidades pueden relacionarse con el tamaño de los fenocristales de cuarzo y feldespato (grano medio a grueso) que constituyen los granitoides. Solamente el 4% presentó rugosidad categorizada como “baja”, principalmente vinculada a las discontinuidades de las inyecciones con textura aplítica.

La figura 5d representa la *Resistencia de la matriz rocosa*, donde se observa que el 55% fue categorizada como “rocas duras” y el 23% como “rocas muy duras”. En estas discontinuidades la superficie rocosa se observó entre “fresca” y “decolorada”, indicando un bajo grado de meteorización. El 13,5% de las discontinuidades se da sobre rocas con condiciones de resistencia “moderadamente blanda”, principalmente localizadas en algunos taludes con sectores en los que la roca se presenta en condición “desintegrada”, debida a procesos de meteorización más intensos. En menor proporción, el 8% tiene condición de “rocas extremadamente duras”. El 0,5% restante se determinó como “rocas muy blandas” (Figura 6).

En la Figura 5e se presentan los resultados de las mediciones de las *Aberturas* existentes entre las caras de las discontinuidades. Se observa que el 44% se agrupa en la categoría de “abiertas” (0,5 a 10 mm). En proporciones semejantes destacan las discontinuidades con aberturas “cerradas” (< 0,5 mm) con un 29%, y “muy abiertas” (> 10 mm), con el 27%.

En la figura 5f se ilustra la proporción de discontinuidades con *Rellenos*. Se observa que el 57% de las discontinuidades se presentan sin rellenos y que el 43% restante están rellenas por tierra, arcilla y, en menor proporción, por sílice.

Respecto al flujo de agua a través de las discontinuidades, el 95% de las observaciones se agruparon en la condición “seca” y el 5% restante en la condición “húmeda” (Figura 5g).

La Figura 5h ilustra la distribución de tamaños de los bloques medidos en los afloramientos. El 70% de los bloques se consideran de escaso volumen, con tamaños inferiores a 1m^3 ; el 30 % restante presentó volúmenes superiores a 1m^3 . La mayoritaria presencia de bloques de volumen pequeño le otorga inestabilidad a la mayoría de los taludes estudiados, produciendo una constante caída de bloques de diferentes tamaños sobre la calzada (Figura 7).

La calidad del macizo granítico se cuantificó a partir del cálculo del *Índice RQD*, mediante la ecuación 1 (Palmstrom, 1975). La Figura 8 ilustra los resultados de estos cálculos y permite observar que el 41 % de los afloramientos presenta valores RQD de calidad “regular” (50-75%), 34% de calidad “mala” (25-50%), 21% de calidad “buena” (75-90%) y 4 % un índice de calidad “muy buena” (> 90 %).

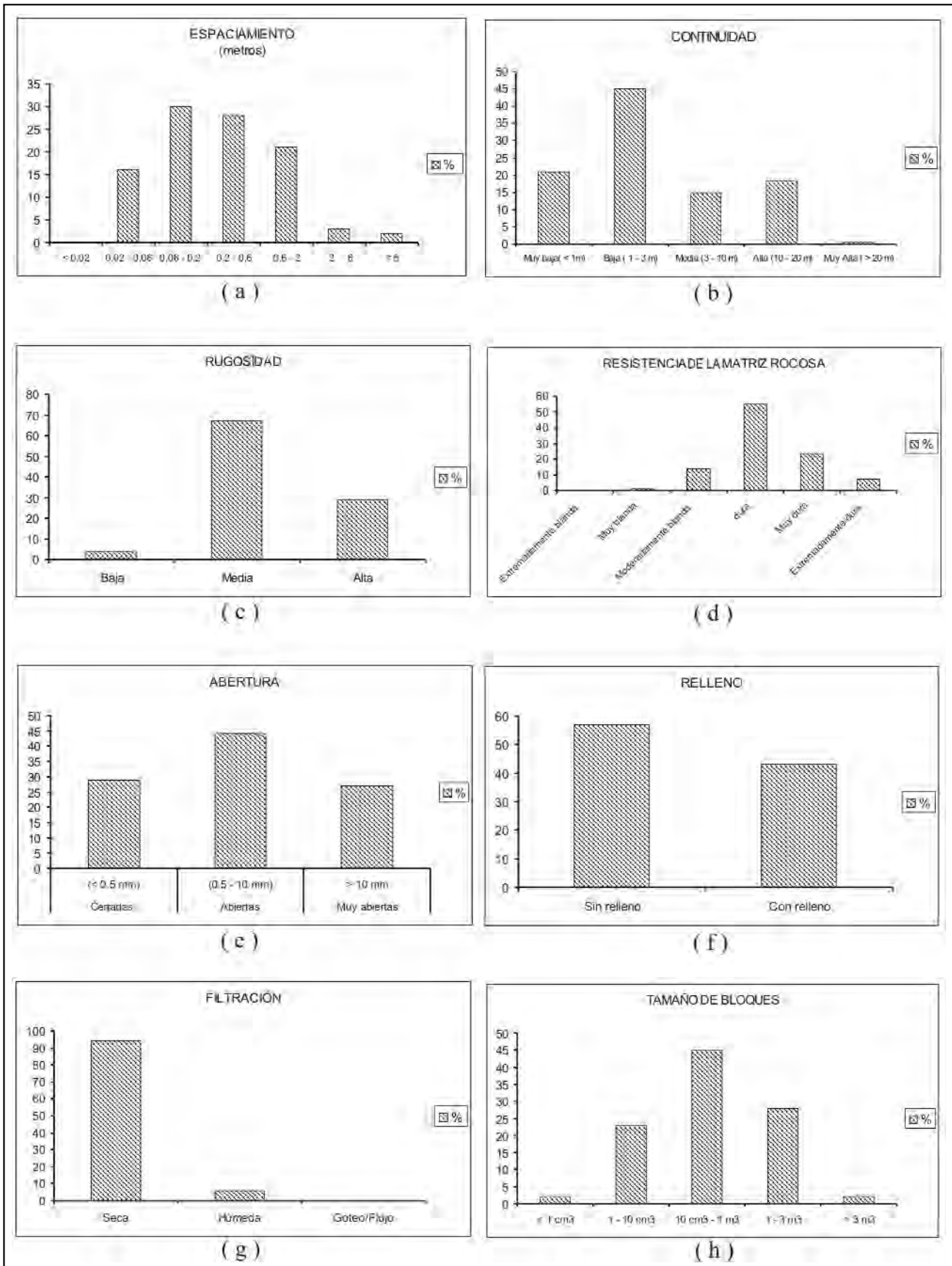


Figura 5. Descripción cuantitativa de los parámetros analizados en las discontinuidades: a. espaciamento, b. continuidad, c. rugosidad, d. resistencia de la matriz rocosa, e. abertura, f. relleno, g. filtración y h. tamaño de bloques



Figura 6. Vista panorámica hacia el NO de uno de los taludes. Entre las líneas punteadas se observa un sector con avanzado grado de meteorización

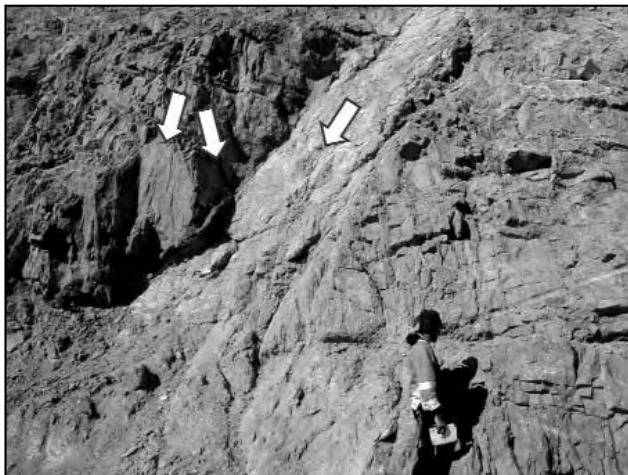


Figura 7. Vista panorámica de un talud. Las flechas indican la exposición de diferentes planos de discontinuidades a partir del desplazamiento de los bloques

A partir de los datos de la descripción cuantitativa de las discontinuidades para cada talud, se estimó el parámetro RMR de la clasificación geomecánica CSIR (Bieniawski, 1979) con la finalidad de determinar la calidad del macizo rocoso granítico. Se tuvo en cuenta la actitud espacial de los planos de fallas y diaclasas respecto a la cara de cada talud para la corrección del valor RMR. (Figura 9). El 52% de los taludes presentaron valores RMR entre 21 y 40, lo que determina una clasificación geomecánica “mala” para la calidad del macizo. El 39% de los taludes tuvo valores RMR menores a 20, que representan calidad “muy mala”. Por último, el 9% restante de los taludes presentó valores RMR de entre 41 y 60, cuya condición geomecánica se clasifica como “media”. Si se tiene en cuenta que el 91% de los taludes presenta condiciones de “mala” o “muy mala” calidad del macizo rocoso, se hacen necesarios estudios más detallados para evaluar los riesgos de deslizamientos y las medidas correctoras.

La Figura 10 muestra el comportamiento observado en la mayor parte de los taludes, en los que se presentan discontinuidades con buzamiento coincidentes con la inclinación de

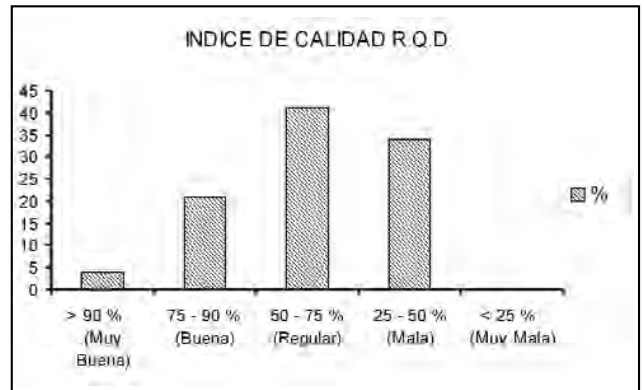


Figura 8. Detalle de la fracturación de la roca granítica a partir de estimaciones del RQD

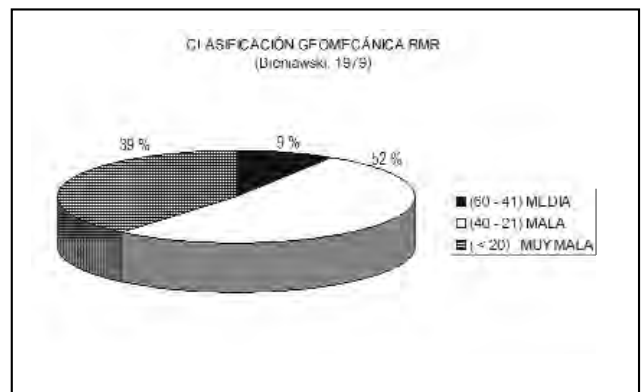


Figura 9. Diagrama indicando la clasificación geomecánica de CSIR (Bieniawski, 1979)



Figura 10. Talud con riesgo de deslizamientos de bloques por rotura planar

los taludes, que producen deslizamientos por rotura planar hacia el camino. Cuando los planos buznan contra pendiente o en corte oblicuo al rumbo de la traza, se producen caídas de bloques de menores dimensiones debidas al alto grado de fracturación (Figuras 7 y 11).

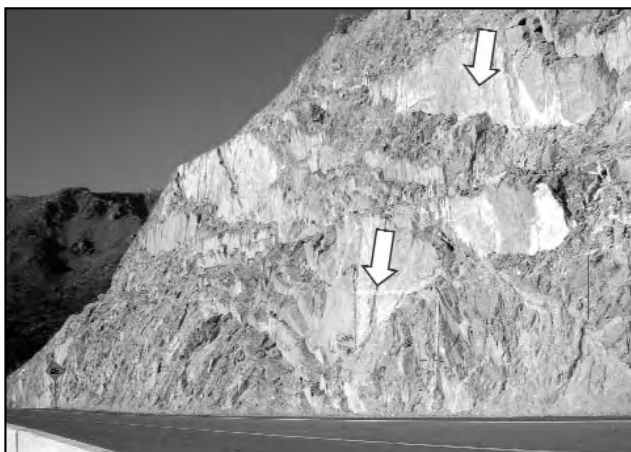


Figura 11. Vista panorámica hacia el NE del talud en el sector "El Mirador"

CONCLUSIONES

- 1) De acuerdo a los resultados de la clasificación geomecánica CSIR para el macizo granítico analizado, la mayoría de los taludes de precorte del camino presenta condiciones de inestabilidad potencial, o manifiesta en algunos casos, ya que el 91 % de los mismos se clasificó dentro de las categorías "mala" o "muy mala".
- 2) Existen taludes con procesos de remoción en masa incipientes, predominando las caídas de bloques de diverso tamaño por rotura planar hacia el camino.
- 3) Dentro de los parámetros geomecánicos analizados para las rocas y discontinuidades, se considera que el bajo espaciamiento de las discontinuidades, principalmente

las que tienen una orientación semejante a la cara de la mayoría de los taludes, es uno de los principales condicionantes de la inestabilidad, ya que el denso fracturamiento vinculado a las fallas extensionales genera un elevado número de bloques de reducidas dimensiones y una importante disgregación mecánica del macizo.

- 4) En el mismo sentido, las estimaciones de la calidad del macizo mediante el índice RQD, sitúan al 75% de los taludes dentro de las categorías "regular" o "mala".
- 5) Se considera de especial importancia la relación entre la orientación de las discontinuidades, mayoritariamente con rumbos NO-SE y buzamiento al NE, y la orientación de los taludes con dirección predominantes NO-SE. Cuando los taludes se inclinan hacia el NE y son coincidentes con el buzamiento de las discontinuidades, se generan las condiciones favorables para los deslizamientos planares, y cuando los buzamientos son opuestos se producen las caídas de bloques.
- 6) La resistencia de la matriz rocosa se clasificó como "dura" o "muy dura" con escasa alteración, teniendo poca influencia en la resistencia general del macizo, debido a la gran cantidad de discontinuidades abiertas.
- 7) De este estudio surge la necesidad de realizar estudios particulares en cada talud para cuantificar los riesgos de deslizamientos y plantear las posibles medidas correctivas o preventivas en los casos que fueran necesarias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración en este trabajo de los alumnos Rolando Ubieta, Ezequiel González Mosso, Gastón León, Silvia De Pasquale, Sebastián Calazza y Javier Guevara.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BIENIAWSKI, Z.T., 1979
The geomechanics classification in rock engineering applications.
4 th International Conference on Rock Mechanics. Montreaux, 2: 41 - 48.
- CAMACHO, A. AND T. IRELAND, 1997
Geochronology preliminar report. Geoscientific Mapping of the Sierras Pampeanas Argentine-Australian Cooperative Project.
Australian Geological Survey Organization, Informe inédito 29 p. Buenos Aires.
- COSTA, C.H., 1992
Neotectónica del sur de la sierra de San Luis.
Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Luis, 390 p. (Inédito).
- COSTA, C.H. Y J. CORTES, 1993
Tectónica extensional en el extremo sur de la sierra de San Luis.
12º Congreso Geológico Argentino y 2º Congreso de Exploración de Hidrocarburos Actas, 3:113-118.
- CRIDO ROQUE, P., C. MOMBRO Y V. RAMOS, 1981
Estructura e interpretación tectónica.
en: M. Yrigoyen Ed., Geol. y Rec. Nat. de la Pcia. de San Luis. 8º Congreso Geológico Argentino Relatorio: 151 192.
- FERRER, M. Y L. GONZÁLEZ DE VALLEJO, 1999
Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos.
Instituto Tecnológico Geominero de España (IGME), 83 pp, España.
- GONZALEZ BONORINO, F., 1950
Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas.
Asociación Geológica Argentina Revista 5:81-110, Buenos Aires.
- ISRM, 1981
Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring.
Ed. E. T. Brown. Pergamon Press.

PALMSTROM, A. (1975)

Characterization of degree of jointing and rock mass quality.
Int. Report Ing. A.B. Berdel, A.S. Oslo, 62 pp.

SALES, D., C. GARDINI Y D. ORIGLIA, 2001

Caracterización geomecánica de taludes en Potrero de los Funes, Provincia de San Luis.
Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, 16: 153-159.



Manejo costero en la costa de dunas de Pehuen-có

Buenos Aires

Marcomini, Silvia Cristina ¹ - López, Rubén Alvaro ¹ - Uehara, Florencia ²

Recibido: 02 de Mayo de 2009 • Aceptado: 26 de Mayo de 2009

Resumen

La zona de estudio pertenece al Municipio de Coronel Rosales, al sur de la provincia de Buenos Aires, a 640 km de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y 90 km al este de Bahía Blanca.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el impacto ambiental generado por las acciones humanas en la hidro y aerodinámica costera del área en estudio.

Se determinó que los factores antropogénicos que han afectado la hidro y aerodinámica litoral local son: explotación de arena de playa, degradación y forestación de la duna costera, la generación de abras deflacionarias y el desarrollo de barreras eólicas.

Sobre la base de las características morfodinámicas del sistema litoral y las alteraciones antropogénicas reconocidas, se zonificó el área costera definiéndose grados de erosión alto, medio, moderado y bajo. La zonificación fue efectuada sobre la base de las siguientes características: a) conservación y morfología de la duna costera, b) morfología del frente costero, c) desarrollo morfológico del perfil de playa, d) actividad y morfologías de los campos de dunas interiores y c) grado densidad y tipo de vegetación sobre la duna costera.

El mapa de susceptibilidad a la erosión muestra que el sector costero más vulnerable es el comprendido entre las calles San Martín y la intersección de las calles 5 y 12, donde se detectó un déficit en la tasa de transporte de sedimentos por el desarrollo forestal, la urbanización, el trazado de la avenida costanera y en el desplazamiento de la trama urbana a sobre los sectores donde se desarrollaba la duna costera.

Se recomienda suspender todo tipo de extracción y movilización de sedimentos del sector de playa y duna costera. Proponiéndose como área alternativa sectores del campo de dunas inactivo, bajo control y monitoreo de las actividades.

Palabras clave: *Dunas, erosión costera, intervención humana, manejo costero.*

Abstract

The study area belongs to Coronel Rosales, on the southeast coast of Buenos Aires province, 640 km southern Buenos Aires city and 90 km to the east of Bahía Blanca city.

The purpose of this study consisted on the evaluation of the environmental impact on the hydro and aerodynamics of the coastal area.

Anthropogenic factors that have affected the hydro and erodynamics are: sand beach exploitation, degradation and afforestation of the coastal dune, the generation of deflation paths and the eolian barriers.

¹ Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria, Pabellón 2, CP 1428

² Unidad de Aplicaciones Agropecuarias, Grupo Agronómico, Centro Atómico Ezeiza.

An erosional hazard zonnification is carried out considering the morphodynamics of the littoral system and

the human intervention. Four grades of susceptibility to erosion are defined: High, medium, moderate and low. Erosion risk evaluations were based on the following characteristics: a) morphology and conservation of the coastal dune, b) morphology of the foredune front, c) beach profile development and morphology, d) interior fields activity and morphology and c) grade, density and type of vegetation of the coastal dune.

From the analysis of the susceptibility to the erosion map, concluding that the most vulnerable coastal sector is located between San Martín street and the intersection of 5 and 12 street, where a deficit in the sediments rate of transport is detected, due to the forest development, the urbanization, the layout of the coastal avenue and to the displacement of the urban centers towards sectors where coastal dune are developed.

We recommend the interruption of sand exploitation or mobilization from the beach and foredune. Sand exploitation for local use can be extracted from the inactive dunefield (B) under severe control and monitoring mining activities.

Keywords: Dunes, coastal erosion, human intervention, coastal management.

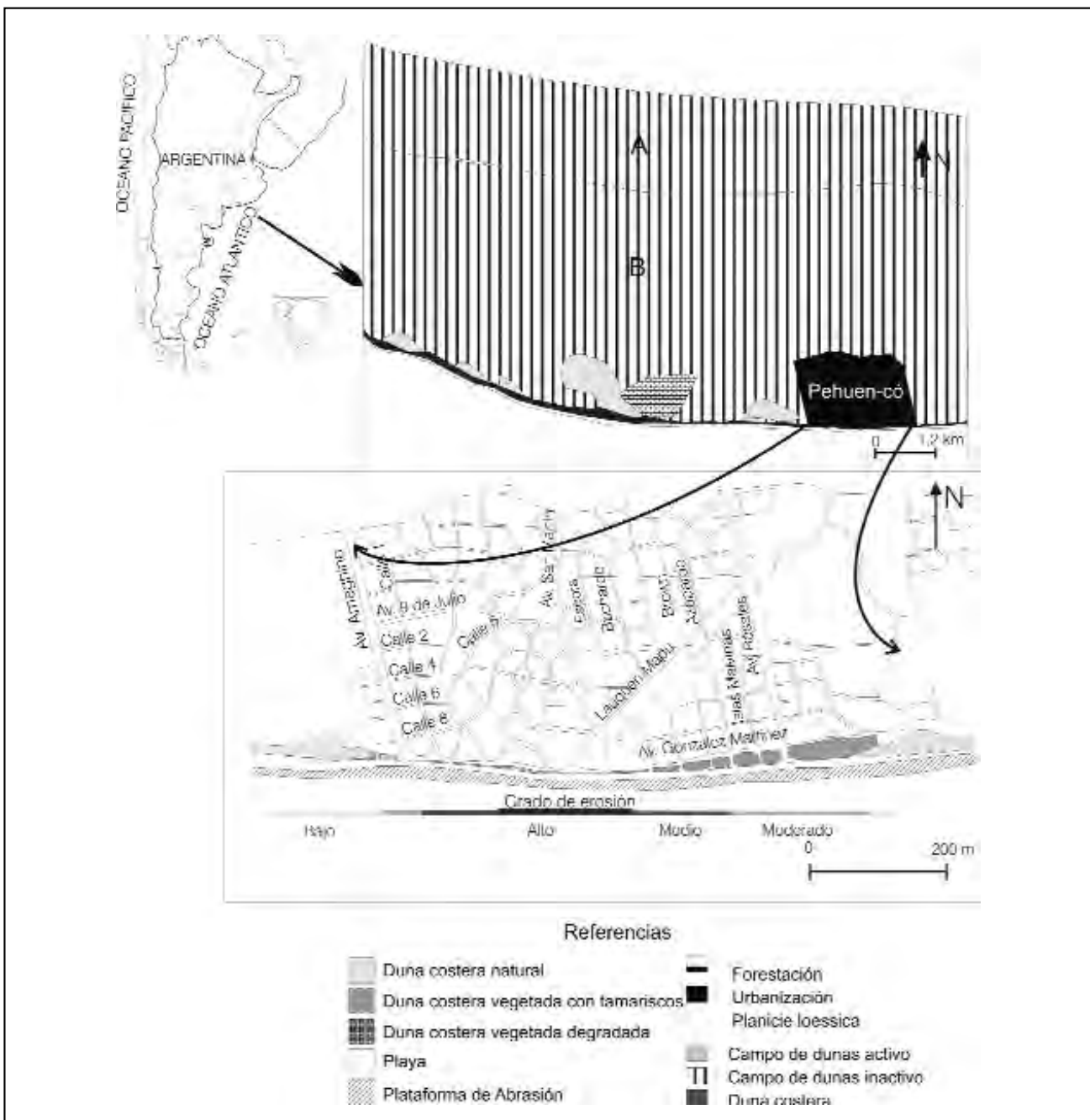


Figura 1. Mapa de ubicación y del grado de vulnerabilidad a la erosión en costa de Pehuén-có, estimado sobre la base de las características morfológicas de la playa y duna costera

INTRODUCCIÓN

Los numerosos desarrollos urbanos en el litoral marino de la provincia de Buenos Aires, han provocado importantes cambios en las variables naturales que condicionan el desarrollo natural de los ambientes costeros, provocando efectos no deseados. Siendo, la erosión de playa y el retroceso de la línea de costa, uno de las consecuencias de mayor condicionamiento en el desarrollo económico-social de las ciudades balnearias (*Marcomini y López, 1993*).

La zona de estudio se ubica al sur de la provincia de Buenos Aires a 640 km de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y 90 km al este de la ciudad de Bahía Blanca, pertenece al partido de Coronel Rosales y tiene una extensión a lo largo de la costa de 15 km (Figura 1).

Numerosos autores han realizado estudios de diversa índole en el área. *Mouzo et al. (1985)* y *Vega et al. (1989)* estudiaron los afloramientos correspondientes a las plataformas de abrasión. Los mismos están integrados por depósitos correspondientes a una ingresión marina conformado por bancos de areniscas y limos consolidados algo conglomeráticos. Estos depósitos fueron asignados al Holoceno con una edad de 6.590 ± 130 años A. P, datada por el método de ^{14}C .

Gutiérrez y Schillizi (2002) describieron los paleoambientes del Cuaternario en el sector comprendido entre Pehuen-có y Monte Hermoso sobre la base de las asociaciones de diatomeas. *Fernández et al. 2003* estudiaron la interrelación de los ambientes eólicos y marinos basados en las características texturales y mineralógicas de las arenas.

Fontana (2005) realizó una zonificación del área cercana a Monte Hermoso según la composición florística de las distintas geoformas.

Caló et al. (1998) estudiaron la estabilidad de las playas de Pehuen-có. Sobre la base de perfiles de playa relevados durante 300 días con una frecuencia quincenal, reconocieron un comportamiento espacial diferencial de la playa. Al este de Pehuen-có monitorearon una tendencia acreciva, mientras que hacia el oeste la playa presentó un ciclo anual de recuperación con erosión en invierno y acumulación hacia el verano. Los mismos autores consideraron que la playa tiene posibilidad de recuperación en períodos que exceden al año, ya que las pérdidas evidenciadas son menores que las pérdidas máximas recuperables. Los volúmenes de arena extraídos en el sector este por los concesionarios de la playa, suministrados por la delegación de la Policía Minera, tenían un valor medio de 129 m^3 mensual. *Caló et al. (1998)* concluyeron, que esta cifra no representaría una pérdida perjudicial para la playa, si se la compara con las pérdidas máximas recuperables.

El presente trabajo consistió en evaluar las características morfológicas y sedimentarias como así también el impacto ambiental generado por las acciones humanas en la hidro y aerodinámica litoral de Pehuen-có, con el objeto de zonificar los sectores más vulnerables a la erosión. Se desarrolló una matriz y un mapa que permitió cuantificar, delimitar el grado y las zonas afectadas, como así también medidas para mitigar los impactos ambientales.

METODOLOGÍA

Se realizó un reconocimiento geomorfológico del área en estudio sobre la base de fotos aéreas correspondientes a la Armada Argentina, Servicio de Hidrografía Naval, correspondiente al año 1996 a escala 1:40.000.

Se efectuaron muestreos de sedimentos correspondientes a campos de dunas inactivos, activos, duna costera y playa. Las tareas de muestreo consistieron en la extracción 0,75 kg de sedimentos superficiales en todos los subambientes.

Los análisis granulométricos se efectuaron por tamizado con Ro-tap durante 15 minutos, la escala utilizada fue la de Udden -Wentworth. Se calcularon los porcentajes en peso de las clases granulométricas y los porcentajes acumulativos y se realizaron histogramas y curvas de frecuencia acumulativa en papel de probabilidad. Los coeficientes estadísticos se obtuvieron mediante el programa GRANUS (*Perillo et al. 1985*), del cual se utilizaron los valores de media, desviación estándar, asimetría y agudeza obtenidos por el método gráfico de *Folk y Ward (1957)*. El análisis estadístico se completó con la consideración de los valores de moda y mediana para cada muestra.

Las evaluaciones del riesgo de erosión se confeccionaron relevando las siguientes características: a) morfología y grado de conservación de la duna costera, b) morfología del pie de dunas, c) desarrollo y morfología del perfil de playa, d) actividad y morfología de los campos interiores y c) en el grado, densidad y tipo de vegetación de la duna costera.

Se definieron distintos grados de erosión, sobre la base de los rasgos previamente identificados, en: alto, medio, moderado y bajo. La información fue volcada en un mapa de zonificación de riesgo a la erosión.

GEOMORFOLOGÍA E HIDRODINÁMICA

La región se caracteriza por presentar un paisaje poligénico desarrollado por los procesos marino, eólico y fluvial. El sector costero está compuesto por un campo de dunas que alcanza una extensión de 6,5 km desde la playa hacia el continente.

Sobre la base de las morfologías eólicas reconocidas se ha diferenciado un campo inactivo y un campo activo (Figura 1). El campo inactivo cubre la mayor parte del área y está constituido por dunas parabólicas cuyos cuernos apuntan hacia el oeste y se halla totalmente estabilizado por la vegetación (Figura 2). Dentro de este campo se han diferenciado 2 subunidades (Figura 1, A y B), una localizada hacia el norte donde la altura de las dunas es mayor y alcanza hasta los 8 m (A) y la otra cercana a la costa donde la altura de las dunas oscila entre los 2 y los 6 m (B).



Figura 2. Vista de campo de las dunas parabólicas que conforman el campo inactivo

El campo activo es de escasa extensión, se presenta como parches dentro del paisaje y están conformados por crestas barjanoides alineadas con eje principal de rumbo Este- Oeste.

La playa natural presenta una berma estable y barras de lavado en el sector intermareal; por lo general tienen un ancho de 100 a 150 m. En el sector céntrico de esta localidad la berma estable desaparece y es común observar la migración de barras de lavado sobre la plataforma de abrasión (Figura 3).



Figura 3. Playa del centro de Pehuen-có donde se observa la plataforma de abrasión en el sector intermareal

Otra geoforma marina que caracteriza el área son las plataformas de abrasión, que quedan expuestas durante la baja marea. Las mismas están constituidas por bancos de areniscas y limos consolidados algo conglomeráticos que fueron estudiados por Mouzo, (1980); Mouzo et al. (1985); Aramayo y Manera (1985), Gutiérrez y Schullizi (2002).

La duna costera está, por lo general, parcialmente estabilizada por vegetación natural e introducida y conforma un cordón paralelo a la línea de costa de 40 a 80 m de ancho (Figura 4). No obstante ello, en el sector que ocupa la duna costera, son comunes los fenómenos deflacionarios localizados en las crestas del cordón, con la formación de dunas en voladura circulares (*plate blowout*).

El régimen de marea para la zona es mesomareal con una amplitud de marea de 3,30 m. Las olas provenientes del sector sur se manifiestan con mayor frecuencia, le siguen aquellas



Figura 4. Duna costera vegetada con especies alóctonas al suroeste de la localidad

provenientes del sudoeste. La dirección de deriva litoral predominante es hacia el este (56,6%), en un 31,4 % hacia el oeste y un 12 % no hubo dirección preferencial. Caló et al. (1995), reconocieron para el área dos poblaciones de altura de ola, una con una moda entre 0,30 y 0,60 m que responde al clima habitual y otra, entre 1,50 y 1,80 m correspondiente a eventos de tormenta. Los períodos hasta 10 segundos abarcan al 70 % de las observaciones y las relacionan a climas de ola normales. Aquellas mayores a los 10 seg son consideradas como de tormentas y comprenden el 30% restante.

RESULTADOS

Las alteraciones antrópicas en el sistema litoral

En las investigaciones realizadas en el área de trabajo, se determinó la incidencia que tiene la acción humana sobre el medio físico, a través de distintas actividades relacionadas con la urbanización y las explotaciones mineras.

Entre las principales alteraciones antropogénicas que han afectado al sistema litoral se destacan las siguientes:

Forestación de la duna costera con especies arbustivas alóctonas

El tamarisco (*Tamaris galica*) fue introducido en estos sectores costeros, al igual que las acacias, con el fin de fijar las dunas e interrumpir el ingreso de arena de la playa hacia el continente, para iniciar distintas actividades como la forestación o urbanización. Si bien estas especies se han adaptado perfectamente a las condiciones salinas, su desarrollo afectó notoriamente la circulación de arena en el sistema litoral, impidiendo el intercambio natural que existe entre la duna costera y la playa y modificando, en consecuencia, las características geomorfológicas de la duna costera original.

En la figura 5 se observa un esquema donde se representa la evolución de una duna costera natural, vegetada por gramíneas (*Panicum racemosum*) (A, B y C), y una duna costera con vegetación arbustiva implantada, como tamarisco y acacias (D, E, F).

Las gramíneas que colonizan la duna natural (Figura 5 A) forman una cobertura vegetal que, con el tiempo, atrapa sedimentos en forma homogénea a lo largo del perfil de la duna, aumentando su altura y ancho en forma proporcional a su tamaño original. Si se registra algún evento de tormenta (*surge storm*), se genera una escarpa en el pie de duna (Figura 5 B) que, posteriormente, se recupera rápidamente al alcanzar el ángulo de estabilidad de las partículas de arena, por la acción conjunta de la remoción en masa y el proceso eólico (Figura 5 C). El intercambio de arena entre la playa y la duna, entonces, no se interrumpe durante la evolución.

La vegetación de la duna por especies arbustivas (Figura 6), altera la hidrodinámica del medio. En general, estos arbustos favorecen la formación de cordones de dunas costeras que, con el tiempo, aumentan su altura a medida que el arbusto crece, pero disminuyen su ancho hasta que la morfología se torna inestable (Figura 5 D). Frente a los eventos de tormenta la acción del oleaje toma arena del pie de duna produciendo una importante escarpa erosiva que, en consecuencia, disminuye el ancho de la duna. Por otro lado, las numerosas ramificaciones de sus raíces hacen que durante las tormentas (*surge storms*) las olas no puedan tomar la suficiente cantidad de arena para saturar sus condiciones de alta energía, tomándola de la playa y provocando la disminución de su nivel (Figura 5 E).

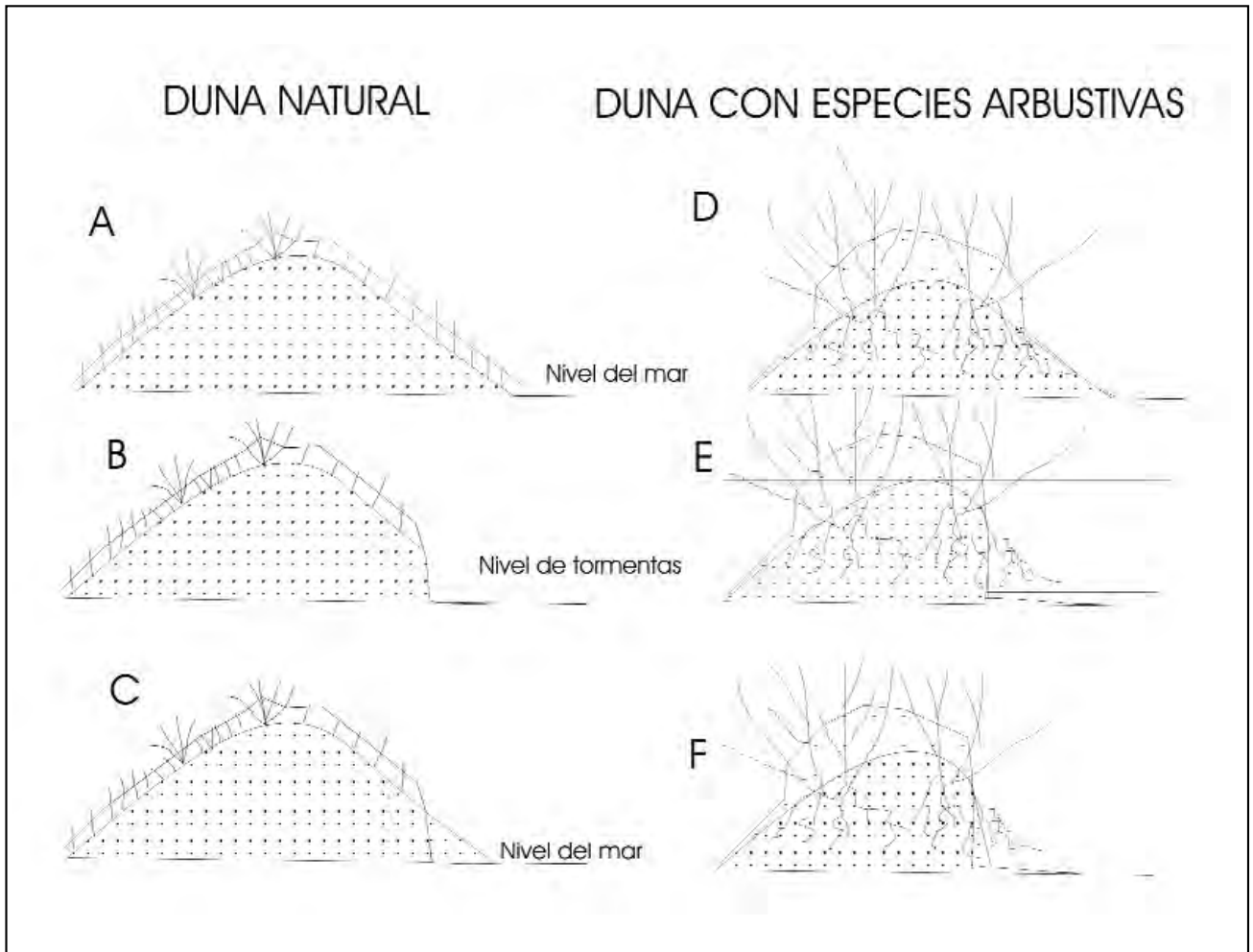


Figura 5. Modelo esquemático que representa la evolución morfológica de una duna costera natural, (A, B y C); y de una modificada por el hombre (D, E y F), por la implantación de vegetación arbustiva como tamarisco y acacias

Luego de la tormenta la escarpa demora en recuperarse, ya que no hay suficiente arena a disposición y el efecto soporte de las raíces no permite alcanzar el perfil de reposo de la arena. Asimismo, las raíces y ramas hacen de contenedor de los procesos de remoción en masa, de manera tal que el único agente que recompone la escarpa es el viento. El área de disponibilidad de arena queda restringida sólo a la playa posterior, la cual como consecuencia de la tormenta y el descenso de su nivel, generan mayores condiciones de humedad y, por consiguiente una disminución del área de playa seca que incide directamente sobre el alcance de la acción eólica afectando la eficiencia para su reconstrucción (Figura 5 F). En estos casos, además, se corta el intercambio de arena entre la playa y la duna litoral por la cobertura vegetal y se intensifica la erosión de playa.

Dadas las características de los campos de dunas estudiados, la disponibilidad de arena en la zona ha disminuido en forma natural por la estabilización de los campos de dunas. En consecuencia, el aporte eólico es menor y las acciones humanas han tendido a potenciar este efecto. El cordón duna costera de la ciudad de Pehuen-có ha sido vegetado por tamariscos, acacias y garra de león en su totalidad. La falta de disponibilidad de arena hace que el tamarisco crezca sin entrapar gran cantidad de sedimentos y favorezca la generación de fenómenos deflacionarios locales (dunas en voladura). Hay sectores de

mayor riesgo de erosión, como pueden distinguirse en la figura 1, donde la duna costera se ha degradado y presenta una pendiente muy alta en su cara del mar. Dichos sectores están comprendidos entre la calle 5 y la avenida San Martín.



Figura 6. Duna costera colonizada por tamarisco en el centro de la localidad

Barreras eólicas

Las barreras eólicas que forman las forestaciones o núcleos urbanos, entrapan arena en el sector de barlovento como consecuencia de la interrupción del flujo eólico y producen un déficit de la misma a sotavento. Como consecuencia, se genera un incremento de los procesos deflacionarios en los sectores de sotavento, que degrada las dunas preexistentes mediante la formación de dunas en voladura. Por la misma causa, la playa asociada a estos campos, es afectada por una pérdida de aporte eólico del sector continental. Otras consecuencias son los problemas de invasión de dunas que se pueden producir a barlovento. Efectos similares se han observado en otras localidades del norte de la costa atlántica de la provincia de Buenos Aires (Marcomini y López 1995).

La localidad de Pehuen-có está rodeada por una barrera forestal. Hacia el Oeste, en la zona de camping, la forestación alcanza un mayor desarrollo y actúa como barrera eólica, produciendo importantes tasas de acumulación, e intensificando la deflación en la zona de la ciudad de Pehuen-có. Esto trae aparejado un menor aporte de sedimentos a la playa y, como consecuencia, un incremento en las condiciones erosivas. Este factor deberá tenerse en consideración en el futuro desarrollo urbano del área en cuestión.

Generación de dunas en voladura por avenidas

El diseño urbano de las avenidas en la ciudad de Pehuen-có es adecuado ya que no posee un patrón rectilíneo y la mayoría de los drenajes no terminan en la playa, como ocurre en numerosas localidades balnearias de la provincia de Buenos Aires (Villa Gesell, Pinamar, Mar de Ajó, Santa Teresita, etc.). No obstante ello, gran parte de las avenidas tienen su acceso a la playa formando abras sobre el cordón de dunas costero (Figura 7).



Figura 7. Abras de acceso a la playa sobre el cordón de dunas costeras. Los vientos del Sur y Sureste tienden a formar núcleos de aceleración de la velocidad del viento sobre las mismas, generando cubetas deflacionarias que actúan a manera de dunas en voladura

Dada la intensidad de los vientos del Sur y Sureste estas abras tienden a formar núcleos de aceleración de la velocidad del viento, generando cubetas deflacionarias que actúan a manera de dunas en voladura. Este proceso tenderá a aumentar la erosión del cordón de dunas mediante la generación de numerosos núcleos deflacionarios.

Explotación de arena de playa

Las explotaciones mineras han intensificado los problemas erosivos de esta localidad, cuyo balance sedimentario se encuentra en déficit por los motivos anteriormente expuestos, tanto de índole natural (incremento en la estabilización de los campos de dunas por variación en las condiciones climáticas), como inducido por la acción antropogénica (vegetación, forestación y degradación de la duna costera, generación de barreras, cortes por avenidas y barreras eólicas).

Este déficit sedimentario fue potenciado por las explotaciones de minería en playa y en la actualidad existen sectores seriamente comprometidos frente a las condiciones erosivas.

La normativa que rige la granulometría de los áridos para la construcción está expresada en la norma IRAM 1627 (IRAM, 1997). La misma, diferencia entre sedimentos para ser utilizados como agregados finos, gruesos o totales.

La normativa indica que el agregado fino podría obtenerse por mezcla de 2 o más arenas de distinta granulometría.

En la figura 8 se pueden observar los límites establecidos para las categorías aptas (curvas A y B) y en obras de "tipo corriente", donde el control de calidad de hormigones se realice en obra (NORMA IRAM 1627 art. 3.2.5), se pueden aceptar los sedimentos cuyas granulometrías no superen el límite estipulado por la curva C.

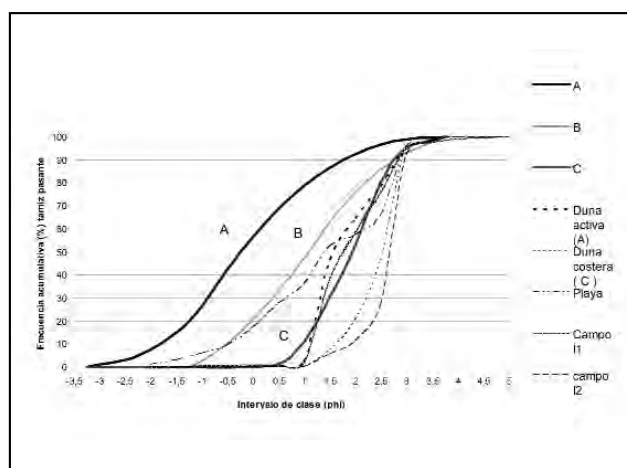


Figura 8. Representación de las curvas de frecuencia acumulativa de los distintos subambientes costeros y su comparación con las curvas (A, B y C) que surgen de la normativa IRAM 1627 para el uso de agregado fino para hormigón. Los agregados cuyas curvas entran entre A y B son considerados aptos para hormigón. Los que se registran entre B y C pueden emplearse cuando el control de hormigones se realice en obra. Las curvas por debajo de C no son aptas

De las curvas se puede observar que ninguna de las arenas cumple con la norma IRAM 1627.

Las curvas que más se aproximan son las correspondientes a los sedimentos de playa, cuyos valores quedan comprendidos entre las curvas A y C, con un 10 % entre A y B, un 50% entre B y C, y un 40 % por debajo de C.

Los sedimentos correspondientes al campo de dunas activo e inactivo están entre las curvas B y C, con distribuciones cercanas a la curva C, o sea que podrían ser empleadas solo para hormigones en obra.

Los sedimentos correspondientes al campo inactivo A y las dunas costeras presentan distribuciones por debajo de la línea C, o sea que son demasiado finas para ser aptas para hormigón. En todos los casos los sedimentos deberán ser mezclados con fracciones más gruesas para poder tener la aptitud para ser empleados como agregado fino para hormigón. No obstante ello, las arenas, por su marcada selección y el tamaño fino de sus partículas, pueden ser utilizados para construcción con otros usos como por ejemplo, para terminación de obra tales como revoques, contrapisos, etc.

Las labores mineras que podrían efectuarse, en el campo A, deben estar estrictamente reguladas, ya que la explotación excesiva podría reactivar los fenómenos deflacionarios en estas dunas, a manera de dunas en voladura e incrementar indirectamente la desertización y avance de las mismas sobre los campos de cultivo ubicados hacia el norte, por invasión de dunas.

Las labores de explotación minera deberían prohibirse en la zona de playa y duna costera tanto de Pehuen-có como de las zonas aledañas, dado el importante grado de vulnerabilidad a la erosión que presenta la zona céntrica de la ciudad (Figura 1).

Los campos de dunas estabilizados serían áreas de explotación alternativa, con menor impacto en la hidrodinámica litoral.

Situación ambiental de la localidad

En la Tabla 1 se presenta una matriz confeccionada para la evaluación del riesgo de erosión costera, teniendo en consideración las características morfodinámicas del sistema natural y las alteraciones antropogénicas reconocidas. Se han definido cuatro grados de riesgo: muy bajo, bajo, moderado y alto.

La zonificación de riesgo de la costa Pehuen-co fue ubicada en la figura 1, donde se observa, que el sector más vulnerable es el comprendido entre las calles San Martín y la intersección de las calles 5 y 12. En este tramo costero se detectó un déficit en la tasa de transporte de sedimentos por el desarrollo forestal,

la urbanización, el trazado de la avenida costanera y el desplazamiento de la trama urbana sobre los sectores donde se desarrollaba la duna costera. En consecuencia, la duna costera ha quedado degradada e inmovilizada por la fijación de especies alóctonas tales como el tamarisco (*Tamaris gallica*) y garra de león (*Carpobrotus edulis*). El sector de costa presenta una playa distal periódicamente escarpada, sin bermas y un frente de duna costera con pendientes abruptas.

Las zonas con un grado de erosión medio son: el tramo entre las calles 5 y Av. Ameghino y el que se extiende entre la Av. San Martín y Brown. Ambos sectores presentan una berma escarpada y el pie de dunas con pendientes intermedias. El primero carece de la duna costera y posee un aporte restringido del campo interior de dunas.

El otro sector, posee un mayor desarrollo de la duna costera, aunque totalmente colonizada por tamariscos, que restringen en gran medida el intercambio de arena, alterando el balance marino-continental. Otro factor que regula la estabilidad es la pérdida en la continuidad lateral de la duna costera, la fragmentación de la misma por la construcción de accesos a playa genera abras que desencadenan fenómenos deflacionarios, con la consecuente degradación de las morfologías.

La erosión moderada se detectó al Este de la calle Brown donde el cordón de dunas costera recupera su homogeneidad (a pesar de estar totalmente vegetado) y empieza a reestablecerse parcialmente el aporte de campos interiores. Se observa un aumento del área de playa distal, una berma estacional y barras de lavado, el pie de duna presenta pendientes de intermedia a baja.

Las zonas reconocidas como de bajo grado de erosión se encuentran en los extremos del centro urbano de la localidad y es donde se reestablecen parcialmente las condiciones naturales: desarrollo de dunas costeras naturales, aporte de los campos interiores, baja influencia del desarrollo urbano y menor presencia de actividades degradatorias relacionadas con las costumbres y usos turísticos.

Tabla 1. Matriz para determinar el grado de erosión costera en el área de estudio

| Riesgo | Duna Costera | | Morfología del pie de duna | | Vegetación | | Campos de dunas Interiores | | Perfil de Playa |
|----------|------------------------|--------------|----------------------------|----------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|
| | Morfología | Conservación | Pendiente | Densidad | Tipo | Actividad | Morfología | Bermas | |
| Alto | Degradada | Malo | Abrupta | Alta | Tamarisco y Garra de León | Inactivo con forestación | Parabólicas | Sin Berma | |
| Medio | Parcialmente Degradada | Regular | Media | Media | Tamarisco y Garra de León | Inactivo con forestación | Parabólicas | Berma Estacional Escarpada | |
| Bajo | Parcialmente degradada | Regular | Media | Alta a tendida | Tamarisco | Inactivo | Parabólicas con Gramíneas | Berma estacional | |
| Muy Bajo | Sin degradación | Bueno | Tendida | Baja | Gramíneas | Activo | Barjan | Berma Estacional | |

DISCUSIÓN

Las características morfológicas reconocidas en la playa y costa de la ciudad de Pehuén-có han evidenciado una erosión inducida muy localizada en la zona céntrica. La pérdida de bermas en la playa posterior, duna estabilizada y frentes de dunas abruptos, ponen a esta localidad en una situación muy comprometida frente a los eventos de tormenta.

Sobre la base de la situación ambiental reconocida, las posibilidades de uso de la arena de playa serían a nuestro entender perjudiciales, en contraposición con lo expresado por Caló *et al.* (1998), quien estimó que pequeños volúmenes de explotación no actuarían en forma perjudicial sobre la playa, como resultado del balance sedimentario de perfiles de playa realizados durante un año.

Dada la conformación de la playa, la cual se dispone sobre una extensa plataforma de abrasión, se corre el riesgo de perder la arena por subsaturación del medio, a expensas del incremento de las superficies de la plataforma, lo que haría muy dificultoso el acceso al agua de los usuarios de playas debido a la irregularidad del sustrato y al impacto del oleaje en el mismo.

En el manejo del recurso costero se recomienda generar estrategias que tiendan a incrementar el aporte de sedimentos en el área costera, disminuyendo la forestación y vegetación de la duna costera y reactivando la movilidad de las dunas hacia la playa.

CONCLUSIONES

Se determinó en la actualidad una disminución de aportes de sedimentos en el sistema litoral, lo que hace que se intensifiquen los procesos deflacionarios sobre dunas inactivas preexistentes, tanto en los campos inactivos (A y B) como en la duna costera, mediante el emplazamiento de dunas en voladura.

La playa natural alcanza un equilibrio hidro y aerodinámico en aquellos sectores donde la influencia antropogénica es baja.

Los factores antropogénicos que han afectado la hidro y aerodinámica litoral son: explotación de arena de playa, la degradación y forestación de la duna costera, la generación de abras deflacionarias y las barreras eólicas.

Del análisis del mapa de susceptibilidad a la erosión, se concluye que el sector costero más vulnerable es el comprendido entre las calles San Martín y la intersección de las calles 5 y 12, donde se detectó un déficit en la tasa de transporte de sedimentos por el desarrollo forestal, la urbanización, el trazado de la avenida costanera y al desplazamiento de la trama urbana a sobre los sectores donde se desarrollaba la duna costera.

Los sedimentos correspondientes a los distintos subambientes costeros analizados, no cumplen la norma IRAM 1627, que indica las características de la granulometría de áridos para ser utilizados como agregados finos para la construcción.

No es factible la explotación de arena de playa, de la duna costera o de los campos activos, ya que en los sectores céntricos de Pehuén-có se ha evidenciado un efecto erosivo sobre la costa, dada la morfología que presenta la playa y la configuración de la línea de costa. Además, es necesario incrementar la saturación de las corrientes litorales para aumentar la sedimentación sobre las plataformas de abrasión y extender la playa.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por el Subsidio UBACyT X083 "Alteraciones ambientales y en la hidrodinámica litoral por explotación de arena y determinación de fuentes alternativas" y UBACyT X129 "Geoindicadores de erosión costera y su implementación en la planificación urbana de la provincia de Buenos Aires" otorgados por la Universidad de Buenos Aires.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ARAMAYO S.A. Y T. MANERA, 1985

Nuevos hallazgos de mamíferos pleistocénicos en el yacimiento de Playa del Barco, Prov. de Buenos Aires.
Primeras Jornadas de Geología Bonaerenses. Tandil. Argentina.

CALÓ J.E., FERNÁNDEZ E.M. Y H. ALDACOUR, 1995

Caracterización ambiental de las playas de Pehuén-co en base a procesos oceanográficos y atmosféricos. Su importancia en el manejo.
Actas Primera Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Río Cuarto. Tomo I, 223-236. Editor M.P. Cantú.

CALÓ J., FERNÁNDEZ E., MARCOS A. Y H. ALDACOUR, 1998

Análisis preliminar del balance sedimentario de la playa de Pehuén-có provincia de Buenos Aires, Argentina.
GEOACTA, 23, 1-12.

FERNÁNDEZ E., CALÓ J., MARCOS A. Y H. ALDACOUR, 2003

Interrelación de los ambientes eólico y marino a través del análisis textural y mineralógico de las arenas de Monte Hermoso, Argentina.
Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología 10 (2): 151-162

FOLK R.L. Y W.C. WARD, 1957

Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters.
Journal of Sedimentary Petrology, 27(1): 3-26.

FONTANA S., 2005.

Coastal dune vegetation and pollen representation in south Buenos Aires Province, Argentina.
Journal of Biogeography. 32 (4): 719 -725.

PERILLO G., GOMEZ E.A., ALIOTTA S. Y D.E. GALINDEZ, 1985. GRANUS

Un programa fortran para el análisis estadístico y graficado de muestras de sedimentos.
Revista Argentina de Mineralogía, petrografía y sedimentología, 16(1- 4):1-5.

- IRAM, 1997
Norma 1627. Agregados, granulometría de los agregados para hormigones.
Instituto Argentino de Normalización, 1-23.
- GUTIÉRREZ T. Y SCHILLIZZI, 2002
Asociaciones de Diatomeas en Paleoambientes Cuaternarios de la Costa Sur de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.
Pesquisas em Geociências, 29(1): 59-70 Instituto de Geociências, UFRGS.
- MARCOMINI S. C. Y R.A. LÓPEZ, 1993
Coastal protection effects at Buenos Aires, Argentina. COASTAL ZONE 93.
The Eighth Symposium on Coastal And Ocean Management. Tomo III, 2724-2738. New Orleans, USA.
- MARCOMINI S. C. Y R. A. LÓPEZ, 1995
Strategies for the Coastal Management of Villa Gesell, Argentina. Coastal Change 95,
Bordomer IOC, Bordeaux, 1995. II: 819-831.
- MOUZO F.H. 1980
Rastros fósiles de alianassidos (“ophiomorphidos”) en sedimentos litorales de Pehuen-Có,
Prov. De Buenos Aires. Simpósio Sobre Problemas Del Litoral Atlántico Bonaerense. Mayo 1980. Mar Del Plata.
- MOUZO F., FARINATI E. & G. ESPÓSITO, 1985
Tubos fósiles de Callianassidos en la playa de Pehuen-Có, provincia de Buenos Aires.
Primeras Jornadas Geológicas Bonaerenses, Tandil. 263-274.
- VEGA V., RODRIGUEZ S. Y M. VALENTE, 1989
Shallow marine and fluvial environments of Quaternary deposits in Pehuen-Có Beach, Buenos Aires, Argentina.
Quaternary of South America and Antarctic Peninsula, 7: 51-80.

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

| Mar del Plata. 21 al 23 de octubre de 2009

Temario

- Agua subterránea
- Cartografía temática
- Casos de obras
- Contaminación de recursos naturales
- Enseñanza de la geología aplicada a la ingeniería
- Estudios geotécnicos
- Evaluación ambiental de planes, proyectos y obras
- Geindicadores
- Geología ambiental
- Gestión Integrada de Recursos Hídricos
- Materiales de construcción
- Ordenamiento territorial
- Problemas geológico ingenieriles en la construcción de obras
- Recuperación de espacios degradados
- Riesgos naturales



ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

Más información en
www.asagai.org.ar

A los fines de la impresión del presente volumen se ha recibido apoyo económico de las siguientes empresas y asociados:

LIC. JORGE WEXLER

MINERA TEA

Copyright 2008 by Editorial ASAGAI
Maipú 645 - 1^{er} piso - 1006 Buenos Aires
Printed in Argentina

Se terminó de imprimir en Mayo de 2009
Córdoba - Argentina

