

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Avaliação de alterações na compactação de solos por usos e manejo agrícolas por meio de ensaio dinâmico de penetração

Soares, Diego Ruiz - Rotta, Cláudia Marisse dos Santos - Zuquette, Lázaro Valentin

Avaliação geológica e geotécnica preliminar da degradação ambiental das áreas úmidas na região de Leme-Brasil

Failache, Moisés - Zuquette, Lázaro

Estrategias para la valorización y rehabilitación del patrimonio minero de Batán-Chapadmalal, Mar del Plata, Argentina

del Rio J. L. - Fernández, R. - Bó, M. J. - Goyeneche, H. - Burmeister, M. - Mastropasqua, P. - Camino, M.

Estudio experimental y modelado del flujo hidráulico en suelos limo-bentoníticos compactados para su uso en barreras naturales

Alercia Biga, Carolina - Eberhardt, Marcelo - Arrua, Pedro - Aiassa Martínez, Gonzalo

Análisis del oleaje máximo generado por el posible colapso de una masa inestable en el lago de la presa Potrerillos (Provincia de Mendoza)

Crinó, Edgar R. - Sales, Daniel A. - Gardini, Carlos E. - Moreiras, Stella M.

Condicionantes geológicos en el cruce de la sierra de Valle Fértil. San Juan

Aceituno Cieri, P. - Zeballos, M.E. - Rocca, R. J. - Martino, R. D. - Carignano, C. - Guerreschi, A. - Giambastiani, M.

Modelación del flujo preferencial en pilas de lixiviación

Delabaye, Carlos H. - Berenguer, Tadeo - Onorato, Martín

Determinación de la calidad para la conservación de áreas impactadas por la minería en la zona de San Agustín, provincia de Córdoba, Argentina

Quintana Crespo, Enrique - Navarro, María Elena

Sobre el empleo de suelos como relleno bajo contrapisos y losas flotantes: dos patologías en estudio

Orlandi, Sandra Graciela - Manzanal, Diego Guillermo - Espelet, María Alejandra - Ruiz, Alejandro

Portada: Planicie aluvial del río Chimehuin en época seca aguas arriba de la población. *Fotografía: F.X.Pereyra*

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



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



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Publicación Oficial de



Maipú 645, Piso 1° - C1006ACG
Ciudad Autónoma de Buenos Aires
editor@editoresasagai.org.ar
www.editoresasagai.org.ar
www.asagai.org.ar
Tel/Fax (011)4322-2820

Número 35 • 2015

ISSN 2422-5703 (En línea)

ISSN 1851-7838 (Impresa)



REVISTA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA Y AL AMBIENTE

EDITOR JEFE

MSc Geólogo Norberto Jorge Bejerman
Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba
Argentina
editor@editoresasagai.org.ar

EDITOR ASOCIADO

Dr. Clemente Irigaray Fernández
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Granada
España
clemente@ugr.es

COMITÉ EDITORIAL

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

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

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

Dra. Ofelia Tujchneider
Departamento de Hidrología y Ambiente
Universidad Nacional de El Litoral. Santa Fe
Argentina
pichy@fich1.unl.edu.ar

Lic. Luis Mario Giaconi
Cátedra de Geología Aplicada (FCNyM)
Universidad Nacional de La Plata
Argentina
lmgiaconi@gmail.com

SECRETARÍA

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

Lic. María Paula Bunicontro
IGEBA (CONICET-UBA)
Argentina
paulabunicontro@hotmail.com

PRODUCCIÓN EDITORIAL

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

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

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

COMISIÓN DIRECTIVA 2014 - 2018

PRESIDENTE	<i>Norberto Jorge Bejerman</i>
VICEPRESIDENTE	<i>Fabio Sergio Luna</i>
SECRETARIA	<i>Cristina Dapeña</i>
TESORERO	<i>Luis Mario Giaconi</i>
VOCAL TITULAR	<i>Mabel Mena</i>
VOCAL TITULAR	<i>Rubén A. López</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Martín Eduardo Guichón</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>María Beatriz Ponce</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>Alejandro Emmanuel Celli</i>
REVISOR DE CUENTAS SUPLENTE	<i>José Gabriel Salminci</i>

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

INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Cuerpo Editorial		I
Comisión Directiva		II
Avaliação de alterações na compactação de solos por usos e manejo agrícolas por meio de ensaio dinâmico de penetração	<i>Soares, Diego Ruiz - Rotta, Cláudia Marisse dos Santos - Zuquette, Lázaro Valentin</i>	1
Avaliação geológica e geotécnica preliminar da degradação ambiental das áreas úmidas na região de Leme-Brasil	<i>Failache, Moisés - Zuquette, Lázaro</i>	17
Estrategias para la valorización y rehabilitación del patrimonio minero de Batán-Chapadmalal, Mar del Plata, Argentina	<i>del Río J. L. - Fernández, R. - Bó, M. J. - Goyeneche, H. - Burmeister, M. - Mastropasqua, P. - Camino, M.</i>	35
Estudio experimental y modelado del flujo hidráulico en suelos limo-bentoníticos compactados para su uso en barreras naturales	<i>Alercia Biga, Carolina - Eberhardt, Marcelo - Arrua, Pedro - Aiassa Martínez, Gonzalo</i>	45
Análisis del oleaje máximo generado por el posible colapso de una masa inestable en el lago de la presa Potrerillos (Provincia de Mendoza)	<i>Crinó, Edgar R. - Sales, Daniel A. - Gardini, Carlos E. - Moreiras, Stella M.</i>	53
Condicionantes geológicos en el cruce de la sierra de Valle Fértil. San Juan	<i>Aceituno Cieri, P. - Zeballos, M.E. - Rocca, R. J. - Martino, R. D. - Carignano, C. - Guereschi, A. - Giambastiani, M.</i>	57
Modelación del flujo preferencial en pilas de lixiviación	<i>Delahaye, Carlos H. - Berenguer, Tadeo - Onorato, Martín</i>	71
Determinación de la calidad para la conservación de áreas impactadas por la minería en la zona de San Agustín, provincia de Córdoba, Argentina	<i>Quintana Crespo, Enrique - Navarro, María Elena</i>	87
Sobre el empleo de suelos como relleno bajo contrapisos y losas flotantes: dos patologías en estudio	<i>Orlandi, Sandra Graciela - Manzanal, Diego Guillermo - Espelet, María Alejandra - Ruiz, Alejandro</i>	103
Instrucciones para autores		115
Formulario de suscripción o compra		119

MISIÓN Y OBJETIVOS DE LA PUBLICACIÓN

Misión y objetivos de la publicación

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

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

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

Leyenda de protección de derechos de autor

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

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

Precio de la revista

Quienes estén interesados en adquirir un ejemplar de la Revista deberán contactarse con la Editorial (editor@editoresasagai.org.ar).

En la página 119 encontrará el formulario a completar a tal efecto

Aims and objectives

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

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

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

Authors Copyrights

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

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

Price of the Journal

All interested in buying a copy of any Journal issue should be in contact with the Editor (editor@editoresasagai.org.ar).

In page 119 an application form to be fulfilled and sent to the Editor is available.



Avaliação de alterações na compactação de solos por usos e manejo agrícolas por meio de ensaio dinâmico de penetração

Evaluation of the changes in the soil compaction due to agricultural uses and management by dynamic penetrometer test

Soares, Diego Ruiz ¹✉ - Rotta, Cláudia Marisse dos Santos¹ - Zuquette, Lázaro Valentin ¹

Recibido: 08 de mayo de 2015 • Aceptado: 01 de octubre de 2015

Abstract

This work shows a study about the soil compaction by the agricultural use in the Basin of Ribeirão do Pinheirinho, São Paulo State, Brazil. It was developed soil resistance to penetration tests with a dynamic penetrometer on different locations in the study area. The results of the soil resistance to penetration, in the most part, were high, especially on the layer of 20 to 40 centimeters deep. Due to the traffic of vehicles and machinery the secondary and farm roads present values of soil resistance to penetration higher than those measured in the croplands. As a consequence, it causes the development of erosion processes because of high taxes of runoff. Both the intensive agricultural use and the characteristics of the geological materials can be pointed as the main factors of soil compaction, erosion and changes in the surface and subsurface water dynamic.

Keywords: *Compaction, soil resistance to penetration, dynamic penetrometer, environmental degradation, Brazil.*

Resumo

O presente trabalho apresenta o estudo sobre compactação do solo sob uso agrícola na Bacia do Ribeirão do Pinheirinho, Estado de São Paulo, Brasil. Realizaram-se ensaios de resistência do solo a penetração com um penetrômetro dinâmico em diversos pontos da área de estudo, verificando-se, na maioria dos casos, elevados valores de resistência à penetração, sobretudo nos 20-40 cm superficiais. Em decorrência do tráfego de veículos e máquinas, as estradas secundárias e carreadores apresentaram valores de resistência mais elevados que os encontrados nas áreas de cultivo, condicionando o desenvolvimento de processos erosivos em decorrência da geração de alto escoamento superficial. Tanto o uso agrícola intenso na bacia quanto as características dos materiais geológicos podem ser apontadas como os fatores principais para o processo de compactação do solo verificado na bacia, bem como outros cenários decorrentes da degradação ambiental, como feições erosivas e alteração da dinâmica de águas superficiais e subsuperficiais.

Palavras-chave: *Compactação, resistência à penetração do solo, penetrômetro dinâmico, degradação ambiental, Brasil.*

1. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; São Carlos, Brasil

✉ diego.soares@usp.br

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das diversas atividades antropogênicas envolvendo componentes do meio físico geram alterações nas condições intrínsecas dos materiais geológicos afetando o seu comportamento frente ao desenvolvimento dos processos geológico e outros componentes ambientais.

Dentre as principais alterações físicas está o processo de compactação do solo, atribuído à redução do volume de macroporos e, conseqüentemente, rearranjo das partículas na matriz do solo, por um lado reduzindo o tamanho e continuidade dos poros e, por outro, aumentando o peso específico seco e a resistência mecânica. A esse conjunto de alterações associam-se processos negativos, como redução da aeração do solo e da taxa de infiltração e condutividade hidráulica saturada (Reichert *et al.*, 2007). Conseqüentemente, além de comprometer o desenvolvimento das plantas pela diminuição da disponibilidade de água, restrição ao crescimento radicular e aeração deficiente, também verifica-se o aumento do escoamento superficial que pode levar à aceleração de processos geológicos, como a erosão e o assoreamento, gerando um cenário de degradação.

Segundo Bennie e Krynauw (1985), o processo de compactação depende tanto de fatores internos quanto externos. Dentre os internos estão aqueles intrínsecos ao material geológico, como composição mineralógica, textura, estrutura, teor de umidade e matéria orgânica. Os fatores externos, por outro lado, são atribuídos principalmente à energia aplicada ao solo, ocorrendo de modo natural, pela ação do impacto das gotas de chuva, ou por atividades antropogênicas.

O tráfego de maquinários e implementos agrícolas e o intenso pisoteio de animais geralmente são apontados como principais causas da compactação de solos, uma vez que exercem uma força mecânica externa considerável sobre a superfície e, conseqüentemente, atingindo até 60 cm de profundidade (Duijker, 2004; Reichert *et al.*, 2007; Davies & Lacey, 2011). O avanço da mecanização embora tenha contribuído para facilitar e agilizar o trabalho de manejo, também compromete a qualidade do solo, uma vez que o uso de máquinas e implementos maiores e mais pesados resulta na compactação do solo, com destaque para as estradas secundárias e carregadores.

Um dos indicadores de compactação no solo é sua resistência à penetração, isto é, a resistência mecânica que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, tal como o crescimento de raízes, sendo, contudo, um indicador secundário de compactação, não sendo uma medição física direta de qualquer condição do solo (Mantovani, 1987). Os penetrômetros fornecem boas estimativas da resistência mecânica do solo à penetração, uma vez que apresentam como principais vantagens a facilidade e rapidez na obtenção dos resultados (Bengough e Mullins, 1990).

O penetrômetro de impacto ou dinâmico tem como princípio de funcionamento a penetração de uma haste com ponteira metálica no solo através do impacto de um êmbolo (martelo) de massa conhecida a uma altura fixa, fornecendo uma energia constante a cada golpe. Assim, associando-se a quantidade de golpes e a profundidade de penetração da ponteira, verifica-se a resistência à penetração do solo em diferentes profundidades, possibilitando uma rápida avaliação do grau de compactação (Herrick & Jones, 2002).

Uma vez que a compactação apresenta efeitos não só pontuais mas também em macroescala, desencadeando tanto prejuízos ambientais, como a perda de qualidade do solo e dos

recursos hídricos, bem como econômicos, associados a perda de produtividade agrícola e maiores quantidades de energia e insumos para manter a mesma produtividade em solos degradados, o estudo dos processos que envolvem a compactação permite uma avaliação das intensidades destas alterações que levam a degradação ambiental.

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo a avaliação da compactação do solo na Bacia do Ribeirão do Pinheirinho, sobretudo no sentido de identificar casos de degradação ambiental devido ao uso agrícola da área de estudo.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Ribeirão do Pinheirinho, com área de 4000 hectares, compreende parte dos municípios de Brotas e Itirapina, centro do Estado de São Paulo (Figura 1).

De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima da região é do tipo Cwa - subtropical de inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (com temperaturas superiores a 22°C), apresentando precipitações médias que variam entre 1200 a 2000 mm.

Geologicamente a região é constituída por materiais relacionados a 3 formações geológicas, a saber: Formação Itaqueri (arenitos variados com diferentes graus de cimentação), Formação Serra Geral (basaltos) e Formação Botucatu (arenitos bem cimentados).

A vegetação da região varia entre Cerrados, Cerradões e Matas de Galeria que acompanham cursos d'água. Contudo, destaca-se o amplo uso do solo para agropecuária, sendo a maior parte da bacia ocupada pela cultura de cana-de-açúcar, reflorestamento e pastagens.

METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho envolveu uma série de etapas, tanto de levantamento de dados quanto trabalhos de campo e laboratório, que posteriormente serviram de base para uma avaliação final. As etapas básicas do desenvolvimento desse trabalho estão sumarizadas no fluxograma da Figura 2.

Levantamentos de dados e materiais prévios

Inicialmente, desenvolveram-se trabalhos de escritório, onde foram reunidas as cartas topográficas e mapa de materiais geológicos da região, em escala de 1:10000, além de imagens de satélite e fotografias aéreas de diferentes períodos e escalas.

A partir do georreferenciamento e digitalização dos mapas topográficos, delimitou-se a área de estudo e, em associação às imagens de satélite, fotografias aéreas e estudos prévios sobre a área, buscou-se avaliar a dinâmica de uso e ocupação da bacia estudada, aspectos associados aos materiais geológicos e aos corpos hídricos. A identificação e análise prévia desses elementos orientaram, por sua vez, o planejamento da etapa de campo.

Mapa de materiais geológicos

Na etapa de campo, houve um mapeamento dos materiais geológicos na escala do trabalho, utilizando-se como base a topografia, observação dos contatos entre diferentes unidades geológicas, análise visual de materiais de diferentes texturas e utilização de mapa de materiais inconsolidados em outra escala. A partir das observações de campo, elaborou-se o mapa de materiais inconsolidados com sua distribuição anterior ao processo de uso intensivo da bacia.

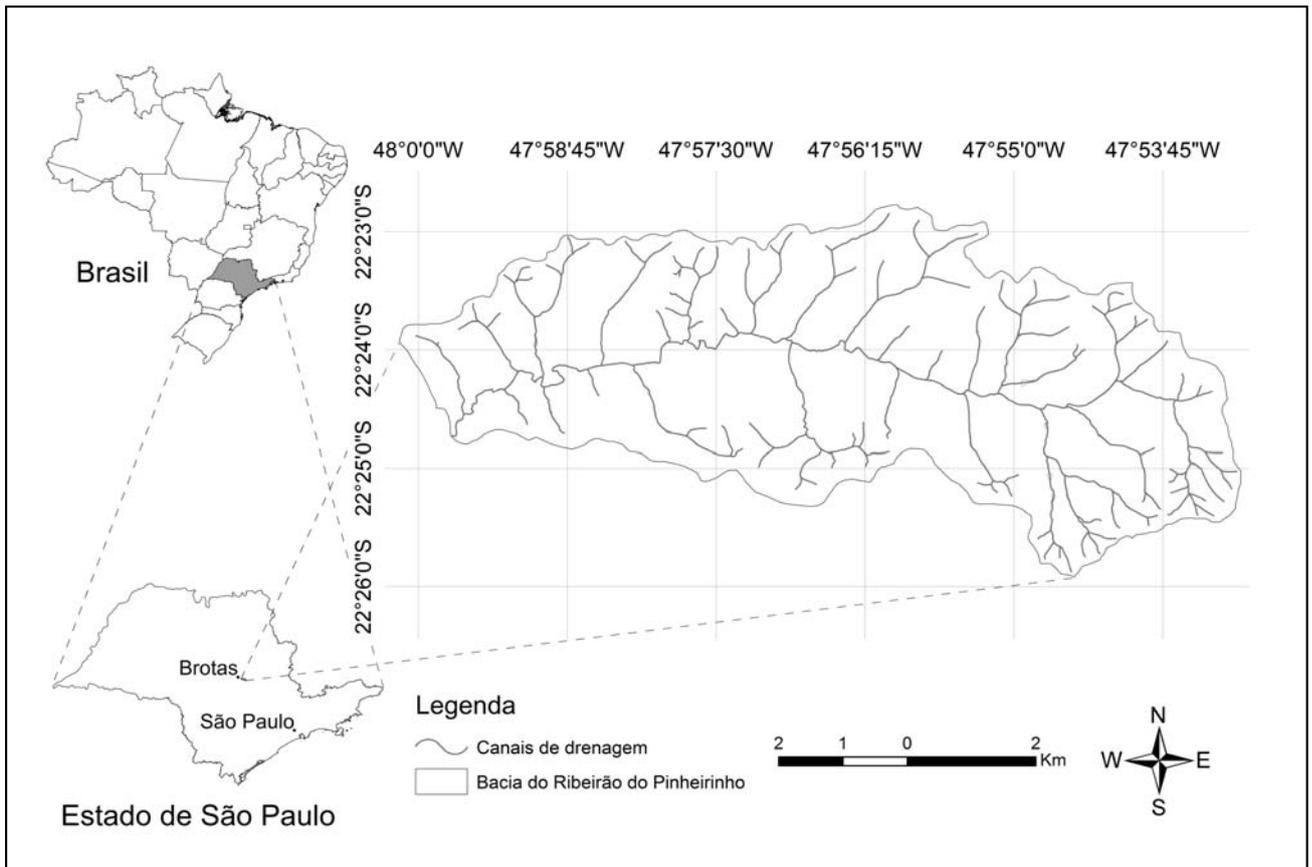


Figura 1. Localização da Bacia do Ribeirão do Pinheiro.

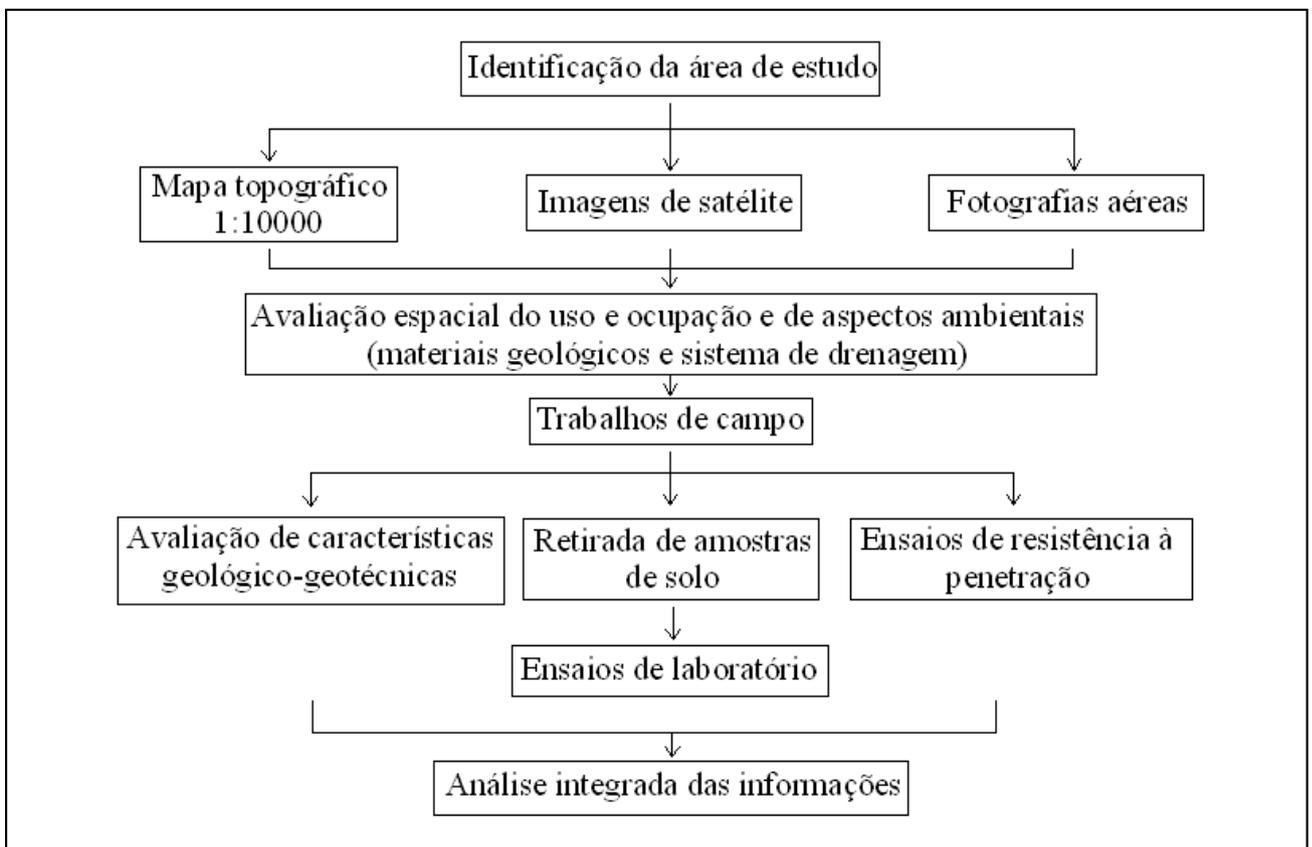


Figura 2. Fluxograma indicativo das principais etapas do trabalho.

Trabalhos de campo

Realizou-se uma avaliação em campo das condições do sistema de drenagem relacionadas a aspectos como extensão, nível de água, presença de vegetação marginal, e condições gerais dos canais. Além disso, foram avaliados aspectos como a presença de processos erosivos, condições de cobertura do solo, e outros indicadores de degradação ambiental.

Os trabalhos de campo envolveram ainda a amostragem de solo e realização de ensaios de resistência do solo à penetração. Tanto a amostragem dos materiais inconsolidados quanto os ensaios de penetração basearam-se nas informações prévias sobre os tipos de materiais presentes na área, assim como no uso e ocupação.

Foram retiradas amostras deformadas e indeformadas, sendo que em alguns pontos foram feitas trincheiras que permitiram a retirada de amostras de diferentes horizontes.

Para determinação da resistência à penetração utilizou-se um penetrômetro dinâmico (Figura 3), sendo o ensaio realizado a partir da superfície do solo até uma profundidade de cerca de 1,80 m. O penetrômetro utilizado é composto por duas hastes metálicas, uma inferior, na qual é rosqueada a ponteira metálica, e a superior onde desliza-se verticalmente o êmbolo (martelo) a partir de uma altura conhecida, impactando a junção responsável pela união das hastes descritas.

Este ensaio foi realizado em diferentes pontos da bacia, de modo a avaliar a resistência do solo sobre os vários usos e em diferentes materiais geológicos, sendo ainda determinada a umidade do solo em intervalos de profundidade de 20 cm.



Figura 3. Visão geral do ensaio com penetrômetro dinâmico.

A partir do número de golpes e da profundidade de penetração da haste em cada golpe, determinou-se a resistência do solo à penetração e construiu-se, para cada ponto, uma curva relacionando a resistência com a profundidade. A resistência do solo foi obtida por meio da equação 1, apresentada por Cassan (1982), utilizada por Vanags et al (2004) e Furegatti (2012):

$$R = \frac{mgH}{A \cdot \Delta Z} \frac{m}{m+m'} \quad (1)$$

Donde:

R: resistência à penetração (Pa);

A: área da base do cone (m²);

g: aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

H: altura de queda do martelo (m);

m: massa do martelo (kg),

m': massa total do penetrômetro (kg).

Δz: profundidade da penetração da haste para um golpe (m).

Trabalhos de laboratório

Os materiais inconsolidados foram ensaiados em termos de granulometria, peso específico dos sólidos e peso específico seco. Em paralelo, determinou-se o teor de umidade do solo de diferentes profundidades dos locais onde os ensaios de resistência a penetração foram realizados.

Análises gerais

Por fim, avaliou-se os dados obtidos tanto nos trabalhos de campo quanto pelos ensaios de laboratório, buscando-se caracterizar a dinâmica dos processos geológicos identificados na área de estudo, sobretudo no sentido de identificar casos de degradação ambiental devido à interferência antrópica, com destaque para os efeitos da compactação do solo na dinâmica de águas superficiais e subsuperficiais da bacia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mapa de materiais geológicos

Observa-se o predomínio de materiais inconsolidados re-trabalhados arenosos da Formação Itaqueri (Unidades 1, 1a, 2, 3, 4, e 5), apresentando diferenças entre si, como espessura dos materiais variando entre 1 a 4 m de profundidade; presença de linhas de concreções de até 30 cm entre camadas de materiais ou presença de concreções dispersas; e profundidades do saprolito e da rocha matriz variando entre 1 a 4 m de profundidade. Esses materiais ocorrem sobrepostos aos residuais da Formação Itaqueri, que podem ocorrer sobre a forma de material inconsolidado, saprolito, ou rocha alterada.

Por sua vez, a presença de materiais residuais argilosos (Unidades 6, 7, e 10) está associado a Formação Serra Geral, com exposição natural da rocha basáltica alterada e consolidada a partir de determinado trecho do canal de drenagem principal.

O exutório da Bacia apresenta materiais inconsolidados residuais arenosos da Formação Botucatu (Unidade 9), presentes juntamente ao saprolito e rocha fragmentada em camadas não superiores a 1 m de profundidade.

Ensaio de Laboratório

Para a avaliação geral dos materiais geológicos, ensaiaram-se os mesmos em termos de granulometria, peso específico dos sólidos e peso específico seco, sendo os resultados sumarizados na Tabela 1.

Em virtude das profundidades nas quais retiraram-se as amostras, denominou-se profundidade A, referente a faixa entre 30-40 cm; B, referente a faixa entre 80-100 cm; C, referente à profundidades superiores a 100 cm, associadas à amostras retiradas de taludes de estradas, em profundidades nas quais não há modificação da estrutura natural dos materiais em função do tipo de uso do solo.

Tabela 1. Caracterização física das amostras de solo da Bacia do Ribeirão do Pinheirinho.

Unidade de materiais inconsolidados	Pontos de amostragem	Uso do solo	Profundidade	Granulometria			γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	(e)	(n) (%)
				Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)				
1	4	Cultivo de cana-de-açúcar	A	70,0	14,0	16,0	26,73	17,22	0,55	35,58
	P44	Condição natural subsuperficial	B	72,0	14,5	13,5	26,46	16,74	0,58	36,72
2	9	Cultivo de cana-de-açúcar	A	68,5	20,5	11,0	27,09	16,81	0,61	37,94
	P60	Condição natural subsuperficial	B	78,0	5,0	17,0	25,96	16,87	0,54	35,00
	DC 15	Cultivo de cana-de-açúcar	A	54,0	8,0	38,0	26,95	15,67	0,72	41,87
	21	Carreador	B	55,0	8,0	37,0	26,86	12,89	1,08	52,01
3	10	Carreador	C	67,5	13,0	19,5	27,33	16,41	0,67	39,96
	13	Cultivo de cana-de-açúcar	A	47,0	14,0	39,0	27,70	15,07	0,84	45,60
4	11	Carreador	B	44,0	17,0	39,0	29,29	13,81	1,12	52,86
	DC 18	Cultivo de cana-de-açúcar	A	63,5	10,5	26,0	26,86	15,72	0,71	41,47
	DC 13	Cultivo de cana-de-açúcar	B	61,2	10,8	28,0	26,3	--*	--*	--*
	DC 16	Eucalipto	A	78,5	8,0	13,5	26,1	19,3	0,4	26,3
7	11	Carreador	B	73,0	8,0	19,0	26,6	16,9	0,6	36,5
	P37	Condição natural subsuperficial	A	65,5	6,5	28,0	26,41	16,20	0,63	38,66
	P38	Condição natural subsuperficial	B	66,0	5,2	28,8	26,63	13,64	0,95	48,77
	P39	Condição natural subsuperficial	A	71,0	5,5	23,5	26,67	16,77	0,59	37,10
8	P45	Condição natural subsuperficial	B	69,0	11,0	20,0	27,74	16,02	0,73	42,27
	Pen 18	Pastagem	A	75,0	8,0	17,0	26,28	17,61	0,49	32,98
	Pen 23 / DC 21	Pastagem	B	72	10	19	27,78	16,62	0,67	40,18
		Pastagem	A	64	11,5	24,5	26,27	16,14	0,63	38,55
8	P45	Condição natural subsuperficial	B	65	11,5	23,5	26,21	15,19	0,73	42,04
	Pen 18	Pastagem	A	70	9,5	20,5	26,40	16,28	0,62	38,32
	Pen 23 / DC 21	Pastagem	B	71,5	6,5	22,0	26,91	25,63	0,72	41,92
		Pastagem	C	75,5	13,5	12	26,61	18,01	0,48	32,30
8	P45	Condição natural subsuperficial	C	74,0	8,2	17,8	27,10	15,14	0,79	44,14
	Pen 18	Pastagem	C	83	5,9	11,1	26,30	14,89	0,77	43,38
	Pen 23 / DC 21	Pastagem	C	76	11	13	26,19	15,13	0,73	42,24
		Pastagem	A	63,0	16,5	20,5	27,15	15,90	0,71	41,43
8	Pen 23 / DC 21	Pastagem	B	63,9	15,0	21,1	27,43	15,20	0,80	44,58
		Pastagem	A	70,0	12,5	17,5	26,31	15,36	0,71	41,61
			B	65,5	12,7	21,8	26,51	14,55	0,84	45,74

* Devido ao grau de compactação, não retirou-se amostra indeformada dessa profundidade, impossibilitando o ensaio de peso específico seco.

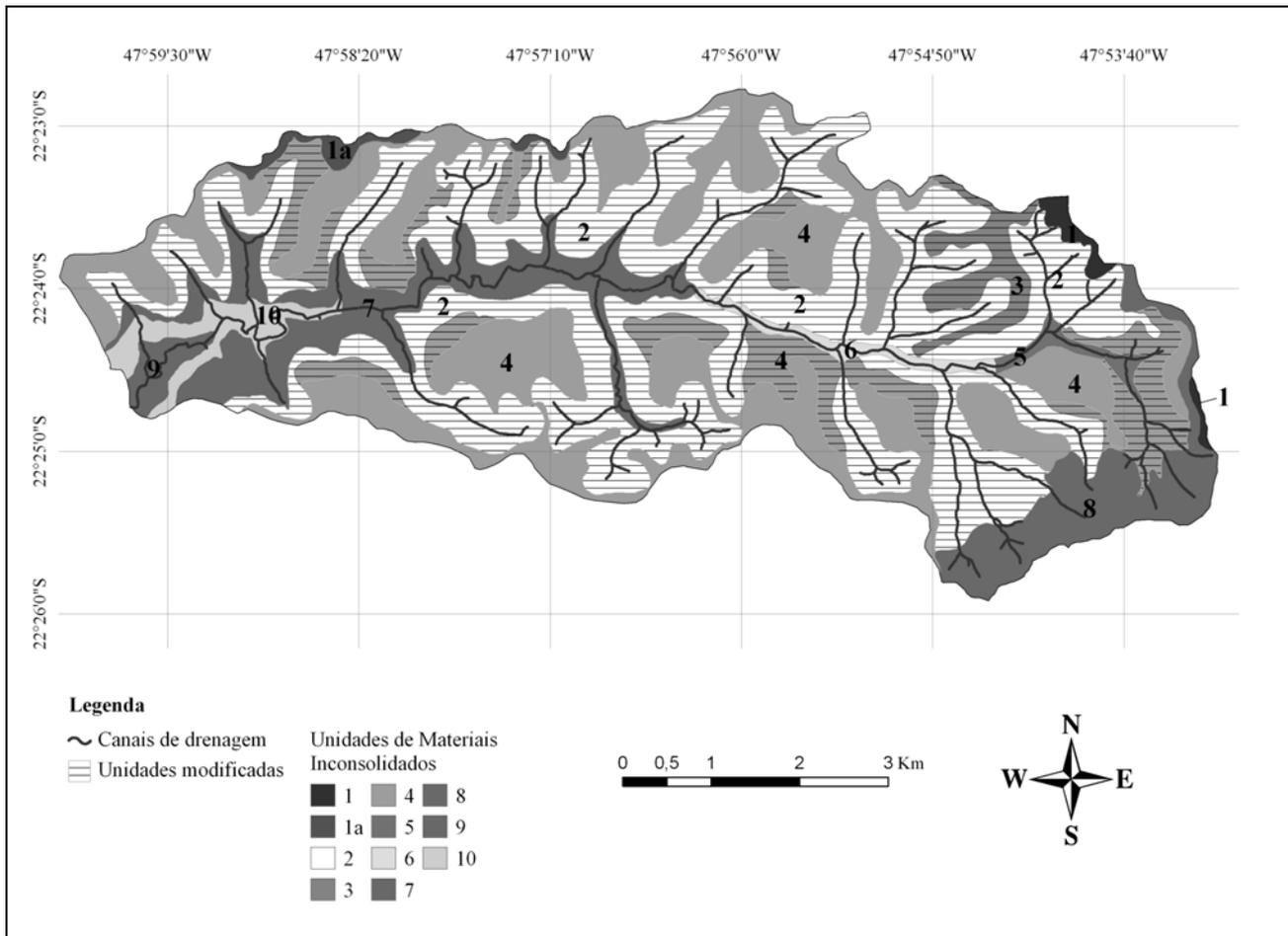


Figura 4. Mapa de materiais inconsolidados da Bacia do Ribeirão do Pinheiro.

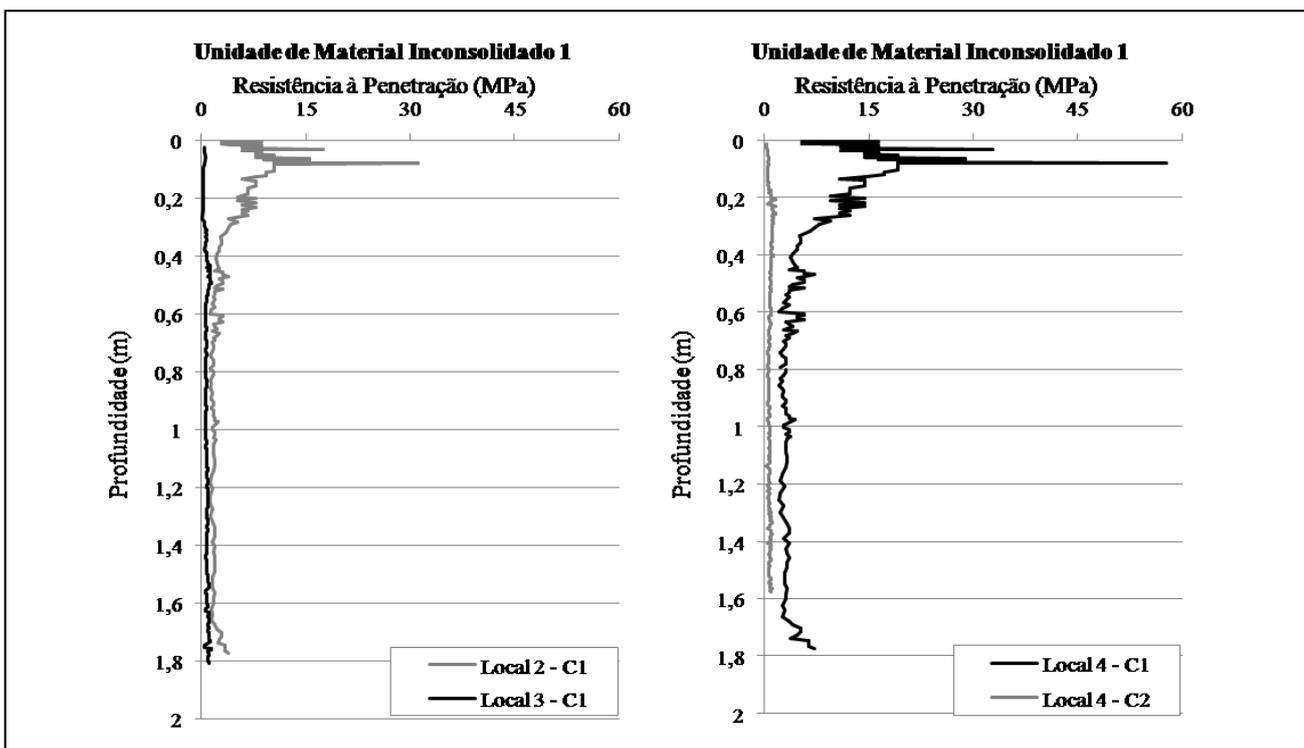


Figura 5. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo na unidade 1.

De maneira geral, verifica-se o predomínio de materiais arenosos, com teores de areia entre 45% e 80%, de silte entre 5% e 20% e de argila entre 11% e 39%. Ressalta-se que esta predominância apresenta-se na maioria das amostras, sobretudo nos materiais retrabalhados da Formação Itaqueri.

Em relação ao peso específico seco, nos locais amostrados em duas profundidades, observa-se uma redução de 0,5 a 2,8 kN/m³, com exceção das amostras do ponto DC16, com

aumento de 9,35 kN/m³. Neste caso, o uso do solo por reflorestamento de eucalipto pode estar associado ao valor elevado na camada mais profunda.

Consequentemente à variação entre os pesos específicos nas duas profundidades, ocorre um aumento da porosidade da camada subsuperficial, chegando a 10% em alguns pontos cujo uso do solo é o cultivo da cana-de-açúcar.

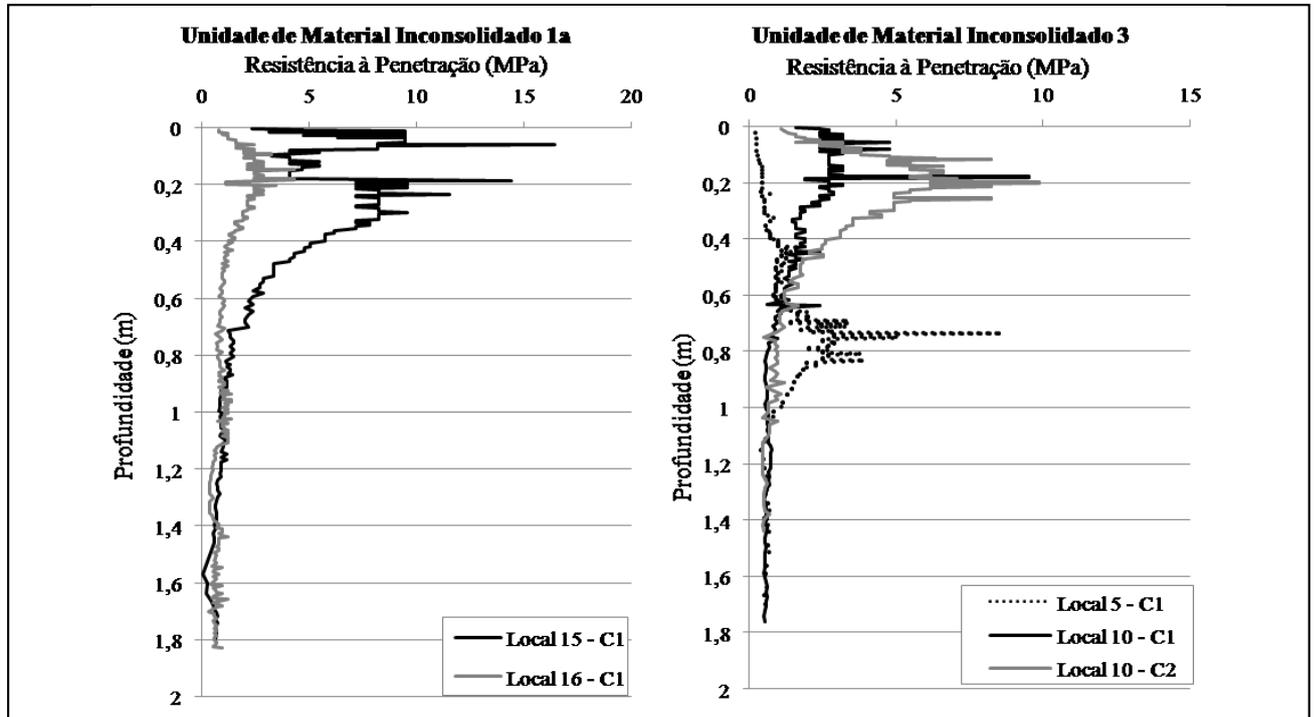


Figura 6. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo nas unidades 1a e 3.

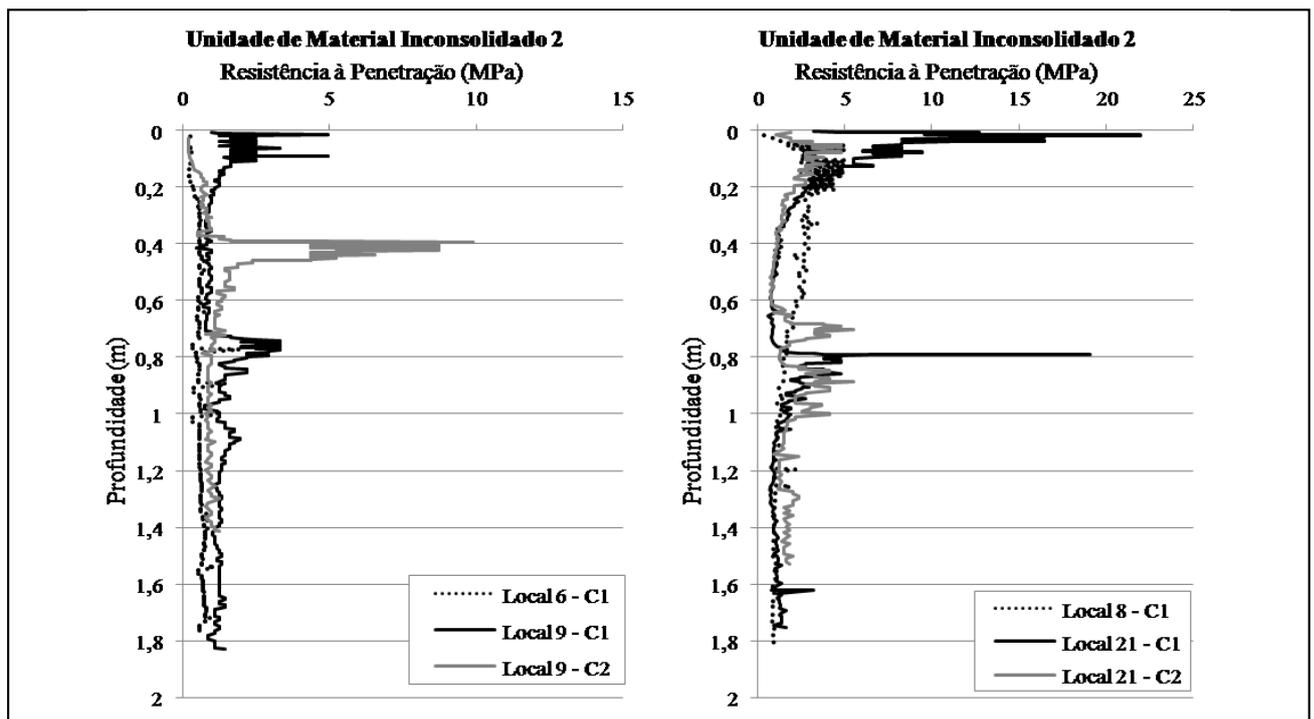


Figura 7. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo na unidade 2.

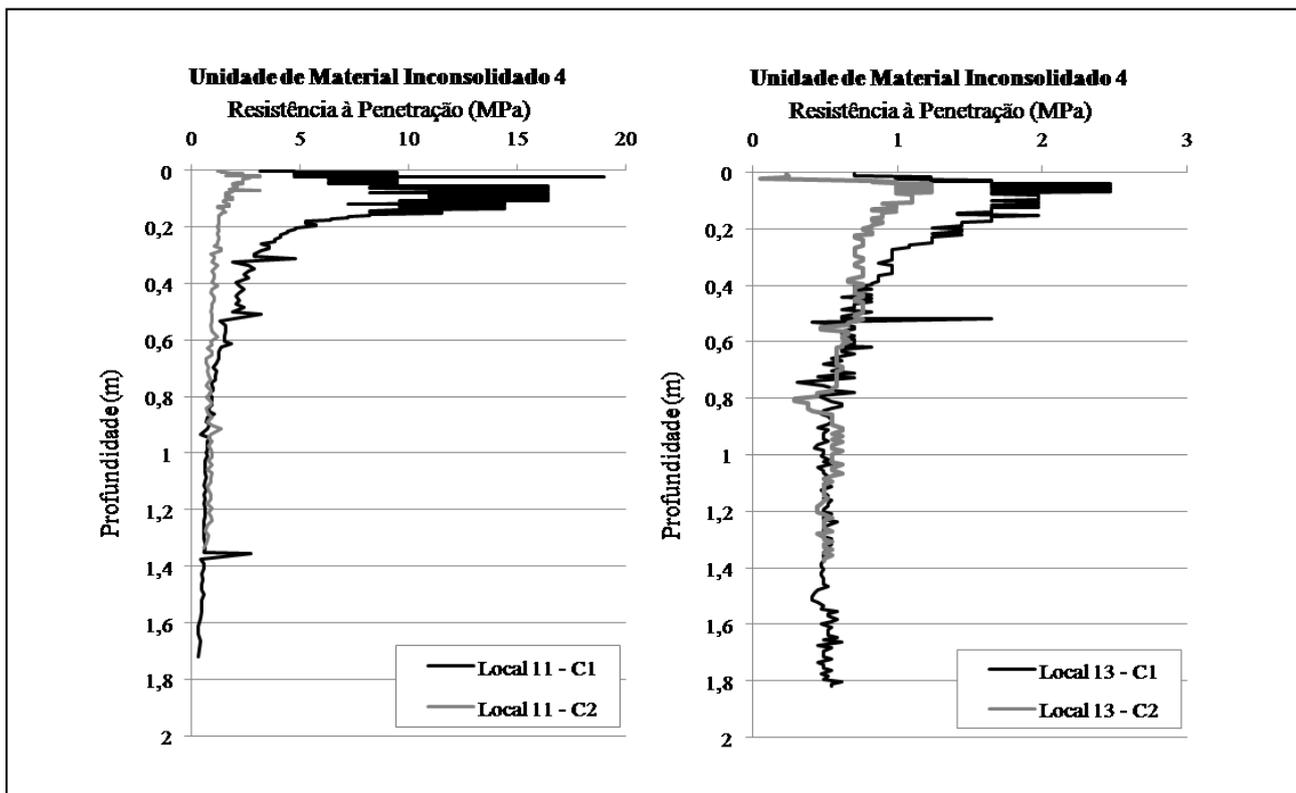


Figura 8. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo na unidade 4.

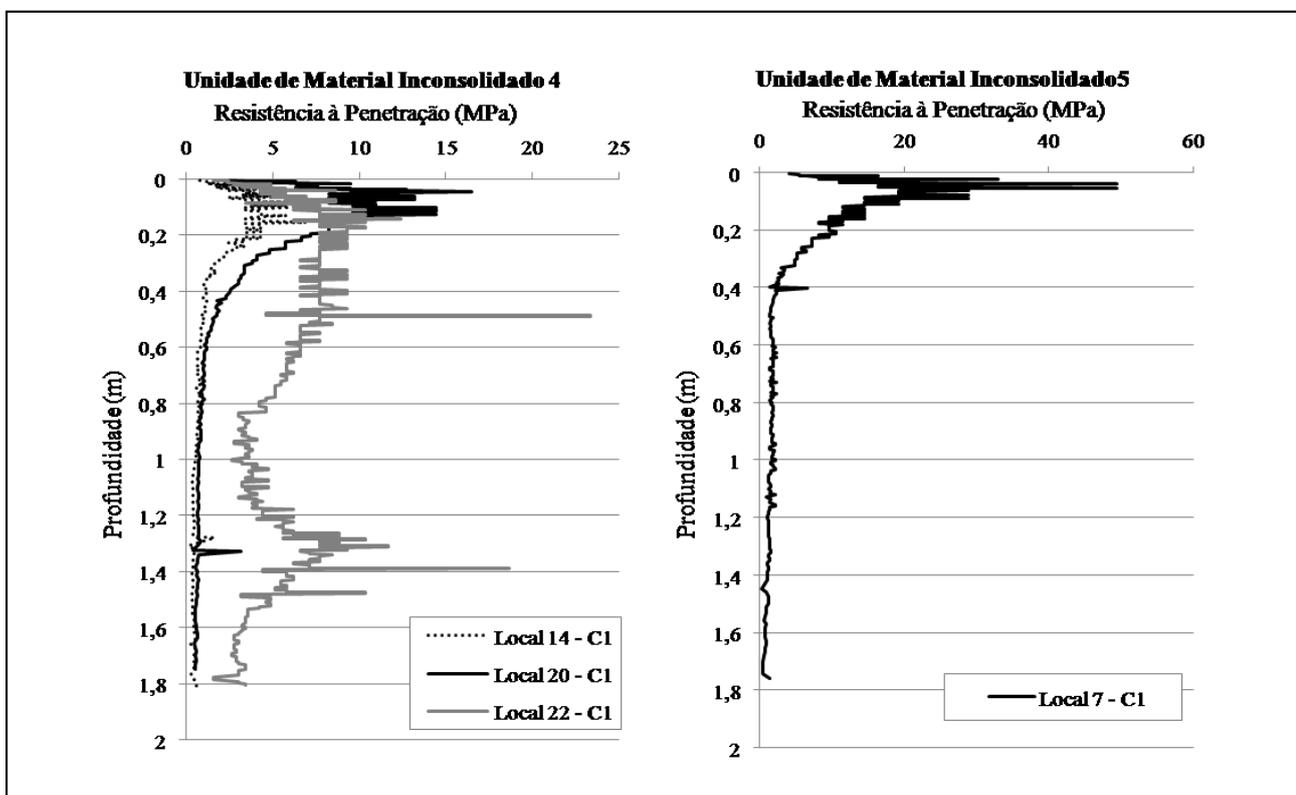


Figura 9. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo nas unidades 4 e 5.

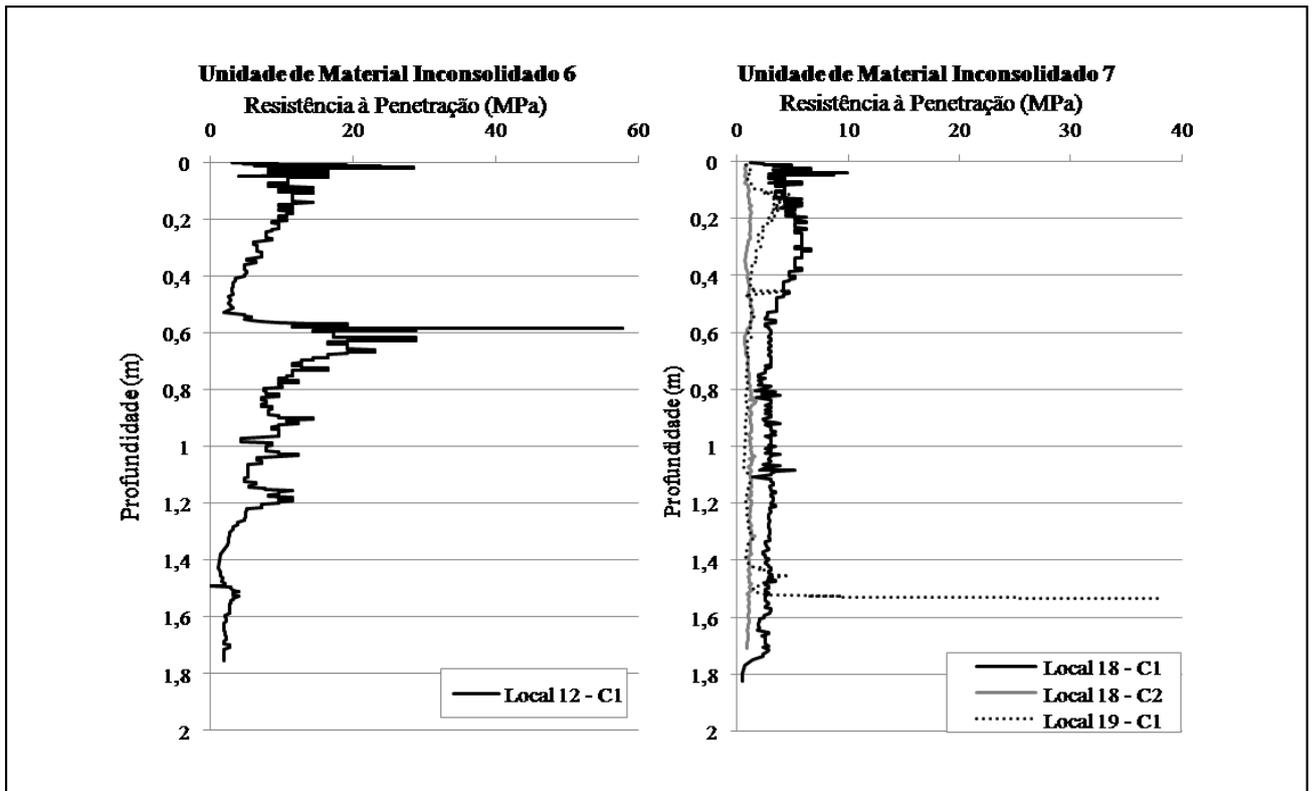


Figura 10. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo nas unidades 6 e 7.

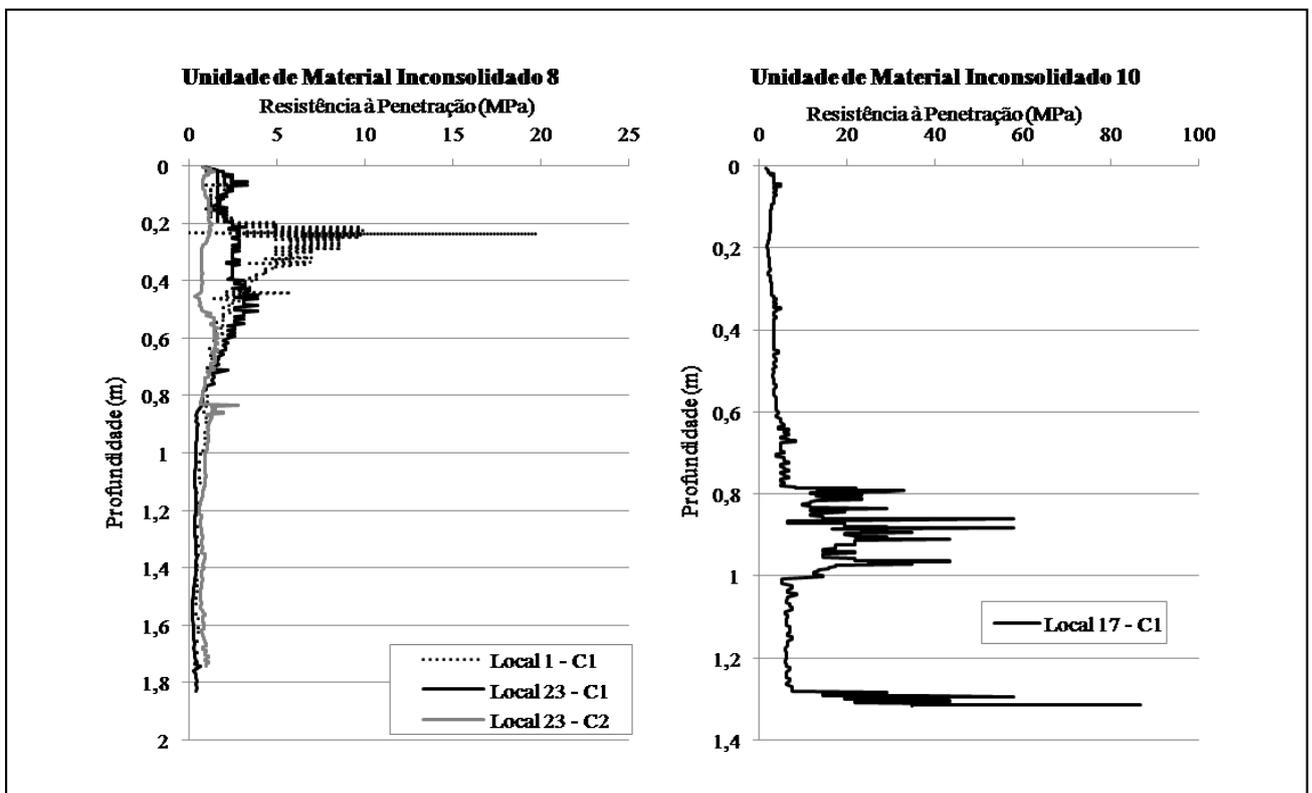


Figura 11. Resistência mecânica à penetração (MPa) ao longo do perfil do solo nas unidades 8 e 10.

Tabela 2. Análise da resistência mecânica do solo à penetração (MPa) a diferentes profundidades.

Unidade de materiais inconsolidados	Local	Condição de umidade do solo	Uso do Solo	Umidade (%)					Resistência à Penetração - Análises Gerais
				Profundidade (m)					
				0 - 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 1,0	
1	2	1	Carreador	8,95	9,30	11,65	11,14	12,38	Apresenta maior resistência nos 20 cm superficiais, com valor médio de 9,02 MPa e picos de 17,41 MPa, com gradativa redução até a profundidade de 40 cm, a partir do qual predomina-se valores de 2,0 a 3,0 MPa
	3	1	Cultivo de cana-de-açúcar (em pousio na época do ensaio)	15,20	14,08	15,38	15,85	16,90	De modo geral, apresenta resistências inferiores a 1,5 MPa, variando entre 0,30 MPa nas camadas superficiais a 1,3 MPa à 60 cm de profundidade
	4	1	Cultivo de cana-de-açúcar	9,83	10,6	9,09	8,96	7,89	Apresenta resistência média de 16,82 MPa nos 20 cm superficiais, com picos de 28 MPa, com redução para um valor médio de 5,0 MPa a partir de 40 cm de profundidade
		2		12	11,74	10,53	10,05	-	Apresenta um aumento de resistência de 0,5 a 1,4 MPa nos 20 cm superficiais e redução gradativa até 0,80 MPa a 65 cm de profundidade
1a	15	1	Carreador	6,83	8,12	1,64	-	-	Nos 10 cm superficiais, apresenta uma resistência média de 8,0 MPa, com redução para 4,0 MPa entre 10 e 20 cm, retornando à cerca de 8,0 MPa entre 20 e 40 cm; a partir de 40 cm, apresenta gradativa redução para um valor médio de 1,0 MPa
1a	16	1	Condição natural*	6,68	7,63	8,81	-	-	Apresenta um aumento de 1,0 a 2,8 MPa nos 20 cm superficiais, com gradativa redução até o valor médio de 1,0 MPa a partir de 50 cm de profundidade
2	6	1	Cultivo de cana-de-açúcar	15,79	17,06	14,39	16,39	15,95	Apresenta um aumento de 0,24 para 0,5 MPa nos 20 cm superficiais, com resistências variando entre 0,5 a 0,7 MPa e picos de 1,5 e 1,7 MPa a partir de 20 cm de profundidade
	8	1	Cultivo de cana-de-açúcar (em meio ao cultivo)	10,03	12,10	12,27	13,16	-	Apresenta um valor médio de 3,3 MPa até a profundidade de 20 cm, com diminuição para cerca de 2,6 entre 20 e 60 cm, gradativa e redução para 1,0 MPa a partir de 1,0 m de profundidade
	9	1	Cultivo de cana-de-açúcar (base de cordão de nível recém arado)	20,38	18,66	22,78	22,99	-	Nos 20cm superficiais, apresenta uma resistência média de 1,8 MPa, com redução para 1,0 MPa entre 20 e 65cm, voltando a aumentar para 2,5 MPa e reduzindo para uma resistência de 1,7 MPa a partir de 80 cm.
		2	Cultivo de cana-de-açúcar (base de cordão de nível)	22,07	24,71	22,14	22,36	-	Gradativo aumento da resistência de 0,20 a 1,0 MPa nos 40 cm superficiais, com aumento para valores de 5,0 a 8,5 MPa entre 40 e 50cm,recém arado) com posterior redução gradativa para 1,0 MPa a 80 cm de profundidade

Unidade de materiais inconsolidados	Local	Condição de umidade do solo	Uso do Solo	Umidade (%)						Resistência à Penetração - Análises Gerais
				Profundidade (m)						
				0 - 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 1,0		
2	21	1	Carreador	10,38	12,20	12,93	7,91	-	Apresenta resistência entre 10 e 15 MPa nos 10 cm superficiais, com redução gradativa para 1,0 MPa a 70 cm, com pico de 19 MPa a 80 cm, e retorno a resistência média de 1,0 a 2,0 MPa a partir de 1,0 m de profundidade	
		2		17,62	13,62	-	-	-		Apresenta resistência de 1,0 a 4,0 nos 10 cm superficiais, com redução gradativa para 1,0 MPa a 60 cm, subindo para 3,5 MPa entre 70 cm e 1 m, média de 2,0 MPa a partir de 1 m de profundidade
3	5	1	Cultivo de cana-de-açúcar (próximo à base de cordão de nível)	14,30	16,13	13,48	9,72	15,69	Apresenta gradativo aumento de 0,2 para 2,0 entre 0 e 70 cm, com resistência média de 3,0 MPa entre 70 e 85 cm, e posterior redução para 0,7 MPa a partir de 1,0 m de profundidade	
		1		12,05	11,86	11,29	11,26	-		Apresenta resistência média de 3,0 MPa nos 20 cm superficiais, e um pico de 9,5 MPa a 20 cm, reduzindo para um valor médio de 0,6 MPa a partir de 80 cm de profundidade
	10	2	Carreador	11,08	10,85	10,12	9,69	-	Apresenta aumento de resistência de 1,0 a 7,0 MPa nos 20 cm superficiais, com redução para 1,0 MPa em 80 cm de profundidade	
		1		11,16	13,03	12,57	-	-		Nos 15 cm superficiais, apresenta resistências entre 10 e 15 MPa, com gradativa redução para 0,7 a 1,0 MPa a partir de 80 cm de profundidade
4	11	2	Carreador	14,80	14,45	13,42	13,88	-	Apresenta resistência média de 2,4 MPa nos 20 cm superficiais com redução gradativa ao longo do perfil do solo, com resistência de 1,0 MPa	
		1		13,38	25,83	16,76	16,97	-		Apresenta resistências entre 1,7 e 2,5 MPa nos 20 cm superficiais, com redução para 0,6 MPa a partir de 80 cm de profundidade
	13	2	Cultivo de cana-de-açúcar (próximo à base do cordão de nível)	25,04	17,23	15,01	14,99	-	Aumento brusco de 0,2 para 1,1 MPa nos 20 cm superficiais, com redução gradativa para 0,6 MPa a 1,0 m de profundidade	
		1		9,83	12,47	13,38	12,20	-		Apresenta resistência média de 4,0 MPa, com picos de 6,0 a 8,0 MPa, nos 20 cm superficiais, com gradativa redução para 0,8 MPa a partir de 60 cm de profundidade
4	20	1	Carreador	9,89	12,57	12,35	-	-	Apresenta resistências entre 11,0 a 13,0 MPa nos 15 cm superficiais, com redução para valores entre 0,8 e 1,0 MPa a partir de 80 cm de profundidade	
		1		5,83	6,35	7,08	7,46	-		Apresenta resistências médias de 5,0 a 9,0 MPa nos 20 cm superficiais, 9,0 MPa entre 20 e 45 cm e entre 1,20 e 1,40 m, e de 4,5 a 5,0 MPa entre 80 cm e 1,20 m e entre 1,6 e 1,8 m de profundidade
	7	1	Carreador	11,99	19,83	28,14	-	-	Apresenta um aumento de 5,0 a cerca de 25 MPa, com picos de 33 e 50 MPa, nos 10 cm superficiais, e gradativa redução para 1,5 a 2,0 MPa a partir de 40 cm de profundidade	

Unidade de materiais inconsolidados	Local	Condição de umidade do solo	Uso do Solo	Umidade (%)					Resistência à Penetração - Análises Gerais
				Profundidade (m)					
				0 - 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 1,0	
6	12	1	Carreador	9,05	13,78	-	-	-	Nos 20 cm superficiais, apresenta resistência média de 12 MPa com picos de 25 MPa, com redução para cerca de 2,0 MPa a 50 cm, apresentando novamente resistências superiores a 20 MPa, com pico de 60 MPa, com gradativa redução para cerca de 1,5 MPa a 1,4 m de profundidade
				-	-	-	-	-	
7	18	1	Pastagem	8,53	9,93	12,49	-	-	Apresenta resistência média de 5,0 MPa até a profundidade de 40 cm, com pequena redução para 3,0 MPa a partir de 40 cm
				31,41	17,50	18,59	19,88	20,17	
7	18	2	Pastagem	14,98	16,88	17,43	18,40	-	Apresenta, ao longo dos 80 cm superficiais, variações de resistência entre 0,80 a 1,3 MPa, e, a partir de 80 cm de profundidade, resistência de 1,3 MPa
				10,54	11,92	11,59	12,03	12,29	
8	19	1	Carreador	6,73	9,47	9,96	10,80	-	Apresenta resistência de 5,0 MPa entre 10 e 20 cm, com diminuição para cerca de 1,0 MPa entre 40 cm a 1,4 m, quando verifica-se aumento para 4,0 MPa e pico de 40 MPa a 1,5 m de profundidade
				14,49	16,27	16,10	13,70	12,20	
8	23	1	Pastagem	24,71	26,72	-	-	-	Nos 20 cm superficiais, apresenta resistência média de 1,7 MPa, com aumento para 9,0 a 10,0 MPa entre 20 e 30 cm, e redução gradativa para 0,7 MPa a 1,0 m de profundidade
				14,49	16,27	16,10	13,70	12,20	
8	23	2	Pastagem	6,73	9,47	9,96	10,80	-	Apresenta resistência média de 2,5 a 3,0 MPa nos 50 cm superficiais, com redução para cerca de 0,5 MPa a partir de 90 cm de profundidade
				14,49	16,27	16,10	13,70	12,20	
10	17	1	Carreador	24,71	26,72	-	-	-	Apresenta, ao longo do perfil do solo, resistência entre 0,80 MPa a 1,60 MPa, com pico de 2,8 MPa na profundidade de 85 cm
				14,49	16,27	16,10	13,70	12,20	
10	17	1	Carreador	24,71	26,72	-	-	-	Apresenta resistência média de 3,0 a 4,0 MPa até 75 cm de profundidade, aumentando para resistências de 20 a 24 MPa com picos de 50 MPa, reduzindo para 6,0 MPa entre 1,0 e 1,3 m e aumentando novamente para 30 a 40 MPa
				14,49	16,27	16,10	13,70	12,20	

Resistência mecânica do solo à penetração

As curvas de resistência mecânica à penetração ao longo do perfil do solo estão exibidas nas Figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11. A Tabela 2 apresenta as umidades do solo determinadas por ocasião do ensaio de resistência à penetração, bem como uma breve análise do comportamento do solo frente ao citado ensaio.

Em virtude da realização do ensaio de resistência à penetração antes e após o ensaio de condutividade hidráulica por meio do duplo anel, designou-se as umidades respectivas como: condição de umidade 1 (C1): anterior ao ensaio de condutividade; condição de umidade 2 (C2): posterior ao ensaio de condutividade. A realização do ensaio em ambas as situações buscou verificar o comportamento da resistência do solo em condições de umidade natural e após saturação hídrica das camadas superficiais.

Observa-se, de maneira geral, uma maior resistência mecânica na cama de 0-20 cm de profundidade nos locais de ensaio, com destaque para os carregadores, que apresentaram valores superiores a 10 MPa e, em três casos, chegando a 30 e 60 MPa. Contudo, nos locais 19 e 17, a elevada resistência encontrada está associada ao impacto entre a base do penetrômetro e fragmentos de rocha da Formação Serra Geral, sendo esta constituinte da unidade de materiais inconsolidados do local de ensaio.

Em relação ao cultivo de cana-de-açúcar, os valores de resistência à penetração mostraram-se variados nas camadas superficiais, estando associados ao intervalo temporal entre as atividades de preparo do solo para plantio (sulcagem e subsolagem) e a realização dos ensaios. Verificou-se resistências inferiores a 5 MPa, sendo os valores mais próximos deste limite observados nos locais em que a sulcagem e subsolagem tinham ocorrido a mais tempo (8, 9, 13 e 14), enquanto que, naqueles onde o manejo do solo era recente (locais 5 e 6) os valores de resistências encontrados foram inferiores a 2,5 MPa.

Contudo, destaca-se o local 4, com resistência entre 15 a 20 MPa na camada de 0-20 cm. Além disso, o peso específico seco da camada mais superficial apresentou-se superior a média dos demais locais, com valor de 17,22 kN/m³, o que, juntamente a elevada resistência à penetração, reflete o grau de compactação elevado do solo analisado.

Nas áreas de pastagem, obteve-se valores distintos entre si, sendo que no local 18, com resistência de 5 MPa, observou-se a presença de animais em diferentes ocasiões, enquanto que no local 23, com resistência inferior a 3 MPa, não constatou-se tal presença, possibilitando inferir sobre tal diferença de valores, uma vez que o pisoteio de animais está entre as principais causas da compactação de solos agrícolas. O peso específico seco acompanhou a diferença entre as resistências, mostrando-se superior no local 18 (15,90 kN/m³) em relação ao local 23 (15,36 kN/m³).

Na área sob reflorestamento com eucalipto, local 22, a resistência à penetração mostrou-se superior a 5 MPa ao longo de quase todo o perfil analisado do solo, compreendendo valores entre 6 MPa e 8 MPa na camada 10-60 cm. Uma outra área da Bacia de estudo, também pertencente à unidade de materiais inconsolidados 4 e sob reflorestamento, apresentou peso específico seco de 16,28 kN/m³ na profundidade de 30-40 cm, e de 25,63 kN/m³ na profundidade de 80-100 cm, indicando que, no caso destes materiais e sob o mesmo uso do solo, o aumento da resistência mecânica também é verificado em camadas mais profundas.

Como dito anteriormente, os carregadores apresentaram, de maneira geral, as maiores resistências à penetração. O local de ensaio 7, referente à unidade 5, apresentou a maior resistência mecânica na camada 0-20 cm, chegando a valores de 30 MPa e picos de 50 MPa. Essa elevada resistência está associada às características do material inconsolidado, influenciado por condições naturais de fluxo de água que, juntamente ao tráfego de maquinários, acarreta o aumento do peso específico do solo e em maiores graus de compactação quando comparados a outros carregadores da bacia.

Os locais 15 e 16, distantes cerca de 10 m, também possibilitam uma boa comparação entre condições distintas de uso do mesmo solo. Enquanto o local 15, carregador, apresenta resistência média próxima a 9 MPa nos 40 cm superficiais, o local 16, condição natural, apresenta valores inferiores a 2 MPa na mesma profundidade, sendo a resistência de ambos aproxima-se a 1 MPa a partir de 1 m de profundidade.

Nos locais onde realizou-se previamente o ensaio de condutividade hidráulica, com adição de água ao solo, constatou-se, na maioria dos casos, redução da resistência à penetração. Em alguns pontos, tal redução ocorreu de maneira mais acentuada, como nos locais 11 e 21, os quais apresentaram uma diminuição de 15 MPa para cerca de 3 MPa, na camada 0-20 cm. Por outro lado, os locais 13 e 23, por exemplo, mostraram uma redução menos brusca, de 2,5 MPa para 1 MPa. O local 10, entretanto, com um aumento de resistência na camada 15-30 cm de 3 MPa, na condição natural, para 6 MPa, após ensaio de condutividade hidráulica, mostrou-se contrário aos demais.

Assim, analisando o comportamento da resistência à penetração nas duas condições de umidade, verifica-se a dependência da resistência em relação à umidade do solo. Em condições de umidade reduzida, observou-se, de maneira geral, maiores valores de resistência. Ao contrário, com o aumento considerável do teor de água, há uma considerável redução na resistência à penetração, uma vez que a água atua entre as partículas do solo, refletindo no decréscimo das forças de coesão e de atrito interno.

Devido a maior compactação, as estradas e carregadores são geradores de alto escoamento superficial drenado para as encostas, condicionando, juntamente com a predominância de materiais arenosos, feições erosivas de dimensões e intensidades variadas, como verificou-se em toda a bacia. De maneira geral, observou-se na área de estudo uma série de feições erosivas lineares, variando desde sulcos a grandes voçorocas, de cerca de 20 metros de largura, até 50 metros de comprimento e 4 metros de profundidade. As feições de maiores dimensões localizam-se, em sua maioria, nas cabeceiras dos canais de drenagem, enquanto, nas encostas, a montante de cordões de nível são observados apenas sulcos e ravinas. Algumas dessas feições são apresentadas na Figura 12.

CONCLUSÕES

A realização do ensaio de resistência mecânica à penetração por meio do penetrômetro dinâmico, em conjunto com a obtenção do teor de umidade e caracterização dos materiais geológicos, possibilitou a análise dos efeitos associados a compactação do solo provocados pelo uso agrícola da área de estudo.

Os maiores valores de resistência à penetração encontrados estão associados a carregadores, indicando maiores graus de compactação e condicionando uma redução das taxas de infiltração e conseqüente aumento do escoamento superficial. Nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, foram encontrados valores

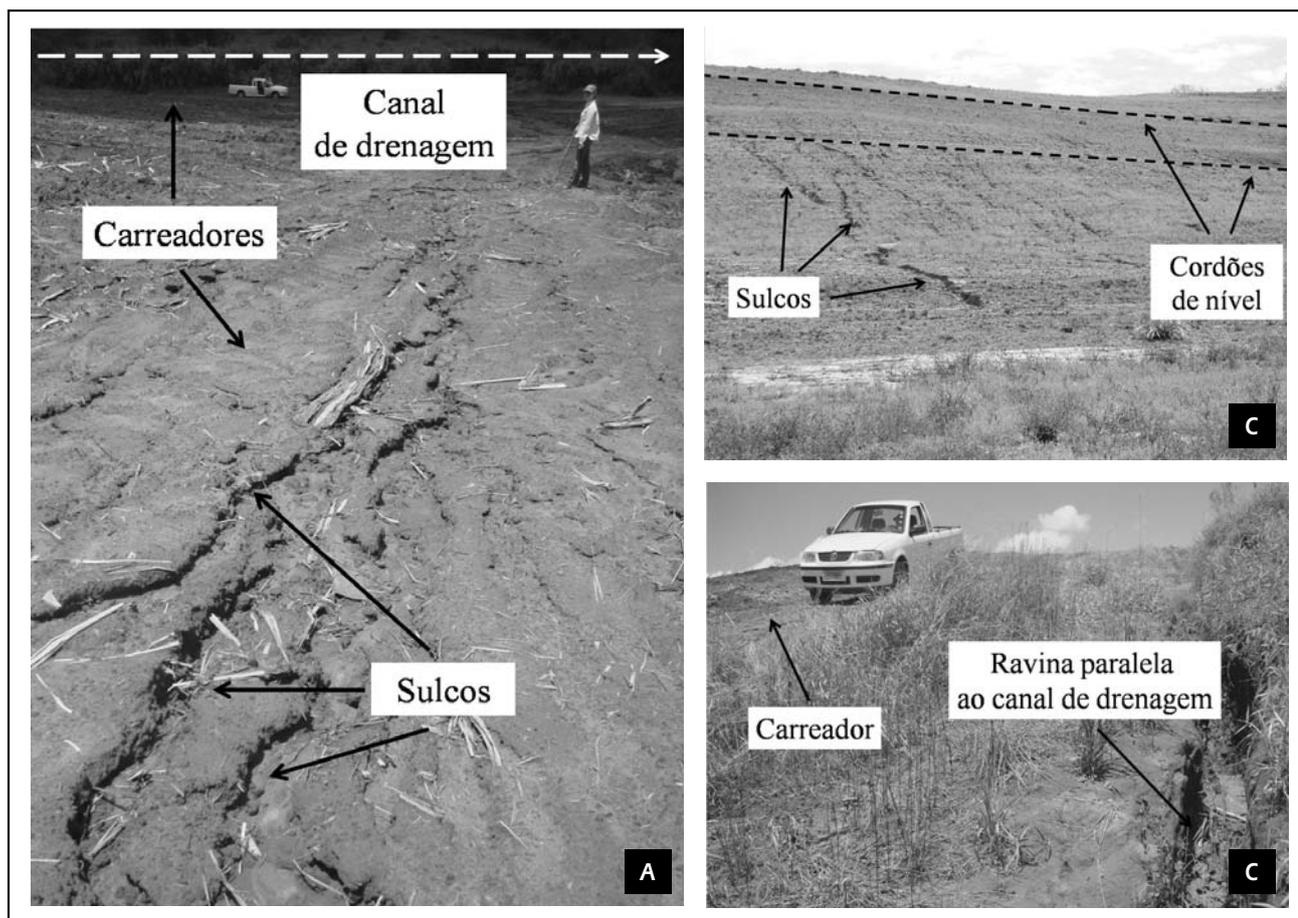


Figura 12. Feições erosivas encontradas próximas as estradas e carreadores em diferentes pontos da Bacia: A: Sulcos em carreador, descontínuos e perpendiculares ao canal de drenagem; B: Diversos sulcos em encosta; C: Ravina paralela ao carreador e continua ao canal de drenagem.

inferiores aos de carreadores, derivado, principalmente, das atividades de manejo solo por maquinário e implementos agrícolas. As áreas de pastagens também apresentaram resistência inferiores, diferindo entre si em função da presença e circulação de animais, ocasionando a compactação por pisoteio.

A resistência mecânica a penetração mostrou-se profundamente influenciada pela umidade do solo, onde o aumento da umidade em camadas mais profundas bem como a adição de água, em ocasião do ensaio de condutividade hidráulica, provocaram redução da resistência.

A utilização do solo para fins agrícolas e consequentes técnicas de cultivo empregadas, associadas às características dos

materiais geológicos podem ser apontadas como principais fatores para o processo de compactação do solo, oriundo do tráfego de maquinários e alteração da distribuição de materiais inconsolidados, com exposição de materiais menos evoluídos geneticamente.

Em decorrência deste processo, ocorre a alteração na dinâmica das águas, sobretudo na razão infiltração/escoamento superficial, verificada em toda a área de estudo, desencadeando processos erosivos de grandes dimensões e também a modificação de toda a dinâmica de recarga, com prejuízos econômicos e ambientais.

TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. (1990).

Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of soil science*, v. 41, n. 3, p. 341-358.

BENNIE, A.T.P. E KRYNAUW, G.N., (1985).

Causes, adverse effects of soil compaction. *South African Journal Plant Soil* 2, p.109-114.

CASSAN, M. (1982).

Los Ensayos in Situ em la Mecânica del Suelo. *Barcelona: Editores Técnicos Associados, S.A.* p. 139-166.

- DAVIES, S., LACEY, A., (2011).
Subsurface compaction: A guide for WA farmers and consultants.
Department of Agriculture and Food, Western Australia.
- DUIKER, W. S., (2004).
Effects of soil compaction. Agricultural Research and Cooperative Extension.
College of Agricultural Sciences. Pennsylvania State University.
- FUREGATTI, S. A. (2012).
Avaliação da variabilidade das características geotécnicas relacionadas aos processos erosivos com ensaios in situ.
Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- HERRICK, J. E., & JONES, T. L. (2002).
A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance.
Soil Science Society of America Journal, 66(4), 1320-1324.
- KOEPPEL, W. (1948).
Climatología, com um Estudo de los Climas de la Tierra.
Mexico: Fondo de Cultura Economica, 478p.
- MANTOVANI, E. C., (1987).
Compactação do solo.
Informe Agropecuário, Belo Horizonte 13.147: 52-55.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. E REINERT, D. J., (2007).
Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação.
Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 5, p. 49-134.
- VANAGS, C.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. (2004).
The dynamic penetrometer for assessment of soil mechanical resistance.
In: Proceedings of the 3rd Australian New Zealand Soils Conference. p. 5-9.



Avaliação geológica e geotécnica preliminar da degradação ambiental das áreas úmidas na região de Leme-Brasil

Preliminary geological and geotechnical assessment of the wetlands environmental degradation in Leme's region- Brasil

Failache, Moisés¹ ✉ - Zuquette, Lázaro

Recibido: 9 de mayo de 2015 • Aceptado: 05 de octubre de 2015

Resumo

Este trabalho apresenta uma avaliação geológico-geotécnica preliminar das áreas úmidas da região de Leme localizada no Estado de São Paulo-Brasil, enfocando-se nos mecanismos que controlam a sua dinâmica de água. Os métodos utilizados foram baseados no uso de ferramentas de geoprocessamento, trabalhos de campo, nas características geológico-geotécnicas dos materiais geológicos, no uso do solo e em dados pluviográficos. Foram identificadas 112 áreas úmidas totalizando uma área de 901,03 ha as quais foram classificadas como depressionais. Estas foram agrupadas em 4 grupos com comportamento hidrológico distinto. Os graus de degradação ambiental variaram principalmente por conta da intensidade das atividades antrópicas e pelas características da configuração geológica e geotécnica de cada grupo. Os grupos que se encontram mais degradados foram aqueles que não estavam assentados sobre os diabásios. Entretanto independente do grupo, na maioria das áreas úmidas, foi verificado a diminuição da lâmina de água no seu interior afetando principalmente a capacidade destas sustentar o fluxo dos canais de drenagem durante a estiagem.

Palavras Chaves: *Áreas úmidas, Avaliação Geológico-Geoécnica, Degradação Ambiental, Dinâmica de água.*

Abstract

This paper presents a preliminary geological and geotechnical assessment of Leme's wetlands located in state of São Paulo-Brazil focusing on the mechanisms that control the water dynamics. The methods used were based on geoprocessing tools, field work, geological and geotechnical characteristics of geological materials, land use and rain data. It was identified 112 wetlands which were classified as depressionals, with a total area of 901.03ha. These were grouped into 4 groups with different hydrological behavior. The environmental degradation degrees ranged mainly due to the intensity of human activities and the geological and geotechnical characteristics of each group. The groups that are most degraded were those who were not on the diabase. However regardless of the group, was found that most of the wetlands decreased superficial water height affecting their capacity to sustain the flow of drainage channels during the dry season.

Keywords: *Wetlands, Geological and Geotechnical assessment, Environmental Degradation, Water Dynamics.*

1. Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil,

✉ mffailache@usp.br

INTRODUÇÃO

As áreas úmidas são ambientes que apresentam uma grande importância ambiental, bem como uma alta vulnerabilidade (Bates et al., 2008; Poff et al., 2002; Winter, 2000). Estas são definidas como ambientes que estão sujeitos a inundações estacionais ou permanentes, que mantêm o solo suficientemente saturado para o estabelecimento de plantas aquáticas e o desenvolvimento de solos hidromórficos. Geralmente se encontram em zonas planas, de baixo relevo, em solos mal drenados, apresentam ainda condições mínimas de precipitação e/ou drenagem que permitem o surgimento de lamina de água pouco profundas. Estes contem de 10 a 20% do carbono terrestre, cobrem aproximadamente entre 5 a 8% da superfície da Terra. Estima-se uma perda de aproximadamente de 50%, estando localizada principalmente em países em desenvolvimento. Entretanto mesmo não sendo um número expressivo, não reflete a degradação ambiental na sua totalidade, visto a dificuldade de avaliar sua degradação. A dificuldade associa-se principalmente na correlação e avaliação das variáveis do regime hídrico (padrão espacial e temporal de alagamento ou saturação do solo), das variáveis ecológicas (ciclo energético e período de crescimento) e das variáveis químicas (qualidade de água (Mitsch et al., 2007).

Além das dificuldades para avaliar estas áreas, as pesquisas a nível mundial ainda são incipientes frente a importância desses ambientes. Sendo que grande parte da pesquisa foi realizada nos países desenvolvidos. (Bartoldus, 1999) constatou que até o final da década de 1990 já haviam sido desenvolvidos mais de 40 métodos rápidos de avaliação. (Kusler, 2004) em levantamento mais detalhado encontrou mais de 90 métodos. Grande parte desses métodos foi desenvolvida nos Estados Unidos, entretanto foram identificados métodos propostos pelos Europeus (Maltby et al., 2009), e para países em desenvolvimento (Koudsta al et al., 1994). No Brasil verificou-se poucos estudos estando relacionados principalmente a descrição de espécies e comunidades e sua inter-relação com este ecossistema (Neiff et al., 1990; Giovannini, 1997; Mendiondo et al., 2000), a sistemas de áreas úmidas artificiais ou naturais para o tratamento de efluentes líquidos (Zacarkim, 2006; Leal, 2009), mapeamento dessas áreas (Meller, 2011; Golubeff, 2012) e seu gerenciamento (Tassi, 2008).

No sentido de apresentar uma diretriz na caracterização avaliação e monitoramento das áreas úmidas a (EPA, 2006) propôs três níveis baseados na quantidade de dados e recursos financeiros disponíveis: Avaliação da paisagem (Nível 1), Avaliação rápida (Nível 2), e Avaliação intensiva in situ (Nível 3). A avaliação da paisagem utiliza basicamente dados prévios, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e sensoriamento remoto para obter rapidamente informações a respeito das condições das áreas úmidas. O Nível 2 de avaliação utiliza indicadores de simples obtenção como a composição do sedimento, tipos de classes de plantas, morfologia, área inundada, etc. Estes métodos avaliam individualmente cada área úmida e fornecem uma única classificação ou pontuação que mostra as condições gerais de degradação ambiental. A grande vantagem desta abordagem é que gera rapidamente uma avaliação das áreas úmidas, com apenas levantamento de campo simples. O terceiro nível é baseado em trabalho de campo intensivo, necessitando de uma grande quantidade de dados tais como um estudo detalhado de espécies, a variação do nível d'água e características físico-químicas ao longo do tempo. Apesar de ser uma avaliação mais rigorosa, requer mais mão de obra, material, dinheiro e tempo.

Um fato interessante a respeito desta proposta é que cada nível pode ser usado como validação para o outro como verificado por (Mack et al., 2000; Wardrop et al. (2007).

Independentemente do nível de avaliação utilizado, para uma compreensão dos graus de degradação ambiental e as funções das áreas úmidas primeiro é necessário classificá-las, em virtude da variedade das funções e mecanismos que regem cada tipo. Esta classificação permite que seja compreendido o funcionamento hidrológico básico de cada tipo, visto que ambientes semelhantes tendem a ter características, propriedades e funções similares. Entre os principais sistemas de classificação das áreas úmidas cita-se o proposto por (Brinson, 1993) chamado de HMG (Hidrogeomorphic Approach). Os atributos base dessa classificação são a posição topográfica, a fonte de água e a hidrodinâmica das áreas úmidas. Entretanto observou-se que na classificação proposta pela HGM, uma classe ainda apresenta um grau de variabilidade, sendo necessário assim classificar em subclasses. (Brison et al., 1995) considera que o nível de subclasses proporciona a resolução para detectar diferenças funcionais das áreas úmidas. Este fato pode ser observado quando se analisa dois tipos de áreas úmidas depressionais localizadas nos EUA. A primeira não apresenta uma conexão continua a nível regional das águas subterrâneas e de drenagens, tendo como principal fonte de água o escoamento superficial, o degelo e as chuvas (Zedler, 2003). Enquanto que a segunda além das fontes já citadas apresenta uma alta relação com o fluxo subterrâneo regional (Wurster et al., 2003), desse modo apresentando uma dinâmica distinta.

Baseado neste contexto o objetivo deste trabalho foi classificar e avaliar a degradação ambiental das áreas úmidas da região de Leme localizada no Estado de São Paulo-Brasil, enfocando-se principalmente nos mecanismos que controlam a dinâmica de água. A região estudada tem um histórico de uso e ocupação agrícola e urbana intenso, onde muitas das áreas úmidas foram ocupadas por cultivos, apresentam a construção de tanques e canais artificiais de drenagem, além de haver evidências de redução da lamina de água no seu interior.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A região de estudo está localizada no centro-leste do Estado de São Paulo envolvendo os municípios de Leme, Pirassununga, Santa da Cruz da Conceição, Corumbataí e Araras, entre os meridianos 47°15' e 47°30'W e os paralelos 22°00' e 22°15'S (Figura 1), cobrindo uma área de 717,43km². A região apresenta duas rodovias principais as quais são a Anhanguera (SP330) que corta ao centro no sentido N-S e a rodovia SP-225 no sentido E-W.

A rede de drenagem da região de Leme apresenta 695 km de extensão, com uma densidade de 0,96 km/km². Os principais rios são o Rio Moji-Guaçu que corre a leste no sentido S-N drenando quase toda a região, o Ribeirão do Roque a norte sentido W-L e o Ribeirão do Meio a sul sentido SW-NE.

O clima da região é caracterizado como subtropical úmido a muito úmido, com presença de fortes estiagens durante o inverno. As chuvas se concentram principalmente nos meses de novembro a março tendo como precipitação média anual aproximadamente de 1300mm como pode ser observado na Figura 2. A evapotranspiração média anual apresenta valores médios anuais de 1000 mm enquanto que as temperaturas médias anuais variam de 20 a 21° C

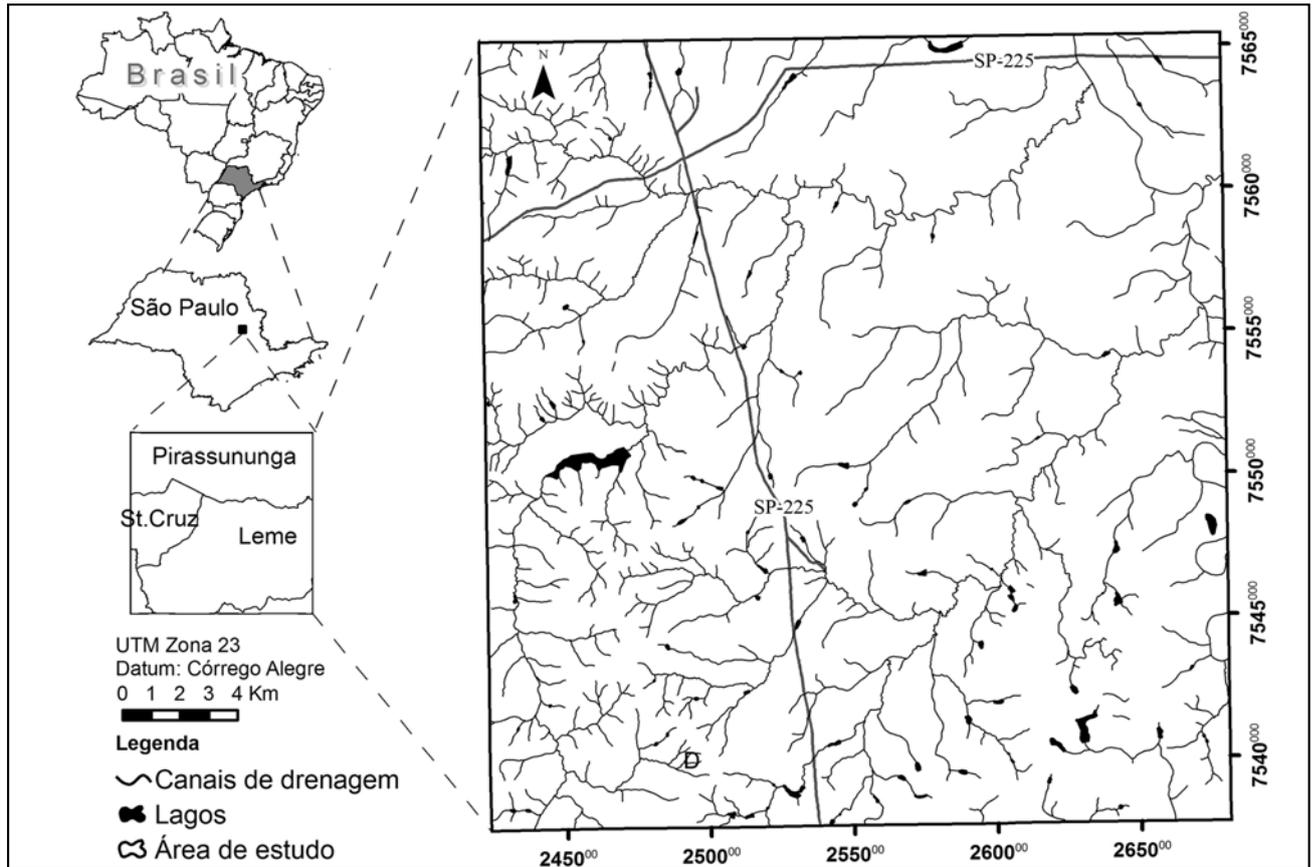


Figura 1. Localização da área de estudo.

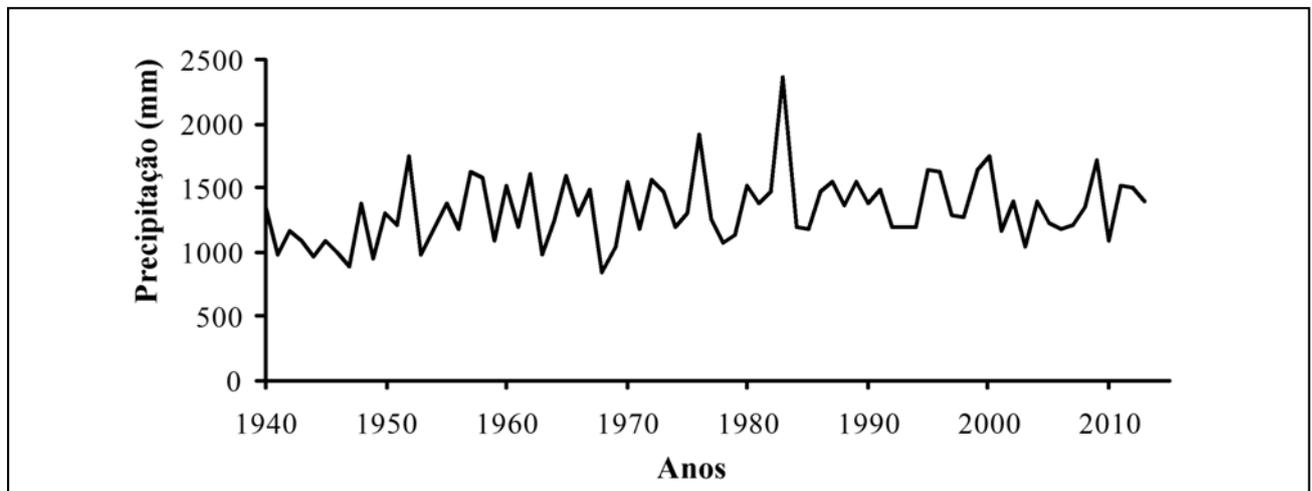


Figura 2. Padrão de chuvas anuais da área de estudo.

Em geral, a vegetação natural existente na área de estudo é constituída um tipo de savana denominado Cerrado e bosques tropicais densos. O uso do solo é predominantemente agrícola sendo a Cana de Açúcar o principal.

A região de Leme está imersa na zona geomorfológica denominada Depressão Periférica (Zona Moji-Guaçu) (Ávila *et al.*, 1981). Os principais tipos de relevo da região são as colinas amplas, médias, morrotes alongado, mesas basálticas, e encostas sulcadas por vales profundos. A declividade varia de 0 a 15% na maior parte da área e acima de 15% nos setores mais

dissecados do terreno. As cotas altimétricas oscilaram na faixa de 530m a 800m.

As formações geológicas que compões a área de estudo são a Serra Geral, Botucatu, Pirambóia, Corumbataí, Irati e Tatuí, sendo que sua descrição é apresentada a seguir:

1. A Formação Serra Geral a qual é representada pelas intrusivas básicas caracteriza-se por soleiras e diques de diabásio de textura faneríticas e coloração cinza a preta. Apresentam associação íntima com as regiões de falhamentos normais com composição mineralógica constituída de plagioclásio e augita.

2. A Formação Botucatu apresenta arenito róseos e avermelhados, finos a médios, bem classificados e friáveis. Estes arenitos foram depositados em ambientes desérticos, podendo está silicificados formando escarpas abruptas devido a erosão diferencial.
3. A Formação Pirambóia é composta por arenitos fluviais esbranquiçados, amarelados e róseos, médios e finos e às vezes bastante argilosos. Esta formação situa-se em regiões com ondulações suaves e interflúvios aplainados.
4. A Formação Irati geralmente é constituída de argilitos, siltitos e folhelhos de carbonos e calcários, podendo apresentar seixos de quartzo e sílex. Na região as litologias predominantes são siltitos e folhelos cinza escuros.
5. A Formação Corumbataí é composta por folhelhos variegados cinzentos a roxo, argilitos e siltitos podendo apresentar cimentação calcária.

6. A Formação Tatuí é apresenta siltitos arenosos de cores arroxeadas podendo ocorrer subordinamente camadas de arenitos, calcários, folhelhos e sílex.

Aspectos gerais e modelo conceitual

Os procedimentos utilizados neste trabalho tiveram como objetivo avaliar preliminarmente os graus de degradação ambiental das áreas úmidas da região de Leme, enfocando principalmente a dinâmica de água. O conjunto metodológico foi estruturado conforme a Figura 3, que mostra o esquema das principais etapas do trabalho. O modelo conceitual básico de análise representando as áreas úmidas da região é mostrado na Figura 4.

Baseado no modelo conceitual, o balanço hídrico das áreas úmidas foi determinado através da Equação 1. O entendimento do balanço hídrico segundo (Acreman e Felicity, 2006) é um importante teste quantitativo na concepção do modelo hidrológico, entretanto este se constitui apenas como uma etapa preliminar da compreensão dos seus mecanismos de controle.

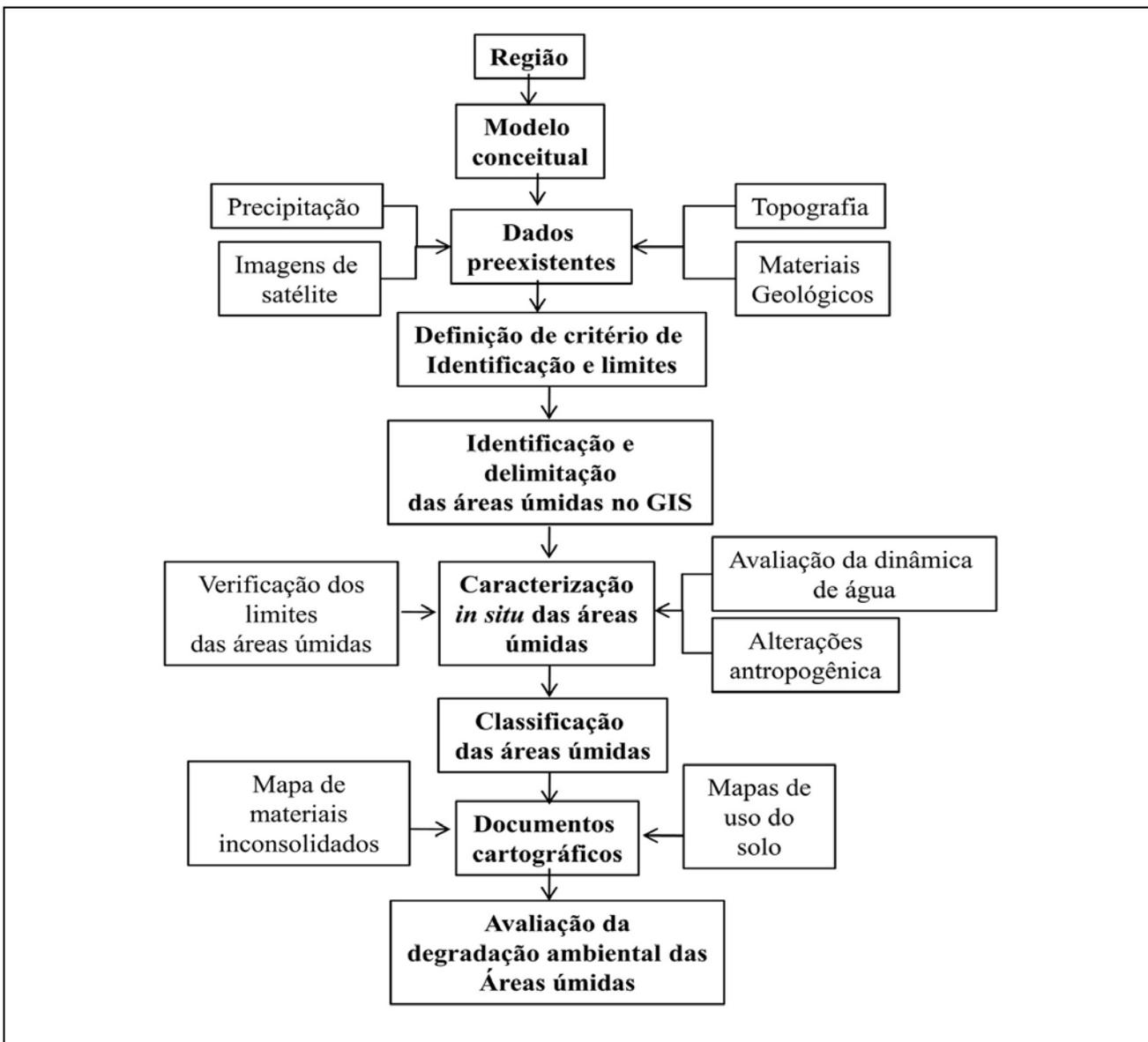


Figura 3. Esquema dos métodos utilizados para avaliar a degradação das áreas úmidas da região de Leme.

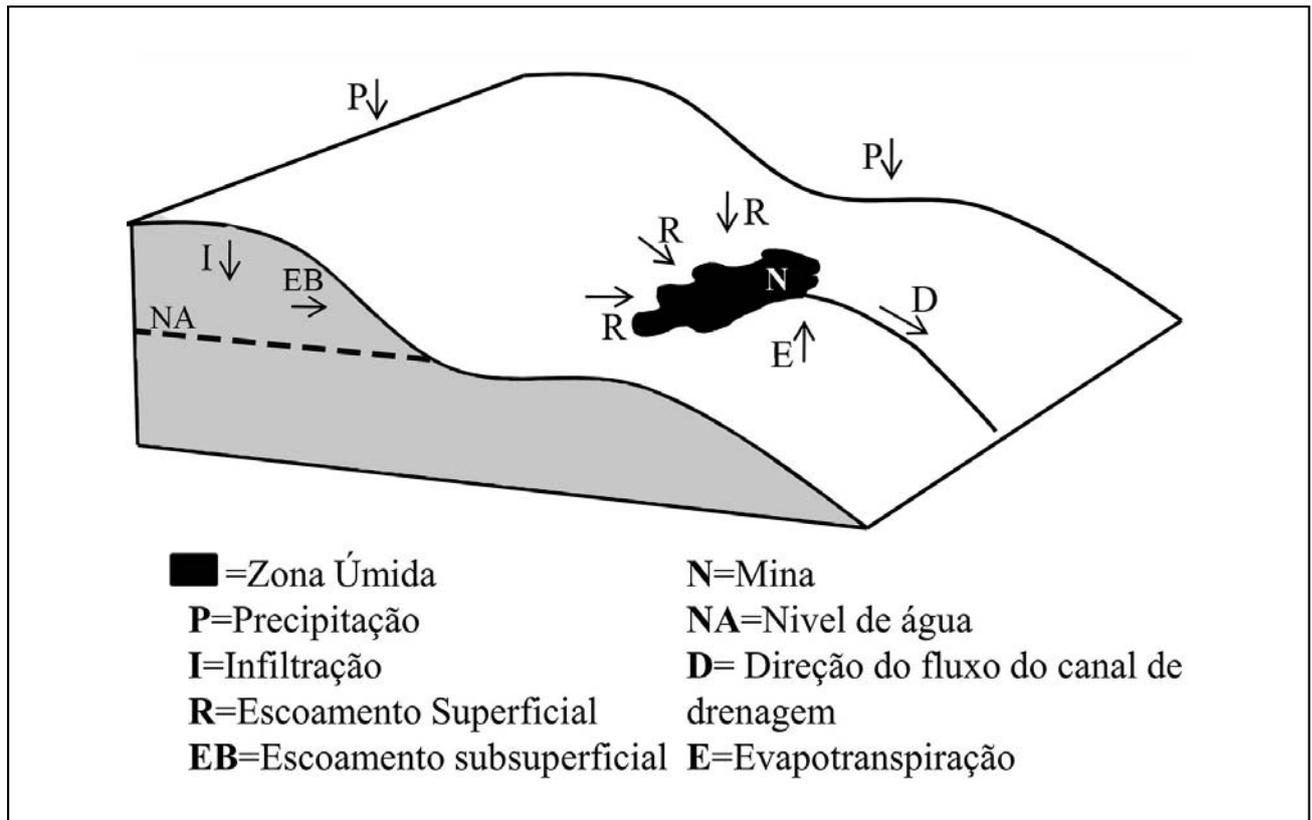


Figura 4. Modelo conceitual do funcionamento hidrológico das áreas úmidas da área de estudo.

$$BH = (P + R + L + S) - (E + D) \quad [1]$$

Onde:

BH=Balanco hídrico; P=Precipitação; R= Escoamento superficial; L=Escoamento Subsuperficial; S=Minas; E=Evaporação; D = Drenagem.

Obtenção e avaliação dos dados preexistentes

Nesta etapa, levantaram-se dados preexistentes necessários para a classificação das áreas úmidas e avaliação dos distintos graus de degradação ambiental. Estes dados referiram-se à caracterização básica dos materiais inconsolidados, de mapas topográficos, de mapas de materiais geológicos, imagens de satélite, fotos aéreas e registros pluviográficos. Em seguida foram avaliados para verificar sua qualidade no que diz respeito à representatividade destes para o modelo conceitual, assim como na representação adequada do meio físico. Os dados preexistentes levantados foram:

1. Mapas Topográficos na escala 1:50.000 elaborados pelo (IBGE, 1971);
2. Mapa de Substrato Rochoso na escala 1:50.000 elaborado por (Lollo, 1991);
3. Mapa e caracterização básica dos materiais inconsolidado elaborados por (Lollo, 1991);
4. Registros pluviográficos extraídos de (ANA, 2015)
5. Imagem de satélite, fotos aéreas, etc.

Definição de critério de identificação e limites das áreas úmidas

A definição de critérios de identificação e delimitação das áreas úmidas em campo se baseou no manual da EPA (SIPPLE, 1988) que de acordo com (Mitsch et al, 2007) é o mais eficiente. O manual proposto pela EPA considera três indicadores (vegetação, solos e hidrologia), porém não requer indicadores ou evidências positivas dos três fatores. Ele se baseia na preponderância de certos indicadores e estão em ordem hierárquica na natureza.

De maneira prática, a abordagem da EPA considera primeiramente a vegetação como indicador principal, onde a ocorrência ou não de certos tipos de plantas determinaram se é uma área úmida ou não. O segundo indicador avaliado é a hidrologia, onde os critérios básicos estão relacionados aos processos de inundação, saturação e de encharcamento. O manual afirma que a identificação destes dois parâmetros é suficiente, todavia eles ressaltam que, caso as evidências hidrológicas não sejam conclusivas deve-se avaliar o solo. Os parâmetros de solos no geral são utilizados principalmente para o delineamento da extensão da área úmida, principalmente quando não é identificado um limite claro.

Assim, os indicadores utilizados para identificar e delimitar as áreas úmidas in situ foram: presença de espécies hidrófitas como a *Typha domingensis*, presença de solos hídricos, alto conteúdo de matéria orgânica, marcas de inundação, observações visuais de ambientes redutores, de saturação de solo e de inundação. Ressalta-se que não se utilizaram todos os critérios propostos pelo manual da EPA, pois alguns destes não se

encontravam disponíveis, como por exemplo, a variação do nível do lençol freático.

Os critérios utilizados para identificação e delimitação no Sistema de Informação Geográfica (SIG) foram: evidências de saturação, inundação, posição topográfica, morfologia e o formato das áreas úmidas.

Identificação e delimitação das áreas úmidas no GIS

Nesta etapa foram identificadas e delimitadas previamente as áreas úmidas e as zonas contribuição de escoamento de cada uma. A identificação e a delimitação foram feitas no ArcGIS 9.3 a partir das imagens de satélite mais antigas na prerrogativa de que nenhuma área úmida havia desaparecido. A zona de contribuição do escoamento superficial foi traçada a partir do modelo digital do terreno elaborado na escala 1:50.000. A execução deste procedimento foi feita no ArcScene 9.3, onde era possível visualizar mais facilmente a zona de contribuição, controlando o exagero vertical.

Caracterização in situ das áreas úmidas

A caracterização das áreas úmidas in situ consistiu de três fases: verificação de limites em campo, avaliação condições hidrológicas e a identificação de alterações antropogênicas.

Para a verificação dos limites das áreas úmidas em campo foram tomados pontos de GPS onde se observava a mudança dos solos hidromórficos. Quando não era possível verificar este critério, analisava-se a transição da vegetação hidrófita. Após a obtenção desses pontos, foi feito ajustes dos limites quando necessário das delimitadas na etapa (2.5).

Para avaliar a dinâmica de água e as condições hidrológicas foram realizadas duas campanhas, uma antes do período mais chuvoso e outra após a ocorrência de eventos significativos de chuva. Analisaram-se as condições das áreas úmidas se estas apresentavam lamina d'água na superfície, lamina d'água nos canais artificiais de drenagem/tanques, evidências de saturação ou se estavam completamente secas. Para auxiliar na verificação de aumento da altura de água foram instaladas estacas de madeira como referência. A cravação foi feita em locais próximos de onde começavam as evidências de saturação ou alagamentos, podendo ser observada na Figura 5. Concomitantemente a esta etapa foram analisados os dados pluviográficos. A quantidade precipitada foi subdividida em chuva por dia.

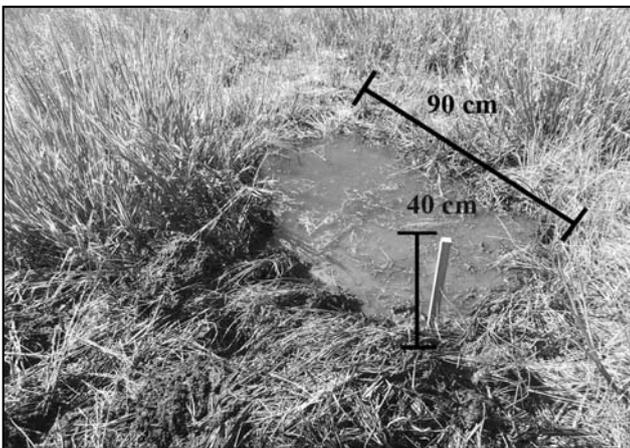


Figura 5. Estaca cravada para ser utilizada como referência na variação da quantidade de água nas áreas úmidas.

A identificação de alterações antropogênicas correspondeu a observação das diversas intervenções antrópicas que pudessem alterar o regime hídrico das áreas úmidas. Dentre as intervenções são citadas os canais de drenagem e lagos artificiais, a presença de cultivos no interior das áreas úmidas, e o uso do solo no entorno destas.

Classificação das áreas úmidas

A classificação das áreas úmidas da região de Leme se baseou na proposta de *Brinson (1993)* a qual considera a posição topográfica, a fonte de água e a hidrodinâmica. Na posição topográfica foi avaliado onde a área úmida se encontra, se está no topo, no meio ou na base da encosta. Além disso, foi levado em consideração o contexto geomorfológico das áreas úmidas, ou seja, se está isolada de rios e lagos, se funciona como uma bacia de captação, em quais tipos de materiais geológicos estavam assentadas. Na fonte de água foram analisados quais são os principais componentes de entrada, seja ela a precipitação, escoamento superficial, escoamento subsuperficial ou minas, etc. A hidrodinâmica avaliou a direção do fluxo da água, se era vertical ou horizontal.

Documentos cartográficos

Para realizar a avaliação da degradação ambiental foi necessário elaborar documentos cartográficos, a fim de retratar espacialmente as características dos materiais inconsolidados e das atividades antrópicas. Os mapas elaborados foram um mapa de material inconsolidado e dois mapas de uso e ocupação, sendo um do ano de 1991 e outro de 2014. O mapa de materiais inconsolidados se baseou no trabalho de *Lollo (1991)*. Os mapas de uso do solo foram elaborados a partir de imagens *Landsat (1991)*. Ressalta-se que as imagens base para a elaboração do uso e ocupação eram do mesmo período do ano para retratar a mesma estação climática.

Avaliação da degradação das áreas úmidas

Esta etapa corresponde à sistematização, análise e avaliação dos aspectos de degradação ambiental das áreas úmidas. Foram correlacionados os dados de materiais geológicos, topográficos, morfologia, tamanho, condições hidrológicas e chuvas para compreender os mecanismos que controlam a dinâmica de águas dos diversos tipos de área úmida encontrados. Foram correlacionados ainda o uso do solo e componentes antropogênicos com o objetivo de analisar a interferência de cada um desses no processo de degradação. A análise desses componentes foi elaborada em duas porções, uma correspondendo à própria área úmida e a outra a sua zona de contribuição de escoamento superficial.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Características Básicas das Áreas Úmidas

No total foram identificadas 112 áreas úmidas totalizando 901,03ha, com uma média de 8,05ha, a maior apresentou uma área de 40,4 ha e a menor 1,08 ha. O formato e a extensão são bastante variados, entretanto tendem a apresentar um formato mais circular, funcionando como uma bacia de captação de água. A disposição espacial e a posição topográfica também apresentaram variações. As áreas úmidas estão normalmente próximas umas das outras, todavia foram identificadas algumas como elementos isolados. No geral estas estão localizadas nos topos de morro, porém observou-se no meio de encostas ou próximo da base.

As zonas de contribuição de escoamento superficial das áreas úmidas somaram uma área de aproximadamente 5555,66 ha, apresentando valor médio, máximo e mínimos de 49,60 ha, 299,45ha e 1,6 ha respectivamente. A forma e a extensão também são variadas, podendo apresentar formatos mais circulares e/ou mais alongados. Na Figura 6 observa-se as relações de extensão das áreas úmidas e sua respectiva zona de contribuição e na Figura 7 a sua distribuição espacial.

Materiais Inconsolidados

O entendimento da distribuição e das características geotécnicas dos materiais inconsolidados no estudo das áreas úmidas é fundamental, pois reflete diretamente na relação infiltração/escoamento superficial, frente a diversos eventos de chuva, consequentemente afetando diretamente nos processos de recarga. Além disso, pode interferir no processo de erosão da zona de contribuição e de sedimentação das áreas úmidas.

Nesse contexto, observou-se que as áreas úmidas e sua respectiva zona de contribuição estão na sua maioria sobre os materiais residuais da Formação Serra Geral, Arenosos Coluvionares e os argilosos de rampa. Com menos frequência notou-se a ocorrência nos argilosos de rampa, arenosos aluvionares, residuais da Formação Tatuí e Irati. Ao analisar as características hidráulicas desses materiais observa-se que os arenosos coluvionares são os que apresentam os maiores valores de condutividade hidráulica, sugerindo que o processamento dominante é de descarga. Enquanto que os argilosos de rampa e os residuais das intrusivas básicas são menos permeáveis, indicando que o processo de saturação e inundação das áreas úmidas seja principalmente por escoamento superficial. De maneira geral a distribuição espacial dos materiais inconsolidados pode ser observada na Figura 8, enquanto que na Tabela 1, são apresentadas suas características geotécnicas.

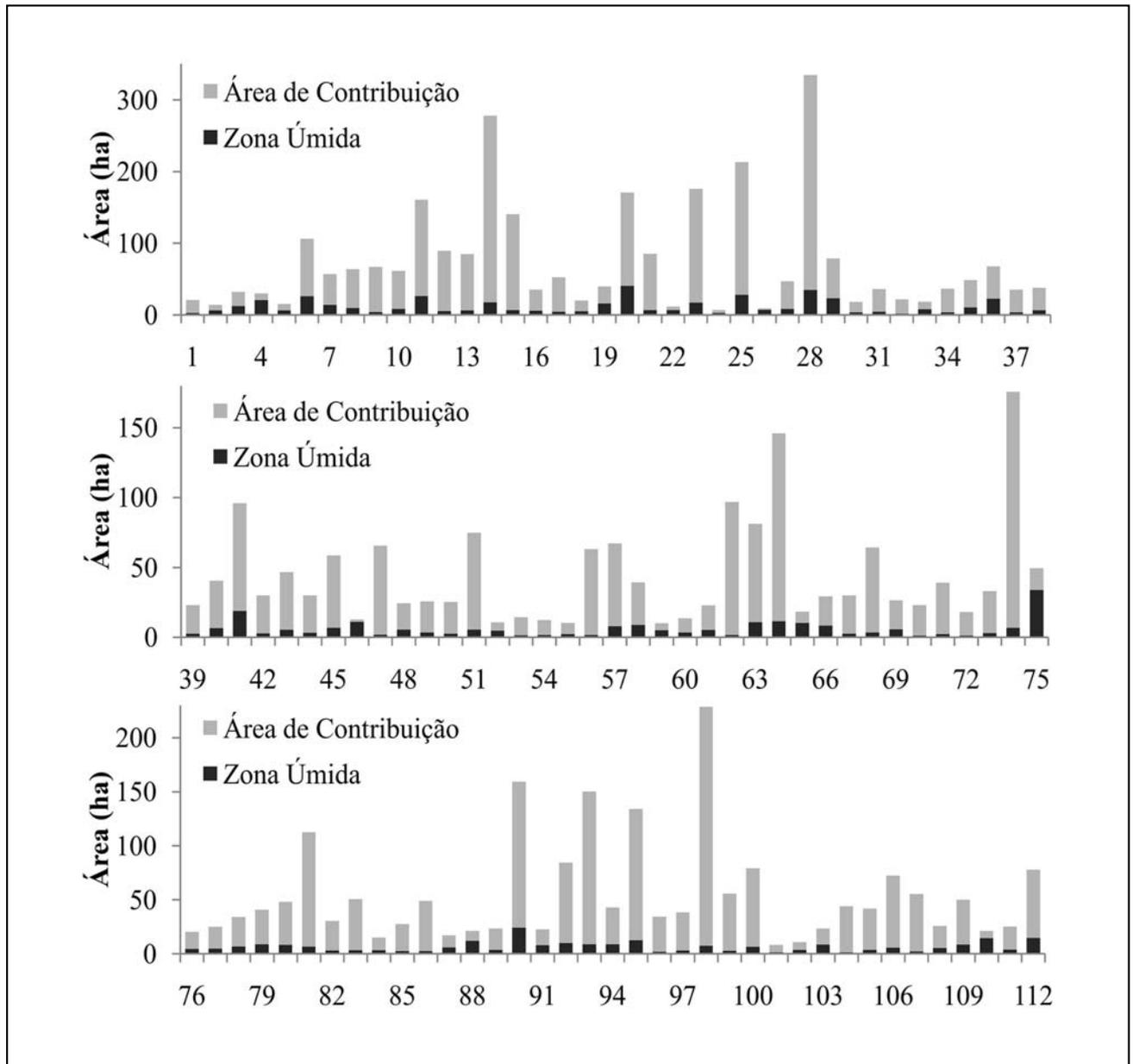


Figura 6. Distribuição das áreas úmidas na região de estudo e sua respectiva zona de contribuição.

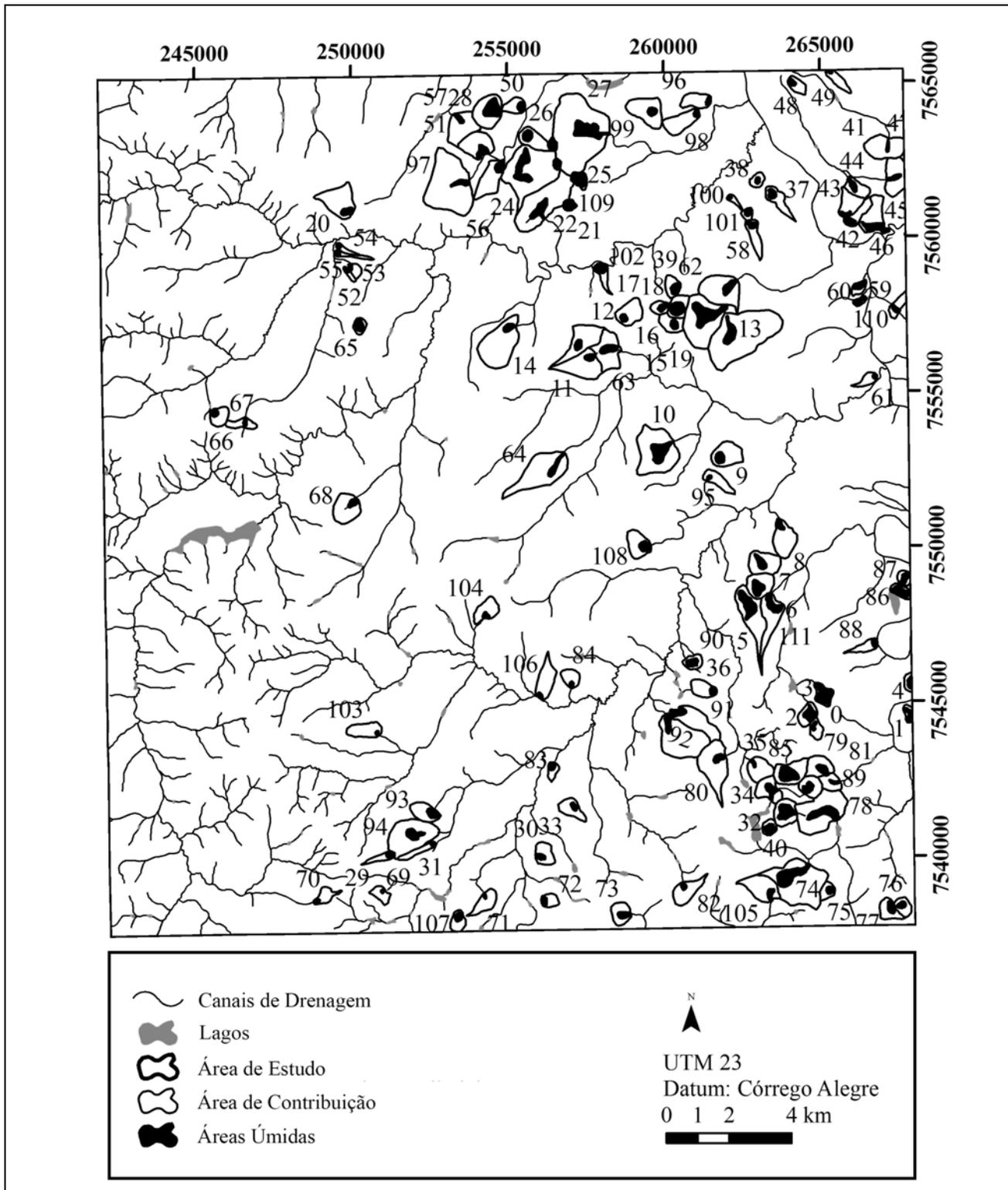


Figura 7. Extensões das áreas úmidas identificadas e das respectivas zonas de contribuição.

Mapa de uso e ocupação

Foram desenvolvidos dois mapas de usos do solo (Figura 9 e 10), um representando março de 1991 e outro março de 2014. A partir desses dois mapas foi possível identificar mudanças tanto espaciais como temporais de modo a identificar e

compreender a alteração das atividades antropogênicas. Os usos do solo foram divididos em 5 classes as quais foram: pastagem, culturas permanentes (laranja), culturas semi-perenes (cana de açúcar) e anuais (soja e milho), mata e reflorestamento. Além disso, nesse mapa foi acrescentada a distribuição espacial das zonas inundadas no interior das áreas úmidas.

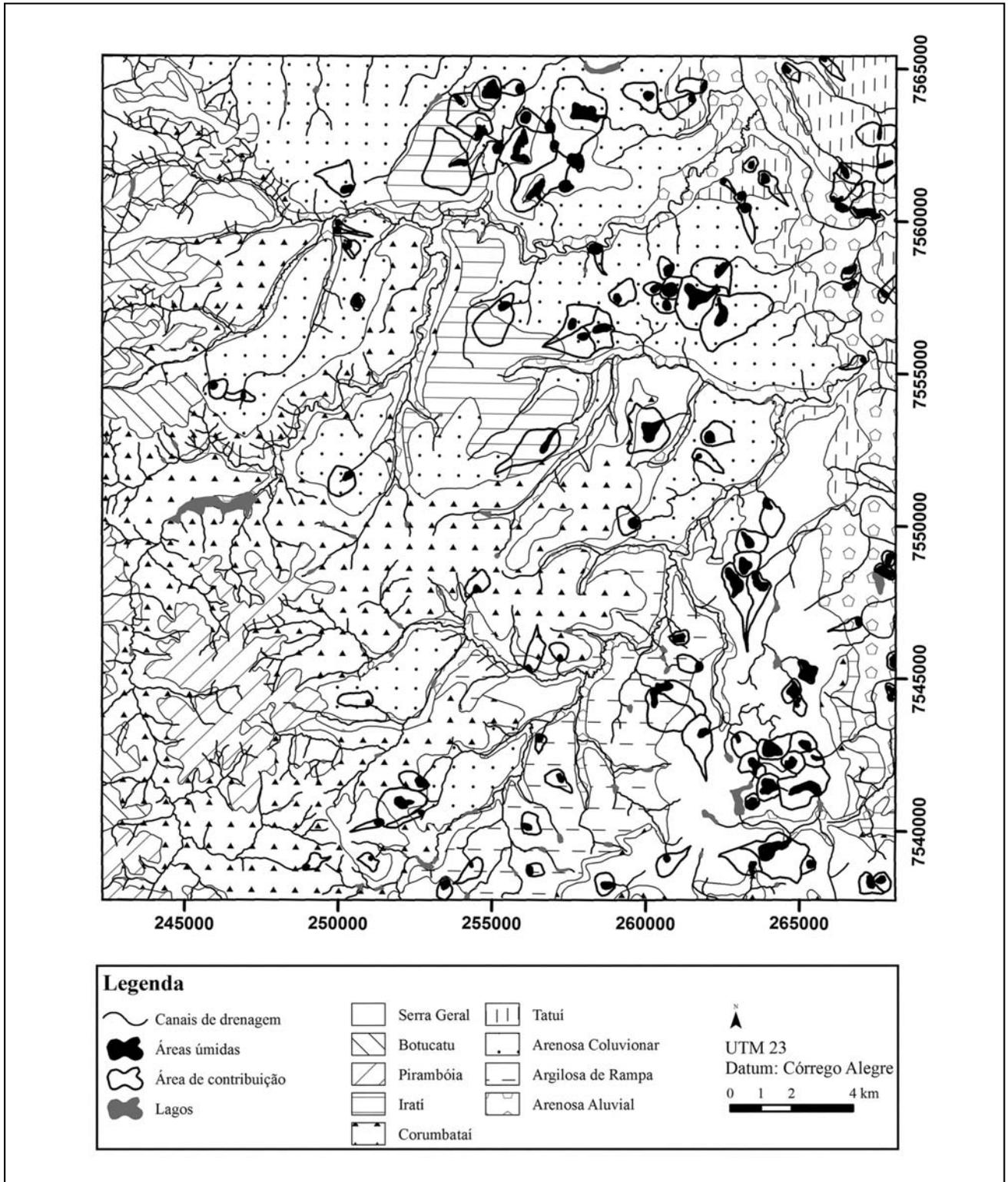


Figura 8. Mapa de materiais inconsolidados, áreas úmidas e zona de contribuição da região de Leme.

Observou-se que grande parte da área de estudo assim como nas áreas úmidas e a respectiva zona de contribuição apresentam usos agrícolas, sendo as culturas semi-perenes as predominantes. Ao comparar os dois anos houve uma redução das áreas vegetadas, assim como uma mudança das culturas

permanentes para semi-perenes e anuais. No que diz respeito as zonas inundadas das áreas úmidas, foi verificado uma diminuição significativa em área, de 269ha em 1991 para 58ha em 2014.

Tabela 1. Características geotécnicas dos materiais inconsolidados da região de Leme-SP.

Materiais	Área (km ²)	Arg(%)	Sil (%)	Ar.F (%)	Ar.M (%)	Ar.G (%)	Ped(%)	Esp (m)	ρs(g/cm ³)	ρd (g/cm ³)	e	n	k(cm/s)
Residual Serra Geral	109	38-58	5-20	16-48	5-6	1-3	0	<10	2,76-3,04	1,5	0,82 - 1,67	0,45 - 0,62	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴
Residual Botucatu	16,5	8-17	4-14	53-80	8-14	0-	0	<2	2,65	1,67	0,5	0,33	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴
Residual Pirambóia	39,3 ^o	17-37	1-6	38-72	10-18	0-1	0	<5	2,67	1,6	0,7	0,41	>10 ⁻³
Residual Corumbataí	173,3	62-72	18-22	4-17	2-3	0	0	<5	2,73	1,5	0,45 - 0,95	0,31 - 0,48	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵
Residual Irati	32,4	45-62	8-15	14-29	7-12	2-6	0	<5	2,85-3,00	1,3	1,00 - 1,20	0,50 - 0,54	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵
Residual Tatuí	28,4	27-43	11-17	30-39	8-18	2-5	0	<5	2,7	1,62	0,67	0,40	10 ⁻⁴
Arenoso coluvionar	48,7	8-23	4-5	14-24	44-67	4-7	0	<10	2,65-2,70	1,30 a 1,50	0,60 - 0,80	0,37 - 0,44	10 ⁻² - 10 ⁻³
Argiloso de rampa	168,5	43-59	13-21	8-22	8-14	3-7	0-1	<5	2,7	1,5	1	0,50	10 ⁻⁴
Sedimento Aluvial	99,1	18-21	13-15	30-58	5-30	1-7	0-2	<2	2,67	1,40 a 1,60	0,60 - 0,90	0,37 - 0,47	>10 ⁻³

Caracterização in situ das áreas úmidas

A caracterização in situ buscou identificar e atribuir os limites em campo das áreas úmidas, bem como descrever de maneira geral as condições de usos e hidrológicas. No total foram visitadas 35 áreas úmidas. A identificação e os limites quando comparadas a partir das imagens de satélites com as de campo foram bastante coincidentes não sendo necessário grandes ajustes. Entretanto foi necessário acrescentar uma área úmida que não havia sido identificada nas interpretações. No total foram identificados três tipos usos no interior das áreas úmidas os quais foram os canais artificiais de drenagem, tanques e o plantio de cana de açúcar. Os tanques e os canais artificiais de drenagem ocorreram em 30 áreas úmidas, sendo estes construídos principalmente para extrair a água para irrigação e para pulverização de defensivos agrícolas. A construção dos tanques foi observada em diversas áreas úmidas enquanto que a construção de canais artificiais de drenagem bem como a presença de cultivos estão localizados a sul onde a presença das plantações de cana de açúcar são predominantes. Na Figura 11 (a,b,c) é possível ver exemplos dos tanques, dos canais artificiais de drenagem e da presença de cultivos intensivo no interior das áreas úmidas.

A verificação hidrológica das áreas úmidas foi feita em dois períodos, uma antes do início das chuvas e outra após o começo destas. Na primeira visita realizada foi possível observar que na sua maioria estavam secas e o nível de água estava abaixo da superfície. As que apresentavam água na sua superfície eram somente aquelas que tinham sofrido represamento. As condições dos materiais geológicos na superfície apresentavam-se bastante secos podendo ser notado sinais de rachaduras ao longo de algumas áreas úmidas. Além disso, verificou-se principalmente nas que estão assentadas sobre os colúvios arenosos sinais de assoreamento, desse modo reduzindo seu volume útil de água. A segunda visita foi feita após um mês, onde se notou condições hidrológicas distintas. Diversas áreas úmidas já apresentavam sinais de inundação, saturação e aumento de volume de água. Entretanto em outras não se verificou nenhuma destas evidências principalmente aquelas as quais haviam sido construídos canais artificiais de drenagem e tanques. Na Figura 12 (a e b) é possível verificar as diferenças entre a primeira e a segunda visita de uma área úmida.

No intuito de compreender as respostas hidrológicas das áreas úmidas foram analisadas as chuvas durante esse período. A Figura 13 mostra a evolução das precipitações durante o período entre as visitas. Ao analisar a precipitação ocorrida durante esse intervalo, se observou que ocorreram eventos que dependendo das condições do solo poderiam provocar a recarga das áreas úmidas tais como o do dia 23/02/2015 o qual choveu aproximadamente 80 mm. Durante a caracterização hidrológica as áreas úmidas apresentaram quatro condições iniciais: presença de lamina d'água nos tanques/canais de drenagem artificiais, presença de lamina d'água na superfície, evidências de saturação e secas. Na segunda visita além das condições mencionadas identificaram-se mais duas condições as quais foram: aumento da lamina d'água e aumento da lamina d'água nos tanques/canais artificiais.

Classificação e avaliação da degradação

A análise da degradação ambiental das áreas úmidas partiu do entendimento dos mecanismos que controlam a dinâmica de águas da região. Desse modo, as áreas úmidas avaliadas foram classificadas como depressionais. Estas ocorrem em depressões topográficas que permitem o acúmulo de água, apresentam inundações inferiores a 2 metros, podem estar próximas a rios e lagos ou estarem simplesmente isoladas hidrológicamente. As fontes de água potenciais são a precipitação, o escoamento superficial, escoamento subsuperficial e as minas. A direção de fluxo predominante ocorre das porções mais elevadas para o centro da depressão. A perda de água ocorre pela evapotranspiração, infiltração e dependendo da configuração da área úmida por canais de drenagens. As principais funções deste tipo estão relacionadas ao armazenamento temporal de água, dos processos de recarga e descarga, do controle de escoamento superficial e sustentar o fluxo dos rios durante os períodos de estiagem.

Entretanto esta classificação ainda é bastante abrangente sendo necessário incluir as áreas úmidas em um contexto geomorfológico. Ao correlacionar a classificação anterior com os materiais geológicos e ao relevo observou-se que as áreas úmidas estão assentadas sobre rochas de baixa permeabilidade associadas a uma topografia suave. Esta configuração permitiu o acúmulo de água necessário para formar as áreas úmidas

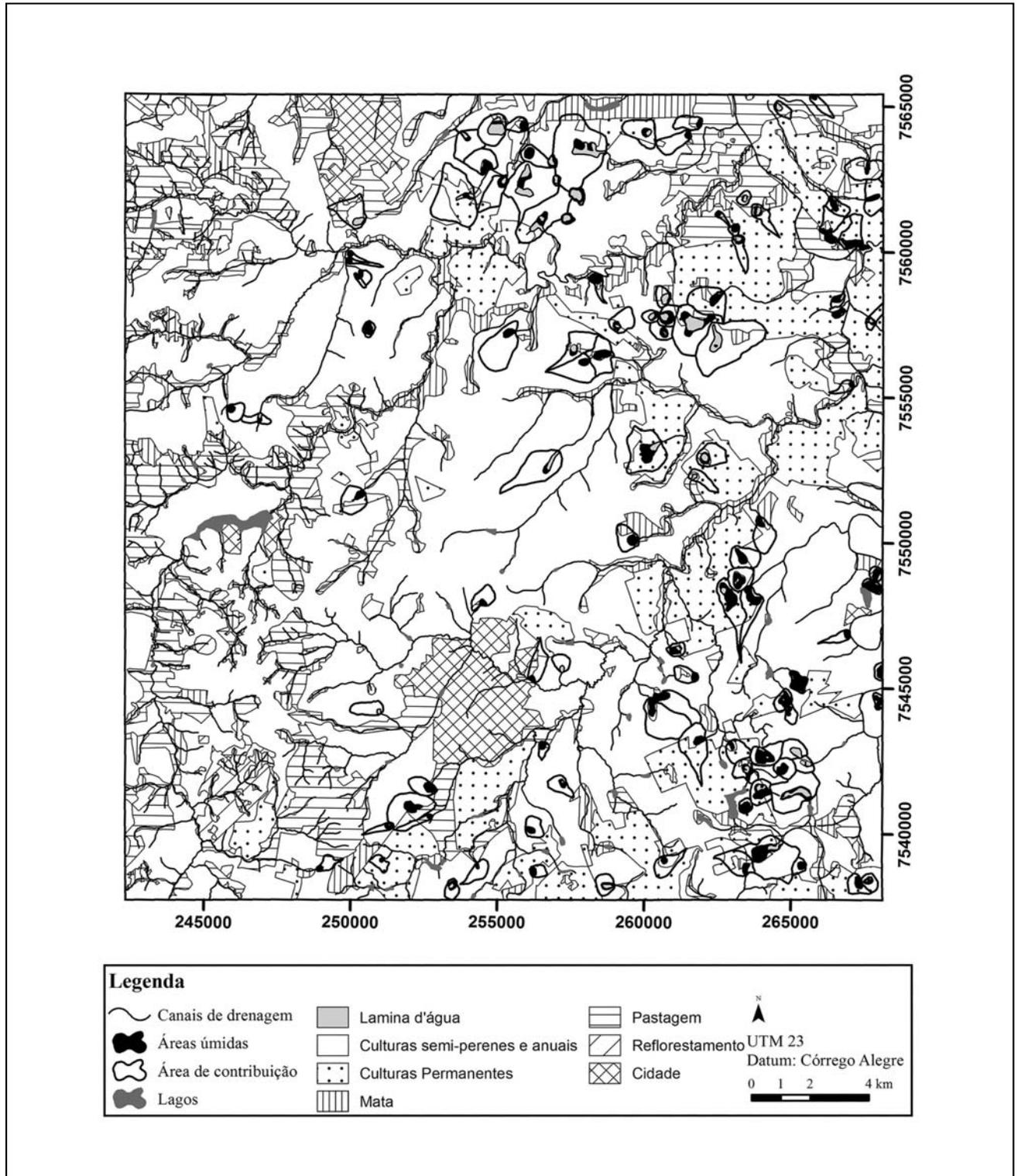


Figura 9. Mapa de uso e ocupação da área de estudo durante o período de 1991.

depressionais da região de Leme. A partir dessa análise foi possível agrupar em 4 grandes grupos (Figura 14). O primeiro grupo correspondeu aquelas que estavam assentadas sobre os diabásios tendo como material inconsolidado os residuais argilosos e os argilosos de rampa. No segundo grupo as áreas úmidas estavam assentadas sobre os materiais arenosos coluvionares, tendo como base destes solos o diabásio. O terceiro grupo se distingue do segundo grupo pelo fato que as áreas úmidas incluídas nesta

categoria em vez de estarem sobre os diabásios estão sobre os argilitos da Formação Corumbataí. O quarto grupo está relacionado às áreas úmidas que estão assentadas sobre Formação Tatuí tendo como materiais inconsolidado os residuais desta formação e os arenosos aluvionares. Ressalta-se que a maioria das áreas úmidas estão localizadas nas regiões de topo de morro exceto as do grupo 4 que na sua maioria estão próximas ao Rio Mogi-Guaçu. (Figura 15).

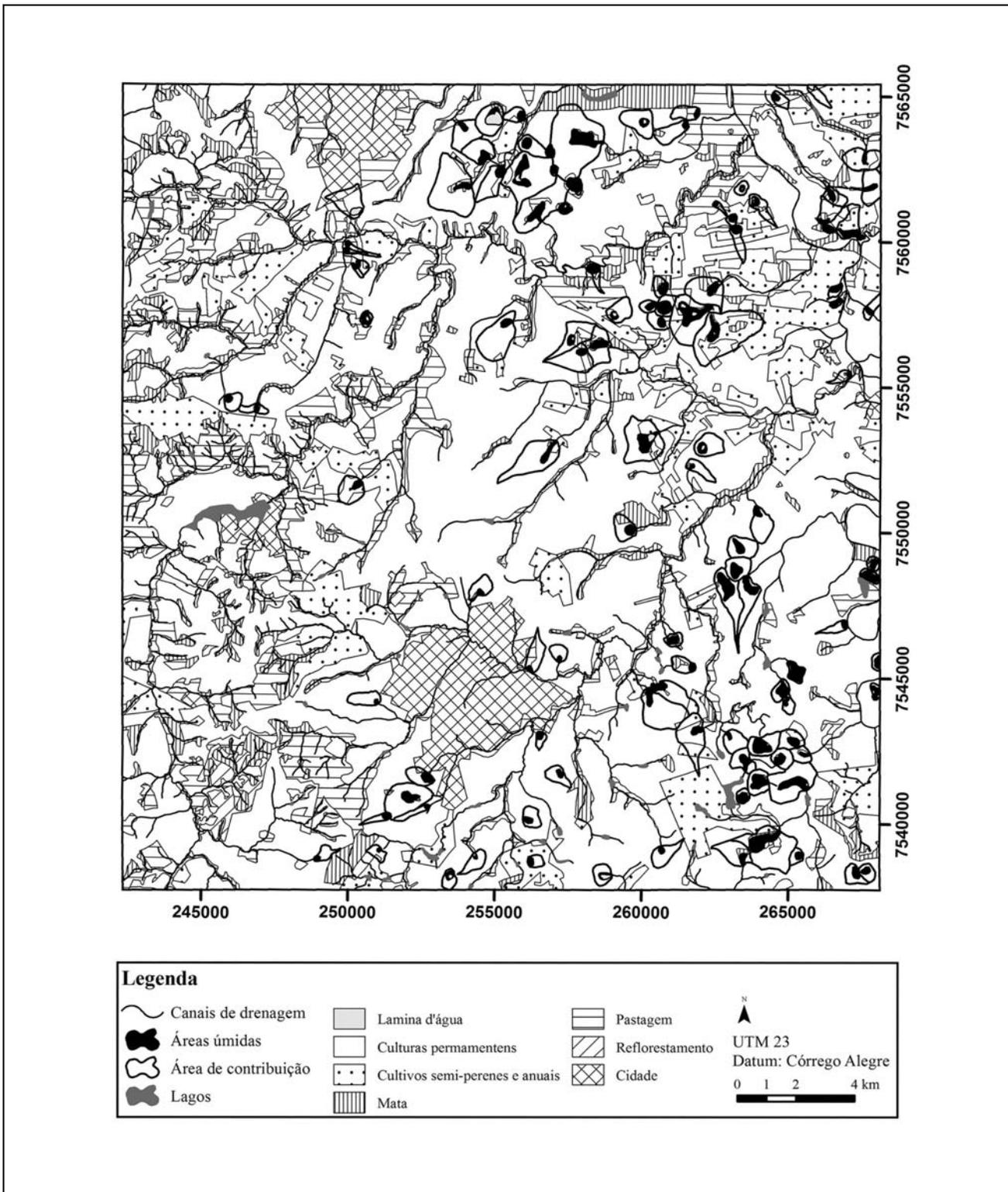


Figura 10. Mapa de uso e ocupação da área de estudo durante o período de 2014.

Ao analisar os mecanismos que controlam a dinâmica de água das áreas úmidas do grupo I observou-se que as fontes principais são as chuvas, o escoamento superficial, escoamento sub-superficial e as minas. Enquanto que a saída de água é por evapotranspiração predominantemente. Suas principais funções estão associadas a retenção de sedimentos, reciclagem de nutrientes, recarga das águas subterrânea e capacidade de sustentar o fluxo das drenagens e de outras áreas úmidas quando

apresentam o nível de água acima da superfície. Por estarem sobre materiais geológicos de baixa permeabilidade tendem a reter mais água na superfície logo se caracterizando como áreas de recarga. O tamanho médio das áreas úmidas gira em torno de 8 ha e seu formato tende a ser mais circular assim como as respectivas zonas de contribuição, funcionando como uma bacia de captação.



Figura 11. Exemplos de modificações antropogênicas nas áreas úmidas: a) construção de tanques, b) canal de drenagem artificial, c) presença de cana de açúcar no interior da área úmida.

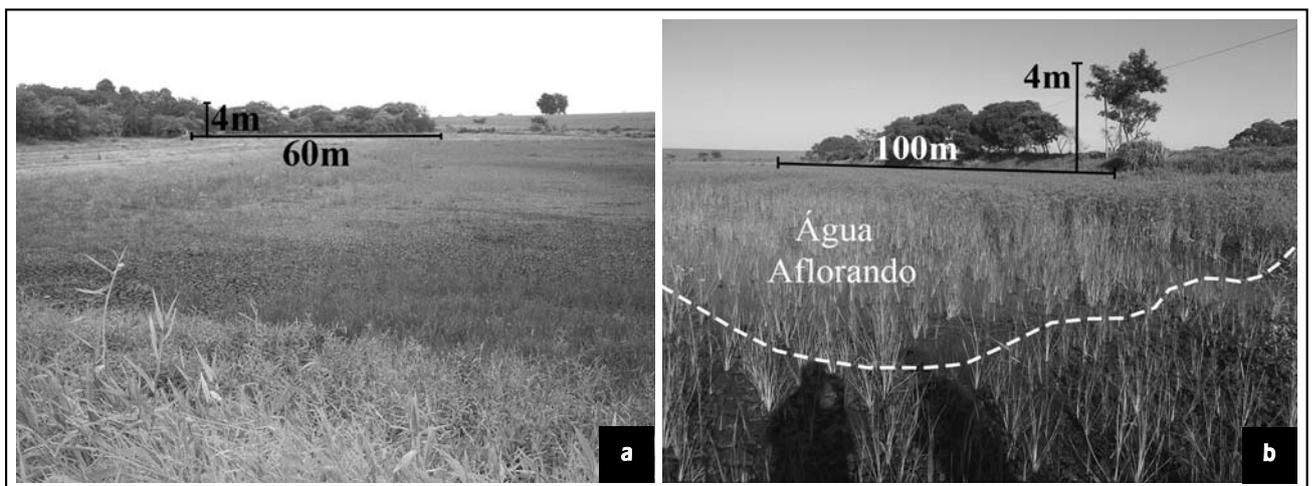


Figura 12. Exemplo das condições hidrológicas: a) primeira visita, b) segunda visita.

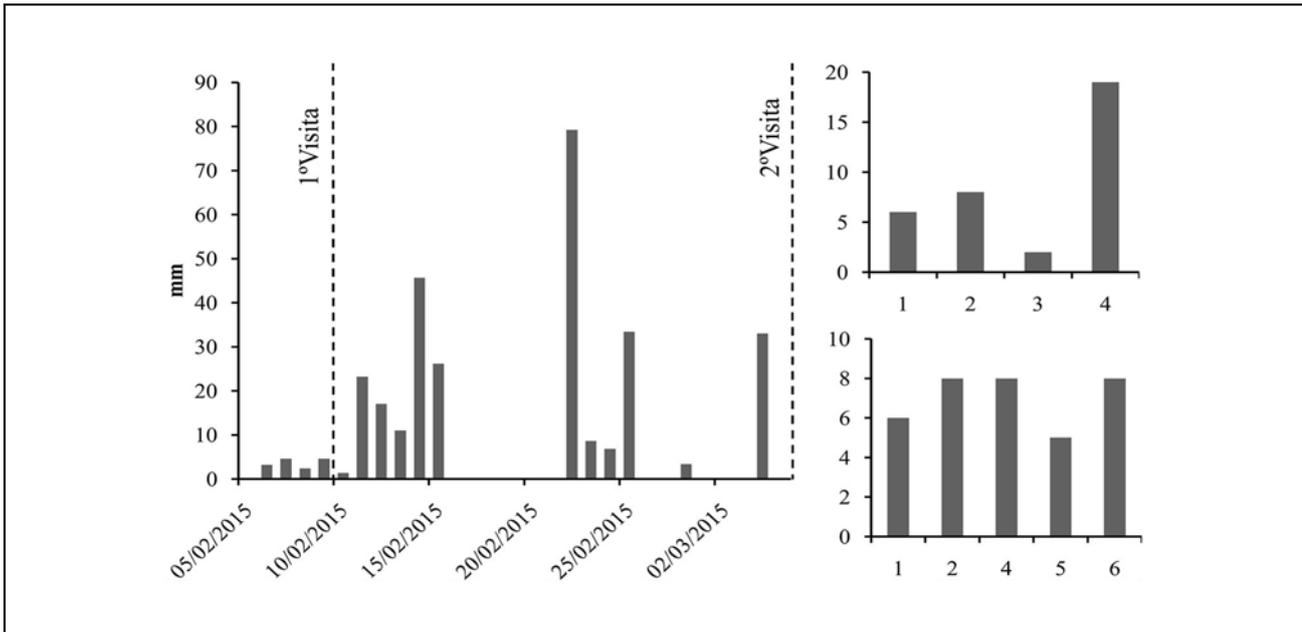


Figura 13. Chuvas durante o período das visitas in situ e as condições hidrológicas observadas: 1) presença de lamina d'água nos tanques/canais de drenagem artificiais, 2) presença de lamina d'água na superfície, 3) evidências de saturação, 4) secas, 5) aumento da lamina d'água, 6) aumento da lamina d'água nos tanques/canais artificiais.

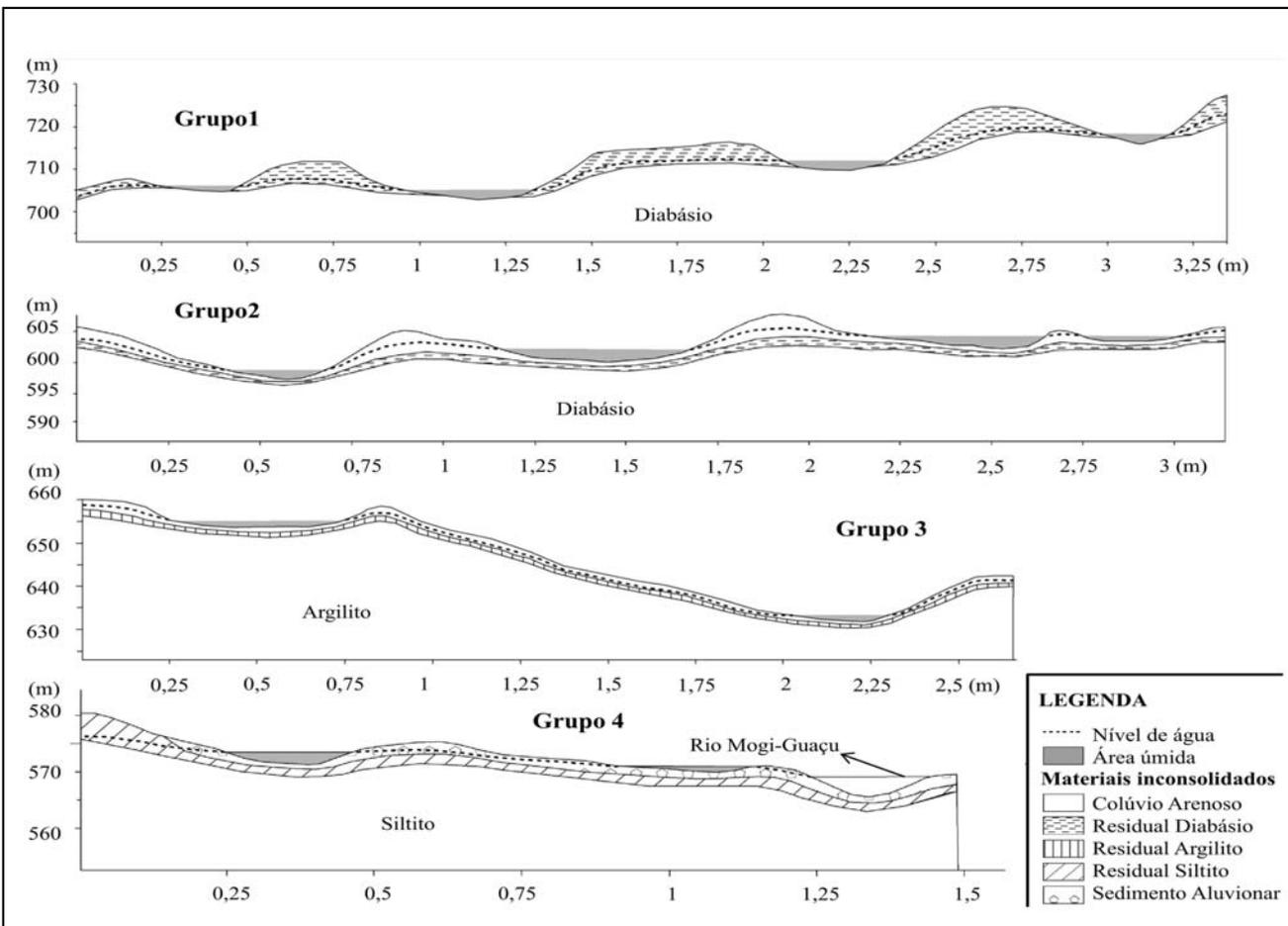


Figura 14. Modelos dos quatro grupos hidrológicos das principais de áreas úmidas da região de Leme-SP.

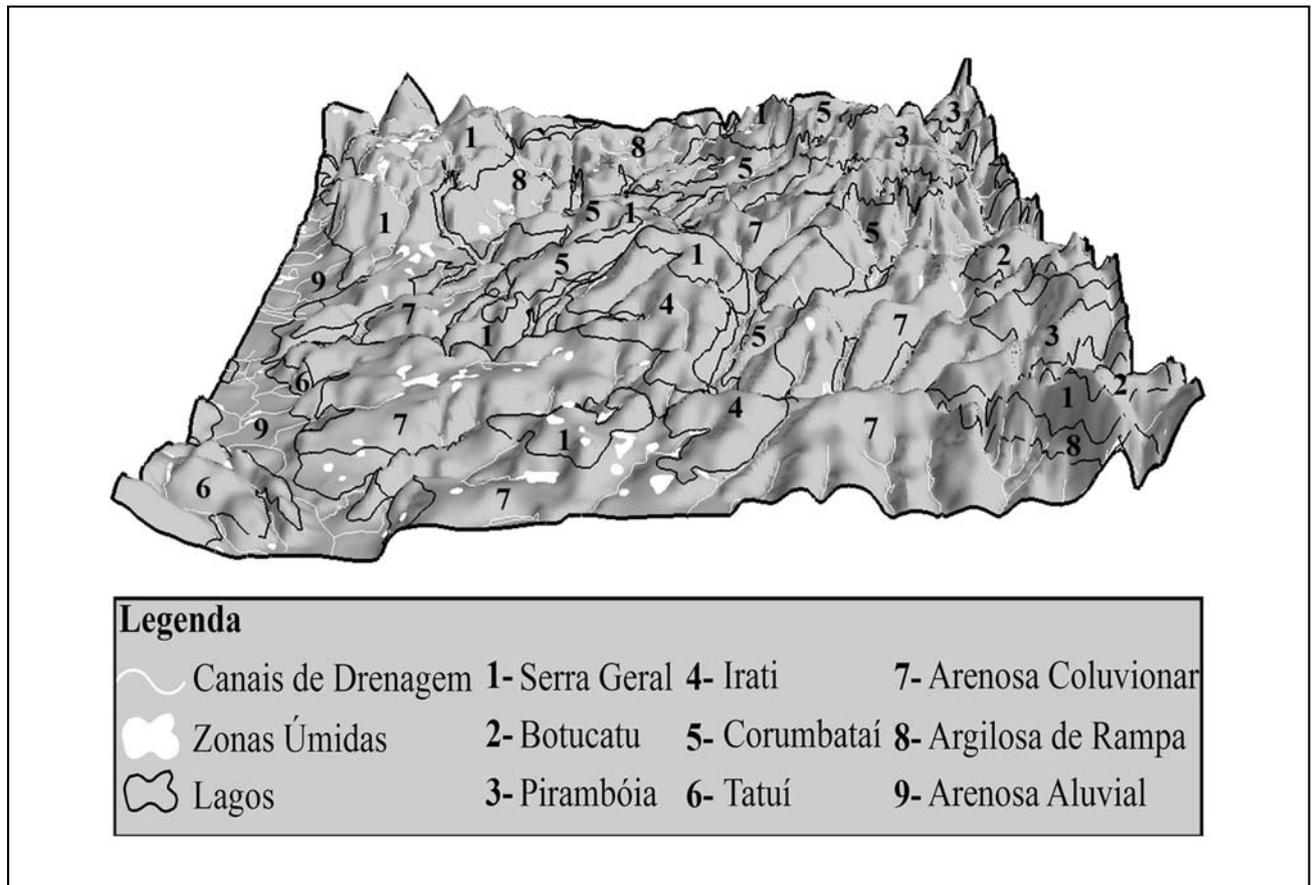


Figura 15. Bloco diagrama com a distribuição das áreas úmidas e os materiais geológicos.

As áreas úmidas do grupo 2 são compostas por materiais arenosos com alta permeabilidade, estando presente em maior espessura na zona de contribuição e em menor espessura no seu interior. A amplitude entre o ponto mais baixo da área úmida com o topo da zona de contribuição geralmente não ultrapassa os 5 metros de altura. O tamanho médio das áreas úmidas foi de 9,03ha, enquanto a da zona de contribuição foi de 25,2ha. Os mecanismos que controlam as entradas de água deste conjunto são a precipitação, o escoamento subsuperficial e as minas. As minas nestas áreas úmidas são bastante importantes, pois o nível d'água geralmente é mais superficial, consequentemente o tempo para a chuva infiltrar e atingi-lo é menor. As saídas são a evapotranspiração, infiltração e o fluxo subsuperficial para as áreas úmidas próximas. Ao analisar os mecanismos que controlam a dinâmica de água, observa-se que as áreas úmidas pertencentes a este grupo podem ser caracterizadas tanto como áreas de descargas e recarga.

As áreas úmidas que estão enquadradas no grupo 3 estão assentadas sobre sedimentos arenosos, entretanto a espessura da base da área úmida até a camada impermeável quando comparada as do grupo 2 é maior. Estas tendem a não estarem agrupadas como os dois primeiros. A área média das áreas úmidas e da zona de contribuição são respectivamente 6 ha e 15ha, enquanto que o formato tende a ser mais circular. As fontes de água são semelhantes as que estão sobre os diabásios, todavia dependendo da posição topográfica o nível de água está mais profundo, logo necessitando um tempo maior para que a água infiltrada atinja esta profundidade. Desse modo, o escoamento superficial

apresenta uma maior importância na recarga destes ambientes. Os mecanismos de saída são controlados principalmente pela evapotranspiração e infiltração.

O comportamento hidrológico do grupo 4 é bastante distinto quando comparadas as outras áreas úmidas. Primeiramente estão assentadas sobre sedimentos predominantemente permeáveis, tanto na sua base como na sua zona de contribuição. Além disso, na sua maioria estão próximas ao Rio Mogi-Guaçu, sendo influenciadas diretamente pela altura do mesmo. Fator este que irá interferir diretamente no nível d'água, bem como na recarga por transbordo. Os mecanismos de saída predominantes são a evapotranspiração, o escoamento superficial e o fluxo subterrâneo. Em termos de forma e área são mais alongadas e apresentam área média de 7,5 ha, enquanto que as zonas de contribuição raramente apresentam forma circular e tem tamanho médio de 18,5ha. As principais funções desse grupo relacionam-se ao armazenamento de água e a diminuição do escoamento superficial das porções do terreno mais elevadas.

Ao correlacionar os grupos hidrológicos das áreas úmidas com os eventos de chuva, as mudanças no uso do solo e as alterações antropogênicas verificou-se distintos graus de degradação ambiental. Estes graus estão associados principalmente as alterações promovidas pelas atividades antropogênicas na relação infiltração/escoamento superficial, bem como nos processos de descarga e recarga. Este fato foi possível observar principalmente na quantidade de água dentro das zonas úmidas. Na Tabela 2 são apresentados os resultados das condições hidrológicas verificada em cada um dos grupos.

Tabela 2. Comportamento da dinâmica de água no interior das áreas úmidas visitadas nos quatro grupos hidrológicos.

Nº visitadas	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4	
	17		10		4		4	
Visita	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º
Presença de lamina d'água nos tanques/canais artificiais	1	5	2	1	-	-	2	-
Presença de lamina d'água na superfície	2	5	4	1	2	2	1	-
Evidências de saturação	3	-	-	-	1	-	-	-
Secas	13	5	4	2	1	-	1	1
Aumento da lamina d'água	-	2	-	4	-	2	-	1
Aumento da lamina d'água nos tanques/canais artificiais	-	-	-	2	-	-	-	2

A presença e quantidade de água variaram entre os grupos, onde no Grupo 1 não foi verificado em diversas áreas úmidas qualquer sinal de recarga. Isto pode ser explicado que estas apresentavam mais evidências de atividades antropogênicas tanto na zona de contribuição como no interior delas alterando diretamente no escoamento superficial e na infiltração. Associado a este aspecto, por apresentar um solo com condutividade hidráulica menor, o tempo entre visitas de campo não foi possível analisar a influência do escoamento subsuperficial e do nível de água na recarga.

Enquanto isso, no Grupo 2 a resposta frente aos eventos hidrológicos foi distinta mesmo com atividades antropogênicas semelhantes. Esta situação pode ser atribuída a características dos materiais geológicos, os quais apresentam uma condutividade hidráulica mais elevada facilitando o fluxo subsuperficial. Além disso, o nível de água neste grupo é mais superficial, tendendo a descarregar mais rápido, conseqüentemente interferindo no nível de água superficial.

As áreas úmidas visitadas do Grupo 3 não apresentaram resultados tão preocupantes frente a presença de água no seu interior, fato esse atribuído a sua utilização para armazenamento de água para captação. Entretanto quando se analisa as evidências de presença de água pelas imagens de satélite nas que não foram verificadas, notou-se que diversas estavam secas. Estas estão inseridas em um contexto de atividades antropogênicas mais intensa, com usos urbanos, a presença de tanques e canais de drenagem artificiais. Apesar de apresentarem configurações semelhantes ao grupo 2 atribui-se ao longo tempo o qual a estas áreas úmidas estão sofrendo modificações a ausência de água na superfície.

As áreas úmidas do Grupo 4 se encontram bastante degradadas. A única que apresentou aumento de lâmina d'água na superfície estava sofrendo represamento. Além disso, o aumento verificado de água pode estar diretamente relacionado com o aumento do nível de água do Rio Mogi-Guaçu devido as chuvas dos dias anteriores. As demais estavam com a presença de atividade antropogênicas intensas, principalmente com a presença de canais de drenagens artificiais.

Quando se compara com a condição de água em 1991 com a atual verifica-se que houve uma redução em volume de água significativa em todos os grupos, evidenciando-se que as pressões antropogênicas estão interferindo diretamente na recarga das áreas úmidas. Assim como tem provocado a perda das

funções seja de forma parcial ou total. Dentre essas funções uma das mais afetadas foi a capacidade de sustentar o fluxo das drenagens durante o período de estiagem, pois para poder executá-la é necessário apresentar água superficial ou saturação. Desse modo, se constatou que diversas estão degradadas, pois muitas mesmo no período chuvoso estavam secas. Entretanto esse contexto de degradação não é um fato recente em áreas úmidas no Estado de São Paulo, pois isto já havia sido observado por *Whitaker (1993)* em áreas úmidas lacustres as quais já apresentam perdas de funções ou desapareceram.

CONCLUSÕES

As áreas úmidas avaliadas foram classificadas como depressionais e ocupam uma área de 901,03 ha. Foram identificados 4 grandes grupos de áreas úmidas depressionais os quais apresentaram respostas hidrológicas e graus de degradação totalmente distintos. Os resultados mostraram que as áreas úmidas do Grupo 2 apresentaram uma resposta hidrológica mais rápida. Isto é, frente aos diversos eventos de chuva foi possível observar um aumento evidente da lamina de água na superfície. Isto ocorreu, pois estas áreas úmidas apresentam o nível de água menos profundo e uma maior permeabilidade, logo, a água infiltrada demora menos tempo para alcançar a zona saturada. As que estavam assentadas sobre os residuais da Formação Geral, não se verificou um aumento expressivo na altura da lâmina d'água. Este fato está associado principalmente a redução do escoamento superficial por conta de cordões em nível construídas nas zonas de contribuição, bem como a presença de tanques e canais de drenagem artificiais. Os resultados da avaliação da degradação ambiental da região de estudo mostraram uma situação preocupante frente a perda de volume de água destas áreas úmidas afetando diretamente a função de sustentar o fluxo de água dos canais de drenagem durante as secas. Este fato altera a recarga dos aquíferos, provocando a diminuição do nível de água, conseqüentemente afetando a quantidade de água disponível nas áreas úmidas. As que se encontravam em situação mais degradada foram as do Grupo 3 e 4 principalmente pela a intensidades de usos urbanos, agrícolas e pela presença de canais de drenagem artificiais e tanques. Entretanto independente do grupo, a maioria as áreas úmidas estão degradadas, verificando-se a diminuição da lamina de água, logo tendo suas funções comprometidas de modo a ser necessário a fazer um manejo adequado dessas áreas.

TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

- ACREMAN, M.C; FELICITY, M. 2006.
Hydrological impact assessment of wetlands.
International Symposium on Groundwater Sustainability (ISGWAS).p225-255.
- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS). 2015.
Dispon em: <http://www2.snirh.gov.br/home/>
- ÁVILA, I.G.; IWASA, O.Y.; PRANDINI, F.L.; FORNASARI FILHO, N.; PONÇANO, W.K. 1981.
Algumas características geológicas e geotécnica dos depósitos coluvionares do Estado de São Paulo.
3º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. SC. V.3,p. 19-31.
- BARTOLDUS, C.C. 1999.
A comprehensive review of wetland assessment procedures: A guide for wetland practitioners.
Environmental Concern, Inc., St. Michaels, Maryland.
- BATES, B.C., KUNDZEWICZ, Z.W., WU, S. AND PALUTIKOF, J.P., EDS., (2008).
Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva.
Disponível em: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_technical_papers_climate_change_and_water.htm.
- BRINSON, M.M., 1993.
A Hydrogeomorphic Classification for wetlands. wetlands Research Program Tech. Rep.
WRP-DE-4. U.S. Army Engineer Waterways Expt. Station, Vicksburg, MS.
- BRINSON, M.M., RHEINHARDT, R.D., HAUER, F.R., LEE, L.C., NUTTER, W.L. SMITH, R.D., WHIGHAM, D. 1995.
A guidebook for application of hydrogeomorphic assessments to riverine wetlands.
U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC. Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-11.
- EPA (2006).
Elements of a State Water Monitoring and Assessment Program for Wetlands.
disponível em: http://www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/Wetland_Elements_Final.pdf
- GIOVANNINI, S. G. T., 1997.
Estabelecimento e desenvolvimento das macrófitas aquáticas *Scirpus californicus*, *Typha subulata* e *Zizaniopsis bonariensis* sob condições experimentais de regimes hídricos diferenciados.
Dissertação de mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 153 p.
- GOLUBEFF, N. 2012.
Proposta metodológica de uso de sistema de informações geográficas destinado à otimização da escolha do melhor lugar para construção de uma wetland.
Dissertação de Mestrado. 152p. FFLCH. Universidade São Paulo.
- IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA).
Cartas topográficas, Folha:SF-23-Y-A-II-1 (LEME) Escala 1:50.000.1971.
- KOUDSTAAL, R.; SLOOTWEG, R. 1994.
Wise use of wetland, a methodology for the assessment of function and values of wetlands.
The Wetland group, Netherlands
- KUSLER, J. 2004.
Wetland assessment for regulatory purposes: Final Report 1: Assessing functions and values.
Association of State Wetland Managers, Institute for Wetland Science and Public Policy. Berne, NY.
Disponível em: <http://www.aswm.org/propub/functionsvalues.pdf>
- LEAL, F.K. 2009.
Estudo Comparativo de leitos percoladores e banhados construídos de fluxo vertical aplicados a remoção de fósforo em esgoto sanitário.
Dissertação. 116p. Universidade de Santa Maria.
- LOLLO, J.A. 1991.
Mapeamento geotécnico da folha de Leme-SP: Utilização da geomorfologia para a caracterização preliminar de unidades geotécnicas.
Dissertação. 87p. EESC. USP. São Carlos.
- MACK, J. J.; MICACCHION, M.; AUGUSTA, L.; SABLAK, G. R. 2000.
Vegetation Indices of Biotic Integrity (VIBI) for Wetlands and Calibration of the Ohio Rapid Assessment Method for Fennessy et al., RAPID METHODS TO ASSESS ECOLOGICAL CONDITION 559 Wetlands v. 5.0.
Final Report to U.S. EPA. Ohio Environmental Protection Agency, Division of Surface Water, 401 Wetland Ecology Unit, Columbus, OH, USA
- MALTBY, E.; BARKER, T. (2009).
The wetlands Handbook
1st edition (Blackwell Publishing, Oxford).

- MELLER, J. 2011.
Mapeamento de áreas úmidas e banhados na microbacia do Rio Amandaú, Região Noroeste do Rio Grande do Sul.
Dissertação. 96p. Universidade de Santa Maria.
- MENDIONDO, E.M.; NEIFF, J.J.; DEPETTRIS, C.A. 2000.
Eco-hydrology of wetlands aided by remote sensing A case study with the Revive's Goals initiative.
Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 138 4
- MITSCHE, W. M. GOSSELINK, J. G., 2007.
Wetlands, 4th ed., John Wiley and Sons, Inc. 582 pp.
New Jersey.
- NEIFF, J. J., POI DE NEIFF, A. S.G. 1990.
Litterfall, leaf decomposition and litter colonization of *Tessaria integrifolia* in the Paraná River floodplain.
Hydrobiologia. 203: 45-52.
- POFF, L., BRINSON, M. AND DAY, JR.J. (2002).
Aquatic ecosystems & global climate change: Potential impacts on inland freshwater and coastal wetland ecosystems in the United States.
Winter, 2000.
- SIPPLE, W.S. 1988.
Wetland Identification and Delineation Manual. Volume I. Rationale, Wetland Parameters, and Overview of Jurisdictional Approach.
Volume II. Field Methodology. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Wetlands Protection, Washington, D.C.
- TASSI, R. 2008.
Gerenciamento hidroambiental de terras úmidas.
Tese. 257p. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande Do Sul.
- WARDROP, D. H.; KENTULA, M. E.; D. L.; STEVENS, JR.; JENSEN, S. F.; BROOKS, R. P. 2007.
Assessment of wetland condition: an example from the Upper Juniata Watershed in Pennsylvania, USA.
Wetlands 27:416-31.
- WHITAKER, V.A., 1993.
A área alagada da represa do Lobo (Itirapina, SP): Os processos Ecológicos Associados ao Potencial de Desnitrificação dos sedimentos. 137f. Tese (Doutorado).
Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos.
- WINTER TC. 2000.
The vulnerability of wetlands to climate change: A hydrologic landscape perspective.
Journal of the American Water Resources Association 36: 305-311.
- WURSTER, F. C., D. J. COOPER, AND W. E. SANFORD, 2003.
Stream/aquifer interactions at Great Sand Dunes National Monument, Colorado: influences on interdunal wetland disappearance,
Journal of Hydrology, 271: 77-100.
- ZACARKIM, C. E. 2006.
Uso de sistema wetland construído no pós-tratamento de efluente de curtume. Mestrado. 77p.
Centro de Ciências Agrárias. Universidade Estadual do Oeste.
- ZEDLER, P. 2003.
Vernal pools and the concept of "isolated wetlands".
Wetlands, 23(3), 597-607



Estrategias para la valorización y rehabilitación del patrimonio minero de Batán-Chapadmalal, Mar del Plata, Argentina

Strategies for the assessment and rehabilitation of the Batán-Chapadmalal mining patrimony, Mar del Plata, Argentina

del Río J. L. ¹ ✉ - Fernández, R. ² - Bó, M. J. ¹, Goyeneche, H. ² - Burmeister, M. ² - Mastropasqua, P. ² - Camino, M. ¹

Recibido: 22 de mayo de 2015 • Aceptado: 10 de octubre de 2015

Resumen

La minería de áridos en el distrito de General Pueyrredón se remonta a la época de la fundación de Mar del Plata en 1874, ciudad cabecera del partido, pero logra organizarse entre 1920 y 1930, en áreas que hoy conforman el ejido urbano de la ciudad y el periurbano de Batán-Chapadmalal. De 22 canteras que operaban en 1965, 15 de ellas se emplazaban en esta localidad.

Las evidencias territoriales del apogeo de la minería local, constituyen en algunos casos escenarios degradados y riesgosos. Por esta razón, la recuperación ambiental, económica y social de estos sectores debe ser abordada con un criterio integral de desarrollo local. En este sentido, el presente trabajo intenta aportar al desarrollo de un Master Plan para el distrito minero, como una propuesta global de usos y espacios, de cara a planificar su desarrollo de forma coherente e integral; que articule su pasado y futuro, y que ponga en valor el paisaje minero-industrial-natural que los caracteriza con una perspectiva fuertemente identitaria.

En este estudio, se integran procedimientos propios de las ciencias naturales y sociales. El aporte de la gestión ambiental urbana, la arquitectura y el urbanismo posibilitan la conversión de un paisaje productivo a cultural-productivo con actividades del orden de un museo de sitio que será primero en formato virtual y luego como una propuesta de planificación integral del área a ser elaborada en conjunto con los actores de la comunidad local y ser ofrecida a las autoridades de gestión urbana y territorial que competan.

Palabras clave: *Minería de áridos, Recuperación y rehabilitación de espacios degradados, Museo de Sitio, Paisaje cultural.*

1. Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (IGCyC)/Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
2. Instituto del Hábitat y Ambiente (IHAM) / Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño. Universidad Nacional de Mar del Plata

✉ jldr@mdp.edu.ar

Abstract

Aggregate mining in General Pueyrredón goes back to 1872, when Mar del Plata, main city of the county, was founded. Between 1920 and 1930 the city becomes organized in the

areas that nowadays form the urban common land of the city and the Batán-Chapadmalal peri-urban. Out of 22 quarries working in 1965, 15 of them were located in this city.

Territorial evidence of the peak of local mining is constituted, in some cases, by risky and degraded areas. For this reason, environmental, economic and social recovery of these areas must be approached with an integral criterion of local development. In this sense, this paper attempts to contribute to the development of a Master Plan for the mining district, as a global proposition of uses and spaces, in order to plan their development in a coherent and integral fashion; articulate their past and future; and value the mining-industrial-natural landscape that characterizes them.

This paper integrates procedures taken from natural as well as social sciences. The contributions of urban environmental management, architecture and urbanism enable the conversion of a productive landscape into a cultural-productive one with activities such as a museum of the site which will be, firstly in virtual format, and later a proposition of integral planning of the area which will be constructed together with the actors of the local community and will be offered to the corresponding authorities of urban and territorial management.

Keywords: aggregate mining, recovery and rehabilitation of degraded areas, museum of site, cultural landscape

INTRODUCCIÓN

La minería de áridos en el distrito de General Pueyrredón, cuya ciudad cabecera es Mar del Plata, ha sido una actividad que ha acompañado su desarrollo urbano desde la época de la fundación de la ciudad en febrero de 1874. La actividad organizada se origina entre las décadas de 1920 y 1930 en áreas que hoy forman parte del ejido urbano de Mar del Plata y los sectores periurbanos del área de Batán-Chapadmalal (Figura 1). La minería se centra en la explotación de las ortocuarzitas de la Fm. Balcarce (Dalla Saldá e Iñiguez, 1979).

A fines del siglo XIX y principios del XX, se establecieron en esta comarca primero las estancias propiedad de los Martínez de Hoz y de Viera (Subiela, 2012). En esos tiempos el ámbito regional era estrictamente rural donde, dispersos en el ambiente de lomas periserranas se encontraban algunos puestos y casonas de los dueños de estas grandes extensiones.

En el año 1910 comenzó a circular el Ferrocarril General Roca, que unía la ciudad de Buenos Aires con Mar del Plata y Miramar. Este medio de transporte fue esencial para el traslado de mercaderías en las primeras décadas del siglo XX. El mencionado tendido ferroviario posibilitó la creación de la Estación Chapadmalal, hecho que constituye un hito en el desarrollo de la minería de áridos y rocas de aplicación en la zona. Actualmente, en la mencionada estación pueden verse los embarcaderos de hacienda, las rampas, playones de carga de piedra y los galpones desde donde se cargaban las chatas y los vagones del FFCC para llegar a distintos destinos, principalmente la Capital Federal y, años más tarde, el Gran Buenos Aires.

Según testimonios orales (Subiela, 2012), en 1910, se extraían ortocuarzitas en tierras de Gregorio Viera, donde actualmente se encuentra el establecimiento San Justo. En 1913 se estableció en la zona actualmente conocida como "Paraje La Florida", un campamento de franceses en busca de petróleo.

En la década de 1920 surgieron otras canteras en la zona como la de Kurt Hermann Wachnitz, a la que llamó cantera Sudatlántica, la cual fue proveedora de los bloques de "Piedra Mar Del Plata" para el tallado de los emblemáticos lobos marinos de la rambla marplatense. En 1930, inició sus actividades la empresa Cerámica del Plata, mina de caolín que estuvo en explotación hasta los inicios de la década de 1980 (Figura 2).

En 1965 tiene lugar la primera investigación sobre la explotación minera que constituye un importante antecedente histórico de la actividad en el área (Ceppi Cabrera, 1965). Este autor describe 21 canteras que operaban en el territorio comunal, de las cuales 14 se emplazaron en la comarca productiva Batán-Chapadmalal.

Esta actividad, constante desde hace un siglo, estuvo sustentada en principio por distintos grupos de inmigrantes, montenegrinos, españoles, italianos, alemanes y más recientemente chilenos que conformaron un crisol cultural con características particulares. La misma ha dejado una infraestructura propia y rasgos territoriales evidentes que configuran un escenario singular en la región, tal que conforma un auténtico distrito minero enclavado en un escenario periurbano.

Estas características productivas, sociales y ambientales constituyen un activo social y cultural que, lejos de ser denostado o ignorado, debe ser recuperado social y culturalmente y puesto en valor por la riqueza historia y la diversidad cultural que aporta al conjunto de la sociedad.

Objetivo

El objetivo general del presente trabajo es aportar al desarrollo de un *Master Plan* destinado al distrito minero de Batán-Chapadmalal, entendido como una propuesta global de usos y espacios para planificar su desarrollo coherente e integral. Es decir, que articule eficazmente su pasado, presente y futuro; promueva la singularidad y el sentido de pertenencia a la misma de cada una de sus partes tanto a escala de las poblaciones existentes como de la dimensión de servicios culturales ofrecidos por Mar del Plata.

METODOLOGÍA

La metodología de trabajo, por su carácter transdisciplinar, abrevia en procedimientos típicos de las ciencias naturales (recopilación de antecedentes, relevamientos de campo, mapeos) y de las ciencias sociales (recopilación de historias de vida, materiales culturales, informantes clave, entre otros).

En el enfoque metodológico devenido de la gestión ambiental urbana, la arquitectura y urbanismo suma la dimensión de plantear el estudio de la posible conversión de un paisaje productivo en un paisaje cultural que cohabite con sus actividades productivas tradicionales. Dicho de otro modo, se busca la

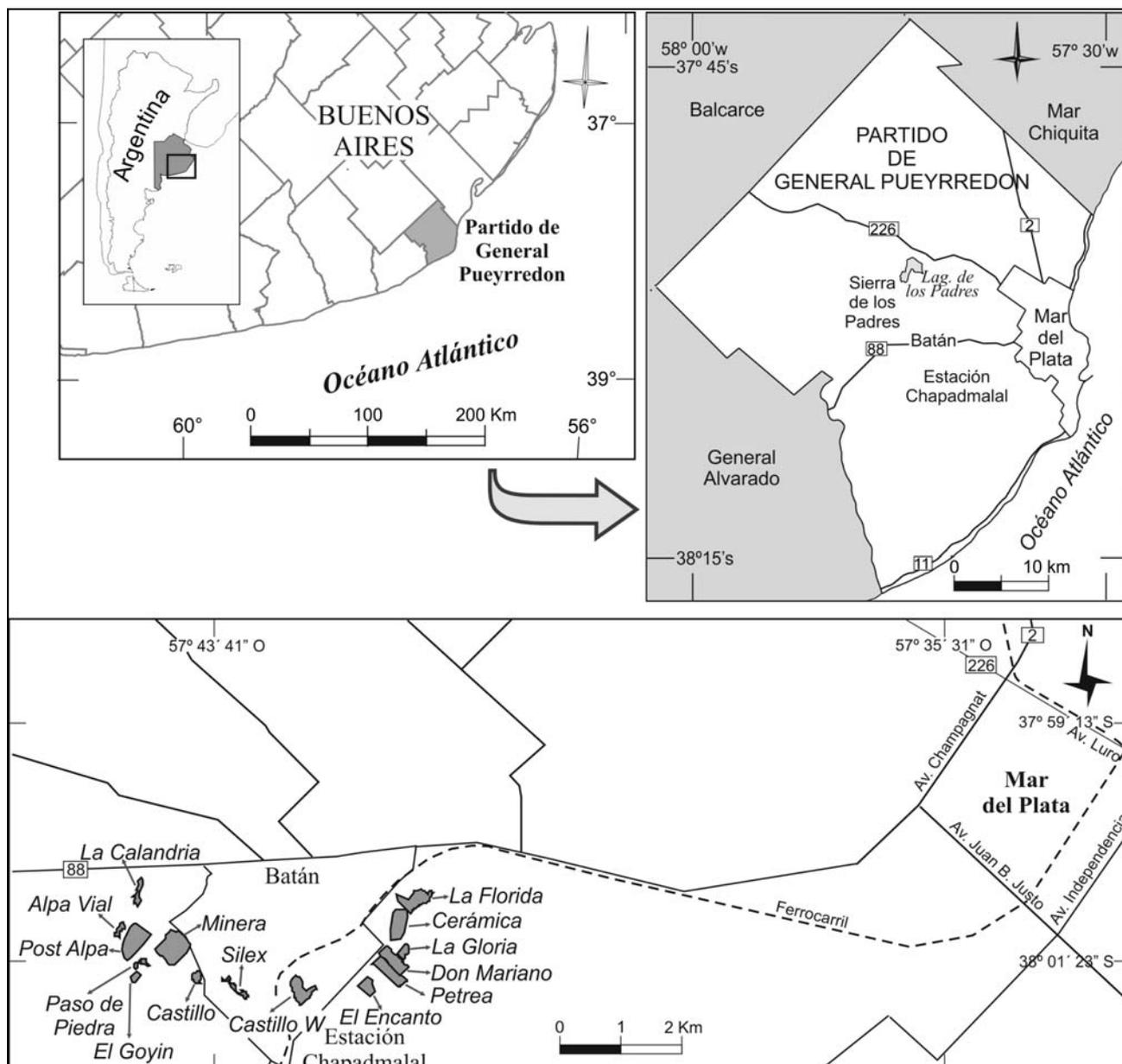


Figura 1. Mapa de ubicación.

integración de la minería, con nuevas actividades de rehabilitación del área como un paisaje cultural. El Museo de Sitio en este proyecto se desarrollará primero en un formato virtual y luego como una propuesta de planificación integral del área a ser elaborada en conjunto con los actores de la comunidad local para ser ofrecida a las autoridades de gestión urbana y territorial que competan.

RESULTADOS

El Partido de General Pueyrredón se localiza en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires y se sitúa a los 38° de latitud sur y los 57° 33' de longitud oeste, en territorio de la República Argentina. La superficie del partido es de 145.344 Has (Rodríguez et al., 2009) y su población residente es de 618.989 habitantes (INDEC, 2010).

La superficie minera per capita sólo llega a 13 m²/hab. Este dato es particularmente ilustrativo cuando se lo compara

con la superficie urbana (215 m²/hab) o las actividades rurales (1.944 m²/hab) (del Río et al., 2013).

La expansión radial-sectorial de la ciudad de Mar del Plata se corresponde con un gradiente centro-periferia, en donde el centro se constituye en el espacio de mayor intensidad de ocupación edilicia, elevada consolidación de infraestructura y alto precio del suelo inmobiliario, mientras que en la periferia se manifiesta en bordes inurbios y/o exurbios que presentan asentamientos humanos de baja densidad poblacional y edilicia, zonas semiconsolidadas y unidades parcelarias que exhiben bajo precio relativo en el mercado de tierra junto a espacios cercanos o linderos a actividades agrarias y/o extractivas.

La minería de áridos, fue y es una actividad periférica, originada industrialmente durante la década de 1930/40 en zonas del actual ejido urbano de Mar del Plata. Esta actividad ha seguido un ciclo de apertura-explotación-abandono o-cierre que apenas involucra el 0,2 % del territorio comunal (del Río et al., 2013).



Ruptura de la roca, operación que se efectúa con barrenos accionados a aire comprimido, lo que permite dar gran impulso a los trabajos.

Figura 2. Fotografía del Boletín municipal segundo trimestre de 1938.

La evolución de la actividad minera en la zona ha registrado distintos momentos que se exponen sinópticamente en la Tabla 1.

La velocidad a la cual la construcción y la minería alteran la superficie, en el partido de General Pueyrredón, ha sido estimada en unos 10 km²/año (Rivas et al., 2006). La transformación de la superficie queda revelada en la construcción de la ciudad, en neo topografías antrópicas que son externalidades de los procesos mineros. Su mayor expresión ocurre en la zona de Batán- Chapadmalal, caracterizadas por una transición urbano-industrial-minero-rural (Mantobani y del Río, 2004).

El partido de General Pueyrredón se divide en 4 delegaciones municipales. La de Batán-Chapadmalal representa el 21% de la superficie total del mismo y cuenta con una población estimada en 21.640 habitantes. La población agrupada es de 12.520 habitantes y se localiza en los principales centros urbanos y periurbanos denominados Batán, Estación Chapadmalal, El Boquerón y en otras áreas urbanas menores (Rodríguez, et al., 2009). El resto constituye la población semiagrupada y dispersa que habita localidades y zonas rurales integrantes del territorio correspondiente a dicha delegación. del Río et al., en 2013 determinaron un área inclusiva de 37,79 km² que

involucra a la totalidad de los yacimientos explotados y en explotación del área de Batán y Chapadmalal (Figura 3). En ella coexisten usos urbanos, agrícolas, ganaderos industriales y mineros. La superficie afectada por las canteras alcanza en ese recorte territorial a 1,67 km² mientras que el área urbana de los centros poblados llega a 2,9 km².

Estos duros rasgos mineros, junto a la identidad de origen de sus pobladores, le han dado a las poblaciones de Batán y de Estación Chapadmalal un carácter que las distingue por sus aspectos productivos, culturales y paisajísticos del resto de los poblados rurales de la región.

Lejos de ser considerados escenarios mineros como un mero pasivo ambiental, recientemente han recibido una nueva mirada desprejuiciada y objetivada mediante consultas a pobladores y visitantes que han permitido jerarquizar valorativamente los paisajes producto de las explotaciones de áridos incluso como un aporte para el desarrollo local (Fernández y del Río, 2012, del Río et al., 2014). Recientemente se han generado distintas acciones reivindicativas de la actividad y sus productos. Un caso emblemático es la denominada *Piedra Mar del Plata*, que ha sido considerada y propuesta como una roca con reconocimiento patrimonial en el Global Heritage Stone Resource (Cravero et al., 2014).

En articulación con este eje conceptual se encuentra un abordaje novedoso desde el concepto de *paisajes culturales*. Estos paisajes, son susceptibles de una valoración e interés en tanto han articulado con diversa clase de incrustaciones materiales, artefactuales y culturales. La noción de paisaje cultural no busca ya limpiar, o restaurar sino asumir la nueva categoría de objetos híbridos y poner alguna claridad sobre los procesos que los forjaron.

Sin embargo este horizonte de revalorización y potenciación del sector considerado como escenario minero debe afrontar el desafío de resolver conflictos propios, tales como: escasa conciencia de la importancia de la minería en el desarrollo económico y urbano, contaminación atmosférica y acústica en áreas cercanas a las canteras, abandono de unidades de explotación inactivas luego de las crisis de los 80 y 2001 y deterioro ambiental, problemas en la circulación vehicular y peatonal y en la accesibilidad, accidentes y de riesgos para la seguridad pública, incompatibilidad espacial con urbanas y rurales, imprevisión estatal de la dinámica de los procesos extractivos y déficit de sustentabilidad del recurso y, consecuentemente, desactualización normativa y exiguo control municipal de la actividad minera, entre otros temas (Rodríguez et al., 2008).

Como respuesta a estos desafíos y oportunidades es necesario promover la localización y desarrollo de minería de áridos en el territorio de la comarca Batán-Chapadmalal, encausar y regular la localización de la minería en áreas específicas a fin de disminuir y evitar conflictos con otros usos de suelo.

La puesta en valor del sector no puede de ningún modo obviar la falta de conocimiento y reconocimiento social de la actividad minera como factor de desarrollo y transformador del territorio.

Tal como lo expresa Skinner (1994), la visión que cada uno tiene sobre la minería y sus efectos es ampliamente variable en función de su posición y expectativa sobre el tema. Es así que postula como problema generalizado y global, lo mismo que ocurre a nivel local: el público no sabe, no le interesa y no entiende las diferencias entre los distintos tipos de minería y sus efectos y consecuencias.

Tabla 1. Evolución de la actividad minera en Batán - Chapadmalal.

Primitiva: desde 1874 a fines la década del '20	Demanda de áridos para el desarrollo urbano del puerto Laguna de los Padres (hoy Mar del Plata). Desarrollo del puerto Mar del Plata (1914-1920).
Minería Pionera: 1930-1950	Inicio de tareas de prospección y análisis de viabilidad económica, preparación y desarrollo de canteras en el sector Batán-Chapadmalal hacia mediados de 1930. Primeros mineros inmigrantes europeos. Desarrollo de infraestructura vial (estado municipal-sector privado) para la consolidación del circuito productivo. Alteración inicial del paisaje (relieves positivos-escombreras y huecos).
Temprana consolidación y expansión de la actividad 1950-1970	Expansión de la actividad en coincidencia con la etapa de mayor desarrollo urbano de Mar del Plata en la década del 1960. Máxima cantidad de canteras activas. Desarrollo y conformación de un distrito minero.
Corrientes inmigratorias de Chile.	Crisis 1980-1990 Crisis del sector en 1980 que continúa en los 90. Cierre y abandono de canteras. Presencia de pasivos ambientales en empresas poco tecnificadas y rentables. .
Post crisis 1990 al 2000. La nueva normativa ambiental	Reforma constitucional de 1994 e incorporación de los deberes y derechos ambientales en la constitución. Incorporación del Título de Protección Ambiental al Código de Minería. Inclusión de Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIAs) a la gestión ambiental minera.
Crisis del 2001	Cierre de canteras y contracción del sector.
Expansión Post Crisis e internalización de criterios ambientales en la producción	A mediados de la década del 2000 se inicia un nuevo período de expansión y consolidación de la actividad acompañada de un ciclo económico basado en el consumo interno y la inversión pública en infraestructura. No existe un acompañamiento político del estado municipal, que se transforma en muchas ocasiones en un cliente cautivo e insolvente, antes que en un gestor potente del territorio comunal. Está expansión y consolidación va de la mano de la internalización proactiva en la empresa más fuerte del sector de criterios ambientales en cuestiones de producción, pero más significativamente en temas de recuperación y rehabilitación ambiental de espacios degradados. Las empresas restantes, con menor presencia en el mercado, con menor respaldo técnico y económico incorporaran los temas ambientales de modo meramente formal dando cumplimiento a los imperativos de la Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS).
Etapas de la Responsabilidad Social Empresarial (RSE) y Proyectos sinérgicos Universidad-Empresa-Sociedad	Las empresas mineras realizan tareas de transformación de pasivos ambientales en activos sociales, se involucran en la problemática educativa y cultural del área y desarrollan proyectos de rehabilitación de espacios y materiales mineros que permiten la incorporación de nuevos actores sociales Cerámica Chapadmalal (UNMdP-Canteras Yaraví S.A.- Proyecto de Extensión Universitario). Reutilización de materiales para la producción artesanal de bloques a partir de Arenas de Trituración de uso comunitario. Ladrillos cerámicos a partir de fangos. Análisis de la valoración y propuesta de circuitos paisajísticos. Repoblamiento de playas erosivas con arenas cuarcíticas. Recomposición del Paisaje. Generación de viveros forestales. Preparación de escenarios para la valoración forestal en secuestro de carbono. Producción de alimentos en canteras. Acuicultura de especies comerciales. Desarrollo de viñedos locales (en etapa de análisis).
Etapas de puesta en valor y resignificación del distrito minero.	Visión territorial de conjunto. Reescenificación ambiental del periurbano minero de Mar del Plata. Revalorización y promoción del paisaje cultural.

En consecuencia, como instrumento primario de clarificación y difusión se presenta el desarrollo de un museo de sitio junto a instituciones de la comunidad mediante el acopio de información y opiniones para constituir el archivo básico. En una etapa inicial tendrá un formato digital y virtual. Actualmente está en proceso de elaboración, con la recopilación de imágenes históricas, identificación, clasificación y sistematización de restos tecnológicos, registro de historias y anécdotas de pobladores, en general y mineros, en particular; cómo así como registros artísticos locales y regionales.

El concepto de Museo de Sitio implica una primera caracterización como punto de partida e insumo para una indagación que aporte ideas para un posterior Museo de Sitio real.

En una primera instancia describe la convivencia armónica de las actividades actuales y de corto plazo y en una segunda instancia, las proposiciones inherentes a usos futuros del territorio potenciando las cualidades de su paisaje y aprovechando las perspectivas que aporta la noción de paisaje cultural.

Afrontar este aspecto es parte de una de las estrategias integrales de revalorización del patrimonio minero, el elemento central es la concreción de un museo de sitio, como parte de una estrategia de refuncionalización del área luego de su vida productiva estimada y atento a fortalecer la identidad de la comunidad y el desarrollo de nuevos usos y actividades en el formato de parque o paisaje cultural activo.

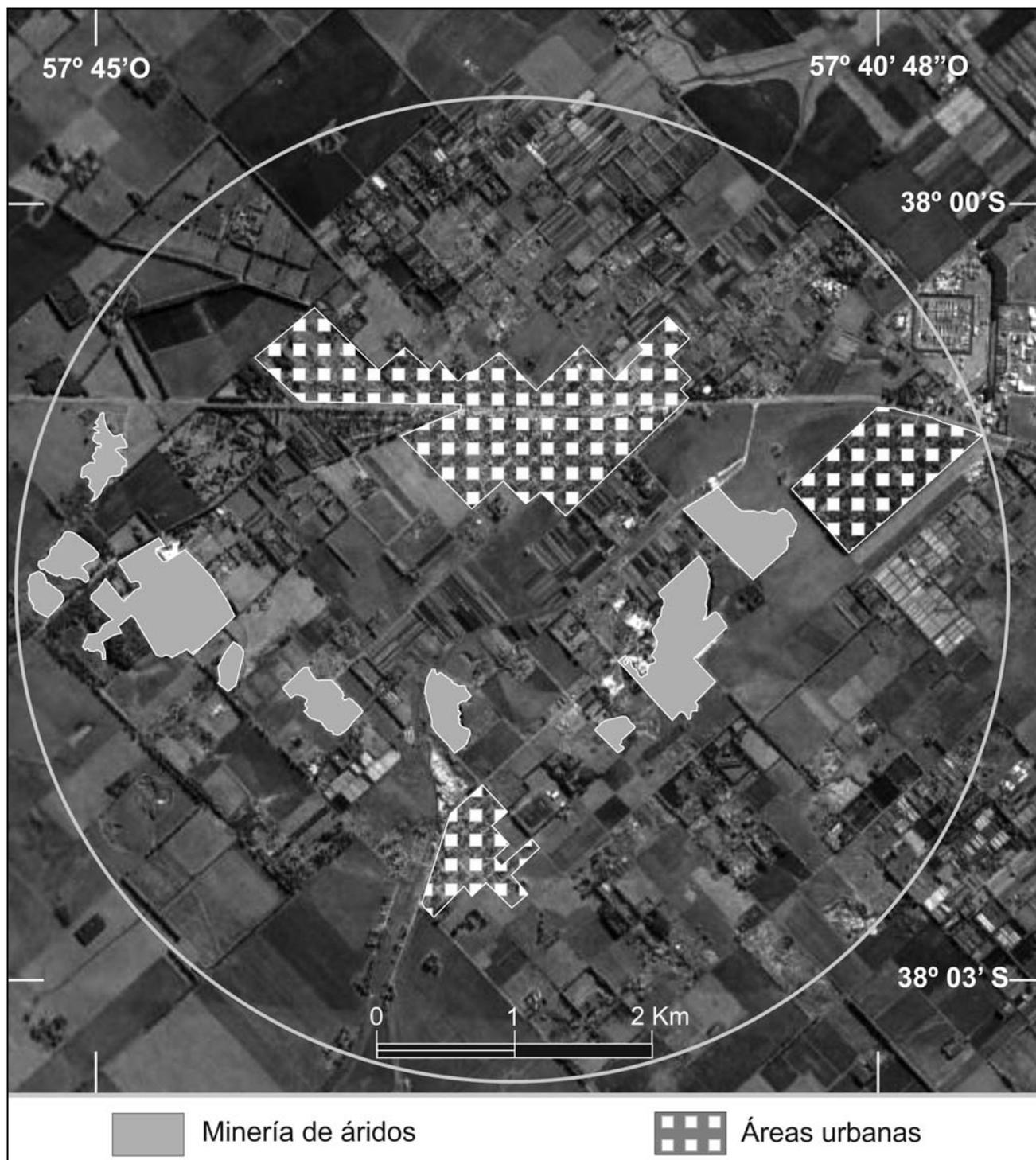


Figura 3. Radio inclusivo que muestra las zonas urbanas y mineras (Modificado a partir de del Río et al., 2013).

El Museo de Sitio no debe entenderse como un concepto pasivo y meramente articulado con el aporte de datos acerca de las actividades del pasado, sino como un proceso de transición desde el perfil productivo tradicional a una nueva instancia de actividades terciarias y culturales en las que puedan discernirse nuevas actividades recreativas, educativas y productivas consideradas por su privilegiado posicionamiento a pocos kilómetros de la urbe de mayor actividad turística de la Argentina.

El proceso de transición de lo productivo tradicional a lo neo-productivo y cultural-terciario debe contemplar, mediante disposiciones de ordenamiento territorial y planificación, formas de compatibilidad entre la continuidad y transformación de actividades actuales (por ejemplo, generar nuevos usos que revertan pasivos en activos ambientales de la actividad extractiva). Esto trae aparejado nuevas actividades de carácter terciario. Por lo tanto el instrumento a desarrollar bajo la noción de Museo de Sitio (primero virtual y luego real). Se caracterizará

como un modelo de desarrollo, remediación territorial, repotenciamiento paisajístico y de aprovechamiento de pasivos junto a la búsqueda de modalidades de compatibilidad entre la extracción tradicional, nuevos desarrollos productivos procesadores de tales pasivos y las actividades de orden terciario que podrán vincularse a nueva residencia, desarrollo de microproducciones, atractores turísticos y recreativos, sitios de esparcimiento y espectáculo, ámbitos de observación científica y divulgación educativa, etc.

Lograr el objetivo planteado requerirá el desarrollo de un *Master Plan* para el futuro del área orientado a la optimización de la adecuada convivencia socio-productiva y ambiental de los emprendimientos minero-extractivos y los asentamientos rurales y urbanos y la rehabilitación integral del sector con la incorporación de nuevas actividades.

Si se considera que el horizonte productivo de las canteras activas tiene su fin hacia el 2050, es necesario direccionar políticas estatales y privadas que transformen estos escenarios mineros en nuevos ambientes productivos y culturales de significación comunal, y que a la vez de su resignificación ambiental y al desarrollo sustentable, se revalorice el patrimonio geológico y minero, en las diversas fases de la actividad, minera que exalte las características de identidad propias y específicas de naturaleza geológica y arqueología industrial minero como un aporte al desarrollo local en comarcas mineras.

La realización de este plan requiere la articulación de los sectores públicos, privados y científicos en un corte transdisciplinar. En este esquema primario debe hallarse un uso potencial y post vocacional de cada una de las canteras que se encuentran hoy en explotación o que han cesado su actividad, con el fin de lograr una compatibilidad productiva y ambiental con las áreas urbanas colindantes.

El proyecto de realizar un plan para el sector parte del reconocimiento primario del estatus y condiciones de cada una de las canteras en el escenario local, a modo esquemático se presenta un mapa de ideas fuerza para el sector en las etapas transicionales del momento actual a la etapa de cierre programado de las canteras en explotación, que se articula con la propuesta de gestión paisajística propuesta por *Fernández y del Río (2012)*.

Como elemento troncal del proyecto, se propone una reasignación de usos y refuncionalización de los sectores ya explotados del distrito minero, enlazado al Museo de Sitio previamente descrito. En este se reconstruirá mediante datos históricos y familiares el ciclo productivo a fin de favorecer intervenciones de redescubrimiento de la identidad cultural-territorial en relación con el patrimonio arquitectónico-minero.

Superada la etapa virtual a través de propuestas planificadoras y normativas se propondrá un área territorial que integre actividades productivas tradicionales como alternativas dentro de un espacio patrimonial cultural, integrado a la comunidad local (Figura 4, Tabla 2).

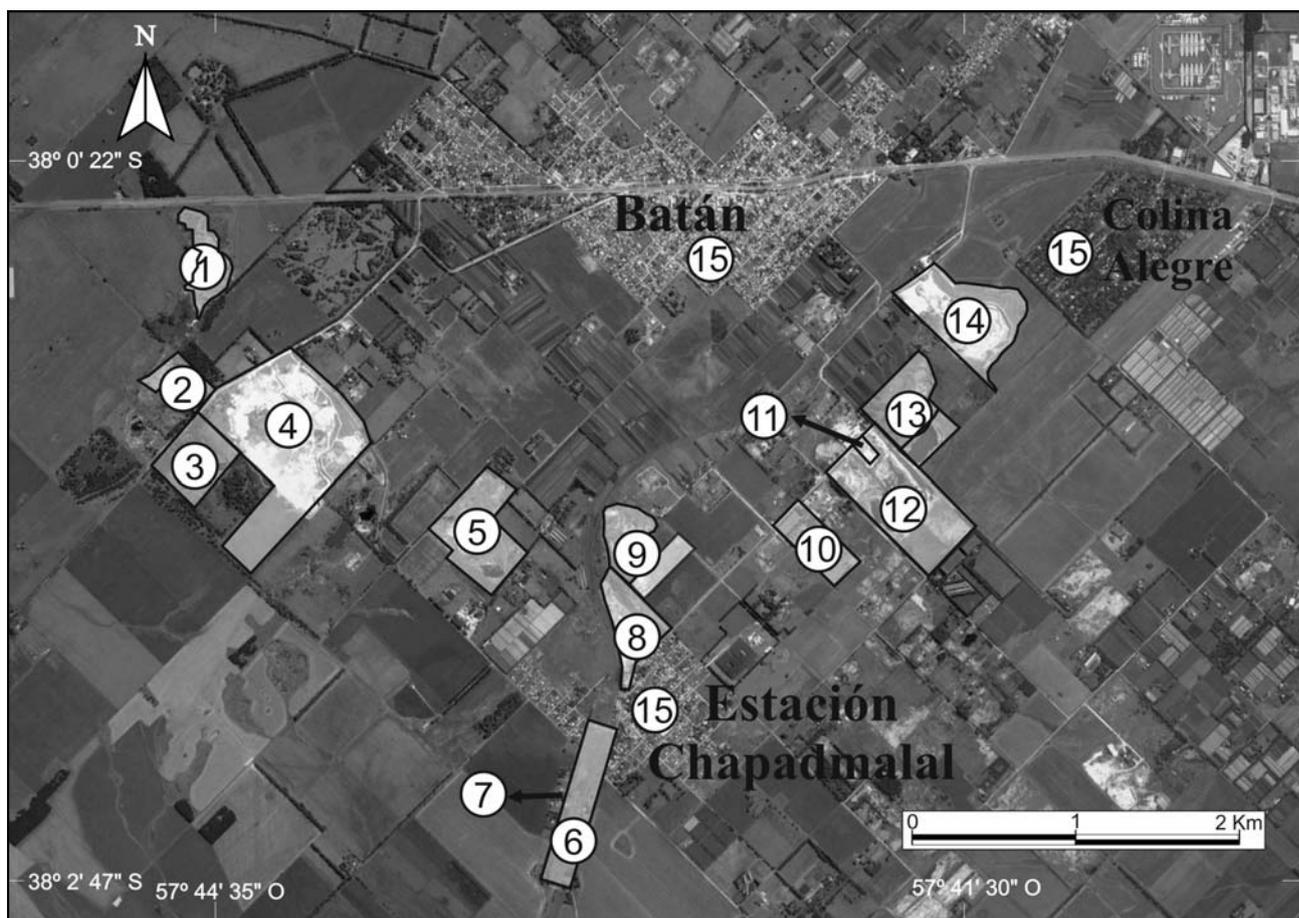


Figura 4. Localización de sitios.

Tabla 2. Uso actual y futuro de sitios de áreas urbanas y extractivas en Batán-Chapadmalal.

Identificador	Denominación del sitio	Uso actual	Uso futuro	
			Presentado ante Organismos Oficiales	Proyectual/No presentado ante Organismos Oficiales
1	La Calandria	Sin uso definido		Cementerio
2	Paso de Piedra	Estación experimental de rehabilitación ambiental		
3	Alpa Vial	Obrador		Sin datos
4	Yaraví Minera	Minero	Arboretum/parque forestal y educativo	
5	Silex	Minero		Sin datos
6	Estación de Ferrocarril	Sin uso definido		Museo de sitio/ferias artesanales/ Parrillas-restaurant
7	Viejo almacén	Sin uso definido		Ferias artesanales/ Parrillas-restaurant
8	Palmar	Producción de ladrillos industriales		Sin datos
9	Cantera Castillo	Minero limitado a extracción artesanal		Anfiteatro/área de desarrollos culturales
10	El Encanto	Camping	Camping	
11	Envasadora de pescado	Industrial	Procesamiento de pescados	
12	Petrea + DonMariano + La Gloria	Minero	Rehabilitados mediante acuicultura	
13	La Cerámica	Minero	Circuito de interpretación minero	
14	La Florida	Minero	Sin definición. A la espera del plan de ordenamiento territorial del municipio	
15	Barrio Colina Alegre Batán/Chapadmalal	Urbano	Urbano	

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La recuperación y rehabilitación de espacios degradados por minería habitualmente ocurren de modo individual. En efecto, los impactos ambientales de la actividad de cada cantera presentan aspectos sinérgicos en cuestiones culturales y territoriales, que a menudo no son tenidos en cuenta en los procesos de recuperación y rehabilitación.

Al reconocer que existen estos impactos, que habitualmente no son reconocidos como tales en las EIAs, es necesario ver estratégicamente y en conjunto los efectos que la actividad tiene en términos territoriales, sociales, en definitiva ambientales.

Un argumento adicional para rehabilitar la zona, mediante otras actividades reguladas y seguras que utilicen los valores paisajísticos naturales y transformados, es la accidentología reciente en áreas de canteras inactivas.

Históricamente los diversos emprendimientos mineros configuraron un distrito con superposiciones jurisdiccionales y dispersión patrimonial. Por este motivo la rehabilitación o recuperación debe ser considerada en un contexto territorial y social a escala comarcal.

La Ordenanza vigente (5295/82) destinada al ordenamiento del territorio de la Delegación Municipal Batán-Chapadmalal, se encuentra desactualizada y presenta numerosas

omisiones que dificultan la regulación del uso, ocupación y subdivisiones del suelo. Asimismo, las ordenanzas específicas correspondientes a los minerales de tercera categoría, requieren de actualización y coordinación con las normas de ordenamiento territorial, con el fin de obtener efectos beneficiosos para las actividades radicadas en la zona.

La transformación del territorio primero y su valorización posterior definen en gran medida la conformación histórica, social y ambiental del escenario minero regional.

La recuperación ambiental, económica y social de estos sectores debe ser abordada con un criterio integral, en un contexto de planificación territorial y puesta en valor del patrimonio minero; entendido como la articulación del paisaje y la arquitectura minera en relación al reconocimiento de la identidad, pertenencia y valores de la sociedad que desarrolló tal patrimonio.

En los últimos años asistimos a una percepción negativa de la minería, que surgió probablemente como efectos sociales y políticos emergentes de la *mega minería metalífera a cielo abierto* y sus impactos significativos en la degradación y contaminación de agua, suelo, aire y paisaje.

En la provincia de Buenos Aires son otras las escalas y tipologías mineras y están ligadas a la extracción de áridos, los cuales están sujetos a criterios regulatorios específicos.

Es una actividad insustituible, por ser la materia básica para la construcción del hábitat humano, y ella deja testimonios de largos asentamientos e implicancias culturales en la constitución de una identidad local.

La actividad extractiva requiere de una revalorización y una recuperación post explotación que incluya la existencia y el desarrollo de las comunidades que le dieron origen y sustento.

Algunas de las referencias a tener en cuenta para el desarrollo de las propuestas del proyecto y la planificación futura de este paisaje cultural son la antigua reconversión de la Anthracite Región en Pensilvania, los museos culturales mineros de Alemania (Emscher Park) o de España (Asturias, León), entre otros.

Adherimos a lo enunciado por Carvajal y González, (2003) en que “*El patrimonio minero es la historia de los pueblos que sucesivamente vienen utilizando las materias primas minerales, y por lo tanto es parte de la historia de la humanidad*”.

Esto implica un enorme desafío, no sólo para los mineros, los científicos y los técnicos relacionados con la actividad. En muchos distritos mineros, hay una nueva corriente de pensamiento centrada en la preocupación y sensibilización por su preservación como elemento constitutivo de la conformación cultural y ambiental de un territorio que incluso puede ser el punto de apoyo para el desarrollo socioeconómico de regiones deprimidas tras el cierre de minas y canteras (Carvajal y González, 2003, Terrazas Loya, 2005, ITGE, 1999).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CARVAJAL, D. J. y A. GONZÁLEZ, 2003.
La Contribución del Patrimonio Geológico y Minero al Desarrollo Sostenible.
En Villas-Bóas, R.C., González Martínez, A. y G. de A. Sá C. de Albuquerque (Eds) Patrimonio Geológico y Minero en el Contexto del Cierre de Minas: 27-49. Río de Janeiro.
- CEPPI CABRERA, G., 1965.
Estudio Geológico Económico del Área Minera del Partido de General Pueyrredón. Provincia de Buenos Aires.
Ministerio de Obras Públicas. Informe Inédito.
- CRAVERO, F. PONCE, M. B. GOZALVEZ M. R Y S. A. MARFIL., 2014,
Piedra Mar del Plata: An Argentine orthoquartzite worthy of being considered as a ‘Global Heritage Stone Resource’.
Geological Society, London,
Special Publications Online First July 8, 2014; doi 10.1144/SP407.9
- DALLA SALDA, L. E INÍGUEZ RODRÍGUEZ, A.M., 1979.
La Tinta, Precámbrico y Paleozoico de Buenos Aires.
7 Congreso Geológico Argentino, 1: 539-550, Neuquén.
- DEL RÍO, J. L., BÓ, M. J. Y LÓPEZ DE ARMENTIA.
La minería de rocas de aplicación en el periurbano de la ciudad de Mar del Plata: La construcción de un nuevo relieve.
En del Río, J.L. y S. De Marco (Eds) Sustentabilidad de la minería en áreas periurbanas: Una aproximación multidimensional: 43-60. EduTecne.
- DEL RÍO, J. L., FERNÁNDEZ, M., CAMINO, M., BÓ, M. J. Y LÓPEZ DE ARMENTIA, A. 2013.
Chapadmalal El Pueblo Minero de Mar Del Plata: Valorización del Paisaje y Propuestas para un Programa de Desarrollo Local.
En: Actas del I Simposio Argentino de Patrimonio Geológico, Geoparques y Geoturismo y III Encuentro Latinoamericano de Geoparques. San Martín de los Andes.
- FERNÁNDEZ, M. A Y J. L. DEL RÍO, 2012.
Valorización, Calidad y Gestión del Paisaje Minero en Áreas Periurbanas del Partido de General Pueyrredón.
En del Río, J.L. y S. De Marco (Eds) Sustentabilidad de la minería en áreas periurbanas: Una aproximación multidimensional: 177-194. EduTecne.
- FERNÁNDEZ, R. DEL RÍO J. L., BURMESTER, M. Y GOYENECHE, H., 2014.
De la naturaleza productiva al paisaje cultural: el caso de las canteras de Batán-Chapadmalal, Mar del Plata.
IV Seminario Internacional de Patrimonio Agroindustrial.
- INDEC, 2010.
Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010, procesado con Redatam+SP.
- ITGE, 1999.
Instituto Tecnológico y Geominero de España.
Patrimonio Geológico, Conservación y Gestión. 161pp.
- MANTOBANI, J. M. Y J. L. DEL RÍO, 2004.
Repensando los ambientes periurbanos desde la perspectiva de la relación Sociedad/Naturaleza.
Rev. Univ. de Geografía. Vol. 13 (1 y 2) 147-162.
- RODRÍGUEZ R., DEL RÍO J.L., BONAVENTA H.J., BO J. GUAGLIARDO G., LÓPEZ DE ARMENTIA A., CAMINO M. Y ÁLVAREZ J.R., 2008.
Minería de áridos y ordenamiento territorial en zonas Periurbanas de Batán-Chapadmalal.
Primer Congreso Argentino de Áridos y VI Jornadas Iberoamericanas de Materiales para la Construcción, Tomo I: 83-92. Mar del Plata.

- RIVAS, V., CENDRERO, A., HURTADO, M., CABRAL, M. GIMENEZ, J. FORTE, L., DEL RÍO, L., CANTÚ, M Y BECKER, A. 2006.
Geomorphic consequences of urban development and mining activities; an analysis of study areas in Spain and Argentina.
Geomorphology, Vol. 73, issues 3-4: 185-206.
- SKINNER, B.J. 1994.
Mineral myopia (abstr): Geol. Soc. America,
Abstracts w/ Prog., v. 26 (7): A-179.
- SUBIELA, A., 2012.
Reseña histórica de las explotaciones de piedra en el circuito Batán-Chapadmalal.
En del Río, J.L. y S. De Marco (Eds) Sustentabilidad de la minería en áreas periurbanas: Una aproximación multidimensional: 13-25. EduTecne.
- TERRAZAS LOYA, V., 2005.
Plan México, integración del patrimonio industrial minero y ferroviario.
En Martins, L. P. y P. Carrión (Eds) El patrimonio Geominero en el Contexto de la Ordenación Territorial. Tipología y aspectos ambientales. Actas II Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Actas: 163-168. San Salvador de Jujuy.



Estudio experimental y modelado del flujo hidráulico en suelos limo-bentoníticos compactados para su uso en barreras naturales

Experimental study and hydraulic modeling in limo-bentonite compacted for use in natural barriers

Alercia Biga, Carolina ¹ ✉ - Eberhardt, Marcelo - Arrua, Pedro - Aiassa Martínez, Gonzalo

Recibido: 11 de mayo de 2015 • Aceptado: 30 de octubre de 2015

Resumen

Los suelos loésicos de Córdoba, presentan una estructura macroporosa y un marcado comportamiento inestable en presencia del agua. Esta característica estructural, los vuelve vulnerables en los procesos de conducción y transporte de agentes externos bajo fenómenos de infiltración. Su mejoramiento mediante el empleo y adición de materiales naturales como la motmorillonita sódica, hace posible su uso como barreras naturales de baja permeabilidad acorde a lo reglamentado por los organismos internacionales. De esta forma, se logra la disminución de su valor de conductividad hidráulica lo cual permite su empleo en la construcción de depósitos de rellenos sanitarios. En este trabajo, se presentan resultados de infiltración en muestras moldeadas de suelo local con adición de bentonita sódica en diferentes porcentajes, moldeadas con diferentes valores de densidad de compactación. Se analizó el comportamiento hidráulico mediante el uso de un equipo de permeabilidad a pared flexible y se ha establecido el ascenso capilar. Los resultados indican que es posible la disminución de la infiltración de un fluido permeante a través del medio poroso, mediante el incremento de la densidad natural del suelo optimizada mediante procesos mecánicos en conjunto con la incorporación de bentonita.

Se observó una respuesta experimental no lineal en las curvas de infiltración obtenidas en diferentes mezclas mejoradas con adición de bentonita. Este comportamiento de características variables, en función del tiempo y de la presencia de adición incorporada, permitió establecer los parámetros necesarios para calibrar el modelo de infiltración propuesto.

Palabras clave: *Bentonita, Densidad Seca, Permeámetro a Pared Flexible, Suelo loessico.*

Abstract

Loessic soil has a macroporous structure and a marked unstable behaviour in presence of water. This structural feature becomes them more vulnerable in transport processes of external agents under low infiltration phenomena. Its improvement through adding natural materials such as sodium motmorillonite enables its use as low permeability natural barriers according to international organizations. Thus, a reduction in the hydraulic conductivity value allows its use in

1. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad regional Córdoba.
Departamento de Ingeniería Civil. Grupo de Investigación

✉ caro_alercia@hotmail.com

the construction of landfill deposits. This work presents the infiltration results on remoulded local soil samples with addition of sodium bentonite in different percentages and different values of moulded dry density. The hydraulic behaviour was analyzed by using a flexible wall permeameter. Also the capillary rise was established. The results indicate that it is possible to reduce the infiltration through the porous medium, by increasing the natural density of compaction of the soil, by using mechanical processes optimized in conjunction with the addition of bentonite. A non-linear experimental response was observed on the permeability coefficient obtained in the mixtures in respect of the incorporation of bentonite. This variable characteristic behaviour, depending on the presence of incorporated addition, allowed establishing the necessary parameters to calibrate the infiltration proposed model.

Keywords: Bentonite, Dry Density, Flexible Wall Permeameter, loess soil.

INTRODUCCIÓN

En Argentina, los suelos loésicos cubren un área aproximada de 600000 km² (Bloom, 1992). Están compuestos por partículas limosas de origen eólico. Su rango de tamaños oscila entre los 10 y 50 micrones. Naturalmente, presentan una estructura macroporosa (Aiassa G, et al 2008), donde la presencia de lentes de arcilla y sales solubles precipitadas construyen conexiones entre las partículas, confiriendo estabilidad y cohesión al mismo. El peso unitario seco (γ_d), presenta rangos entre 11 kN / m³ a 14 kN / m³, el límite líquido varía entre 22% y 30%, el límite plástico entre 16% y 20%. El contenido de humedad natural presenta valores entre 8% y 25%. Su gravedad específica es de 2,65. Su distribución granulométrica muestra que, el 96 % del suelo se define como pasante tamiz N° 200. De acuerdo con la Clasificación Unificada de Suelos (USCS), los mismos corresponden al tipo CL-ML. Su gravedad específica está controlada por la fracción de arcilla presente, y puede variar entre 1 m² / g, y 10 m² / g. Son suelos naturalmente alcalinos con un valor de ph > 8. (Rocca R, et al, 2006)

Los suelos loessicos en presencia de ciclos de humedecimiento, manifiestan una marcada inestabilidad mecánica, asociada a la disolución de sales presentes en el esqueleto mineral. Éstas, se hidratan y disuelven, debilitando los enlaces químicos entre partículas, provocando el fenómeno conocido como colapso (Arrúa, 2011). En la ciudad de Córdoba, la ingeniería geotécnica procura la estabilización de los suelos locales, mediante procesos de compactación o mediante el uso de materiales estabilizadores, cuya respuesta mecánica es conocida (Arrúa, 2012). La incorporación de materiales finos como la motmorillonita sódica en la matriz de suelo loessico, ha reportado mejoras considerables en el desempeño hidráulico (Aiassa, 2009, Alercia, et. al. 2014).

Los factores que afectan la respuesta hidráulica de los suelos de la Formación Cordobense son: el tamaño de las partículas, la relación de vacíos, el grado de saturación, la composición química del suelo, el espesor de la doble capa difusa, entre otros. Los experimentos de laboratorio colaboran predecir, y analizar las tendencias de dicha respuesta. Predecir analíticamente un fenómeno requiere de establecer la vinculación entre las variables involucradas en el problema. En este trabajo se exponen resultados experimentales y se presenta un procedimiento analítico para modelar, comprender y describir el comportamiento hidráulico no lineal del suelo loessico local en relación a la incorporación de bentonita sódica y a la modificación de su densidad seca natural.

MODELO HIDRÁULICO

Previo a establecer la relación entre los resultados empíricos y el modelo teórico, se observó en la respuesta experimental una relación entre el coeficiente de permeabilidad obtenido en las mezclas respecto de la incorporación de bentonita. Se realizó una calibración mediante funciones exponenciales, a partir de resultados obtenidos de laboratorio, para suelos loésicos con diferentes porcentajes de adición de bentonita sódica.

La respuesta fue no lineal, observándose un factor de infiltración inicial variable en relación al porcentaje de incorporación de bentonita. El diagrama característico de infiltración en mezclas aditivadas se presenta en la (Figura 1). Se observa que, al incrementar la adición de bentonita, se produce una disminución de la infiltración. No se registran valores máximos. Se visualizan dos estados: para tiempos iniciales, un estado transitorio, y para tiempos superiores un estado estacionario tendiendo la curva de infiltración experimental a un valor límite o último. Las muestras ensayadas permitieron identificar los parámetros involucrados en el comportamiento hidráulico analizado. (Figura 2)

Donde I-t: infiltración- tiempo, I_i=f(%B): Factor de Infiltración inicial obtenido como el valor de la pendiente de la recta tangente a la curva desarrollada y valuada en el origen en el periodo de tiempo transcurrido desde el inicio de un ensayo hasta el tiempo definido como tiempo último.

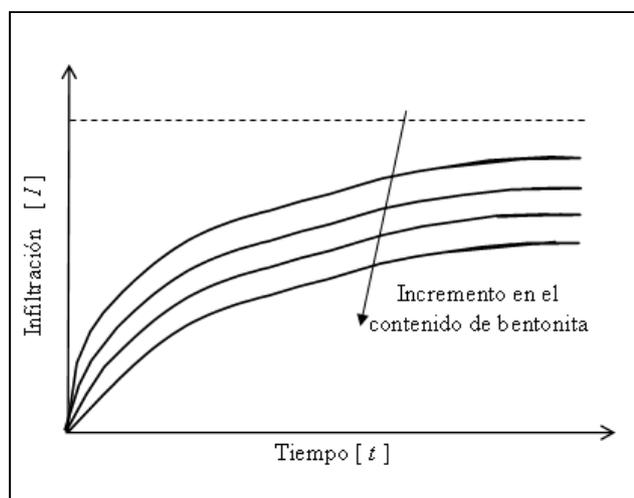


Figura 1. Diagrama característico de Infiltración de mezclas de limo - loessico estabilizadas con bentonitas.

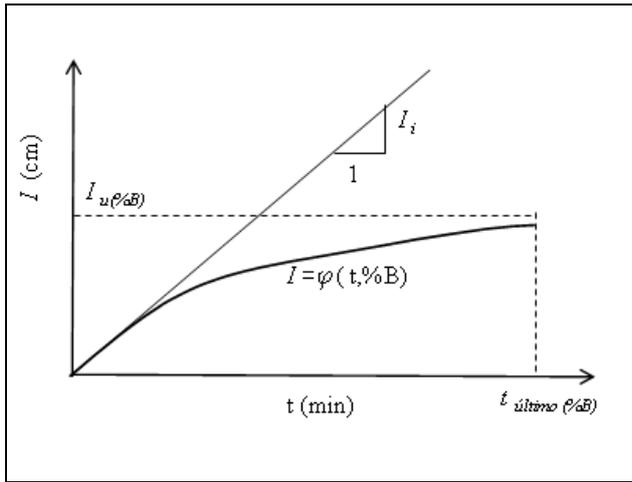


Figura 2. Parámetros de calibración del modelo de infiltración.

La infiltración obtenida como respuesta al modelo analizado depende del tiempo transcurrido y del porcentaje de bentonita adicionado en las mezclas. La ecuación (1) muestra la relación descripta:

$$I = \varphi(t, \%B) \tag{1}$$

El modelo analizado debe satisfacer las condiciones presentadas en las ecuaciones (2), (3) y (4):

$$I(0, \%B) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \varphi(0, \%B)}{\partial t} = I_i \tag{3}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t, \%B) = I_u(\%B) \tag{4}$$

La ecuación (2) impone la restricción de infiltración cero para un tiempo inicial cero. La ecuación (3) define el factor de infiltración inicial (I_i) como el valor de la pendiente de la recta tangente al gráfico de infiltración para un tiempo inicial cero.

La ecuación (4) plantea el máximo valor de infiltración al cual tiende el modelo de comportamiento propuesto en un tiempo último, observándose una respuesta asintótica. A partir de las condiciones establecidas, la ecuación (5) permite estimar el comportamiento hidráulico de las mezclas.

$$I = \frac{t}{\frac{t}{I_{ultimo}} + \frac{1}{I_{inicial}}} \tag{5}$$

Donde, $I_{último}$ e $I_{inicial}$ se obtienen a partir de una regresión exponencial, cuya variable independiente corresponde al porcentaje de bentonita empleado. En la (Figura 3), se muestran las relaciones entre el porcentaje de bentonita y las variables $I_{último}$ e $I_{inicial}$.

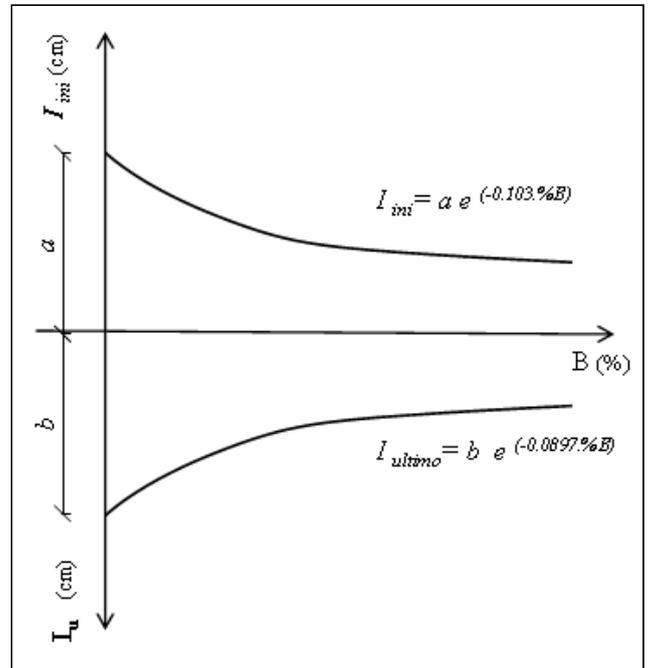


Figura 3. Relación entre Infiltración inicial e Infiltración última respecto del porcentaje de bentonita empleado.

Los factores a y b obtenidos de la calibración poseen unidades de longitud. El factor de infiltración inicial, se define como la derivada primera de la ecuación (5) propuesta como comportamiento hidráulico.

Así se obtiene la ecuación (6):

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \frac{1}{\left(\frac{t}{I_{ultimo}} + \frac{1}{I_{inicial}} \right)^2} = I_i \tag{6}$$

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales empleados fueron suelo tipo limo - loessico obtenido de perforaciones realizadas a 1 metro de profundidad en las cercanías de la Ciudad Universitaria, en Córdoba, y bentonita sódica, procedente de yacimientos de Lago Pellegrini, Río Negro. Las propiedades de ambos materiales se muestran en la (Tabla 1). La bentonita empleada, está compuesta por un 92% de Montmorillonita, y en porcentajes menores por Cuarzo, Gibbsita, Feldespato, Calcita y Zeolitas (Lombardi, et. al. 2003). En general muestra altas proporciones de hierro variables entre un 4% y 6%. Los iones intercambiables son Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} y K^+ , con un predominio de cationes sodio, producto de la presencia de sales solubles y de cationes retenidos en la doble capa difusa. De allí su clasificación (Hyang-Sig Ahn, 2009).

Tabla 1. Propiedades del material empleado.

Propiedades	Loess	Bentonita
γ_d (kN/m ³)	12.2-14.5	--
γ (kN/m ³)	14.9-16.8	---
LL (%)	20.8-32.2	301
IP (%)	0-8	231
Gs	2.68	2.71
Ps 200 (%)	87	100
Contenido arcilla < 0,002 mm (%)	4	85
SUCS	CL-ML	CH
Ss (m ² /g)	1	731(*)
Ph	> 8	7-7.5
Sc (%)	0.38	< 0.1

Nota: γ = peso unitario natural, LL = Limite líquido, IP = Índice de plasticidad, Gs = Gravedad Especifica, Ps = Pasante tamiz , Ss = Superficie específica , Sc = Contenido de sal. (*) (Santamarina, 2002)

Seleccionados los materiales, se procedió a tamizar el suelo matriz recolectando el pasante de tamiz N ° 100. Se secó en estufa a 105 ° C durante 24 horas. Se confeccionaron muestras con adición de bentonita en diferentes porcentajes respecto del peso unitario seco, y definidas como SB1 = 3%, SB2 = 6% y SB3 = 9%. La humedad de compactación estática fue de 20%. Los pesos unitarios secos de estudio fueron 13 kN/m³, 14 kN/m³, 15 kN/m³ y 16 kN/m³ y 17 kN/m³. Se moldearon probetas cilíndricas y sus medidas fueron 0,07 m de diámetro y 0,14 m de altura.

El método de compactación empleado fue estático, mediante la aplicación de presión uniforme en cada molde cilíndrico. Las probetas obtenidas fueron rotuladas y almacenadas en bolsas de cierre hermético hasta la ejecución de los ensayos hidráulicos correspondientes. Los ensayos se efectuaron usando un equipo de permeabilidad a pared flexible mediante el empleo de la técnica de carga variable (Fredlund, 1993), de acuerdo con los lineamientos de la norma ASTM D 5084. (Figura 4).

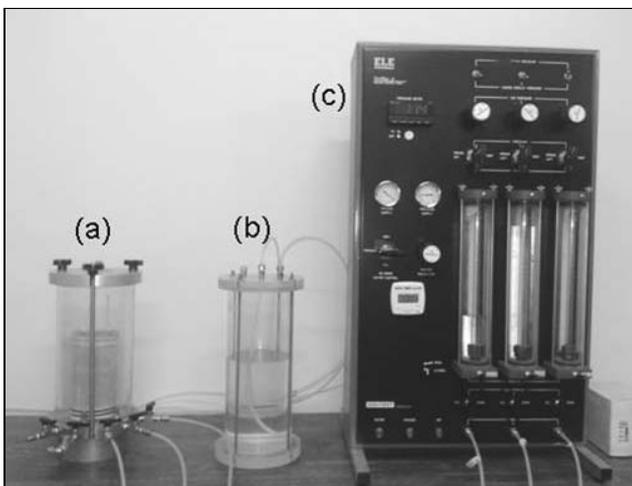


Figura 4. Equipo de Infiltración. Celda de Infiltración (a), Tanque Intercambiador (b), Panel de comando (c).

Los mismos se ejecutaron en condición no saturada y saturada. La presión de confinamiento en la celda fue de 117 kpa, mientras que las presiones superior e inferior fueron de 100 kpa y 114 kpa respectivamente.

La tasa de Infiltración (I_r) se obtuvo según el empleo de la ecuación (7).

$$I_r = \frac{\Delta V(t)}{\Delta t A} \quad (7)$$

Donde ΔV : volumen infiltrado durante un intervalo de tiempo Δt , A: área transversal de la probeta. Se adoptó un gradiente hidráulico igual a 10 (ASTM D 5084, 2000). El fluido permeante utilizado fue agua desaireada.

En condición saturada, el coeficiente de permeabilidad se obtuvo mediante el empleo de la ecuación (8).

$$k = \frac{a.L}{A.\Delta t} .Ln \left(\frac{PB_1 + \frac{V_{u(t1)} - V_{l(t1)}}{a}}{PB_2 + \frac{V_{u(t2)} - V_{l(t2)}}{a}} \right) \quad (8)$$

Donde, a: área de la bureta, L: longitud de la muestra, A: área de la muestra, Δt : intervalo de tiempo, PB_i : presión del sistema, $V_u(t_1)$: volumen de lectura de la bureta superior para un tiempo t determinado i , $V_l(t_1)$: volumen de lectura de la bureta inferior para un tiempo determinado i . El grado de saturación se verificó mediante el cálculo del coeficiente B de Skempton (Fredlund D., 1993) definido como $B = [(u_2 - u_1) / (\sigma_2 - \sigma_1)]$, donde $u_2 - u_1$: incremento de la presión de poros, $\sigma_2 - \sigma_1$: incremento en la presión de la celda. Se consideró estado saturado para valores de B superiores a 0,95.

CARACTERIZACION HIDRAULICA

Infiltración

La incorporación de material fino como arcillas produce en las mezclas de suelo limoso una disminución en la infiltración y también en el coeficiente de permeabilidad. (Cuisinier, 2011), (Qiong Wang, et al., 2013) (India Sudhakar M, et al., 2013).

La (Figura 5) y (Figura 6), muestran como resultado, la superposición de las curvas de calibración del modelo hidráulico propuesto y los resultados experimentales obtenidos para cada porcentaje de bentonita incorporado y distintas densidades secas de estudio. Se puede apreciar que, el modelo planteado para una misma densidad seca, propone una respuesta en el tiempo similar a la obtenida de manera empírica. Del mismo modo, se analizó el comportamiento del suelo en estado natural. Se evaluó el mejor ajuste del modelo teórico planteado respecto de los datos obtenidos de laboratorio, mediante el criterio de mínimo error cuadrático. Se obtuvo un valor igual a 0,74.

La (Figura 7), (Figura 8) y (Figura 9), muestran como influye el peso unitario seco de diseño en el volumen de infiltración acumulado. Se moldearon probetas con rangos de peso unitario seco desde 13 kN/m³, 14 kN/m³, 15 kN/m³, 16 kN/m³ y 17 kN/m³. Esta característica se analizó para los tres porcentajes de bentonita en estudio.

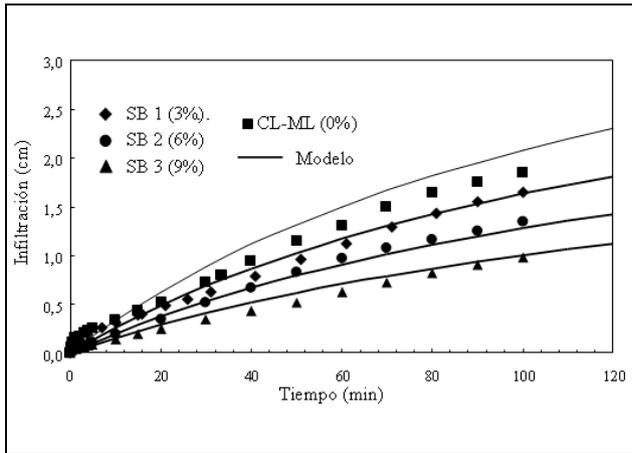


Figura 5. Resultados experimentales y modelo de comportamiento hidráulico en mezclas de suelo limo - bentonítico para una densidad seca de diseño igual a 15 kN/m³.

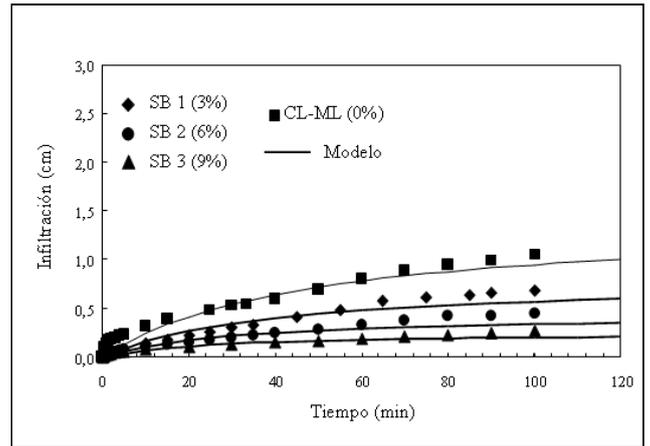


Figura 6. Resultados experimentales y modelo de comportamiento hidráulico en mezclas de suelo limo - bentonítico para una densidad seca de diseño igual a 16 kN/m³.

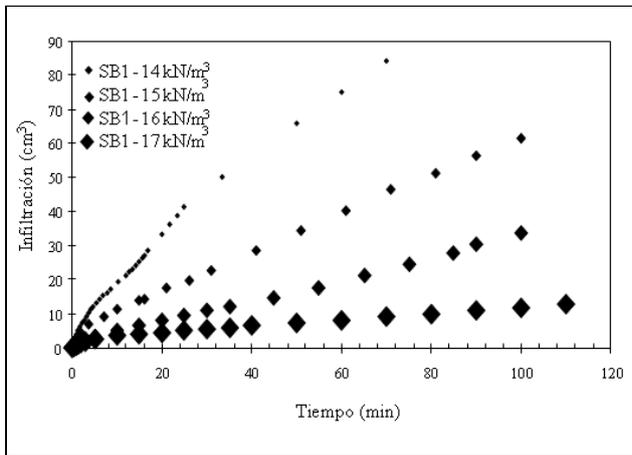


Figura 7. Volumen de Infiltración para muestras limo-bentoníticas moldeadas con diferentes pesos unitarios secos para una adición de 3% de bentonita.

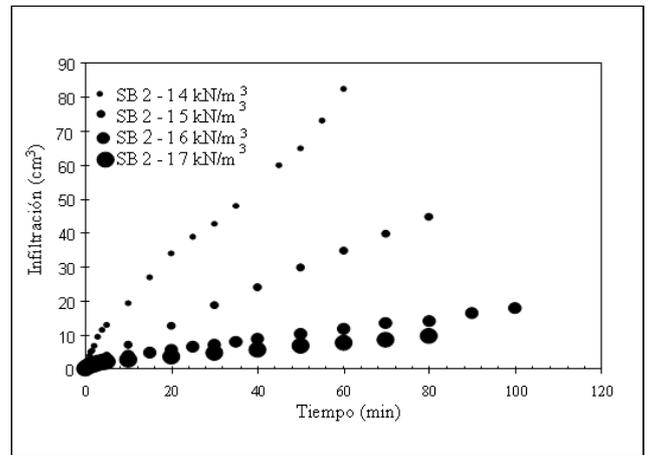


Figura 8. Volumen de Infiltración para muestras limo-bentoníticas moldeadas con diferentes pesos unitarios secos para una adición de 6% de bentonita.

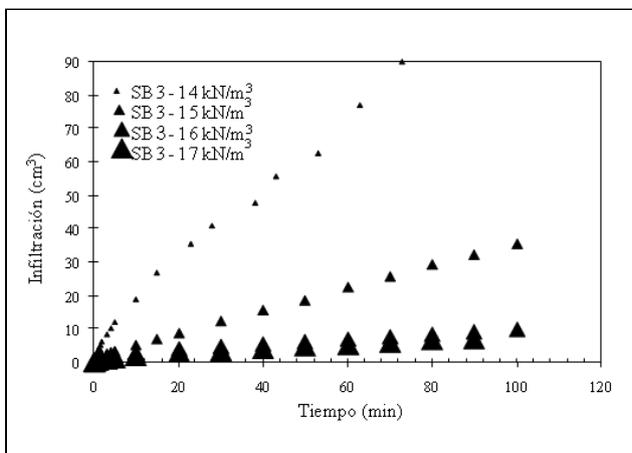


Figura 9. Volumen de Infiltración para muestras limo-bentoníticas moldeadas con diferentes pesos unitarios secos para una adición de 9% de bentonita.

En condición saturada, se observó una disminución del comportamiento de infiltración en función del incremento del porcentaje de bentonita adicionado a las mezclas. Se registro un comportamiento similar en función del incremento de la densidad seca de diseño. Se calcularon los coeficientes de permeabilidad para cada mezcla. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes de permeabilidad de suelos limo Loessicos naturales y con adición de bentonita sódica.

Muestra	% Bentonita	γ_d (kN/m ³)	ω_1 (%)	K (m/sec)
Suelo solo	0	13,90	18,80	5,80E-07
SB 1	3	14,10	20,30	2,40E-07
SB 2	6	14,00	18,80	1,83E-07
SB 3	9	13,60	22,00	1,73E-07
Suelo solo	0	15,00	17,70	2,00E-07
SB 1	3	14,80	19,30	2,10E-07
SB 2	6	14,80	19,40	1,77E-07
SB 3	9	14,90	20,80	1,41E-07
Suelo solo	0	15,90	17,60	9,49E-09
SB 1	3	15,70	18,90	2,19E-08
SB 2	6	15,90	20,60	2,12E-08
SB 3	9	15,90	21,30	1,73E-08
Suelo solo	0	16,40	18,00	9,04E-09
SB 1	3	17,30	18,10	6,71E-09
SB 2	6	16,10	21,20	2,08E-09
SB 3	9	16,40	22,00	2,03E-09

Nota: γ_d = densidad seca de diseño, ω_1 : humedad de compactación, k= coeficiente de permeabilidad.

Se observa una mayor reducción de los valores de coeficiente de permeabilidad con el incremento de las densidades secas de diseño respecto a incremento del porcentaje de adición de bentonita, para muestras con similar peso unitario seco. En los resultados obtenidos, se concluye que hay una reducción significativa de la permeabilidad cuando la densidad seca de diseño es mayor a 16 kN/m³ y cuando el contenido de bentonita es de 9%. Se explica este fenómeno, debido a la alta capacidad de intercambio catiónico que posee la bentonita sódica, proveniente de la presencia de los iones de Na⁺, los cuales se vuelven atractivos por las moléculas de agua. El proceso de hinchamiento de estos iones modifica la consistencia de la mezcla limosa, cambiando no solo su textura sino afectando la conductividad hidráulica de la misma. (Mitchell J., 1993). La muestra SB 3 confeccionada con una densidad seca de diseño igual a 16,4 kN/m³, registró un valor de conductividad hidráulica de 2,03 x 10⁻⁹ m/seg, cercano al valor admisible de 1x10⁻⁹ m/seg, con un valor de humedad de compactación de 22%, cercano al valor de humedad óptima registrado según el ensayo Proctor Standard, e igual a 20%. La mayoría de los resultados se encuentran dentro de la rama seca de la curva de compactación típica para estos suelos limosos, resultando macroestructuras en cada muestra del tipo abierta o floculada, generando conductividades hidráulicas mayores a las esperadas respecto de estructuras cerradas o dispersa. (Lambe, 1958)

Ascenso Capilar

Para determinar la velocidad de ascenso capilar, se utilizó un contenedor metálico con la adición de agua destilada en su interior. Las muestras fueron colocadas sobre un aro metálico de 0,03 m de altura y base ranurada. Se midió el nivel de ascenso del frente de humedad en función del tiempo. La (Figura 10), (Figura 11) y (Figura 12) muestran el comportamiento

de las probetas moldeadas con diferentes densidades secas de diseño moldeadas con distintos contenidos de bentonita.

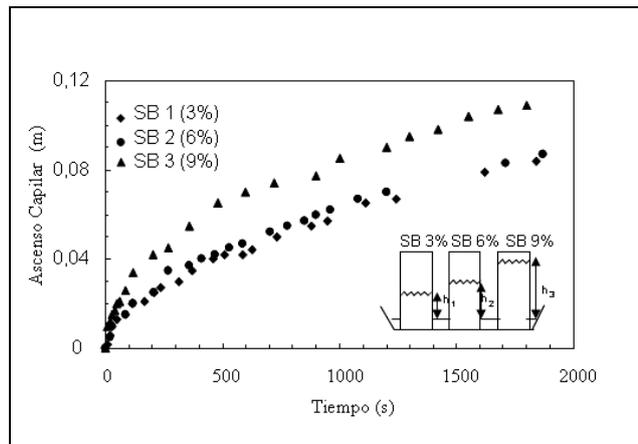


Figura 10. Ascenso capilar en mezclas de limo-loessico con adición de 3%, 6% y 9% de bentonita y peso unitario seco 13 kN/m³.

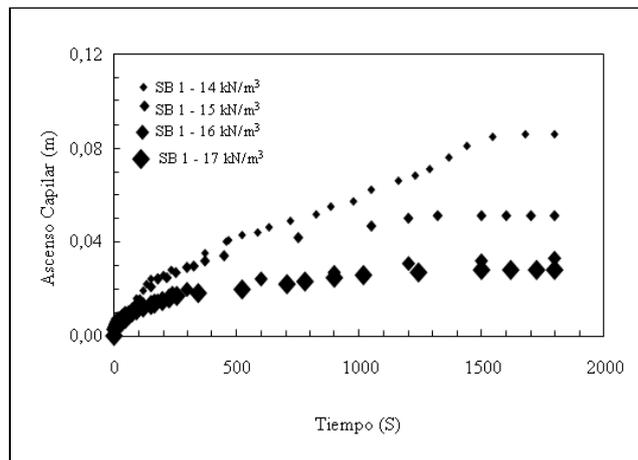


Figura 11. Ascenso capilar en mezclas de limo-loessico con adición de 3% de bentonita y moldeadas con diferentes pesos unitarios secos.

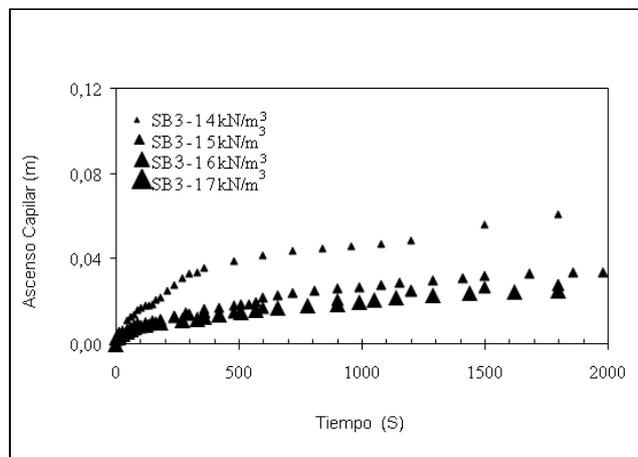


Figura 12. Ascenso capilar en mezclas de limo-loessico con adición de 9% de bentonita y moldeadas con diferentes pesos unitarios secos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza el comportamiento hidráulico de mezclas de suelo limo-loessico con adición de motmorillonita sódica, en diferentes porcentajes, y se revisa la influencia de la densidad seca de diseño en la elaboración de las muestras aditivadas.

Las principales conclusiones de este trabajo son:

- *Infiltración*: Las mayores reducciones en la permeabilidad se obtuvieron mediante el incremento de la compactación en las muestras de suelo respecto del incremento de la adición de motmorillonita sódica. Para muestras confeccionadas con densidades secas de diseño mayores a 16 kN/m^3 , con un aporte de motmorillonita del 9% y humedades superiores a la humedad óptima de compactación 20%, los resultados de conductividad hidráulica fueron cercanos a $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$. Según lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, (US EPA, 1993) referente a la disposición de residuos sólidos urbanos (RSU), los valores de conductividad hidráulica deben ser de $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ o menor, lo cual indica que para suelos cordobenses, se debería trabajar con densidades secas de compactación superiores a 16 kN/m^3 , o con adición de 9% o más en el contenido de bentonita para mejorar su

desempeño hidráulico y utilizar los mismos suelos como barrera sanitaria.

- *Ascenso Capilar*: los menores ascensos capilares se registraron en probetas con densidades secas de diseño superiores a 17 kN/m^3 y con adición de bentonita en un 9%. El mejoramiento de la densidad seca de 13 kN/m^3 a 17 kN/m^3 en las mezclas produce una disminución de un 75% el nivel de ascenso capilar en tanto que el aumento de la adición de bentonita no genera importantes cambios.
- *Modelado hidráulico*: el modelo matemático de infiltración propuesto, se ajusta al comportamiento experimental que se manifestó en las diferentes mezclas de suelo limo-loessico con adición de bentonita y en suelos sin adición. Se aplicó el criterio de mínimo error cuadrático arrojando un valor de 0,74.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la Beca de Formación Doctoral al Dpto. Ingeniería Civil (UTN FRC), el apoyo de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba, Ministerio de Ciencia y Tecnología, Gobierno de la Provincia de Córdoba (PID-GRF), FONCyT y Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

AIASSA G.Y ARRUA P, 2009.

“Desempeño de barreras sanitarias simples de suelo loessico compactado”
Revista Tecnología y Ciencia, Año 8: 26-40

AIASSA G, ZEBALLOS M., ARRUA P Y TERZARIOL. 2008

“Infiltración en suelos limosos compactados”
XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. La Plata, Argentina.

ALERCIA BIGA, I. C ; ARRUA P., EBERHARDT M.G; AIASSA MARTINEZ G.A.2014

“Hydraulic Conductivity in Loessic Stabilized Soil”
Fourth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Brisbane, Australia, ISBN 978-4-9905958-3-8 C3051.

ARRUA P, AIASSA G., Y EBERHARDT M. 2011

“Behavior of collapsible loessic soil after interparticle cementation”
International J. of GEOMATE, Vol. : 130-135.

ARRUA, P; AIASSA, G. Y EBERHARDT, M.2012

“Loess soil stabilized with cement for civil engineering applications”.
International Journal of Earth Sciences and Engineering. ISSN: 0974-5904. Vol. 5, No 1:10 -18.

ASTM. D 5084, 2000

Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated porous Materials using a Flexible Wall Permeameter.

BLOOM, A.,1992

“Some Questions about the Pampean Loess”.
Paper for the Department of Geography. University of Leicester N° 23: 17-18.

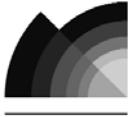
FREDLUND, D,G; RAHARDJO, H; 1993

Soils Mechanics for unsaturated soils.
John wiley and Sons.. NY. USA.pp. 124-135.

HYANG-SIG AHN, HO YOUNG JO,2009.

“Influence of exchangeable cations on hydraulic conductivity of compacted bentonite.”
Journal of Applied Clay Science, Vol 44.:144-150.

- LAMBE, T.W., 1958.
“The structure of Compacted Clay”
Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Asce, Vol. 84, Nro. SM2, 1654-34
- LOMBARDI B., BASCHINI M. AND TORRES SANCHEZ R.M., 2003
“Bentonite deposits of Northern Patagonia”
Journal of Applied Clay Science. Vol 2: 309-312.
- MITCHELL K. J., 1993.
Fundamentals of Soils Behavior.
Editorial John Wiley and Sons. Inc.
- ROCCA R., REDOLFI E. Y TERZARIOL R, 2006
“Características Geotécnicas de los Loess de Argentina”
Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6.Año 2: 149-166.
- CUISINIER, O, AURIOL, J.Cl; LE BORGNE, T; DENELEE, D; 2011.
“ Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil”
Journal of Engineering Geology. Vol. 123: 187-193.
- QIONG WANG ,YU-JUN CUI, ANH MINH TANG, BARNICHON J., SABA S., WEI YE, 2013.
“Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite/sand mixture during hydration”.
Journal of Engineering Geology. Vol 164, pp,67-76.
- INDIA SUDHAKAR M. RAO, RAVI K., 2013.
“Hydro-mechanical characterization of Barmer 1 bentonite from Rajasthan, India”.
Journal of Nuclear Engineering and Design. Vol 265: 330-340.
- SANTAMARINA J., KLEIN K, WANG Y., Y PRENCKE E ,2002.
“Specific surface: determination and relevance”.
Published on the NRC Research Press Web site at <http://cgj.nrc.ca>.
- U.S. EPA, 1993.
Solid Waste Disposal Facility Criteria Manual. Environmental Protection Emergency Response.
EPA 530 -R-93-017. Agency (5305). www.epa.gov/osw



Análisis del oleaje máximo generado por el posible colapso de una masa inestable en el lago de la presa Potrerillos (Provincia de Mendoza)

Maximum wave analysis probable generated by sudden collapse of unstable landslide into the Potrerillos reservoir (Mendoza Province)

Crinó, Edgar R. ¹ ✉ - Sales, Daniel A. ² - Gardini, Carlos E. ² - Moreiras, Stella M. ^{3,4}

Recibido: 19 de mayo de 2015 • Aceptado: 07 de noviembre de 2015

Resumen

En este trabajo se estima la altura máxima hipotética del oleaje que se produciría sobre la superficie de agua del embalse Potrerillos, debido al colapso repentino de un deslizamiento situado al pie de la ladera occidental del cerro Los Baños, en la margen nororiental del embalse, calculado en 493.000 m³ aproximadamente. El cálculo de la ola se realiza en base al modelado del área inestable aflorante por encima de la superficie del lago, a través de la selección de la superficie de rotura teórica con menor factor de seguridad. Se asume que el deslizamiento es homogéneo y de geometría triangular simétrica.

A partir del cálculo de la amplitud de la onda inicial y final en el agua, generada por la masa que se desliza sobre un plano inclinado, sin rozamiento, considerando las características topográficas del área inestable, se estima que se generaría una altura de ola de 12,90 m en el primer instante y en el sector de ingreso de la masa rocosa al agua. A medida que la onda superficial de gravedad se propaga sin pérdida de energía, llegaría a tener una altura máxima de 3,60 m tanto en la presa como en la costa opuesta, ambos situados a unos 2500 m del deslizamiento. En una situación real de un deslizamiento con rozamiento, se considera que la ola máxima estaría por debajo del nivel de coronamiento de la presa, representando un riesgo bajo hacia la misma.

Palabras claves: Deslizamiento - Embalse - Colapso.

Abstract

The hypothetical maximum height of the wave produced on the water surface of Potrerillos dam due to the sudden collapse of a landslide at the western slope foot of Los Baños hill on the dam northeastern margin is estimated on approximately 493.000 m³. The wave calculation is done based on the modeling of the unstable area appearing on the lake surface, through the selection of the desired fracture surface with the

1. Departamento de Física, Universidad Nacional de San Luis, Ejército de los Andes 950, 5700, San Luis.
 2. Departamento de Geología, Universidad Nacional de San Luis, Ejército de los Andes 950, 5700, San Luis.
 3. Universidad Nacional de Cuyo
 4. CONICET
- ✉ ecrino@unsl.edu.ar

lowest safety factor. The landslide is assumed to be homogeneous and with symmetric triangular geometry.

Considering the amplitude of the initial and end waves in the water, generated by the rocky mass sliding on an inclined plane without friction, and the topographic features of the unstable area, a 12,90-metre wave is estimated to be generated at the first moment and in the area of the rocky mass entry to water. As the gravity surface wave propagates without energy loss, the wave might reach a maximum height of 3,60 m in the dam and in the opposing coast, both located at 2.500 m from the landslide. In a real landslide situation with friction, the maximum wave is considered to be below the level of the dam crown, representing a low risk to the wave.

Keywords: *Landslide - Dam - collapse.*

INTRODUCCIÓN

En la margen noreste del embalse de Potrerillos (Provincia de Mendoza), se determinó la existencia de un deslizamiento rotacional ubicado al pie de la ladera occidental del cerro Los Baños (32°58'32" S y 69°08'40" O), que afecta a rocas sedimentarias de edad triásica y neógenas en el ámbito de la Pre-cordillera de los Andes (Figura 1).

El proceso de inestabilidad fue reconocido inicialmente por personal de la delegación Potrerillos de Recursos Naturales de la Provincia de Mendoza, durante junio de 2007.

Posteriormente, Sales et al. (2012) describen el área del deslizamiento con un largo máximo de 380 m en dirección NE-SO hacia la orilla del lago y un ancho promedio de 200 m, cubriendo una superficie aproximada de 7,6 ha. Esto constituiría una masa inestable en movimiento hacia el lago de aproximadamente 492.928,9 m³, resultado obtenido del modelado de la supuesta superficie de rotura con menor factor de seguridad. Se analizaron además cualitativamente las posibles causas que podrían haber actuado como disparador del deslizamiento, interpretando que el evento fue generado más por un vaciado rápido del embalse que por la existencia de terremotos, dadas condiciones sísmicas del sector (Zona Sísmica 1).

Moreiras et al. (2014), identifican cuál sería la perturbación de la superficie lacustre ante la caída abrupta de la masa inestable, mediante el análisis de la propagación de la onda superficial de gravedad en la superficie lacustre, que es el eje central de esta contribución.

ANÁLISIS METODOLÓGICO

En caso de producirse la caída abrupta de la masa inestable hacia el lago, por movimiento rotacional de la ladera al pie del cerro Los Baños, se generaría en la superficie del embalse un movimiento ondulatorio de marea propagándose inmediatamente a través de la superficie lacustre con una determinada amplitud de onda inicial. Ante tal evento, resulta importante estimar el máximo nivel de la ola en el instante en que el material ingresa al espejo de agua, y cual sería la amplitud de la onda superficial de gravedad que llegaría tanto a la margen opuesta del embalse y como a la presa misma, ambas distantes 2500 m del punto inicial de la ola.

Es sabido que una superficie de agua libre de esas dimensiones en equilibrio, sometida a la gravedad y a la tensión superficial, es plana y horizontal. Si se la aparta de su posición de equilibrio en algún punto por efecto de una perturbación, como la que produce por ejemplo la caída de un cuerpo sólido, se originará en el agua un movimiento ondulatorio que se propagará sobre toda la superficie líquida. Si la longitud de onda de este movimiento es lo suficientemente grande (mayor que algunos centímetros), la fuerza de restitución se debe sólo a la

gravedad y al movimiento se lo denomina *ondas de gravedad*. El movimiento de las partículas de agua de un estanque (embalse) en donde se propaga una onda de gravedad de longitud de onda λ , dependerá de la profundidad h del mismo. En el caso en que $h > \lambda/2$ las ondas se denominan de *aguas profundas* y el movimiento de las partículas de agua es circular con un radio que disminuye exponencialmente con el aumento de la profundidad. Si en cambio la profundidad del estanque es pequeña ($h < \lambda/10$) las partículas se mueven en una trayectoria elíptica y las ondas se denominan de *aguas poco profundas*.

Si un cuerpo sólido de dimensión característica L cae sobre esta superficie líquida desde una cierta altura, generará en ella un pulso constituido por una superposición de ondas de longitudes de onda diferentes. Sin embargo, el análisis de Fourier (en Gratton, 1986) confirma que la longitud de onda predominante es del orden de la extensión espacial de la perturbación inicial. La energía de la onda dependerá de su amplitud. Suponiendo que la onda preponderante en el pulso tiene una longitud de onda del orden de $2L$, la energía potencial por unidad de longitud del frente de onda puede calcularse aproximadamente asemejando la mitad del ciclo con un triángulo de altura A y base igual a media longitud de onda $\lambda/2$. Considerando que para procesos periódicos, la energía cinética es igual a la potencial, la energía total de la onda de amplitud A por unidad de longitud del frente de onda será como se expresa en la Tabla 1 (ecuación 1), en donde δ_a es la densidad del agua.

La energía total del frente de onda de longitud s , ha de ser igual a la energía potencial que posee el cuerpo de masa M_r que cae desde una altura H por encima del agua, expresado en la ecuación 2 (Tabla 1). Por lo tanto, se puede calcular la amplitud de onda A , a partir de la ecuación 3 (Tabla 1).

Asumiendo que la onda preponderante en el pulso tiene una longitud de onda del orden de $2L$ y siendo $s = 2\pi L$, la amplitud de onda A puede calcularse a partir de la ecuación 4 (Tabla 1).

Tabla 1. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la máxima amplitud de onda superficial de la ola, al momento de que la masa inestable ingrese al agua.

Descripción	Ecuación
Energía Total de la onda	$E = \frac{1}{2} \delta_a \lambda \cdot g \cdot A^2$ (1)
Energía Potencial	$M_r \cdot g \cdot H = \frac{1}{2} \delta_a \cdot \lambda \cdot g \cdot s \cdot A^2$ (2)
Amplitud de onda	$A = [2M_r H / \delta_a \lambda s]^{1/2}$ (3)
	$A = [M_r H / 2\pi \delta_a L^2]^{1/2}$ (4)
	$A(r) = [r_0(A_0)^2 / r]^{1/2}$ (5)

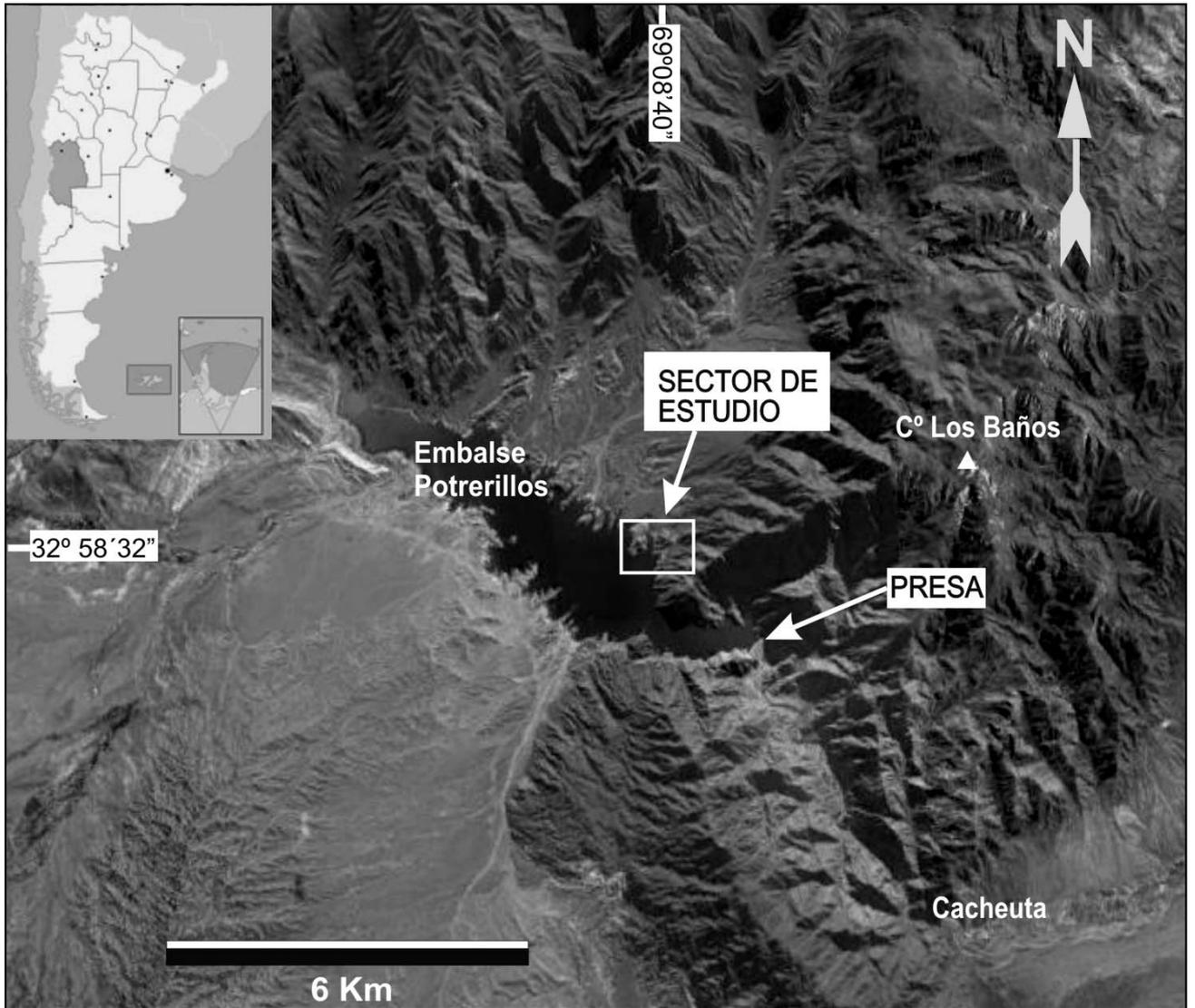


Figura 1. Mapa ubicación del sector de estudio (imagen tomada y modificada de Google Earth).

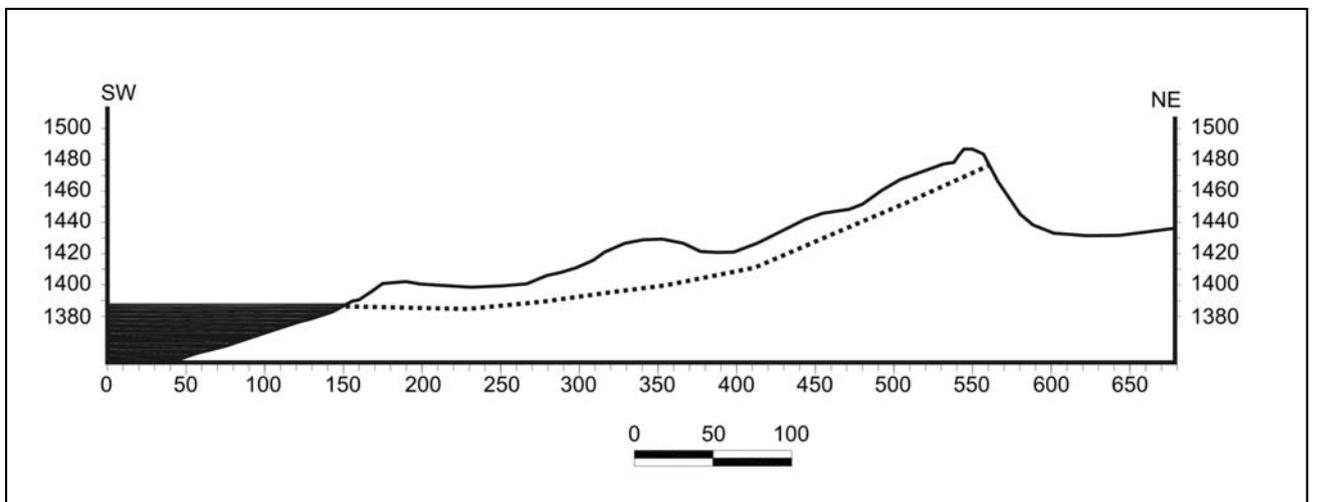


Figura 2. Perfil topográfico A-A' y superficie de rotura con menor factor de seguridad del área inestable (trazo discontinuo).

Por último, considerando que la onda se propaga sin pérdida de energía, su amplitud $A(r)$ a r metros del punto de origen ha de verificar que cumple la ecuación 5 (Tabla 1).

MODELIZACION Y CÁLCULO DEL OLEAJE

El cálculo de la máxima amplitud de la onda superficial que se podría generar en el embalse del dique Potrerillos por el deslizamiento de la ladera, según la representación topográfica de detalle, se ha efectuado haciendo ciertas suposiciones. En primer lugar se supone que la conformación del deslizamiento es homogénea y de forma triangular simétrica respecto de un plano vertical que corta a la superficie según la línea del perfil topográfico (Figura 2).

Suponiendo que la masa rocosa que se desliza hacia el agua lo hace como un todo según un plano inclinado y sin rozamiento, puede considerarse que el cuerpo sólido que cae sobre la superficie del lago tiene su centro de masa a una altura $H = 36$ m por encima del nivel de agua.

Teniendo en cuenta la ecuación 4 (Tabla 1) y bajo las condiciones mencionadas, el valor de la amplitud "A" de la onda de gravedad superficial generada por el derrumbe de la masa rocosa en estudio, determinada para el punto de origen (ingreso de la masa rocosa al agua) es de 12,9 m de altura.

A partir de la ecuación 5 (Tabla 1), se estimó el valor de amplitud de onda a una distancia "r" del sitio de ingreso de la masa inestable. Dado que: $r_0 = L$, y que las distancias (r) a la costa que se ubica en frente del punto de deslizamiento y también la correspondiente en línea recta al cierre de la presa, son, como se observa en la Figura 1, ambas aproximadamente 2500 m, se encuentra que la máxima altura de la onda que llegaría a esos puntos es: $A(2500m) = 3,60$ m.

Considerando que el cálculo se realizó para una situación ideal sin rozamiento, la altura final de la ola en esos puntos debería ser menor por lo que la misma estaría por debajo del nivel de coronamiento de la presa. Este análisis cuantitativo muestra entonces un riesgo bajo hacia la misma.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

GRATTON, J, 1986.

Arrojando piedras en un estanque,
Física, Vol. 1: 4-15.

MOREIRAS, S., E. CRINÓ, D. SALES Y C. GARDINI, 2014.

Análisis del oleaje en el lago Potrerillos (Mendoza, Argentina) por caída abrupta de la ladera inestable del cerro Los Baños.
Actas 19º Congreso Geológico Argentino, en CD. 2 al 6 de Junio, Córdoba.

SALES, D., S. MOREIRAS Y C. GARDINI, 2012.

Riesgo de deslizamiento a orillas del lago Potrerillos, Prov. de Mendoza.
10º Simposio de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, Villa Carlos Paz (Cba.), 15 al 17 de Agosto de 2012.



Condicionantes geológicos en el cruce de la sierra de Valle Fértil. San Juan

Geological constraints at the crossing of sierra Valle Fertil. San Juan

Aceituno Cieri, P. ¹ ✉ - Zeballos, M. E. ² - Rocca, R. J. ² - Martino, R. D. ² - Carignano, C. ² - Guerreschi, A. ² - Giambastiani, M. ²

Recibido: 19 de mayo de 2015 • Aceptado: 07 de noviembre de 2015

Resumen

La Ruta Nacional 150 cruza el norte de la sierra de Valle Fértil con una traza que sigue la quebrada del río Agua de la Peña y del arroyo León. Esta quebrada secciona el Pliegue de la Sierra Morada, y pone al descubierto parte de una de las mayores cuencas extensionales carbonífero-triásica conocidas en Argentina (Cuenca de Paganzo - Cuenca de Ischigualasto-Villa Unión), donde afloran sedimentitas depositadas en paleoambientes mayormente fluvio-lacustres.

Las sedimentitas de la Cuenca de Paganzo, de edades carboníferas a pérmicas, fueron depositadas en dos grandes depocentros, oriental y occidental, controlados por fallas en una tectónica de pull-apart. La primera formación, denominada Guandacol, fue depositada cercana a las fallas. Posteriormente, se depositó la Formación Tupe que registra una amalgamación progresiva de cuencas apiladas para llegar a formar una cuenca compleja con un piso irregular. Finalmente, durante una etapa de subsidencia gradual y máxima expansión, se deposita la Formación Patquía-De la Cuesta.

A lo largo de unos 40 km de extensión se han realizado distintas obras de arte, incluyendo seis túneles con forma de herradura de unos 70 m² de sección y cinco puentes, dos de ellos en arco.

Se analiza en detalle la influencia de las condiciones geológicas en cada sector.

Palabras Clave: Valle Fértil, túneles, taludes, Fm. Tuminico, Fm. Talampaya, Fm. Chañares.

Abstract

National Route 150 crosses the northern Sierra de Valle Fertil with a trace that follows Agua de la Peña River and Leon stream valley. This stream cut the Sierra Morada fold and exposes part of one of the largest Carboniferous-Triassic extensional basins known in Argentina (Paganzo Basin - Ischigualasto-Villa Union Basin). Their sedimentary outcrops were mostly deposited in fluvial-lake environment. Paganzo Basin sediment with Carboniferous to Permian age, were deposited

in two large depocentres, Eastern and Western, controlled by faults in a pull-apart tectonic. The first formation, called Guandacol was deposited close to faults. Subsequently, the formation Tupe was deposit with a gradual amalgamation of stacked basins to eventually form a complex basin with an

1. Dirección Nacional de Vialidad. D. San Juan.

2. Universidad Nacional de Córdoba. CV- F.C.E.F.N

✉ paula_cieri@hotmail.com

irregular floor. Finally, during a stage of gradual subsidence and maximum expansion, Patquía-De la Cuesta formation was deposited.

The route has 40 km long with several infrastructure works, including six tunnels with horseshoe-shaped section 70 m² and five bridges, two of them are arch bridges.

It is analyzed in detail the influence of the geological conditions in each sector.

Keywords: Valle Fértil, tunnels, slopes, Fm. Tuminico, Fm. Talampaya, Fm. Chañares.

INTRODUCCION

La Sierra de Valle Fértil esta localizada en el este de la Provincia de San Juan. Ha sido cruzada por la Ruta Nacional 150, que forma parte del corredor bioceánico que corre desde Puerto Alegre (Brasil) hasta La Serena (Chile) (Figura 1)

A lo largo de unos 40 km de extensión se han realizado distintas obras de arte siendo las principales, seis túneles con forma de herradura de unos 70 m² de sección con un total de 2000 metros y cinco puentes, dos de ellos en arco.

En el trabajo se analiza en detalle la influencia de las condiciones geológicas en cada sector, sobre las distintas obras que se han ejecutado.

CONDICIONES GEOLÓGICAS

La Ruta Nacional 150 cruza el norte de la sierra de Valle Fértil a través de una traza que sigue principalmente la quebrada del río Agua de la Peña y de su afluente, el arroyo León. Esta quebrada secciona el Pliegue de la Sierra Morada, y pone

al descubierto parte de una de las mayores cuencas extensionales carbonífero-triásica conocidas en Argentina (Cuenca de Paganzo – Cuenca de Ischigualasto-Villa Unión), donde afloran sedimentitas depositadas en paleoambientes mayormente fluvio-lacustres (Figura 2). La traza se encuentra dentro de la Reserva Natural de Ischigualasto, por lo que tiene restricciones ambientales.

Estratigrafía General

Las sedimentitas de la Cuenca de Paganzo, de edades carboníferas a pérmicas, fueron depositadas en dos grandes depocentros, oriental y occidental, controlados por fallas en una tectónica de *pull-apart* en la región central de Argentina. La primera formación, denominada Guandacol, fue depositada cercana a las fallas. Posteriormente, se depositó la Formación Tupe que registra una amalgamación progresiva de cuencas apiladas para llegar a formar una cuenca compleja con un piso irregular. Finalmente, durante una etapa de subsidencia gradual (*sag*) y máxima expansión, se deposita la Formación Patquía-De la Cuesta.



Figura 1. Ubicación del proyecto, remarcado en el este de San Juan.

Las formaciones Guandacol y Tupe pertenecerían a un complejo fluvio-deltaico continental y lacustre profundo, con transición a facies marinas. Las condiciones climáticas habrían variado de glacial-interglacial (Guandacol) a periglacial (Tupe). La Formación Patquía-De la Cuesta sería fluvial, de cursos entrelazados y de alta sinuosidad establecidos en un régimen climático cálido, árido y oxidante hasta tal punto que se desarrollan eolianitas.

En la quebrada del río de Agua de La Peña se han reconocido sedimentitas equivalentes a la Formación Tupe denominadas Formación Tuminico.

Formación Tuminico

Las sedimentitas de la Formación Tuminico están formadas por conglomerados, areniscas arcósicas, grauvacas, limolitas y lutitas pertenecientes a ciclos fluviales de tipo anastomosado y meandriforme, con episodios deltaicos y lacustres. Se reconocen restos de plantas fósiles que permiten asignarle a la Formación Tuminico una edad carbonífera media superior (Tabla 1).

La secuencia cubre en discordancia angular a los granitoides y las metamorfitas de la Sierra de Valle Fértil, truncada por una discordancia angular, sobre la que se apoyan estratos rojos de las formaciones Talampaya y Tarjados. En otros lugares de la cuenca se han identificado coladas de basaltos olivínicos alcalinos, aglomerados y tobas entre el Carbonífero y el Triásico.

Sobre la Formación Tuminico, en distintas litologías, se desarrolla el tramo del camino donde se emplaza el Túnel 7.

Cuenca de Ischichuca-Villa Unión

Las sedimentitas de la Cuenca de Ischichuca-Villa Unión, de edad triásica, se han depositado en una depresión elongada NO-SE producida por una tectónica extensional que generó una geometría en hemigraben, cuyo margen activo fue el lineamiento Valle Fértil ubicado al oeste. Estas sedimentitas se encuentran muy bien desarrolladas en los bolsones del Bermejo y Pagancillo y se exponen entre el Cerro Bola y la Hoyada de Ischigualasto. A la altura de la quebrada del río Agua de la Peña se puede apreciar casi toda la secuencia completa de este Triásico continental único en el mundo.

La cuenca está compuesta por dos unidades estratigráficas bien diferenciadas entre si: las formaciones Talampaya y Tarjados y el Grupo Agua de la Peña integrado por las formaciones Ischichuca (incluyendo la Formación Chañares), Los Rastros, Ischigualasto y Los Colorados (Tabla 2).

Formaciones Talampaya y Tarjados

La Formación Talampaya sobreyace en discordancia angular sobre el Pérmico (aunque en la quebrada del río Agua de la Peña lo hace sobre Carbonífero), mientras que una discordancia erosiva la separa de la Formación Tarjados. Conjuntamente están formadas por areniscas rojas de grano fino, rojo pálido (Talampaya) sobrepuestas por la discordancia mencionada por conglomerados y areniscas rojizas seguidas por areniscas blanquecinas finalizando en un nivel de fñanita (Tarjados).

El ambiente de depositación de la Formación Talampaya tendría tres secuencias depositacionales de la sección inferior a la superior: facies de abanicos aluviales, flujos de detritos,

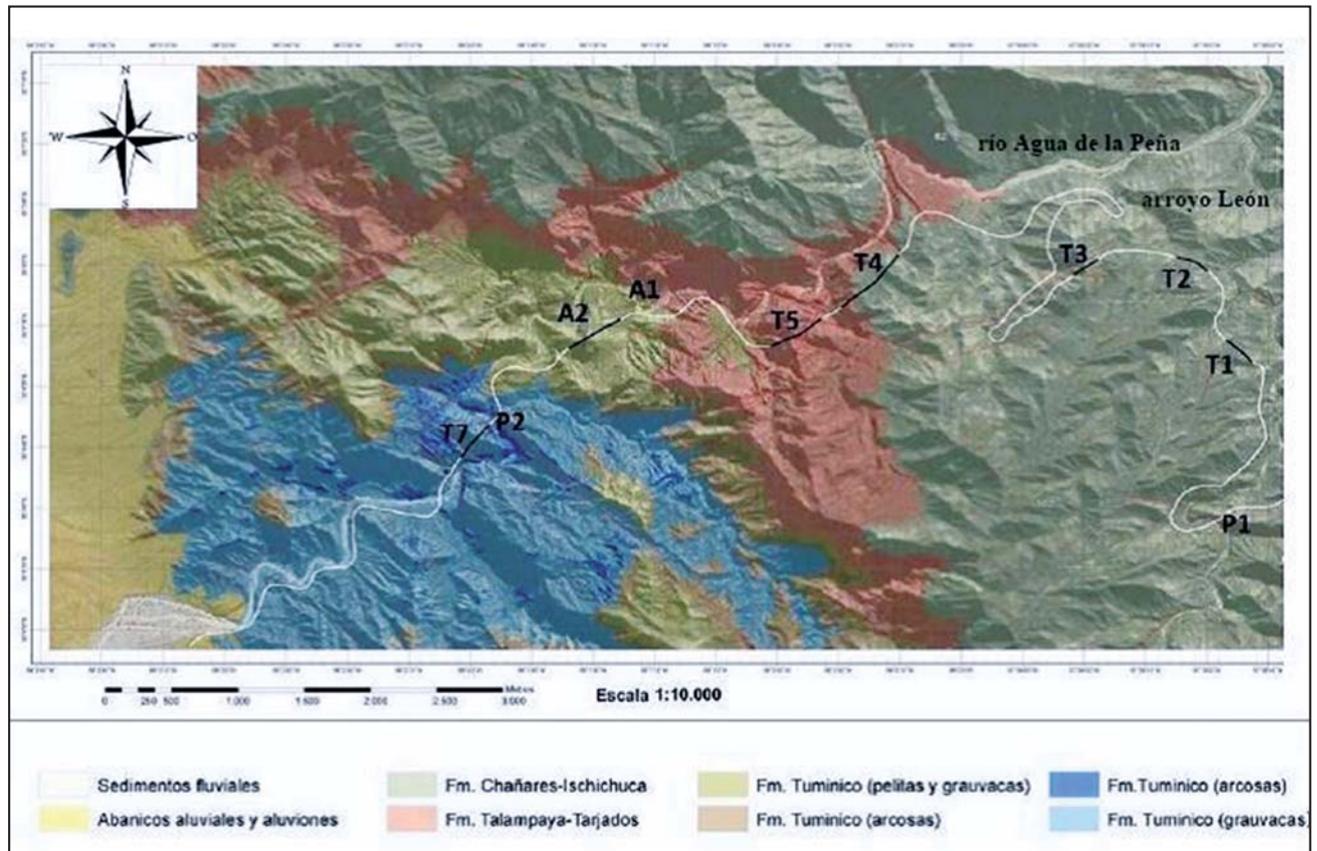


Figura 2. Ubicación de Túneles (Ti), Puentes (Pi) y Puentes en Arco (Ai) en los distintos ambientes geológicos.

Tabla 1. Columna estratigráfica de la Formación Tuminico (Cuerda et al. 1979).

EDAD	Espesor (m)	LITOLOGIA	ESTRUCTURAS	PALEOAMBIENTES
Carbónico Medio a Superior	M 205	Arenisca de grano fino laminadas	Rodados rocas metamorficasLenticular	lacustre
	L 230	Areniscas de grano grueso	Rodados rocas metamorficas Erosivo	
	K 127	Areniscas y conglomerados		corriente de barro lacustre
	J 86	Areniscas de grano fino	Lenticular	lacustre fluvial
	I 383	Areniscas de grano grueso con brechas y conglomerados	Erosivo	
	H 233	Areniscas de grano fino laminadas con conglomerados	Bloques 2 m diámetro laminación plegada	fluvial meandriforme
	G 274	Areniscas de grano fino, laminados	Erosivo Tangencial	ciclo fluvial
	F 112	Areniscas de grano fino		lacustre
	E 112	Areniscas de grano fino con ondulitas		canales interdistribuidos
	D 425	Areniscas de grano grueso con conglomerados y brechas	Plegamiento sin sedimentario Erosivo Artesa Arcosas Erosivo	anamostomado a meandriforme
	C 124	Areniscas de grano grueso	erosivo	fluvial meandriforme
	B 212	Lutitas con areniscas de grano fino, laminados	falla erosiva arcosas	
A 150	Areniscas de grano grueso con brechas		fluvial anastomosado	
Pre-Cámbrico		Gneiss tonalítico ambibolita		

Tabla 2. Columna estratigráfica del Triásico de la Cuenca Ischigualasto (Stipanovic, 2002).

Formaciones cretácicas y terciarias			
<i>discordancia angular</i>			
Grupo AGUA DE LA PEÑA	formación LOS COLORADOS (100 - 1000 m)	Superior	segundo postrift
		Inferior	
	Formación ISCHIGUALASTO (200 - 900 m)	Superior	segundo sinrift
		Inferior	
(575 -3600 m)	Fm. LOS RASTROS (200 - 1000 m)		primer postrift
	Fm. ISCHICHUCA (incluye Fm. CHAÑARES) (75 - 750 m)		primer sinrift
<i>discordancia angular</i>			
PAGANZO III (600 m)	Fm. TARJADOS (0 - 250 m)		
	Fm. TALAMPAYA (0 - 400 m)		
<i>discordancia angular</i>			
Basamento cristalino precámbrico, sedimentitas neocarboníferas y eopermicas			

barreales y sedimentos eólicos; siguen depósitos aluviales entrelazados con algo de materiales eólicos e intercalaciones de basaltos. La Formación Tarjados sería de origen aluvial con participación eólica menor.

Los Túneles 5 y 4 se emplazan dentro de estas formaciones.

Grupo Agua de la Peña

A los fines de brevedad, sólo se describirán las formaciones Ischichuca y Los Rastros que afectan a las obras.

Las formaciones Ischichuca y Los Rastros tienen distintas facies y representarían diferentes situaciones paleogeográficas de un mismo sistema depositacional (fluvio-deltaico-lacustre). La primera está dominada por pelitas negras (facies lacustres) y areniscas finas a gruesas con un arreglo grandecreciente. El ambiente correspondería a facies distales de sistemas fluvio-deltaico-lacustres. En transición, se pasa a la Formación Los Rastros formada por areniscas verdosas dominantes y pelitas carbonosas de ambientes fluviales y deltaicos. Hacia la parte superior, los depósitos fluviales se canalizan en cuerpos arenosos-conglomerádicos con estratificación cruzada y en artesa. El conglomerado de las Peñas pertenecería a estos niveles conglomerádicos.

Los Túneles 3, 2 y 1 se emplazan en estas formaciones.

Estructura General

Esta zona se ubica en el norte de la Sierra de Valle Fértil, localizada en el borde de las Sierras Pampeanas Occidentales, en la zona limítrofe con la Precordillera, a lo largo de una megaestructura tectónica que marca el límite entre ambas provincias geológicas y que habría sido activa desde épocas paleozoicas. Esta megaestructura, conocida como lineamiento Valle Fértil, ha sido reactivada a fines del Terciario por la compresión Andina (Rosello et al 1996).

La configuración tectónica que presenta es la responsable del actual estilo estructural de deformación de zócalo (*thick-skinned tectonic*) en el ámbito de las Sierras Pampeanas, es decir bloques de basamento ascendidos y limitados por profundas y antiguas fallas que han sido reactivadas en el Terciario, deformando por plegamiento/fallamiento la cobertera sedimentaria, que no se desacopla en la deformación sino que acompaña al basamento durante ese proceso.

El principal efecto de la orogenia Andina es la producción de cuencas de antepaís generadas por sobrecarga tectónica, rellenas con sedimentos continentales, que se superponen a cuencas sedimentarias previas. Por debajo de los sedimentos terciarios de antepaís se preservan, de modo discontinuo, sedimentitas depositadas en cuencas extensionales carboníferas, pérmicas y triásicas.

Por esta causa, los bolsones y relictos de aquellas cuencas conservados en los bloques elevados de las sierras, preservan características estructurales extensionales heredadas de los procesos paleozoicos-mesozoicos y compresivas de los procesos andinos cenozoicos.

El lineamiento Valle Fértil se dispone con un rumbo NNO-SSE a lo largo de más de 700 Km y se lo reconoce tanto en superficie como en subsuelo por el alineamiento de varios pliegues anticlinales que deforman sedimentitas mesozoicas y exhiben núcleos de sedimentitas neopaleozoicas o basamento cristalino.

Las sedimentitas carboníferas-triásicas en la quebrada del río Agua de la Peña están plegadas siguiendo un anticlinal, con eje buzante al norte con bajos ángulos y plano axial subvertical, ambos orientados hacia el NNO. En profundidad, el pliegue anticlinal de la Sierra Morada ha sido interpretado como efecto de una estructura en flor positiva nucleada en el basamento como reactivación del lineamiento Valle Fértil.

Sobre el flanco oriental del pliegue, orientado con un rumbo general NO a E-O, localmente con buzamientos entre 10-25° al ENE, se encuentra la discordancia angular entre el Carbonífero y el Triásico. Esta discordancia angular actualmente inclina 10-15° hacia el este, siendo oblicua con muy bajo ángulo con el plano de estratificación de las sedimentitas carboníferas. Por encima, se disponen las sedimentitas triásicas que inclinan 20-25° hacia el este.

En el flanco descripto, dominado por una estructura planar penetrativa (plano S_0 de sedimentación-estratificación) y afectado por fracturamiento, diaclasado y fallamiento, se disponen la traza la Ruta Nacional N° 150.

DESCRIPCION DEL PROYECTO

El diseño de la traza sigue los lineamientos modernos de caminos de montaña.

Los túneles tienen la misma sección en forma de herradura de unos 12 metros de ancho y 8 metros de altura, aproximadamente. La porción circular tiene un radio interno de 5,68 m. El área es de alrededor de 70 m², que incluye la calzada y sectores laterales. El gálibo mínimo, en sentido vertical es de 5,25 m. Fueron diseñados siguiendo los criterios del manual del PIARC de "Diseño de Secciones Transversales para túneles carreteros bidireccionales" de 2004.

Se adoptó el criterio de reducir la pendiente longitudinal lo máximo posible, variando entre 1,7% (Túnel 7) a un máximo de 2,9% (Túnel 1).

El soporte de los túneles fue previsto mediante estimaciones del método RMR (Bieniawski, 1989) y Q (Barton et al, 1974). Las soluciones se dividieron en cinco casos de sostenimiento, modificados de las provisiones del método RMR. Se efectuó un seguimiento continuo del frente de excavación para verificar las condiciones reales del macizo y definir el sostenimiento a aplicar en cada caso.

En los sectores con fallas, se emplearon adicionalmente, anclajes tipo swellex y enfilados (spiling) (Aceituno Cieri et al 2014).

Para asegurar la estabilidad de la excavación en la zona de los portales de los túneles, se ejecutó un paraguas de micropilotes de 4" de diámetro, 16 m de largo y espaciados 0.4m conforme se observa en la Figura 3a.

Esta corona sirvió además para solidarizar la armadura de la viga de vinculación con la estructura de hormigón de los portales (Figura 3b).

Debido a las dimensiones de los túneles, el método de excavación utilizado consistió en la excavación en avance (bóveda) y destroza (banco). La excavación de avance se realizó mediante un piloto central de 4,5 m x 4,5 m central y posterior desquinche lateral (figura 3b).

Las excavaciones y su posterior sostenimiento fueron monitoreadas mediante mediciones de convergencia para poder verificar la estabilización de la convergencia a medida que se avanzaba con el frente del túnel.



Figura 3. a) Ejecución de paraguas de micropilotes. b) Viga de vinculación del paraguas.

COMPORTAMIENTO DE FORMACIONES

Los macizos rocosos sedimentarios presentan gran variabilidad de propiedades geomecánicas por lo que se han generado distintos problemas en cortes en laderas y en la excavación de los túneles. Las características de los mismos dependen de la orientación de las obras, con relación a la litología y geoestructuras presentes. Se describen algunos casos significativos.

Formación Tuminico (Carbonífera, grauvacas y arcosas)

El macizo rocoso perteneciente a esta formación tiene alguna variabilidad geomecánica. Los ensayos de compresión simple se encuentran en el rango de 80 Mpa mientras que la compresión diametral alcanza a 9,9 Mpa.

Afectación en obras superficiales

En un ejemplo del comportamiento se encuentra en la progresiva 34200 a 400, donde la traza tiene una orientación N 0° a N 20° de sur a norte.

Las rocas predominantes son grauvacas grises con clastos de rocas ígneas, metamórficas y de cuarzo y con clastos de areniscas blancas intensamente deformados, alargados, paralelos al plano de estratificación S_0 , que está orientado N 150°/15° E.

Las principales discontinuidades son además del Plano de estratificación S_0 , tres juegos de diaclasas (uno dominante) y fallas oblicuas a S_0 .

El juego de diaclasas dominante denominado J1 tiene una orientación general N 212°/85° SE con un espaciado de 5-30 cm. J1 se combina con otro juego de diaclasas denominado J2, formado por planos únicos o por un conjunto de fracturas apretadas de disposición planar sin llegar a ser un clivaje de fractura. J2 se orienta N 270°/85° S y tiene un espaciado aproximado de 5 m. También lo hace con otras diaclasas denominadas J2', N 302°/70° S, también con espaciados del orden de metros. El resultado de la combinación de J1-J2 y J1-J2' es la formación de bloques en forma de cuña, de gran tamaño, alargados verticalmente, con ejes de intersección N 142°/84° y N 190°/70° respectivamente (figura 4a).

Las fallas reconocidas están orientadas N 183°/80° E y N 350°/85° O respectivamente. Ambas se hallan donde el talud cambia de rumbo a N 20°. La primera falla de las nombradas es la más importante, tiene relleno arcilloso (cm-dm).

La otra falla, casi paralela a la anterior, es de poco espesor (cm), tiene rellenos de calcita en los que se reconoce una estría orientada N 310°/75° indicando movimientos inversos con componente sinistral en planta.

Esta configuración geoestructural produce casos de volcamiento o rotacional que supone la rotación de columnas o bloques de roca, que se produce cuando dos familias de discontinuidades ortogonales convenientemente orientadas originan un sistema de bloques (figura 4b). El empuje sobre los elementos inferiores origina su desplazamiento, lo que permite la rotación de los superiores, progresando el fenómeno hasta la rotura definitiva.

Para solucionar este problema, se propuso y ejecutó la modificación de la sección transversal con contratalud en el sector indicado a un perfil con un talud 1h:2v, con bermas de 3 metros de ancho cada 10 metros de altura.

Afectación en obras subterráneas

En esta formación se emplaza el túnel 7 (de 312 m) donde se encuentran areniscas color marrón rojizas (pátina natural), formadas por grauvacas grises en corte fresco. Se presentan bien estratificadas, con estratos planares de espesor variable (0,5-0,10 m hasta 1 m). A esta estructura planar primaria se la identifica como plano S_0 . Se intercalan en las grauvacas grises, pequeñas capas lentiformes de areniscas blancas, de espesores centimétricos. A veces hay clastos redondeados de estas capas.

En la entrada del túnel, las areniscas color marrón rojizas presentan grandes capas lentiformes de areniscas blancas (arcosas), de espesores métricos que se intercalan en las grauvacas grises. El plano S_0 es ondulado aquí a escala del metro.

Las principales discontinuidades son: Planos S_0 , diaclasado vertical (dos juegos de diaclasas), falla directa (figura 5a).

El plano S_0 tiene una orientación media de N 116°/17° NE, con un espaciado entre 0,5-1 m.

Las diaclasas, J1 y J2, coincidentes con las diaclasas descritas para la salida del Túnel 7 (Fig. 5b), están orientadas N 200°/90° y N 300°/75° SO respectivamente. J1 está espaciada 30-45 cm, mientras que J2 lo está a 70-80 cm, un poco más que las diaclasas J2 de la salida del Túnel 7. Aquí también ambas diaclasas poseen un halo de alteración ferruginosa de unos 2 cm de espesor.

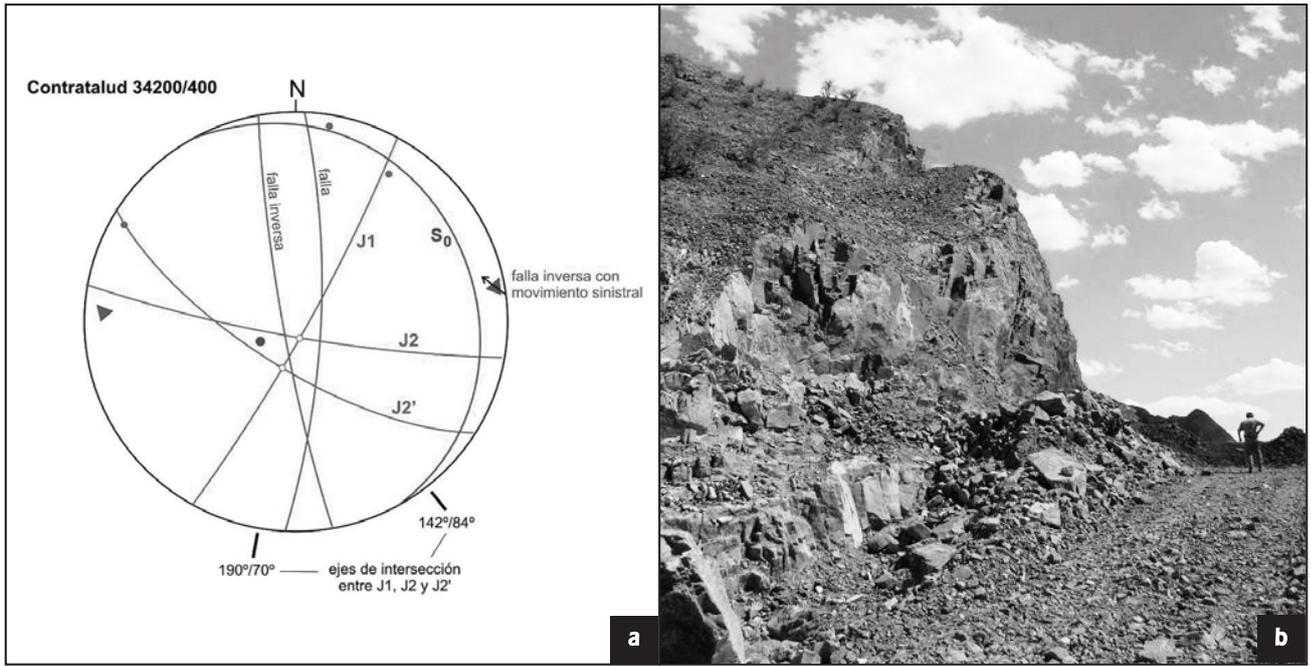


Figura 4. a) Proyección de discontinuidades. b) Vista del volcamiento.

La combinación de las dos diaclasas subverticales y el plano S₀ produce prismas alargados subverticales, de sección cuadrada o triangular. El largo de estos prismas suele ser superior al metro (figura 6).

A la entrada del túnel hay una falla de naturaleza directa, orientada N 300°/75° NE, tiene 0,50-1 m de espesor y está rellena con un material cataclastizado derivado de la arenisca, de color pardo por óxidos de hierro. Este relleno presenta una diaclasado extensional orientado N 308°/60° O. Esta falla es consistente con las que se reconocen a la salida del Túnel 7.

En la salida del T7, el plano S₀ de sedimentación está orientado N 110-140°/10-20° N, con espaciados variables entre 0,5-10 m. (Figura 5b)

Se reconocen tres juegos de diaclasas: J1, orientada N 210°/85° SE; J2, orientada N 304°/85° SO; J3, orientada N 10°/10° E. J1 es la más desarrollada, puede variar en el rumbo

y el buzamiento, presenta sus planos con una alteración ferruginosa bien marcada al igual que J2 y el espaciado es de 20-25 cm. J2 tiene un espaciado de 15-30 cm. Ambas combinadas con S₀ dan lascas de 30 x 30 cm y menores, generando bloques prismáticos triangulares o cuadrados, alargados subverticalmente de dm a m de largo. Cabe agregar que J2 suele presentar relleno de cuarzo menor a 1 cm. J3 es un juego oblicuo al conjunto y sólo reconocido a la salida del túnel en su hastial derecho; está orientada N 10°/10° E. No son planares sino que se curvan un poco hacia la clave del túnel. Esta última figura esquematiza en 3D las relaciones entre las discontinuidades de la salida del Túnel 7.

La geometría del diaclasado favoreció la sobrexcautación del túnel por formación de cuñas verticales (combinación de S₀, J1 y J2), a lo que se sumaron la fracturación secundaria producida por explosiones (Figura 6).

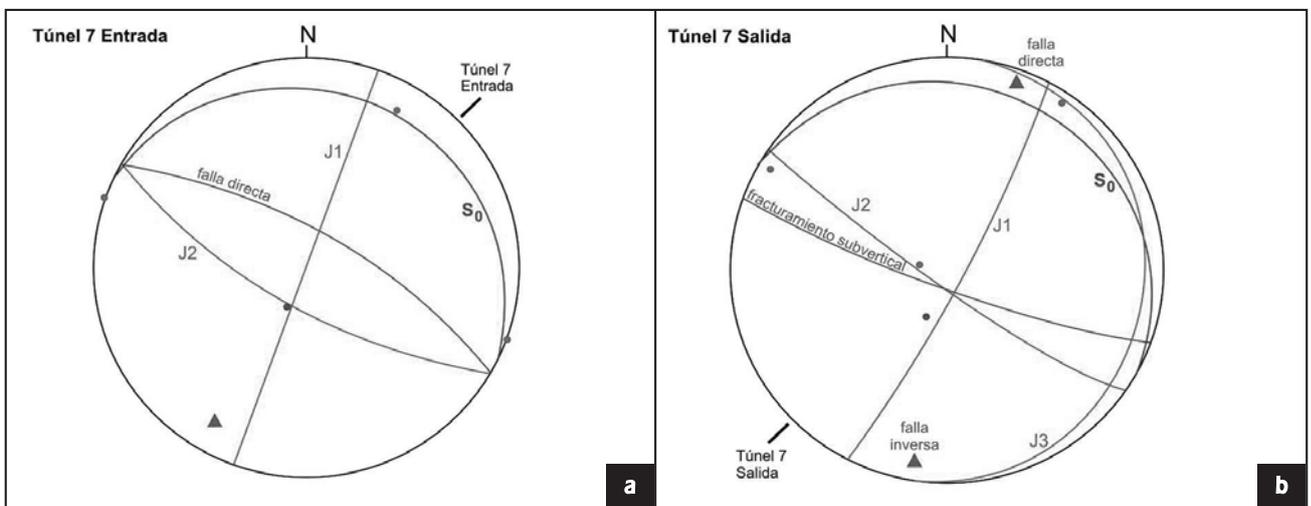


Figura 5. Proyección de discontinuidades. a) entrada y b) salida del T7.

El sostenimiento empleado consistió en anclajes pasivos y shotcrete, en espesores de los tipos 2 y 3 del sostenimiento RMR. En zona de muy baja cobertura (menos de 10 metros) por presencia de una quebrada superficial, se pasó con un túnel piloto y cerchas en toda su extensión.

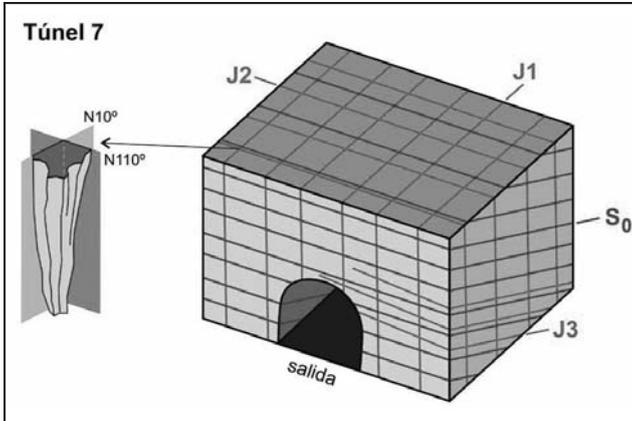


Figura 6. Block diagrama del T7 con las discontinuidades predominantes.

Formación Tuminico (pelitas)

Afectación en obras superficiales

En el caso se describe, correspondiente a uno de los estribos del puente A2, que por ser de Arco requiere niveles de deformaciones pequeños. El estribo está emplazado en un sector donde predominan areniscas finas competentes. Sin embargo, la estratificación subhorizontal de las areniscas es muy marcada con discontinuidades que se aprecian visualmente desde el margen opuesta (Figura 7).

La compresibilidad del macizo puede estimarse computando las aperturas de las discontinuidades. .

Se observa que las principales discontinuidades tienen continuidad a lo largo de la excavación y por consiguiente, se prolongan por debajo del plano de fundación del estribo.

La sumatoria de las aperturas de las discontinuidades medidas en el frente de excavación está en el orden de los 40 mm. Desde el punto de vista estático, es poco probable que se cierren

cuando se la solicite externamente con las estructuras del puente.

En caso de sismo se puede producir la rotura de las asperidades que limitan las discontinuidades, produciéndose asentamientos, cuyo límite estará dado por la sumatoria de las aperturas.

Para evitar asentamientos nocivos del estribo en caso de sismo, se planteó una fundación profunda del mismo, con transmisión de las cargas por debajo de las discontinuidades, por medio de pilotines. Para materializarlos, se emplearon caños huecos de 4 pulgadas, tal como los que fueron usados en los paraguas de los portales de túneles.

Formación Talampaya-Tarjados (Triásico, areniscas y conglomerados)

La traza del camino atraviesa las distintas formaciones de areniscas y conglomerados a través de cortes a media ladera o en cajón, los que afectan la estabilidad de las mismas. Se han producido inestabilidades de bloques que abarcan una variada topología, aunque las soluciones más empleadas han sido la remoción de los mismos. Los ensayos realizados sobre muestras han arrojado una resistencia a la compresión simple de 80 Mpa y a la tracción de 4 Mpa.

Afectación en obras subterráneas

En esta formación se emplazan los túneles T5 (de 440 m) y T4 (de 542 m).

Predominan areniscas rojas con estratificación entrecruzada, con niveles de arcillas rojas y capas y lentes de material conglomerádico matriz-soportado. El espesor varía entre decímetro–metro, siendo los estratos de la entrada del túnel de mayor espesor que los de la salida.

Las principales discontinuidades son Planos de estratificación S0, diaclasas (tres juegos), fallas directas, zonas de fracturas con deslizamientos en cuña tipo graben (denominadas aquí zFr) y zonas tabulares de fracturación denominadas Fr.

Los planos de estratificación S0 varían desde N 134°/29° NE en la salida del túnel a N 113°/12° E a la entrada (en planta los planos S0 se abanicaban hacia el este y en corte se horizontalizan en el mismo sentido), posiblemente por efectos de rotación debido a fallas directas. En la salida tiene un rumbo N 20° y en la entrada N 40° (Figura 8).



Figura 7. a) Vista de fundación del estribo y b) detalle recuadrado de base del puente arco A2 sobre el río Agua de la Peña.

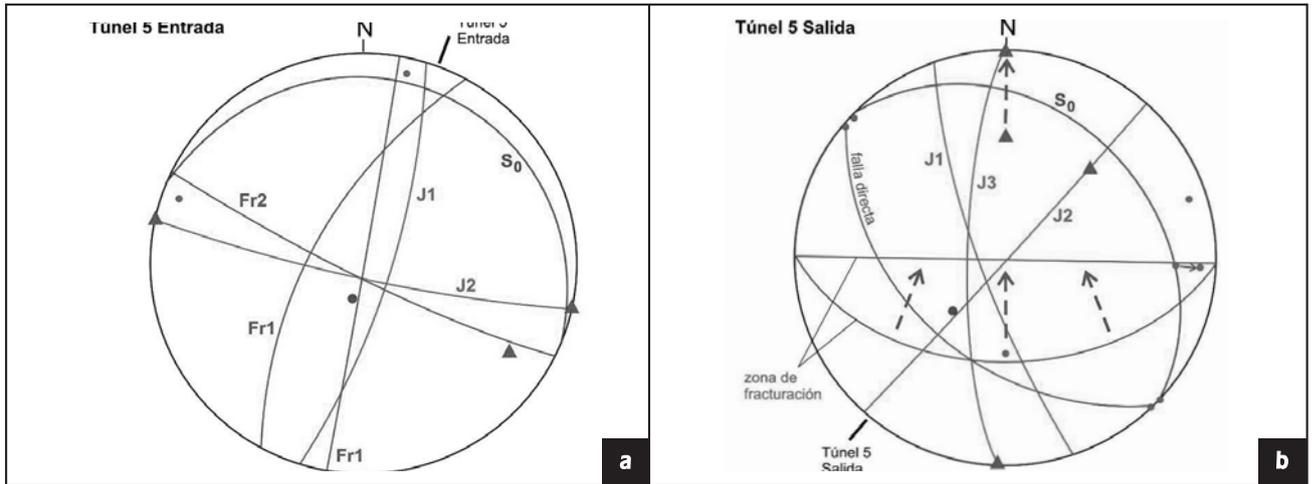


Figura 8. Proyecciones de discontinuidades en el Túnel 5.

En la *entrada* del túnel hay 2 juegos de diaclasas: J1, orientada N 198°/80° E (dominante) y J2, orientada N 282°/85° S (subordinada). Los espaciados son del orden de decímetro-metro. Debe notarse aquí la orientación diferente de las diaclasas y la ausencia de J3 con respecto a la *salida* del

El cambio en la orientación de las diaclasas sigue el cambio en la orientación del plano S₀ mencionado más arriba y también un espaciado menor entre los planos S₀.

En la *salida* del túnel se reconocen tres juegos de diaclasas: J1, N 340°/80° SO; J2, N 40°/90°. Un tercer juego de diaclasas (J3), orientadas N 0°/70-80° O, bisecta a los juegos anteriores. Los espaciados son del orden de decímetro-metro (Figura 8).

Tanto las fallas como las fracturas cortan de forma oblicua, con bajos y altos ángulos, al Túnel 5. Además, en tres sectores las fallas directas y las fracturas Fr1 fueron atravesadas durante la construcción del túnel.

Las excavaciones del T5 recibieron tipos de sostenimiento S2 (11%), S3 (81%) y S4 (8%). Se atravesaron algunas fallas menores subverticales y perpendiculares al eje del túnel.

Los principales problemas encontrados durante la excavación fue la caída de bloques de roca formados por la combinación de las familias de discontinuidades. Estas caídas provocaron algunas sobre excavaciones importantes en el sector de la bóveda (figura 9b).

Por último, cabe aclarar que las condiciones de entrada y salida del Túnel 4 son análogas a la del Túnel 5 (orientación media N 30°). La entrada del Túnel 4 es N 40° mientras que la salida es N 50° (orientación media ≈ N 45°).

La excavación del túnel 4 se desarrolló en macizos con sostenimiento tipo S2 (23%), S3 (75%) y S4 (2%) y en condiciones secas. Se observó una falla importante entre progresivas 29+330 y 29+344. Se identificaron las 3 familias de discontinuidades descriptas.

Los principales problemas de estabilidad del macizo rocoso presentes en las excavaciones estuvo relacionado con la remoción de cuñas rocosas inmediatamente después de la voladura y durante el saneo de las excavaciones.

Uno de los problemas más importantes relacionado con los portales de ambos túneles fue la mitigación de caída de bloques de las laderas sobre los mismos. Se estudiaron varias soluciones consistentes en prolongación de falso túnel, más allá de

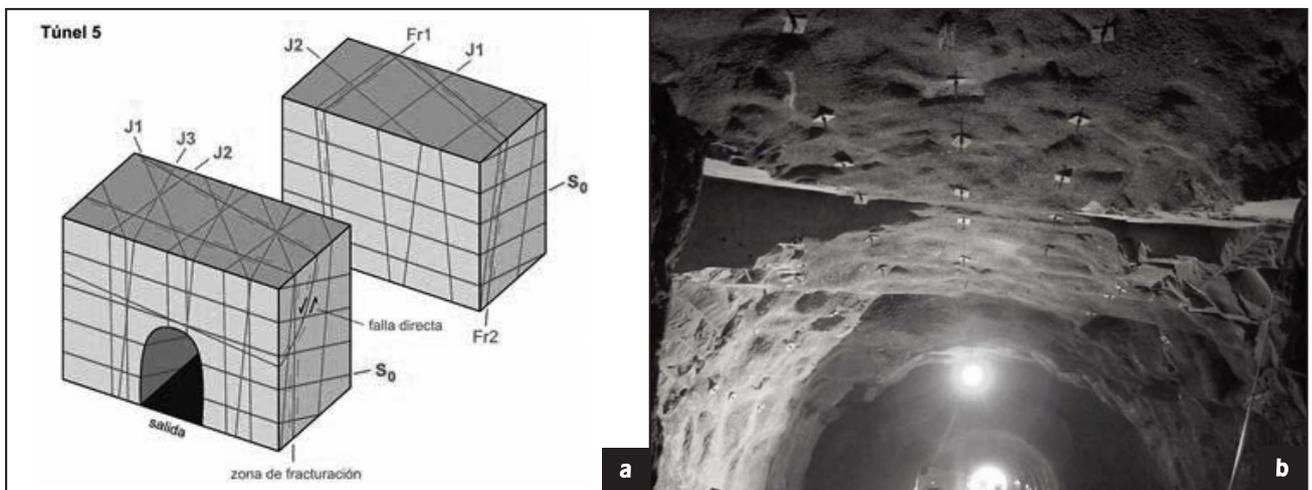


Figura 9. a) Block diagrama de T5 y T4. b) Cuñas caídas de la bóveda.

los 5 m que tenían por diseño, en función de la proyección de la caída de bloques. Finalmente, se optó por la colocación de barreras dinámicas con la capacidad de deformarse para contener esas caídas (Figura 10).



Figura 10. Mitigación de caída de bloques en los portales de salida del T5, con barreras dinámicas.

Formación Chañares-Ischichuca (Triásica, areniscas y limolitas)

Esta formación ha tenido un comportamiento muy diferente a las anteriores, tanto en obras superficiales como subterráneas. La resistencia a la compresión simple es de 50 Mpa y a la tracción es de 3 Mpa. La alternancia de areniscas y pelitas con distintos espesores de estratos produce distintos fenómenos erosivos superficiales.

Afectación en obras superficiales

En relevamientos de imágenes se pudo detectar la existencia de sistemas de fallas directas que han producido deslizamientos de distintas magnitudes (figura 11a). Alguno de ellos se produjeron durante la construcción y otros luego de importantes lluvias (Figura 11b).

Entre las progresivas 22+090 hasta la 22+380, se produjo durante la construcción un incidente significativo, con falla circular del macizo e invasión de la traza. Posteriormente, se pudo observar que los monolitos de medición no mostraban signos de movimiento.

Para verificar el estado de seguridad del talud en las condiciones previas al deslizamiento, se realizó un modelo numérico del talud para simular el deslizamiento observado. Habiéndose verificado la falla, se realizó un retroanálisis para determinar las propiedades medias resistentes del terreno que justifiquen el deslizamiento observado. En la Figura 12 se muestra una fotografía del sector donde puede observarse la cuña de deslizamiento, y se presentan los resultados de la modelación del talud donde se obtiene mediante retroanálisis un factor de seguridad ligeramente inferior a 1, que representa lo ocurrido en el deslizamiento.

Como solución, se relocó la traza en este tramo, luego de alivianar la masa deslizada y canalizar vías de escurrimiento superiores.



Figura 11. En a) se observan paleodeslizamientos, mientras que en b) se presenta uno reciente.

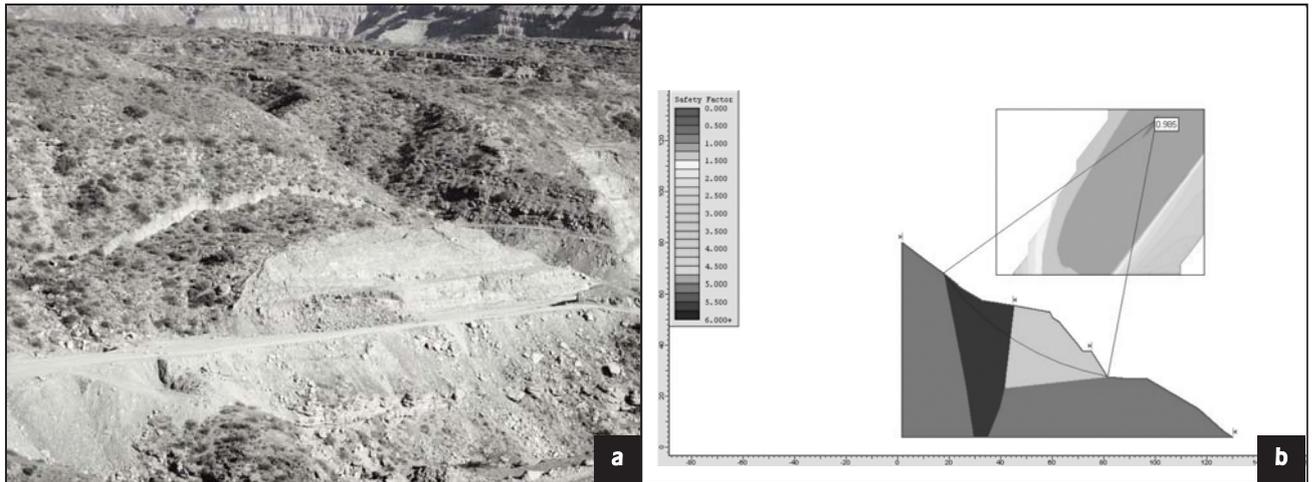


Figura 12. a) Vista de un deslizamiento circular y b) modelación de la estabilidad.

Otro de los fenómenos más comunes de esta formación está constituido por el descalce de estratos rígidos de areniscas por erosión de estratos débiles inferiores, constituidos por lutitas. En general, el buzamiento de ambos es subhorizontal.

Una vez realizada la excavación, las lutitas inferiores, tienen una tendencia a la meteorización en forma acelerada, por lo menos en su componente superficial. Con el paso del tiempo, y las oscilaciones diarias térmicas, o la acción del viento, el material sufre desecación y procesos de contracción y dilatación. En consecuencia se fragmenta y pierde sus componentes cohesivos.

Las areniscas superiores, se presentan en forma de bloques de dimensiones métricas, con planos de diaclasamiento subverticales. Muchos de estos planos se encuentran soldados, dando a la formación una apariencia de medio continuo. La realización de la excavación, y el desconfinamiento lateral de la arenisca tiende a producir la formación de las discontinuidades en sentido vertical, lo cual hace que este nivel ejerza una baja contribución resistencia en la estabilidad global. Cuando la fisura vertical se ha formado, el nivel actúa como una sobrecarga del nivel de lutitas.

Este tipo de problemas amerita el tendido de los cortes y en lo posible, el uso de shotcrete para evitar la erosión.

Afectación en obras subterráneas

Los túneles T3 (203 m), T2 (260 m) y T1 (180 m) se emplazan en esta formación. El conjunto litológico está conformado por areniscas finas limosas y tobáceas, con intercalaciones de limolitas y lutitas oscuras (raramente carbonosas). Hacia arriba gradan a facies de areniscas finas y sedimentos heterolíticos mayormente constituidos por areniscas muy finas y pelitas laminadas intercaladas con bancos de lutitas oscuras. En el Túnel 3 predominan los términos más arenosos, mientras que los Túneles 2 y 3 se ubican en las facies heterolíticas y lutíticas.

Las discontinuidades estructurales reconocidas fueron el Plano de estratificación S0, diaclasas (J1 y J2), fracturas y deslizamientos.

El plano S0 de estratificación tiene una orientación N 124°/15° N. Todo el conjunto litológico está profusamente

diaclasado, lo que afecta más a los términos pelíticos que areniscos. Se reconocen dos juegos de diaclasas: J1, orientada N 98°/90° con un espaciado aproximado de 30 cm, es la más penetrativa y desarrollada. Paralelamente a J1 se desarrolla un clivaje de fractura que genera, en lugar de un plano J1 nítido, una zona tabular de ancho variable a escala decimétrica; J2, orientada N 180°/85° O con un espaciado similar a J1. El efecto del clivaje de fractura y la combinación del diaclasado con S0 genera bloques menores a 30 x 30 cm, con espesores de cm (lajamiento) en las areniscas y aún menores en las pelitas (lascas). También es posible observar que existen otros juegos menores de diaclasas, orientados según J1, con una inclinación variable de alto ángulo tanto al norte como al sur.

En las cercanías de la salida del Túnel 2, se reconocen fracturas de 20-30 cm de ancho, espaciadas 2-3 m, afectando a areniscas laminadas. Están orientadas N 120°/90°.

Se han observado también aquí zonas de deslizamientos, probablemente inducidos por sismicidad.

En el Túnel 3, que posee un rumbo de N 55°, el plano S0 es casi paralelo al eje del túnel, mientras que buza unos 15° perpendicularmente a él (Figura 13).

En el Túnel 2, que posee una curvatura en planta de N 110° a la salida y de N 130° a la entrada, la relación de S0 con las trazas perpendiculares y paralelas a cada una de las orientaciones son diferentes (Figura 13b). La traza paralela al eje del túnel varía desde 5° de buzamiento a casi paralela (1-2°) desde la salida a la entrada respectivamente. Perpendicular al eje del túnel y mirando hacia la salida, la traza de S0 es paralela y subhorizontal en ambos tramos del túnel.

En el Túnel 1, y paralelamente a su eje, S0 es oblicua con 12° de buzamiento, mientras que perpendicularmente al eje del túnel es paralela subhorizontal.

En los túneles 1 y 2, excavados en la secuencia rocosa predominantemente pelítica, debido a la posición subhorizontal de las capas, el mecanismo de debilitamiento del macizo se concentró fundamentalmente en la clave del túnel mediante la movilización y caída de placas de roca (Figura 14). En menor medida se observaron caída de pequeños bloques de tamaños centimétricos a decimétricos.

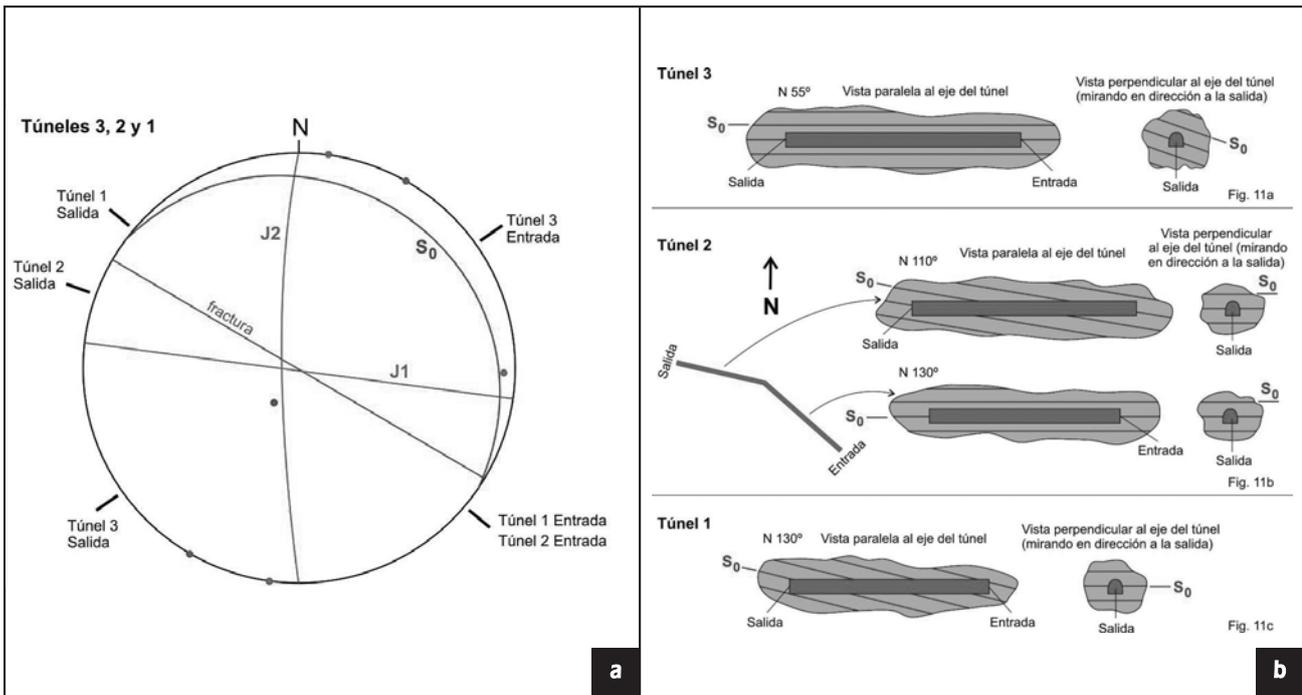


Figura 13. Relación entre el plano de discontinuidad principal S_0 y el eje del túnel (esquemático).



Figura 14. disposición de pelitas del frente de excavación.

La excavación del túnel 1 se desarrolló en macizos predominantemente de tipo S3 (84%) y S4 (16%) y en condiciones secas. Solo se encontró una falla menor entre progresivas 22+530 y 22+566.

La excavación del túnel 2 se desarrolló en macizos de tipo S3 (74%), S3M (9%) y S4 (17%) y también en condiciones secas. Fallas menores fueron mapeadas entre progresivas 23+420 y 23+460.

La excavación del túnel 3 se desarrolló en macizos tipo S4 (74%), S3M (9%) y S4M (26%) y también en condiciones secas. El macizo atravesado corresponde al cuerpo principal de un antiguo deslizamiento (Figura 11). Por este motivo el macizo presentaba un alto grado de fracturamiento distensivo, bloques escalonados y rotados (Figura 15a) y zonas de fallas con relleno de suelo (Figura 15b).



Figura 15. T3. a) Bloques rotados. b) falla paralela al eje longitudinal del túnel.

Las zonas de falla principales que fueron mapeadas tienen rumbo N50° y buzamiento de 70°O, subparalelo al eje del túnel y perpendicular a la dirección de movimiento del deslizamiento. Estas zonas de falla ocasionaron sucesivos problemas de estabilidad en la bóveda del túnel, con colapsos tipo chimenea involucrando decenas de m³ de suelo y roca. Fueron encontradas aberturas entre bloques de hasta 2 m de espesor, indicando el importante desconfinamiento del macizo. La excavación fue muy lenta debido a la necesidad de instalar cerchas metálicas en forma continua.

CONCLUSIONES

Las formaciones sedimentarias de la Sierra de Valle Fértil tienen características distintivas que han condicionado tanto la ejecución de obras superficiales, como cortes de ladera y puentes, como la de los seis túneles excavados.

Las formaciones Tuminico y Talampaya-Tarjados tienen litologías con comportamiento geomecánico de material rígido, areniscas y grauvacas, donde se generan desplazamiento por deslizamiento en función de la orientación de las discontinuidades.

En cambio, las formaciones Chañares-Ischichuca, presentan alternancias de areniscas y lutitas que son erosionadas y se comportan como materiales blandos.

Esto hizo que se generaran cuñas de deslizamientos en los túneles 4 a 7, mientras que en los túneles 1 a 3, se observó

procesos de acampanamiento de la bóveda por rotura de materiales débiles. En T1 y T2, se generaron placas subhorizontales, mientras que en T3, se observó fallamiento directo por relajación tensional generada por el valle del río Agua de la Peña.

Las convergencias medidas con cinta extensométrica mostraron estabilidad al cabo del tiempo de ejecución de los túneles.

Las excavaciones superficiales mostraron diferentes tipos de fallamiento, basados en deslizamiento de bloques, y volcamiento en las formaciones más rígidas. En cambio, en la formación más débil se observó rotura circular como en los suelos. Asimismo, la erosión diferencial de los materiales pelíticos generó descalces de bloques de areniscas.

Las fundaciones de los puentes se realizaron en roca, alguno de los cuales fue necesario rigidizar para mitigar deformaciones, sobre todo durante terremotos.

En general, todos estos tipos de problemas pudieron ser visualizados previamente a la construcción, aunque en el caso de los túneles fue necesario un seguimiento continuo para acomodar el tipo de sostenimiento de acuerdo con las características de los frentes de excavación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección Nacional de Vialidad, Distrito San Juan por el apoyo y permiso para publicar datos de informes y fotografías.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ACEITUNO P., M. GIAMBASTIANI M., R.J. ROCCA AND R.D. MARTINO, 2014.
Geotechnical Characteristics in Road Tunnels of Sierra Valle Fértil. San Juan. Argentina.
WTC 2014. Foz de Iguassu.
- ACEITUNO CIERI P., R.D. MARTINO, M. GIAMBASTIANI. YRJ ROCCA, 2014.
Failure Modes in Road Tunnels of Sierra Valle Fértil. San Juan. Argentina.
Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure. SBMR 2014 -ISRM Specialized Conference 09-13 September, Goiania, Brazil
- BARTON N., R. LIEN AND J. LUNDE, 1974.
Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support.
Rock Mechanics Vol.6 (4):189-236.
- BIENIAWSKI Z.T., 1989.
Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineering and geologist in mining, civil and petroleum engineering.
Wiley 251 pp.
- CUERDA A.J., C.A. CINGOLANI, R.VARELA Y O.C. SCHUAUER, 1979.
Depósitos carbónicos en la vertiente occidental de la sierra del Valle Fértil, provincia de San Juan.
Revista de la Asociación Geológica Argentina Vol. 34 (2): 100-107.
- ROSELLO, E.A., M.E. MOZETIC, P.R. COBBOLD, M. URREIZTIETA, D. GAPAIS AND O.R. LÓPEZ GAMUNDÍ, 1996.
The Valle Fértil flower structure and its relationship with the Precordillera and Pampean Ranges, 30-32° S, Argentina.
Third ISAG, Saint Malo, France, Vol.1: 481-484.
- STIPANIC, P.N., 2002.
El Triásico en la Argentina.
En: Stipanic, P.N., Marsicano, C.A. (Eds.), Léxico estratigráfico de la Argentina, v. 3, Triásico. Asociación Geológica Argentina, Serie B (Didáctica y Complementaria), Vol. 26: 1- 24.



Modelación del flujo preferencial en pilas de lixiviación

Modelling of preferential flow in heap leaching

Delahaye, Carlos H.¹ ✉ - Berenguer, Tadeo - Onorato, Martín

Recibido: 31 de mayo de 2015 • Aceptado: 16 de noviembre de 2015

Resumen

El artículo analiza el desarrollo de flujo preferencial en pilas de lixiviación debido a la heterogeneidad del mineral apilado. La heterogeneidad del material se describe mediante campos de permeabilidades aleatorios que aumentan la conectividad de los poros, con una media constante y una función de covariancia que depende del vector distancia relativa entre dos puntos arbitrarios. Puesto que los datos relativos a la variabilidad del material a pequeña escala es muy limitada, se mantiene una estrecha relación con los datos macroscópicos promedio medidos (homogéneo). Una vez definido el modelo de suelo heterogéneo, se utiliza un código termo-hidro-mecánico acoplado de propósito general para realizar el análisis. El mineral está inicialmente en estado no saturado y se simula el riego de la pila a una tasa determinada. Las características geotécnicas del material son representativas del mineral de la pila de lixiviación de la Mina Gualcamayo (Jáchal, San Juan). Los resultados de los diferentes análisis se comparan con el fin de avanzar en la comprensión del flujo preferencial a través de pilas de lixiviación. Las implicancias de los resultados obtenidos desde el punto de vista de la operación de la pila son inmediatas. Por un lado muestran la necesidad de revisar los métodos actuales de transporte y vertido del mineral, los cuales favorecen la segregación de partículas, dando como resultado un flujo heterogéneo, que disminuye el rendimiento de la pila. Por otro lado, muestran la potencia del método de análisis utilizado y las posibilidades de su empleo en el diseño de ingeniería de pilas.

Palabras claves: pila lixiviación, heterogeneidad, vías preferenciales, flujo no saturado.

Abstract

The article analyzes the development of preferential flow in heap leaching due to the heterogeneity of stockpiled ore. The heterogeneity of the material is described by random permeability fields which increase the connectivity of the pores, with a constant mean and a covariance function that depends on the relative distance vector between two arbitrary points. Since data on the material variability at a small scale is very limited, a close relationship with the average macroscopic data measured (homogeneous) is maintained. Once the heterogeneous soil is defined, a general purpose code for thermo-hydro-mechanical analysis is subsequently used to perform the analyses. The ore is initially in unsaturated state and a rain rate on the top of the heap is applied. The geotechnical characteristics of the material are representative of the ore from the Mina

Gualcamayo heap leaching (Jáchal, San Juan). The implications of the results obtained from the point of view of the operation in heap leaching are immediate. On the one hand they show the need to review the current methods of transportation and disposal of mineral in heaps, which lead to the separation of particles, resulting in a heterogeneous flow,

1. Instituto de Investigaciones Mineras, Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, Av. Libertador 1109 – Oeste – 5400, San Juan, Argentina.

✉ delahaye@unsj.edu.ar

which reduces heap leaching performance. On the other hand, they show the power of the analysis method used and the possibilities of its application in the engineering design of heap leaching.

Keywords: heap leaching, heterogeneity, preferential paths, unsaturated flow.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se explora el efecto de la heterogeneidad del material sobre el desarrollo de flujo preferencial no saturado en el interior de una pila de lixiviación de minerales, utilizando un modelo numérico basado en el método de elementos finitos.

Trabajos de varios autores (Aylmore, 1993; Brun, 1989; Conciani et al., 1995) muestran que la heterogeneidad del suelo conduce al fenómeno de "fingering" cuando un frente de humectación avanza a través de un suelo no saturado, formando vías preferenciales de flujo a través de zonas de mayor permeabilidad dentro de la masa del suelo, que controlan el avance del frente de humectación provocado por el riego de la pila.

La observación de perfiles de resistividad eléctrica en secciones de una pila de lixiviación (Figura 1, Rodríguez et al., 2012) sugiere también una estructura heterogénea y flujo concentrado sobre caminos preferenciales. El problema es complejo ya que las características físicas de las distintas capas, el estado

de tensiones significativas, el grado de saturación y la tasa de riego influyen significativamente sobre las trayectorias de flujo.

Para definir el modelo de suelo heterogéneo se han generado campos de permeabilidades aleatorios, estacionarios y bidimensionales, aumentando la conectividad de los valores altos de permeabilidad, con una media constante y una función de covariancia que depende del vector distancia relativa entre dos puntos arbitrarios. La función de covarianza es definida por su varianza y rango. La función densidad de probabilidad del campo de permeabilidades corresponde a una distribución log-normal.

El dominio de análisis considerado corresponde a una región cuadrada de $2.5 \times 2.5 \text{ m}^2$ de la sección transversal de la pila de lixiviación analizada en Delahaye (2010) (Figura 2). La muestra fue dividida, en todos los casos, en 50×50 celdas cuadradas cada una de las cuales fue modelada por medio de un elemento finito con propiedades constantes. La zona ampliada muestra una realización de distribución de permeabilidades correspondiente a un campo aleatorio esférico con una distancia de correlación muy pequeña.

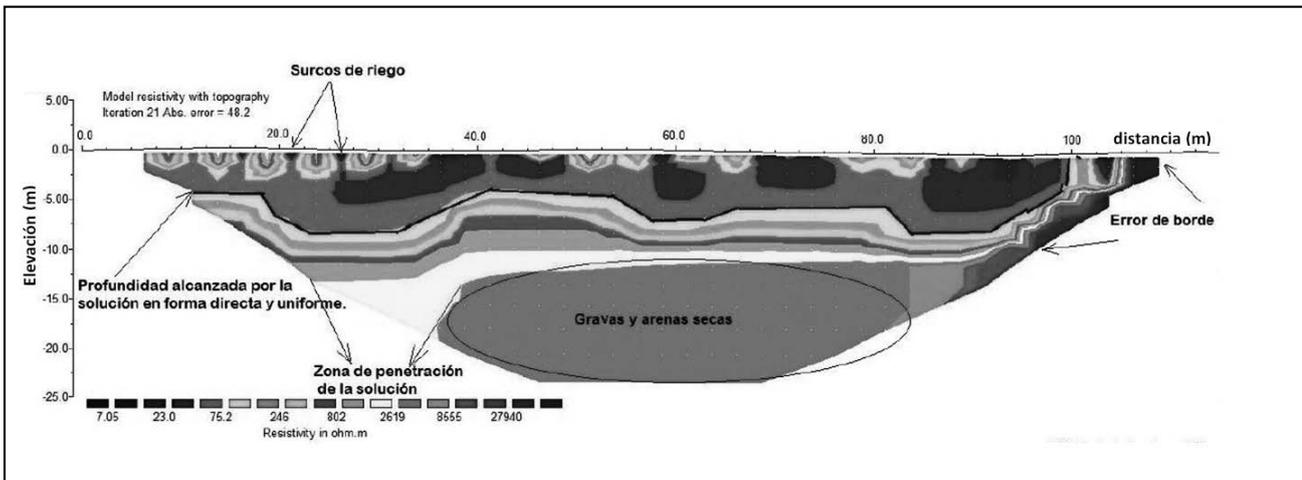


Figura 1: Distribución de resistividades eléctricas medidas sobre un perfil de la Pila de Lixiviación Sur de la Mina Gualcamayo, San Juan, Argentina.

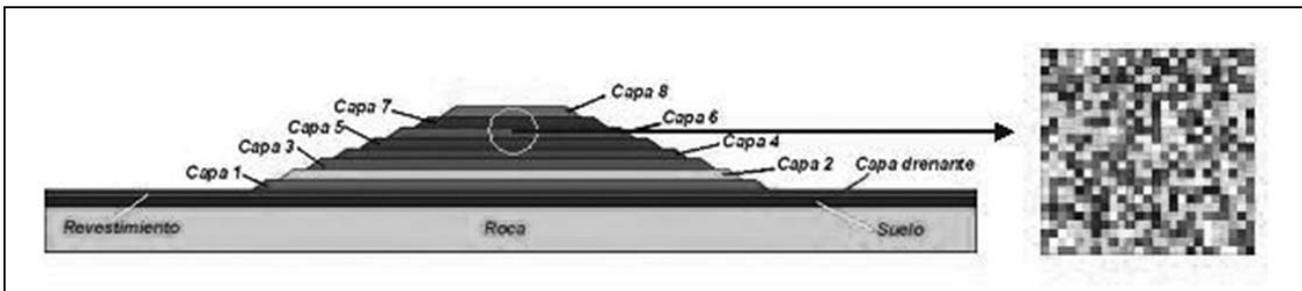


Figura 2. Sección transversal de la pila sobre plataforma. Región de análisis.

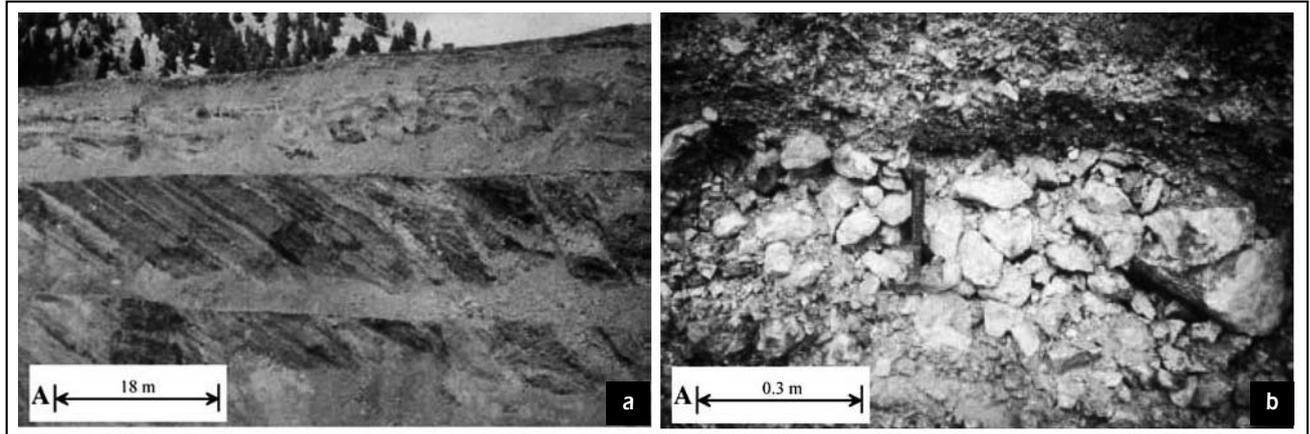


Figura 3. Segregación del material producido por el volcado y acomodamiento del mineral en la plataforma de lixiviación. Pila este de la mina "Golden Sunlight Mine", Montana, USA. a) Disposición del mineral en capas horizontales en un banco de la pila. b) Detalle de la estructura heterogénea del mineral apilado.

Una vez definido el modelo de suelo heterogéneo, se utiliza un código Termo-Hidro-Mecánico (THM) acoplado de propósito general para analizar el comportamiento hidromecánico de la región de análisis. El mineral está inicialmente en estado no saturado, con un grado de saturación inicial del 13% ($w_o=3.2\%$) y se simulan las condiciones de operación de la pila aplicando sobre el contorno superior de la región de análisis una tasa de riego de 12 l/h/m^2 , la cual se mantiene constante durante 45 días. Se ha considerado mineral con estructura homogénea (suelo base de permeabilidad media) y mineral con estructura heterogénea (campos aleatorios de permeabilidades esférico y anisótropo).

Los resultados obtenidos de los diferentes análisis se presentan en gráficos de distribución espacial y gráficos de evolución de las variables de flujo, con el fin de avanzar en la comprensión del desarrollo de flujo preferencial observado en pilas de lixiviación. El flujo preferencial es debido al proceso natural de compactación y segregación que se produce durante el volcado y acomodamiento del mineral sobre la plataforma de lixiviación. En la Figura 3a puede observarse, a escala de banco de pila, la textura del material con disposición del mineral en capas horizontales, y en la Figura 3b, en mayor detalle, la estructura heterogénea del material apilado (Azam *et al.*, 2007). La estructura heterogénea del mineral apilado disminuye el rendimiento de la operación de la pila, y en algunos casos, conduce a afloramientos de líquido por la superficie de los taludes, afectando las condiciones de estabilidad y aumentando las posibilidades de contaminación del medioambiente.

MARCO TEÓRICO

La predicción del comportamiento de una pila de lixiviación puede realizarse a partir del análisis de los aspectos hidromecánicos que inciden directamente sobre su rendimiento y las condiciones de seguridad. Debido a que el mineral se apila en estado no saturado, el uso de un modelo hidromecánico, basado en la mecánica de los medios no saturados, constituye una herramienta adecuada para este propósito, ya que permite conocer la evolución y disipación de las presiones de poros en el interior de la pila, las presiones sobre el revestimiento de la base, la posición del nivel freático y determinar las condiciones de flujo en las distintas fases de construcción, operación, cierre y abandono (O'Kane *et al.*, 1999; O'Kane, 2000).

En este trabajo se ha utilizado el Sistema de Cálculo CODE-BRIGHT (2000), basado en el método de los elementos finitos. CODE-BRIGHT es capaz de efectuar el análisis Termo-Hidro-Mecánico (THM) acoplado en dos y tres dimensiones de problemas reales de la ingeniería civil y de minas. Puede simular aspectos tales como: estructura y discontinuidad del terreno, comportamiento hidromecánico de suelos, rocas y discontinuidades, excavación y construcción, filtraciones, distintas opciones de refuerzo y otras. Este sistema de cálculo posee módulos de conexión del programa de elementos finitos al Sistema Gráfico Interactivo GID (2000) para el pre y post procesamiento de la información. El Sistema GID es una interfaz gráfica interactiva que permite la definición, preparación y visualización de toda la información resultante de la simulación numérica.

CODE_BRIGHT resuelve el problema del flujo de gas (aire) y líquido (agua) en un medio no-saturado que deforma a medida que se producen cambios en los esfuerzos totales y/o las presiones de gas y de líquido. Las variables independientes de la formulación son la presión de gas (P_g), la presión de líquido (P_l) y el vector desplazamiento (\mathbf{u}). Los flujos advectivos y difusivos se calculan a través de las leyes generales de Darcy y Fick respectivamente. La parte mecánica se formula en términos de dos campos de esfuerzos independientes: tensión neta, ($\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma} - P_g \mathbf{m}$, $\boldsymbol{\sigma}$ = tensión total, \mathbf{m}^T = vector auxiliar [1,1,1,0,0,0]) y succión matricial ($s = P_g - P_l$). CODE_BRIGHT se describe en detalle en Olivella *et al.* (1994, 1996).

El programa resuelve simultáneamente el siguiente conjunto básico de ecuaciones:

Ecuación de balance de masa de gas (aire):

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_g n (1 - S_l + H S_l)] + \text{div} [\rho_g (\mathbf{v}_g + H \mathbf{v}_l)] = 0 \quad (1)$$

donde, ρ_g , S_l y n son la densidad del gas, el grado de saturación y la porosidad. \mathbf{v}_g y \mathbf{v}_l son los vectores velocidad macroscópica (ley de Darcy) del gas y del líquido. La ley de Henry se utiliza para encontrar la masa de gas disuelta en el líquido. Si H es la constante de Henry, el volumen de gas

disuelto en un volumen $n S_l$ de líquido es $H n S_l$ (medido a la presión de gas libre).

Ecuación de balance de masa de líquido (agua):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_l n S_l) + \text{div} (\rho_l \mathbf{v}_l) = 0 \quad (2)$$

donde ρ_l es la densidad del líquido. La ecuación (2) no considera la transferencia de humedad en forma de vapor. El transporte de humedad por vapor es significativo en los casos de gradientes de temperatura importantes o grado de saturación pequeños.

Ecuación de equilibrio mecánico:

$$\frac{\partial (\sigma_{ij} - \delta_{ij} P_g)}{\partial x_j} + \frac{\partial P_g}{\partial x_i} + b_i = 0 \quad ; \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

donde b_i son las fuerzas de masa, P_g la presión de gas, σ_{ij} las tensiones totales, x_i el sistema de coordenadas y δ_{ij} la función de Kronecker. Note que en la ecuación (3) el equilibrio está formulado en términos de tensiones netas (exceso de la tensión total sobre la presión de gas). Cuando el terreno alcanza la saturación, $P_g = P_l$, la succión $s = P_g - P_l$ se anula y se recupera la clásica formulación en términos de tensiones efectivas.

Ecuaciones constitutiva: El líquido y el gas se mueven de acuerdo a la ley de Darcy:

$$\mathbf{v}_l = -(\mathbf{K}_l / \gamma_l) (\nabla P_l - \rho_l \mathbf{g}) \quad (\text{líquido}) \quad (4)$$

$$\mathbf{v}_g = -(\mathbf{K}_g / \gamma_g) (\nabla P_g - \rho_g \mathbf{g}) \quad (\text{gas}) \quad (5)$$

γ_l y γ_g son el peso específico del líquido y del gas. La densidad del líquido se calcula por, $\rho_l = \rho_{l0} \exp[\beta(P_l - P_{l0})]$, β = compresibilidad del líquido, ρ_{l0} y P_{l0} son la densidad y la presión de líquido a T_0 (temperatura de referencia).

El gas se comporta como un gas ideal: $\rho_g = M P_g / (R T)$, M = peso molecular del gas, R = constante de los gases, T = temperatura absoluta (ley del gas ideal).

$\mathbf{K}_l = \mathbf{K} k_{rl} (\rho_l \mathbf{g} / \mu_l)$ y $\mathbf{K}_g = \mathbf{K} k_{rg} (\rho_g \mathbf{g} / \mu_g)$ son el tensor permeabilidad al líquido y al gas.

El tensor permeabilidad intrínseca, \mathbf{K} , depende de la estructura porosa del terreno y está dada por:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \quad (\text{modelo de Kozeny}) \quad (6)$$

donde \mathbf{K}_0 es la permeabilidad intrínseca correspondiente a ϕ_0 (porosidad de referencia).

k_{rl} y k_{rg} son las permeabilidades relativas al líquido y al gas, las cuales controlan la variación de la permeabilidad en régimen no saturado. μ_l y μ_g son las viscosidades dinámicas del líquido y del gas. \mathbf{g} es la aceleración de la gravedad.

Para resolver las ecuaciones indicadas anteriormente es necesario definir las permeabilidades relativas al gas y al líquido como una función del grado de saturación (o de la succión) y la curva de retención del líquido, relación entre el grado de

saturación y la succión. Varias expresiones se han propuesto para expresar estas relaciones (Lloret et al., 1985; Alonso et al., 1987).

En general, las permeabilidades relativas al líquido y al gas (k_{rl} y k_{rg}) se hacen dependientes del grado de saturación efectivo, S_e ; que se expresa por $S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} \leq 1$, donde

S_l es el grado de saturación, S_{rl} el grado de saturación residual y S_{ls} el grado de saturación máximo.

Las permeabilidades relativas al líquido y al gas se han calculado utilizando las siguientes ecuaciones:

$$k_{rl} = S_e^{1/2} \left(1 - (1 - S_e^{1/\lambda})^\lambda \right)^2 \quad (\text{líquido, van Genuchten, 1980}) \quad (7)$$

$$k_{rg} = A_g (1 - S_e)^{\beta_g} \quad (\text{gas, ley potencial generalizada}) \quad (8)$$

donde λ , A_g y β_g son parámetros del material.

Para la curva de retención de los materiales, que relaciona el grado de saturación con la succión, $s = P_g - P_l$, se ha adoptado el modelo de van Genuchten (1980):

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left[1 + \left(\frac{s}{P_o} \right)^{1-\lambda} \right]^{-\lambda} \quad (\text{modelo de van Genuchten, 1980}) \quad (9)$$

donde P_o y λ son parámetros del material. En los análisis llevados a cabo no se han tenido en cuenta los efectos de histéresis de la curva de retención.

La ecuación constitutiva mecánica toma la forma incremental:

$$d\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{D} d\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{h} ds \quad (10)$$

Los coeficientes de la matriz \mathbf{D} y \mathbf{h} se definen a través del modelo constitutivo mecánico.

Para la ley constitutiva elasto-plástica (Alonso et al., 1990; Gens, 1995), la deformación volumétrica se define por $\boldsymbol{\varepsilon}_v = \boldsymbol{\varepsilon}_x + \boldsymbol{\varepsilon}_y + \boldsymbol{\varepsilon}_z$.

La superficie de fluencia generalizada depende de las tensiones, $\boldsymbol{\sigma}'$, de la deformación volumétrica plástica $\boldsymbol{\varepsilon}_v^p$, y de la succión, s : $f = (\boldsymbol{\sigma}', \boldsymbol{\varepsilon}_v^p, s)$, que escrita en términos de invariantes resulta:

$$f = (p', J, \theta, \boldsymbol{\varepsilon}_v^p, s) \quad (11)$$

donde p' es la tensión media neta,

$$p' = (1/3) (\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z) = p - \max(P_g, P_l)$$

J^2 es el segundo invariante del tensor desviador de tensiones,

$$J^2 = (1/2) \text{traza} (\mathbf{s}^2) \quad ; \quad \theta \text{ es el ángulo de Lode,}$$

$$\theta = -\frac{1}{3} \sin^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{\det \mathbf{s}}{J^3} \right) \text{ y } \mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma}' - p' \mathbf{I} \text{ , } \mathbf{s} \text{ es el tensor}$$

desviador de tensiones, e I es el tensor identidad.

Por simplicidad, se ha adoptado como ley constitutiva saturada isotérmica de referencia una forma del modelo clásico Cam-Clay Modificado.

$$F = \frac{3J^2}{g_y^2} - L_y^2 (p' + p_s)(p_o - p') = 0 \quad (12)$$

donde g_y es una función del ángulo de Lode, M es un parámetro para la línea de estado crítico y $L_y = \frac{M}{g_y(\theta = -\pi/6)}$.

La ascunción básica es que la presión de preconsolidación, p^o , depende de la succión y de la temperatura:

$$p_o = p^c \left(\frac{p_o^*(T)}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(o)-k_{i0}}{\lambda(s)-k_{i0}}} \quad (13)$$

donde $p_o^*(T) = p_o^* + 2(\alpha_1 \Delta T + \alpha_3 \Delta T |\Delta T|)$ y $\lambda(s) = \lambda(o)[(1-r) \exp(-\beta s) + r]$. p^c es la presión de referencia, p^o es la presión media de preconsolidación inicial para condiciones saturadas, $\lambda(o)$ es la pendiente de la curva índice de vacíos - tensión media en condiciones saturadas, k_{i0} es la pendiente elástica inicial de la curva volumen específico - tensión media para succión nula, α_1 y α_3 son parámetros para deformación plástica por temperatura, r y β son parámetros que definen la pendiente de la curva tensión neta media - volumen específico para la succión s .

Además, la resistencia a la tracción por succión es $p_s = k \exp(-\rho \Delta T) s$, donde k y ρ son parámetros.

En común con otros modelos de estado crítico, se asume que el endurecimiento depende únicamente de la deformación volumétrica plástica:

$$dp_o^* = \frac{1+e}{\lambda(o)-k_{i0}} p_o^*(T) d\varepsilon_v^p \quad (14)$$

y el potencial plástico:

$$G = \frac{3J^2}{g_p^2} - \alpha L_p^2 (p' + p_s)(p_o - p') \quad (15)$$

donde $L_p = \frac{M}{g_p(\theta = -\pi/6)}$. Para un modelo plástico asociado, se adopta $\alpha=1$.

En función del grado de compactación del material la descripción del comportamiento del material dentro de la superficie de fluencia es particularmente importante. La variación de la rigidez tensional con la succión y especialmente, la variación del potencial de hinchamiento del material con la tensión y la succión tienen que ser cuidadosamente tomados en cuenta.

El modelo elástico resultante es como sigue:

$$d\varepsilon_v^e = \frac{k_i(s)}{1+e} \frac{dp'}{p'} + \frac{k_s(p',s)}{1+e} \frac{ds}{s+0.1} + (\alpha_o + 2\alpha_2 \Delta T) dT \quad (16)$$

donde

$$k_i(s) = k_{i0}(1 + \alpha_i s), \quad k_s(p',s) = k_{s0}(1 + \alpha_{sp} \ln p'/p_{pref}) \exp(\alpha_{ss} s)$$

e es el índice de vacíos, α_0 , α_2 son parámetros para la deformación térmica elástica, α_i es parámetro para k_i , k_{i0} y k_{s0} son la pendiente elástica inicial de la curva volumen específico-tensión media neta y volumen específico-succión, para succión nula. α_{sp} y α_{ss} son parámetros para k_s y p_{pref} es una tensión media de referencia. Las deformaciones elásticas desviadoras se obtienen a partir de un coeficiente de Poisson, ν , constante.

SIMULACIÓN DE LA HETEROGENEIDAD DEL MINERAL DE LA PILA

En los análisis realizados se ha resuelto únicamente el flujo de líquido. La presión de gas se ha mantenido constante e igual a la presión atmosférica, lo que está de acuerdo con la baja humedad inicial del mineral de la pila que permite que el gas (aire) se mueva libremente en el interior de la pila a medida que avanza el frente de humectación. No se ha considerado el acoplamiento mecánico, lo que significa que la distribución de porosidades y permeabilidades se mantiene constante en el tiempo (comportamiento rígido).

Suelo homogéneo de referencia

Se ha seleccionado como conjunto de parámetros de referencia las propiedades geotécnicas básicas del mineral. La curva de retención para el caso homogéneo (suelo básico) se ha estimado a partir de ensayos de propiedades índices del mineral de la pila, utilizado en ensayos de recuperación en columnas de lixiviación (Fredlund and Xing, 1994; Fredlund, et al., 2002). La Figura 4 muestra la curva de retención para el caso homogéneo (suelo básico) correspondiente a la porosidad $\phi_0 = 0.38$, la cual representa la mejor aproximación a los datos de laboratorio.

La permeabilidad relativa al líquido se ha estimado con el modelo de van Genuchten (1980) (ecuación 7). La derivación del conjunto de parámetros de referencia se describe en detalle en Delahaye y Onorato (2013).

El riego se simula imponiendo un flujo de líquido constante de 12 l/ (hxm²) sobre el contorno superior de la región. Sobre el contorno inferior se impone las condiciones de una superficie de filtración (presión atmosférica y sólo flujo de salida permitido). Los contornos laterales de la zona de estudios se asumen impermeables. Las condiciones iniciales del mineral son el grado de saturación de líquido S_{l0} y la porosidad ϕ_0 correspondiente al inicio del riego (tiempo $t = 0$).

La Figura 5 muestra el problema de contorno resuelto que representa las condiciones de operación de la pila.

Se han resuelto cinco casos del problema de contorno planteado, los cuales se han indicado en la Tabla 1. El Caso 0 corresponde al mineral homogéneo tomado como referencia, los Casos 1 a 4 corresponden a mineral heterogéneo. En todos los casos se ha utilizado una geometría 2D, discretizada por elementos finitos cuya malla está compuesta por 2601 nodos y 2500 elementos cuadriláteros lineales a los efectos de que el problema sea tratable desde el punto de vista numérico.

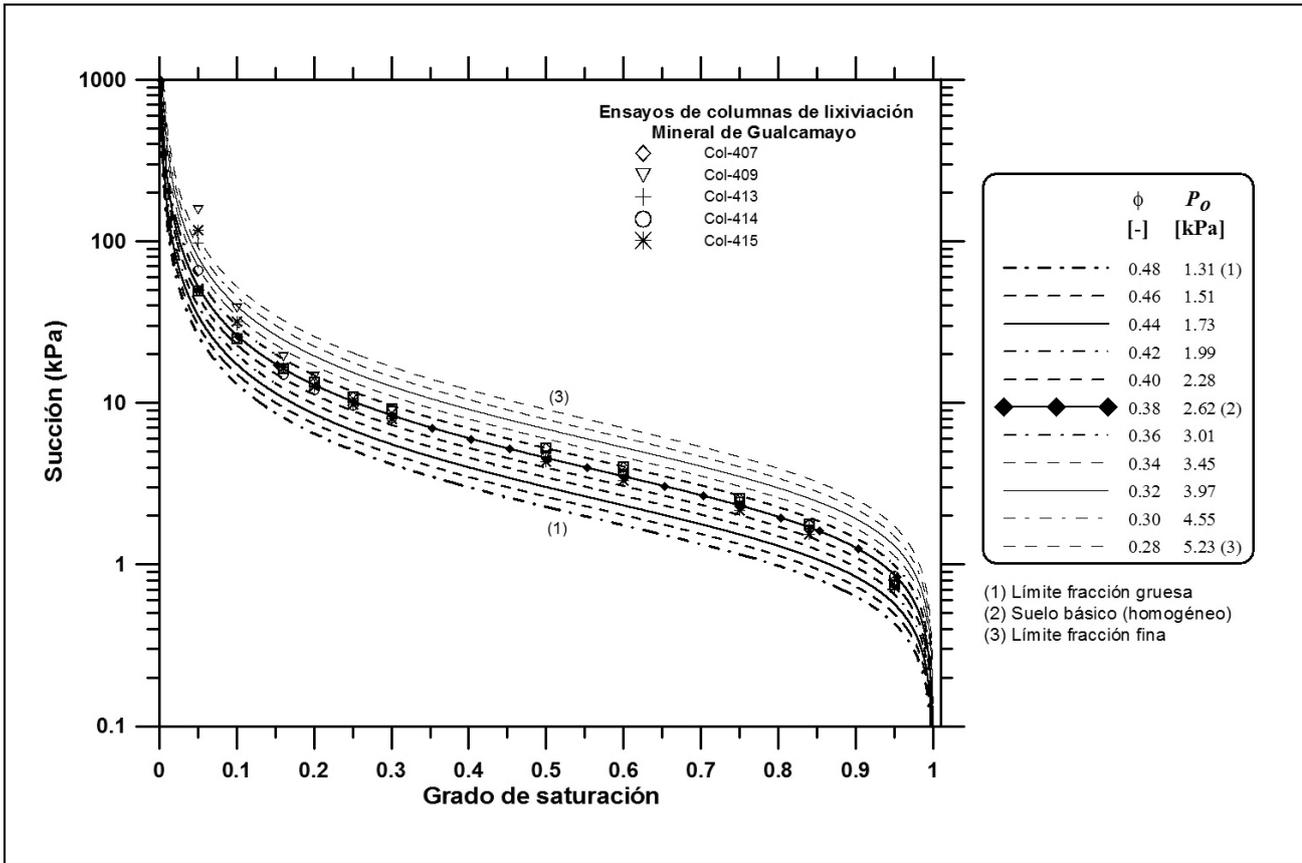


Figura 4. Curvas de retención de líquido para los casos homogéneo y heterogéneos.

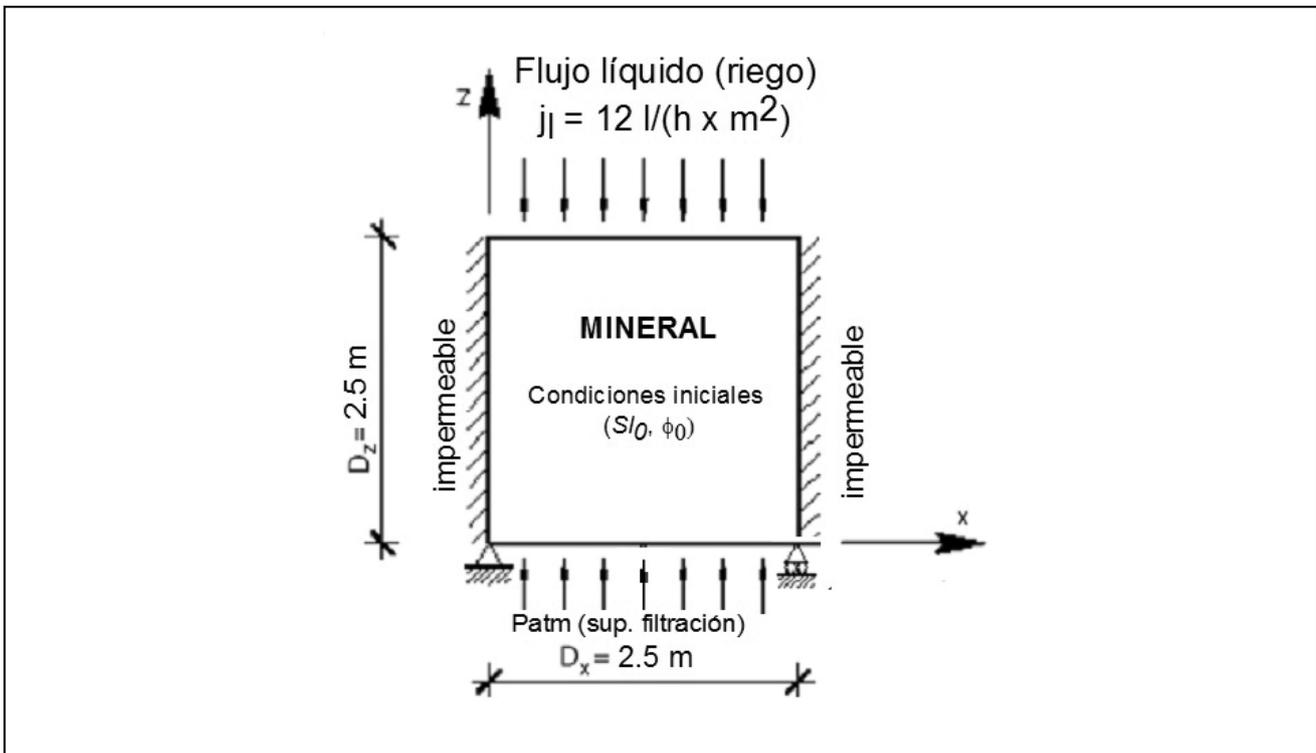


Figura 5. Definición del problema resuelto.

Tabla 1. Definición de casos.

Caso	Campo	Tipo	log K (media, Var)	Porosidad	Curva de retención	Permeabilidad relativa al líquido
0	0	Suelo básico, homogéneo	(-10.983, 0)	$\varphi = 0.38$	$P_o = 2.62 \text{ kPa}$ $\lambda = 0.5,$ $S_{rl} = 0, S_{ls} = 1$	$\lambda = 0.5,$ $S_{rl} = 0, S_{ls} = 1$ (ecuación 7)
1	1	heterogéneo	(-10.983, 2)	Asociada con K por ley cúbica (ecuación 6)	$P_o = P_o(\varphi)$ (ecuación 17) $\lambda = 0.5,$ $S_{rl} = 0, S_{ls} = 1$	
2	2					
3	3					
4	4					

$K =$ permeabilidad intrínseca (m^2) ; K media = $1.04E-11 m^2$

Suelo heterogéneo

De acuerdo con lo descrito en la introducción, el propósito del trabajo ha sido explorar el efecto de la heterogeneidad del material sobre el desarrollo de flujo preferencial en el interior de la pila.

La idea se ha representado en la Figura 6 (Delahaye y Alonso, 2002), la cual muestra la trayectoria en tres y dos dimensiones seguida por una partícula de líquido desde la zona superior (riego) hacia la zona inferior (salida) de la región de análisis. En este trabajo el problema se ha simplificado a dos dimensiones para todos los casos analizados.

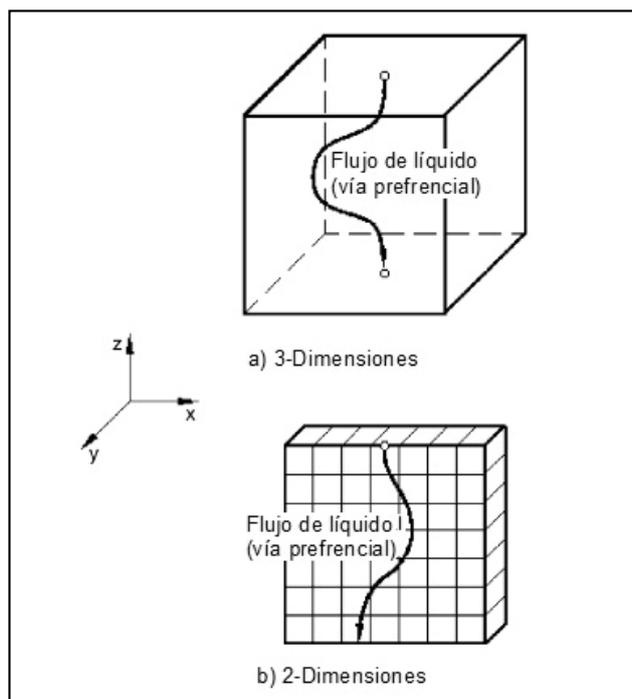


Figura 6. Flujo preferencial en un suelo heterogéneo. a) problema 3D; b) problema 2D.

Campos de permeabilidad aleatorios

Para representar la heterogeneidad del terreno se han generado campos de permeabilidades aleatorios, estacionarios y bidimensionales, aumentando la conectividad de los valores altos de permeabilidad, con una media constante y una función de covarianza que depende del vector distancia relativa entre dos puntos arbitrarios. La función de covarianza es definida por su varianza y rango, las cuales se han representado en la Figura 7 para un campo aleatorio unidimensional $Z(x)$. La función densidad de probabilidad del campo de permeabilidades $K(z,x)$ corresponde a una distribución log-normal.

La generación de los campos aleatorios de permeabilidades se ha realizado con el programa GCOSIM3D (Gómez-Hernández, J., 1991, 1993), considerando una dirección de flujo preferencial en la región de análisis. El caso típico de estructura heterogénea del material de pila, que conduce a una

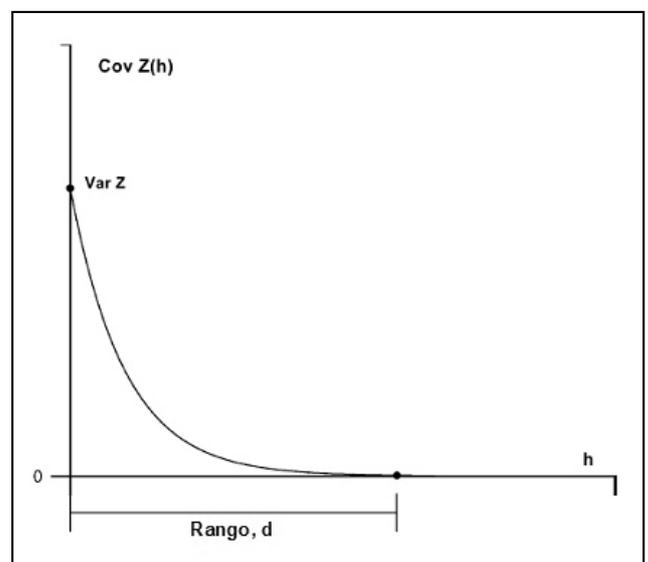


Figura 7. Función de covarianza.

anisotropía marcada en la permeabilidad, es el desarrollo de capas debido al proceso natural de compactación y segregación que se produce durante el volcado y acomodamiento del mineral sobre la plataforma de lixiviación. Se han considerado dos rangos de correlación: d_x (en dirección del eje x horizontal) y d_z (en dirección del eje z vertical). A medida que el rango de correlación aumenta la variabilidad espacial se reduce. Para una distancia de correlación nula se alcanza la máxima aleatoriedad (“ruido blanco”).

Las características de los campos de permeabilidades aleatorios utilizados en los análisis están relacionados al campo de permeabilidades aleatorio tomado como base, Campo 2, cuyas características se han indicado en la Tabla 2. Su valor medio corresponde a la permeabilidad intrínseca adoptada para el caso homogéneo de referencia de valor $K_0=1.04E-11$ m². La varianza

de $\log K_0$ (campo aleatorio normal dado que K tiene una distribución normal) es relativamente grande ($\text{Var}[\log K]=2$) e implica cambios importantes de permeabilidad a distancias cortas. La anisotropía se define por dos rangos diferentes a lo largo de las direcciones x y z: $d_x = 0.025$ m = $D_x/100$ y $d_z=1$ m = $10/25 D_z$, donde D_x y D_z son el ancho y alto de la región de análisis.

Se han considerado además otros 3 campos aleatorios: Campo 1, campo aleatorio esférico con distancia de correlación muy pequeña en ambas direcciones; Campo 3, campo aleatorio anisótropo cuyo rango en dirección z se ha incrementado un 50% respecto del Campo 2, y Campo 4, campo aleatorio anisótropo con rango en dirección x dos veces el rango en dirección z. Este último campo tiene por objeto representar el incremento de flujo horizontal en la pila provocado por el volcado y acomodamiento del mineral sobre la plataforma de lixiviación.

Tabla 2. Parámetros de los campos de permeabilidad aleatorios.

Campo	K media (m ²)	Varianza (log K)	Tipo de Campo	Rango d_x (m)	Rango d_z (m)
0	1.04E-11	--	Homogéneo	--	--
1	1.04E-11	2	Esférico	0.025	0.025
2	1.04E-11	2	Anisótropo	0.025	1
3	1.04E-11	2	Anisótropo	0.025	1.5
4	1.04E-11	2	Anisótropo	1	0.5

K = permeabilidad intrínseca

La región de análisis de 2.5 m x 2.5 m fue dividida en todos los casos en 50 x 50 celdas cuadradas de 0.05 m x 0.05m cada una. Cada celda fue modelada por medio de un elemento finito con propiedades constantes. La figura 8 muestra 4 realizaciones de distribución de permeabilidades para los 4 campos aleatorios definidos anteriormente. Puede observarse en dicha figura el efecto de las diferentes distancias de correlación utilizadas en cada caso.

Algunos estudios micrográficos muestran que un suelo puede exhibir cambio de propiedades importantes en distancias cortas. Esto puede observarse en la Figura 9, la cual representa la variación de la permeabilidad intrínseca de una muestra de suelo natural informado por *Conciani et al. (1995)*, derivado a partir de una distribución de densidades secas determinadas con tomografía computada (CT). La técnica utilizada en este caso da la información en celdas de 2 mm x 2 mm. La porosidad cambió en el rango de 0.31 a 0.49. Los cambios de porosidad solamente no dan suficiente información para derivar permeabilidad, la cual puede estar también controlada por cambios en la composición del suelo, mineralogía y microestructura. Sin embargo, estos resultados proveen una clave sobre la escala de la fluctuación presente en un suelo natural.

Análisis hidráulico. Casos definidos.

Casos 1, 2, 3 y 4 han sido definidos en Tabla 1. Dado que los cambios en permeabilidad están posiblemente asociados con cambios simultáneos de porosidad y de las propiedades de retención de líquido, se ha introducido un procedimiento aproximado para extender los campos de permeabilidad generados, a cambios de porosidad y características de retención de líquido.

La porosidad se re-calcula utilizando la relación de Kozeny (ecuación 6). La curva de retención de líquido se aproxima cambiando el valor de entrada de gas P_o (ecuación 9), de acuerdo con el cambio de porosidad, utilizando la siguiente ecuación:

$$P_o(\phi) = P_o(\phi_0) \exp(a(\phi_0 - \phi)) \quad (17)$$

donde a se determina a partir de las granulometrías límites fina y gruesa del mineral definidas en el intervalo $[\phi_0 - 0.10; \phi_0 + 0.10]$ (Figura 4). El resto de los parámetros de la curva de retención del suelo de referencia se mantienen sin cambios.

El Caso 1 representa la mayor variabilidad hidráulica. Cada celda es en sí misma un suelo distinto caracterizado por su propia porosidad, permeabilidad intrínseca y curva de retención de líquido. Sin embargo, la permeabilidad relativa al líquido se mantuvo sin cambios. Casos 2, 3 y 4 son versiones con mayor variabilidad en una dirección determinada, como se puede observar en la Tabla 1.

Se ha introducido una condición de consistencia con el objeto de preservar una conductividad hidráulica promedio común para todos los casos definidos. A medida que el mineral se hace más heterogéneo y el flujo preferencial más definido la conductividad hidráulica promedio aumenta. A los efectos de mantener la conductividad hidráulica promedio igual al valor original (Caso homogéneo, $K_0 = 1.04E-11$ m², para $\phi_0 = 0.38$), la permeabilidad intrínseca de referencia K_0 correspondiente a los campos heterogéneos Campos 1, 2, 3 y 4, fue reducida. Para ello se simuló un ensayo de permeabilidad en

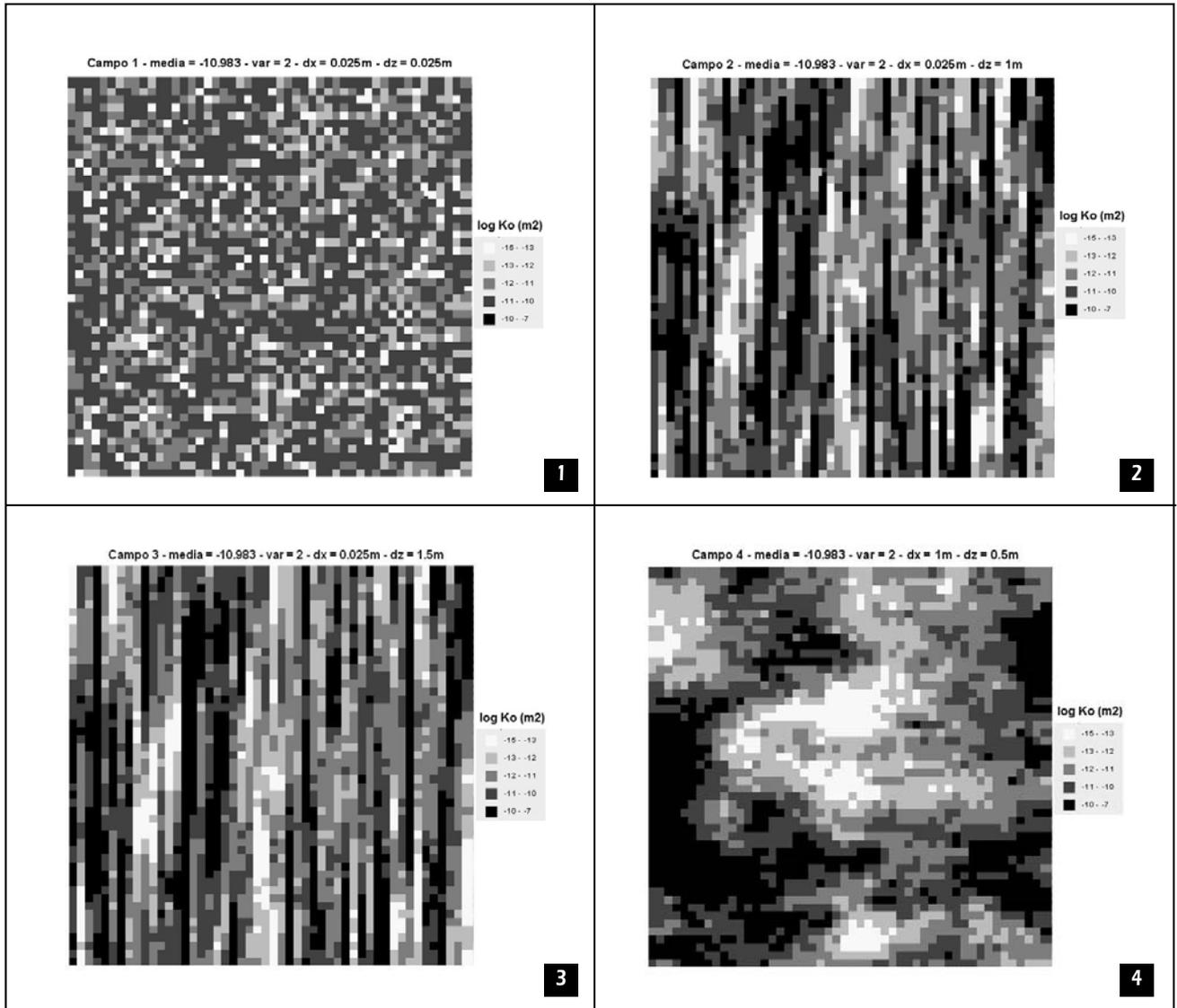


Figura 8. Realizaciones de 4 campos aleatorios de permeabilidades intrínsecas.

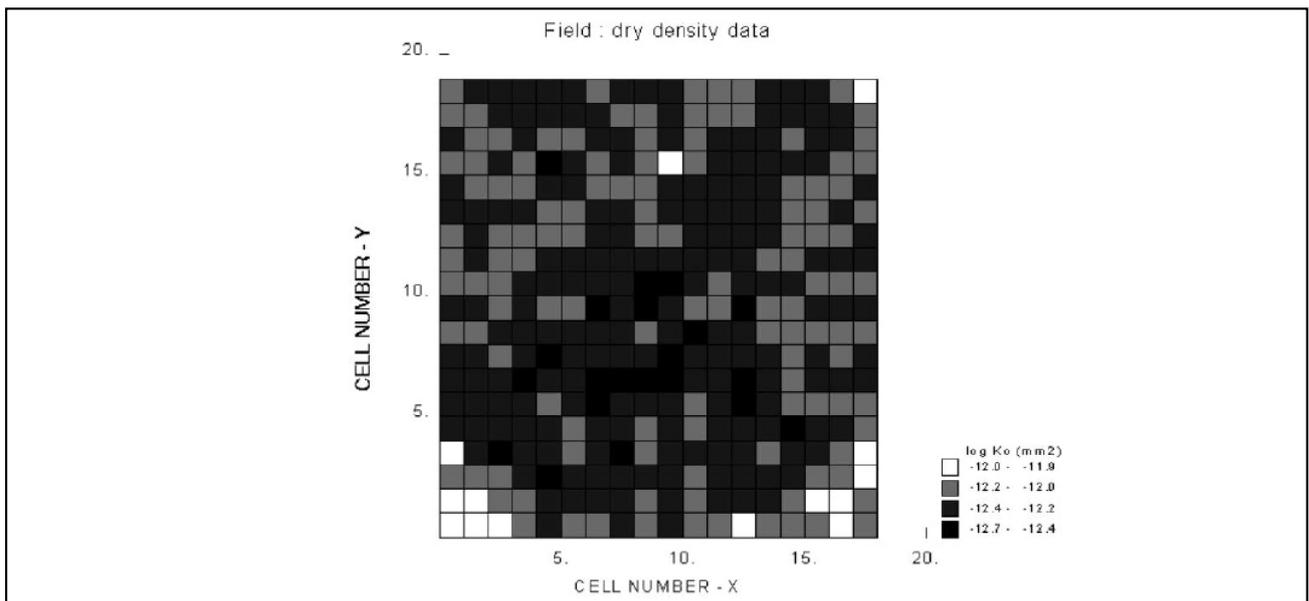


Figura 9. Campo de permeabilidades intrínsecas calculado a partir de datos de densidad seca informados por Conciani et al. (1995).

condiciones saturadas para todos los casos heterogéneos, considerando la región como la probeta de ensayo, modificando el K_0 (para $\phi_0 = 0.38$) hasta conseguir la coincidencia del flujo total a través de la muestra heterogénea con el flujo total correspondiente a la muestra homogénea de referencia. Las permeabilidades intrínsecas promedio obtenidas fueron:

- Campo 1: $K_0 = 0.282E-11 \text{ m}^2$,
- Campo 2: $K_0 = 0.385E-12 \text{ m}^2$,
- Campo 3: $K_0 = 0.140E-12 \text{ m}^2$,
- Campo 4: $K_0 = 0.468E-11 \text{ m}^2$

Resultados

El avance del frente de humectación en el interior de la masa de mineral, inicialmente en estado no saturado y con baja

humedad ($w_0 = 3.2\%$, $S_{l0} = 13\%$), producido por el riego con la solución lixivante, puede seguirse en la Figura 10, la cual muestra el grado de saturación calculado en tres instantes de tiempo después que comenzó el riego. La figura permite observar el desarrollo progresivo de flujo preferencial, el cual llega a saturar algunas celdas y deja sin humedecer a otras.

En condiciones de estado estacionario se establecen vías principales de flujo (flujo mayor) en algunas áreas, vías secundarias de flujo (flujo menor) en otras, permaneciendo áreas que no son alcanzadas por el flujo, o en todo caso áreas que apenas llegan a humedecerse. Esto puede observarse en las Figuras 11 y 12, las cuales muestran contornos de velocidad de flujo y vectores de velocidad de flujo en estado estacionario para los cuatro campos heterogéneos.

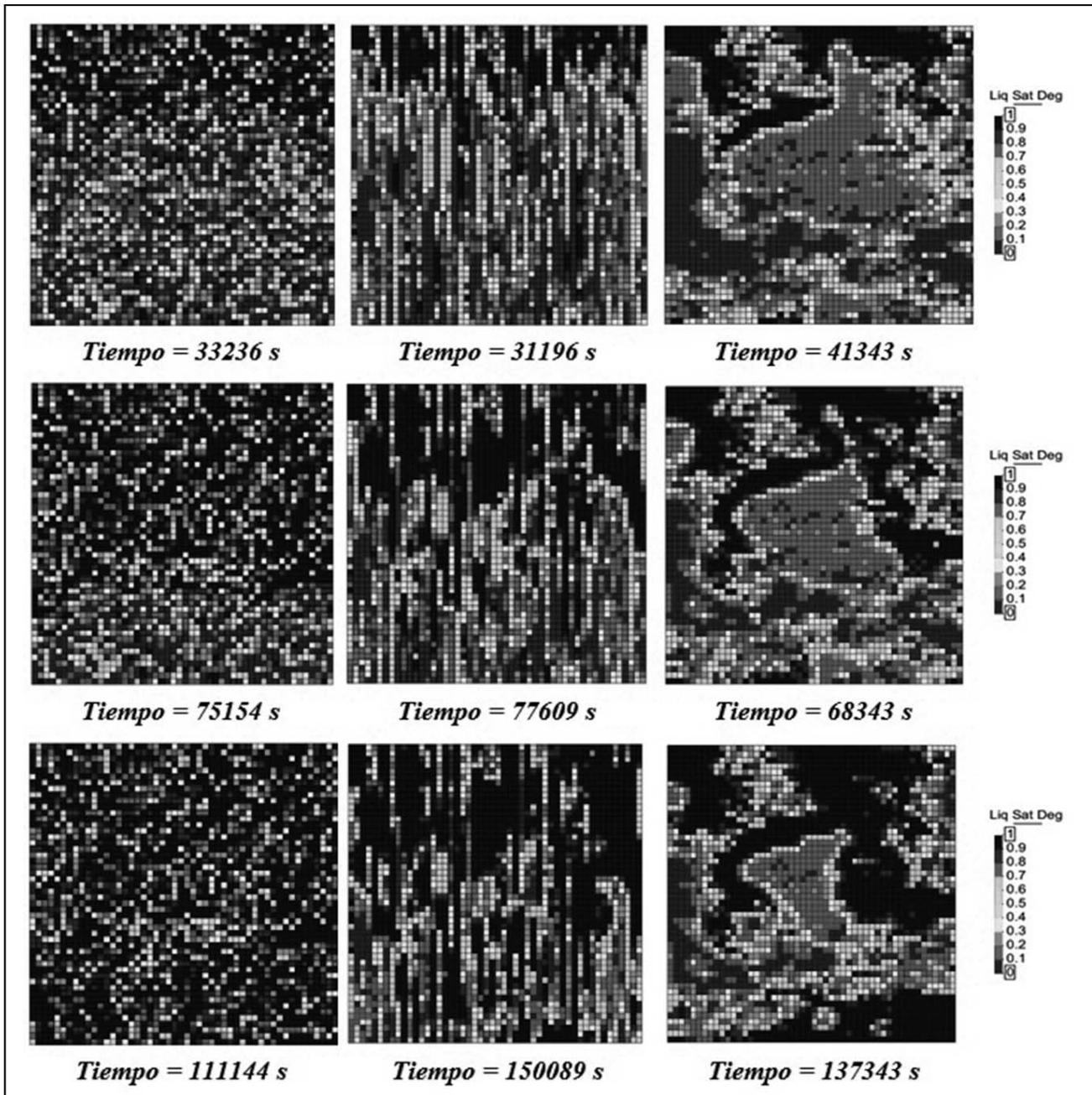


Figura 10. Campos heterogéneos: Campo 1 (izquierda), Campo 2 (centro) y Campo 4 (derecha). Formación de vías preferenciales de flujo. Grado de saturación para tres instantes de tiempo.

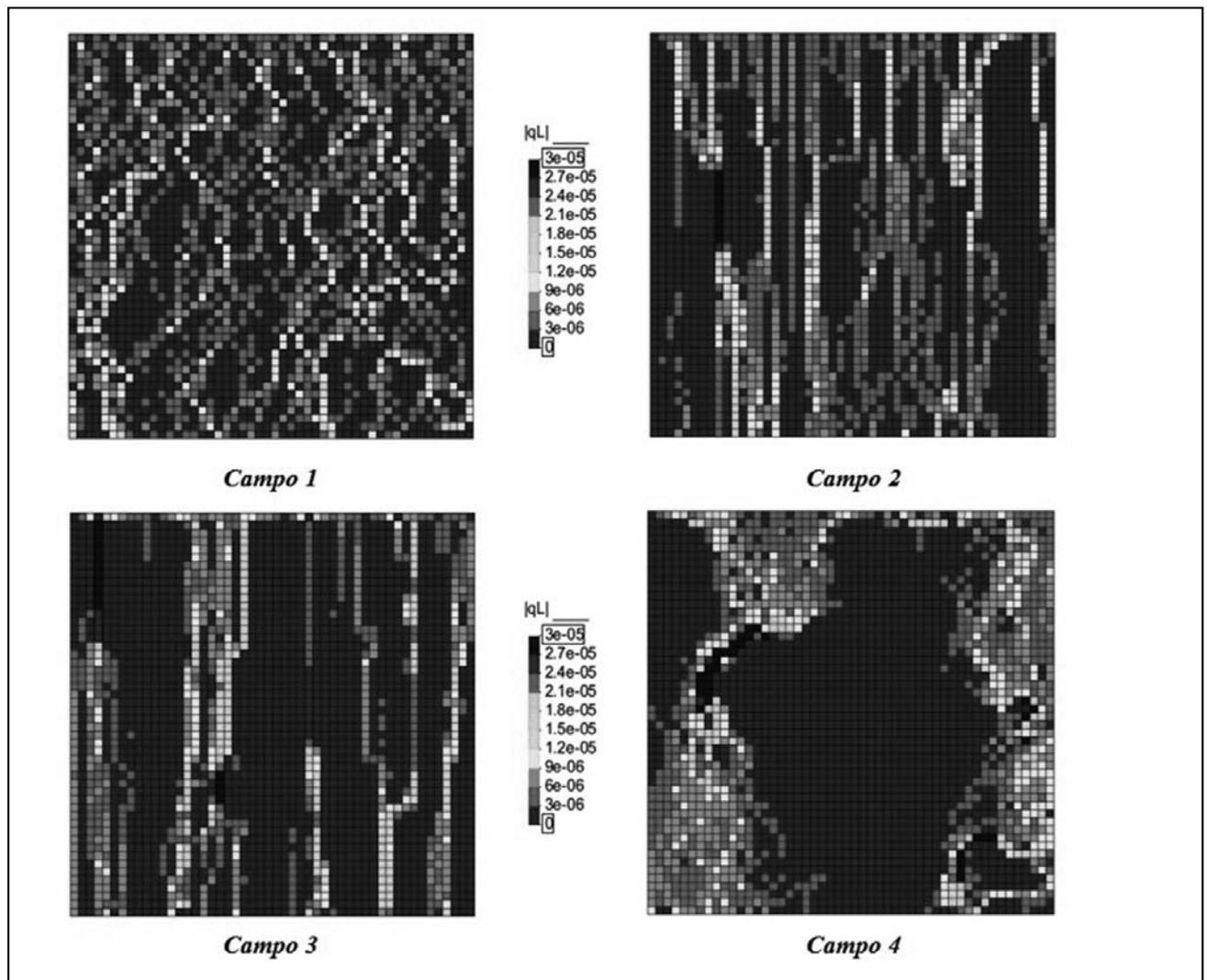


Figura 11. Campos heterogéneos 1, 2, 3 y 4. Formación de vías preferenciales de flujo. Contornos de velocidad de flujo de líquido en estado estacionario.

Las Figuras 13a y 13b muestran la evolución del flujo de solución en algunos nodos de salida para el Caso 1-Campo 1 y Caso 2-Campo 2, respectivamente. Puede observarse que algunos nodos contribuyen significativamente en correspondencia con las vías principales de flujo, otros contribuyen en menor medida (vías secundarias) y hay nodos con flujo escaso o nulo.

En la Figura 14 se muestra la tasa de flujo total de salida, que converge gradualmente hacia la tasa de flujo total de entrada (tasa de riego = $12 \text{ l/h m}^2 = 0.333\text{E-}02 \text{ kg/s m}^2$), para los 5 casos indicados en la Tabla 1. Puede observarse que la introducción de una variación espacial aleatoria de las propiedades hidráulicas resulta en una reducción del tiempo de ruptura (tiempo comprendido desde el inicio del riego hasta la salida de flujo por la superficie de filtración inferior) y en general, en una historia diferente (transitorio) de la tasa de flujo de líquido, con respecto al caso homogéneo de referencia (Caso 0). Ello es consecuencia de la formación de vías preferenciales de flujo.

Los resultados presentados corresponden a una simple realización de los campos aleatorios definidos. El próximo paso debería ser la introducción de los efectos 3D y la ejecución de

una simulación Monte Carlo con el objeto de derivar la estadística de los aspectos significativos del problema.

Discusión

En este trabajo se ha explorado el efecto de la variabilidad del mineral depositado en la pila de lixiviación sobre las condiciones de flujo de líquido en su interior. La descripción precisa de la heterogeneidad del mineral se ha visto obstaculizada por la carencia de datos reales, por lo que se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad. El análisis es obviamente incompleto dado que la cantidad de variables significativas que podrían controlar el proceso es excesivamente grande. Además, el análisis completo desde un punto de vista probabilístico requeriría de un gran esfuerzo computacional.

El énfasis del trabajo ha sido demostrar los efectos de la heterogeneidad del mineral. No se han hecho intentos específicos por reproducir ensayos de recuperación en columnas. Sin embargo, se han derivado propiedades promedio del mineral en base al conocimiento del mineral de la pila de lixiviación de la Mina Gualcamayo. Mayores incertidumbres permanecen en la cuantificación de la variabilidad.

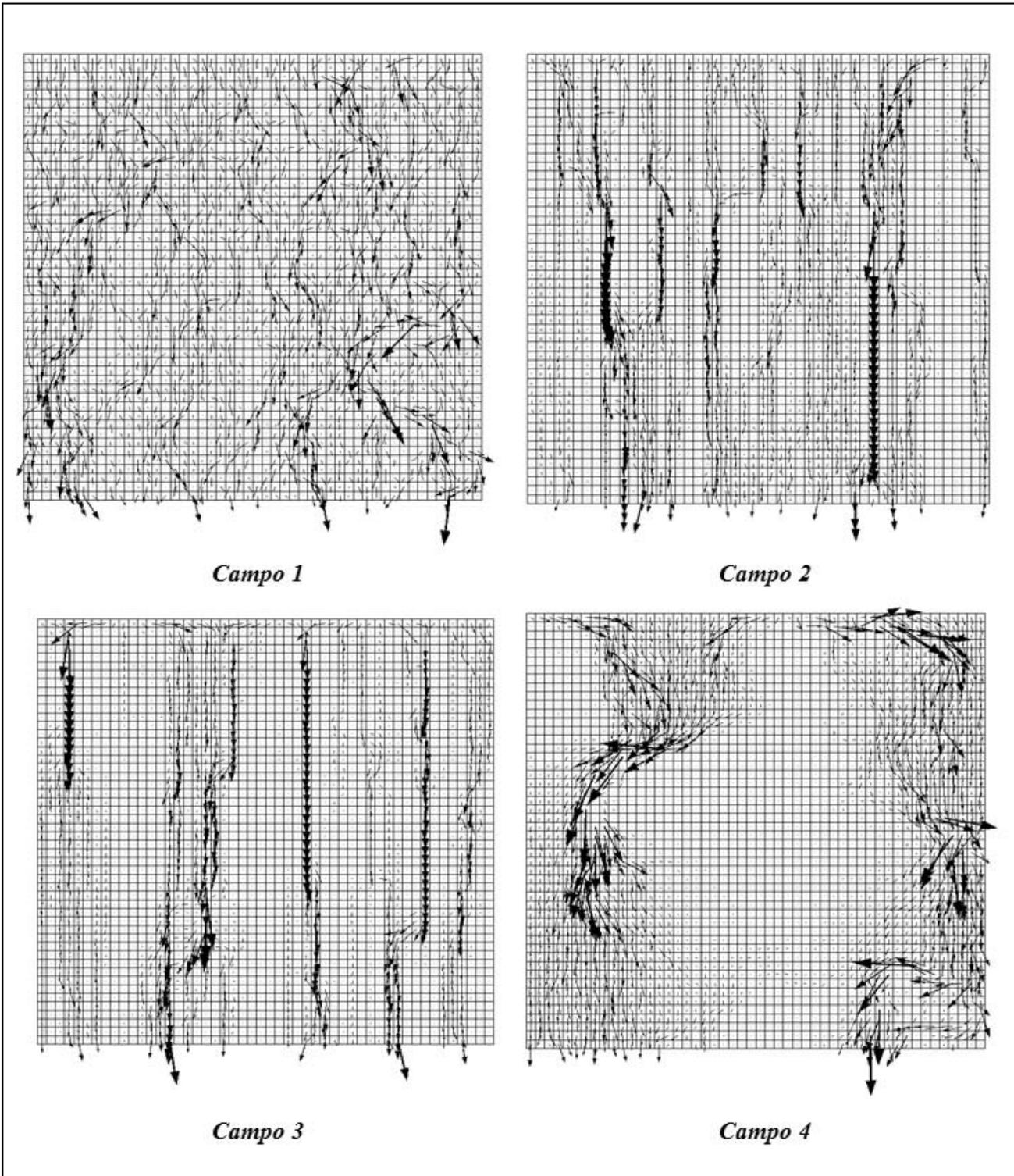


Figura 12. Campos heterogéneos 1, 2, 3 y 4. Formación de vías preferenciales de Flujo. Vectores de velocidad de flujo de líquido en estado estacionario.

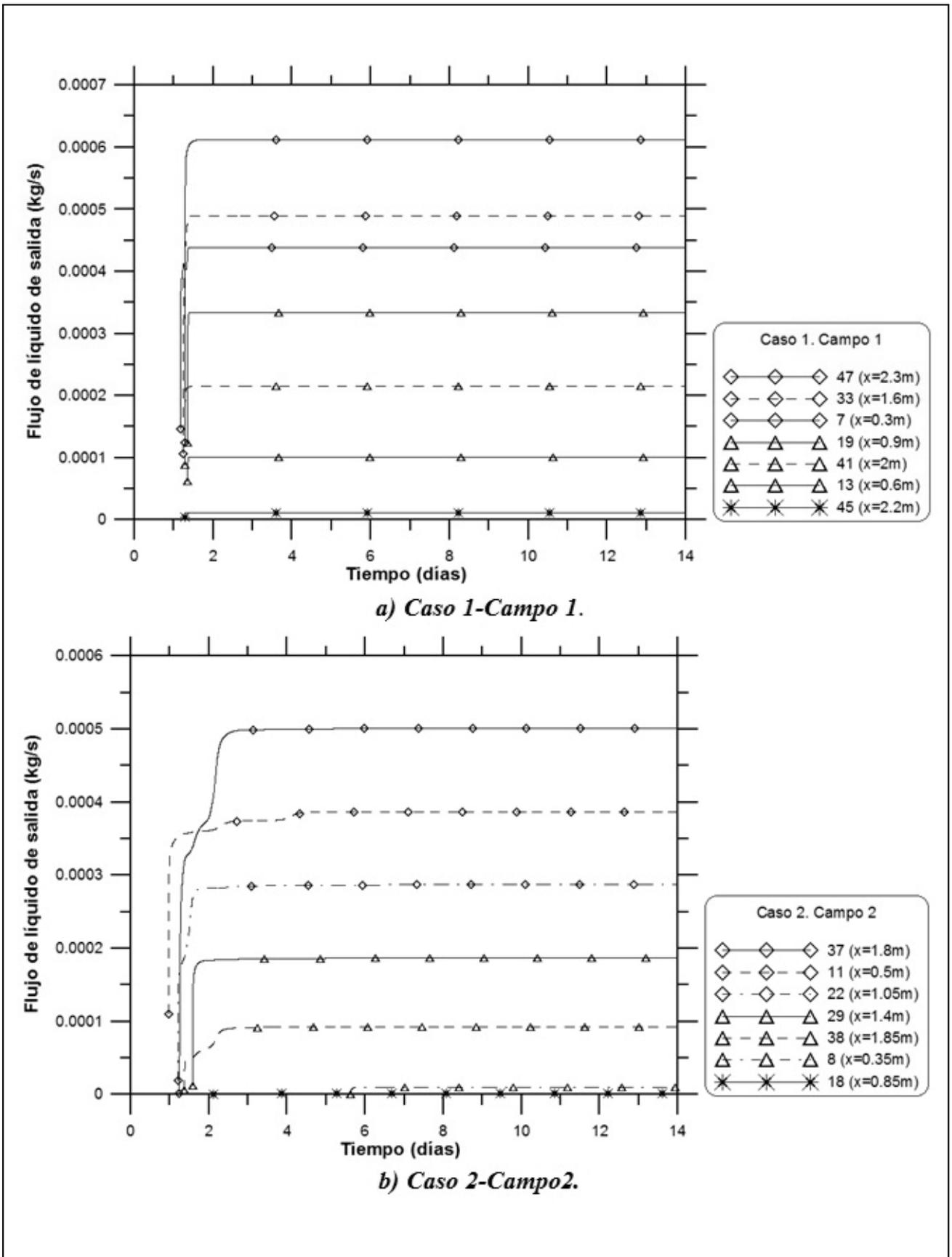


Figura 13. Evolución del flujo de líquido en algunos nodos de salida.

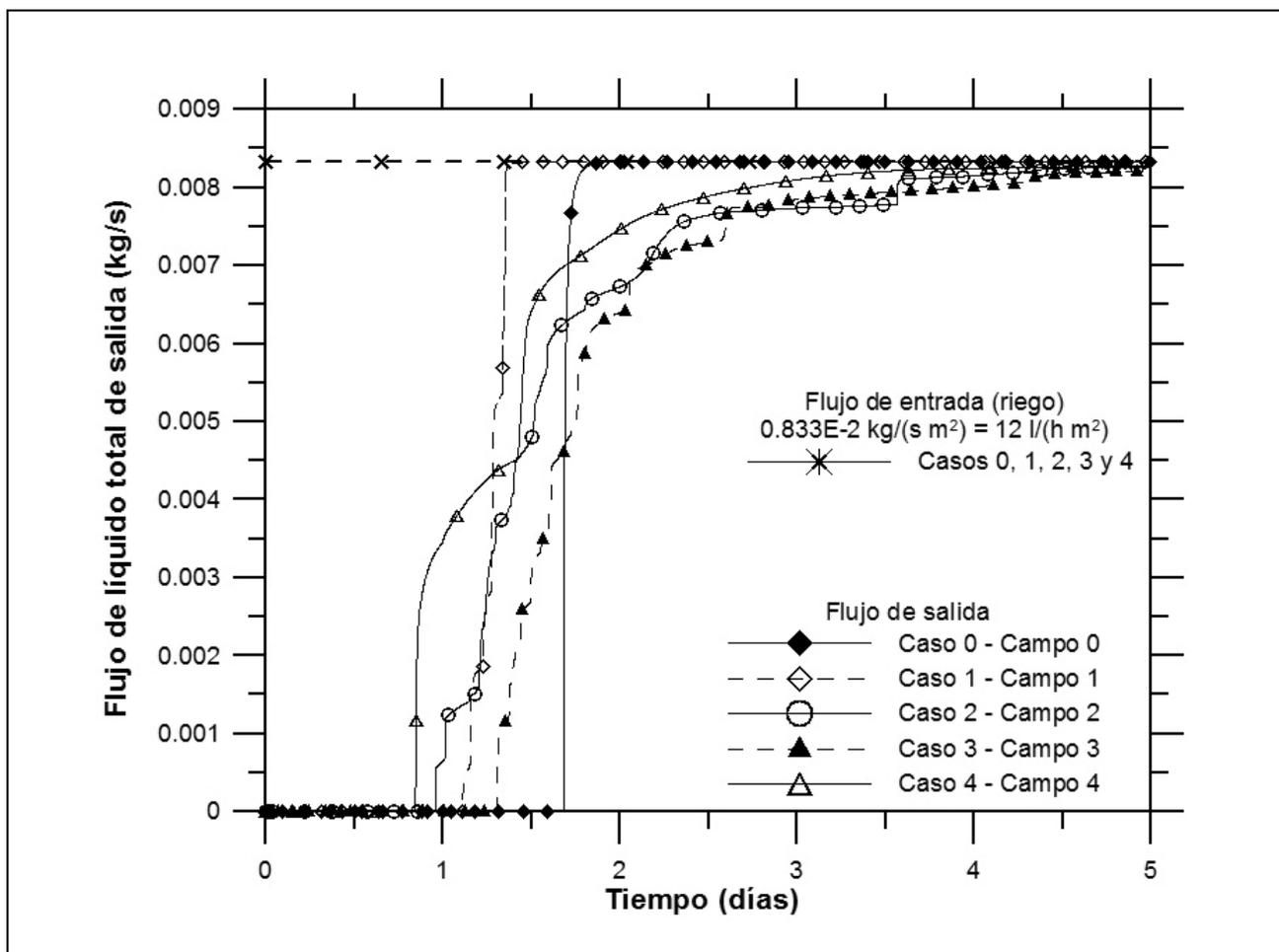


Figura 14. Evolución del flujo de líquido total.

CONCLUSIONES

El análisis realizado ha demostrado un número de aspectos interesantes que conducen a una mejor comprensión del flujo preferencial a través de pilas de lixiviación:

Las fluctuaciones de la estructura espacial de las propiedades hidráulicas del suelo controla las vías de circulación del líquido, la magnitud de los flujos y el tiempo de ruptura.

La consecuencia de la formación de vías preferenciales de flujo es una reducción del tiempo de ruptura y en general, una historia diferente (transitorio) de la tasa de flujo de líquido con respecto al caso homogéneo de referencia.

En condiciones de estado estacionario se establecen vías principales de flujo (flujo mayor) en algunas áreas de la pila, vías secundarias de flujo (flujo menor) en otras, permanecien-

do áreas que no son alcanzadas por el flujo, o en todo caso áreas que apenas llegan a humedecerse.

Desde el punto de vista de operación de la pila las implicancias de los resultados obtenidos son inmediatas. Por un lado establecen la necesidad de revisar los métodos actuales de transporte y vertido del mineral, los cuales favorecen la segregación de partículas, dando como resultado un flujo heterogéneo, que disminuye el rendimiento de la pila. Por otro lado, muestran la potencia del método de análisis utilizado y las posibilidades de su empleo en el diseño de ingeniería de pilas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Investigaciones Mineras, al Departamento de Ingeniería de Minas y al CICITCA de San Juan, el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ALONSO, E., GENS, A. Y D.W. HIGH. 1987.
 Special problem soils.
General report. Proc. 9th Europ. Conf. Soil Mech. Fdn. Engng., Dublin, 3, 1087-1146.
- ALONSO, E., GENS A. Y A. JOSA. 1990.
 A constitutive model for partially saturated soils.
Geotechnique, 40, 3, 405-430.

- AYLMORE, L.A.G., 1993.
Use of computer assisted tomography in studying water movement around plant roots.
Advances in Agronomy, 49, 1–53.
- AZAM, S., WILSON, G.W., HERASYMUIK G., NICHOL C., AND BARBOUR, S. 2007.
Hydrogeological behaviour of an unsaturated waste rock pile: a case study at the Golden Sunlight Mine, Montana, USA.
Bull Eng Geol Environ, 66:259–268, DOI 10.1007/s10064-006-0077-7, Springer.
- BRUN, P., 1989.
Cinétique d'infiltration au sein d'une conche d'argile compacté.
Etude expérimentale et numérique. These, ENS Mines de Paris.
- CODE-BRIGHT, 2000.
User's Guide Manual. Departamento de Ingeniería del Terreno, E.T.S.
Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- CONCIANI, W., SOARES, M.M. Y CRESTANA, S. 1995.
Geotechnical use of mini tomography. UNSAT'95.
In: Alonso, E.E., Delage, P. (Eds.), Proc. First Int. Conf. On Unsat. Soils. Unsaturated Soils, Vol. 2, Balkema.
- DELAHAYE, C.H. Y E.E. ALONSO. 2002.
Soil heterogeneity and preferential paths for gas migration.
Engineering Geology, 64, 251–271.
- DELAHAYE, C.H. 2010.
Modelación Hidromecánica de pilas de lixiviación de minerales.
Revista de Geología Aplicada a y al Ambiente, 24, 91-107.
- DELAHAYE, C. Y ONORATO, M. (2013).
Caracterización geotécnica e hidrometalúrgica del mineral de la Mina de Gualcamayo.
Informe Técnico Interno. Instituto de Investigaciones Mineras. FI-UNSJ, 48 pp.
- FREDLUND, M.D., WARD WILSON, G. AND FREDLUND, D. 2002.
Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve.
Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39: 1103-1117, NRC.
- FREDLUND, D.G. AND XING, A. 1994.
Equations for the soil-water characteristic curve.
Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31: 521-532, NRC.
- GENS, A., 1995.
Constitutive laws. Modern issues in non-saturated soils.
A. Gens, P. Jouanna, B.A. Schrefler Eds. Springer Verlag. Wien. 129-158.
- GID, 2000.
User's Guide Manual.
CIMNE - Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España.
- GOMEZ-HERNÁNDEZ, J. (1991).
A stochastic approach to the simulation of block conductivity values conditioned upon data measured at a smaller support.
Ph. D. Thesis. Stanford University, CA. Michigan.
- GOMEZ-HERNÁNDEZ, J. AND JOURNEL, A.G. (1993).
Joint sequential simulation of Multigaussian fields.
En Troia '92. Vol. 1, 85-94, Almicar Soares Ed., Kluwer Academic Publishers.
- LLORET, A. Y E. ALONSO. 1985.
State surface for partially saturated soils.
XI Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng., 3, 557-562.
- O'KANE, M; S.L. BARBOUR Y M.D. HAUG. 1999.
A Framework for Improving the Ability to Understand and Predict the Performance of Heap Leach Piles.
Copper 99-Cobre 99, Volume I. S.K. Young, D.B. Dreisinger, R.P. Hackl, and D.G. Dixon, (editors), pág. 409-419.
- O'KANE CONSULTANT INC. 2000.
Demostración de la Aplicación de Unsaturated Zone Hydrology for Heap Leach Optimization.
Industrial Research Assistance Program and O' Kane Consultants Inc.
- OLIVELLA, S., CARRERA, J., GENS, A. Y E. ALONSO. 1994.
Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media.
Transport in porous media, 15, 271-293.
- OLIVELLA, S., GENS, A., CARRERA, J Y ALONSO E., 1996.
Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media.
Engineering Computations. 13, 87-112.

RODRÍGUEZ, A. Y MAZUELOS, O., 2012.

Geofísica geotécnica a partir de tomografías eléctricas para la Pila de Lixiviación Sur.
Empresa Minera Yamana Gold Mina Gualcamayo. Informe Técnico - Estudios Geofísicos GEOM. San Juan, Argentina.

VAN GENUCHTEN, M.T. 1980.

A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.
Soil Sci.Soc.Am.J., 44 (5), 892-898.



Determinación de la calidad para la conservación de áreas impactadas por la minería en la zona de San Agustín, provincia de Córdoba, Argentina

Determination of quality for conservation of areas impacted by mining in San Agustín zone, Córdoba, Argentina

Quintana Crespo, Enrique ^{1,2} ✉ - Navarro, María Elena ²

Recibido: 15 de mayo de 2015 • Aceptado: 25 de noviembre de 2015

Resumen

El área de influencia de la localidad de San Agustín, en la Provincia de Córdoba, comprende llanuras de uso fundamentalmente agropecuario, y montañas en las que se registran actividades de ganadería y minería. Su ubicación a menos de ochenta kilómetros de la ciudad de Córdoba, le viene generando además una fuerte presión demográfica.

Con el objetivo de determinar la calidad para la conservación y definir los usos más adecuados del suelo en la zona de estudio, se aplicó una metodología desarrollada por Centeno (Centeno et al., 1994), que fuera utilizada para la confección del Mapa Geocientífico de la Provincia de Valencia (Cendrero, 1986), y el Plan General de Ordenación Urbana de Ador (Adhara, 2008) en la Comunidad Valenciana, entre otros planes de desarrollo regional.

La metodología se basa en la definición de unidades con diversos grados de calidad y se toma como punto de partida el análisis geomorfológico. De esa manera se definieron las siguientes unidades: Unidad Geomorfológica 1: Plataforma Basculada; Unidad Geomorfológica UG2: Depresión Periférica; Unidad Geomorfológica UG3: Piedemonte Serrano; Unidad Geomorfológica UG4: Montañas.

En cada una de las unidades se determinaron las condiciones geológicas, del agua superficial y subterránea, suelos, vegetación y paisaje, a fin de efectuar una categorización que permita establecer su valor para la conservación.

Una vez efectuada la categorización, se analizó el impacto ambiental de una de las canteras existentes en la zona de estudio, determinándose que el mismo era fundamentalmente de tipo paisajístico.

Como conclusión del estudio se efectúan una serie de consideraciones atinentes a la remediación paisajística de los frentes de canteras que afectan a las zonas de mayor calidad para la conservación.

Palabras Clave: *calidad para la conservación - geomorfología - minería.*

1. Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

2. Dirección de Posgrado, Especialización y Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina.

✉ equintr@yahoo.com

Abstract

The area of influence of the town of San Agustín, in the Province of Córdoba, comprising mainly agricultural use plains, and mountains where animal breeding and mining activities are developed. Its location within eighty kilometers of the city of Córdoba is also generating strong demographic pressure.

In order to determine the quality for conservation and define the most appropriate land uses in the study area a methodology developed by Centeno has been applied (Centeno et al., 1994). The same methodology has been used to prepare the Geoscientific Map of the Province of Valencia (Cendrero, 1986), the Land Use Planning of Ador (Adhara, 2008), in Valencia, and also another regional development plans.

The methodology is based on the definition of units with several degrees of quality and takes as its starting point the geomorphological analysis. The following units were defined: Geomorphologic Unit 1: Tilted Platform; Geomorphologic Unit 2: Peripheral Depression; Geomorphologic Unit 3: Piedmont; Geomorphologic Unit 4: Mountains.

Geological conditions, surface and ground water, soil, vegetation and landscape, were defined at each unit, to make a categorization system which permits that the conservation value of each one were determined.

Once the categorization was done, the environmental impact of existing quarries in the study area was established, and the landscape alteration was defined as the more important one.

As conclusions, a number of considerations were made, to generate the landscape remediation of the quarry fronts that were affecting areas of the best quality for conservation.

Keywords: quality for conservation - geomorphology - mining.

INTRODUCCIÓN

El área de influencia de la localidad de San Agustín, en la Provincia de Córdoba, comprende llanuras de uso fundamentalmente agropecuario, y montañas en las que se registran actividades de ganadería y de minería de rocas calcáreas. Figura 1.

El concepto de Calidad para la Conservación se basa en la definición del término “calidad” de la Real Academia Española, que habla de la propiedad o conjunto de propiedades inherentes a una cosa, que permiten apreciarla como igual, mejor o peor que los restantes de su especie. Es decir que el análisis de los distintos elementos naturales presentes en cada una

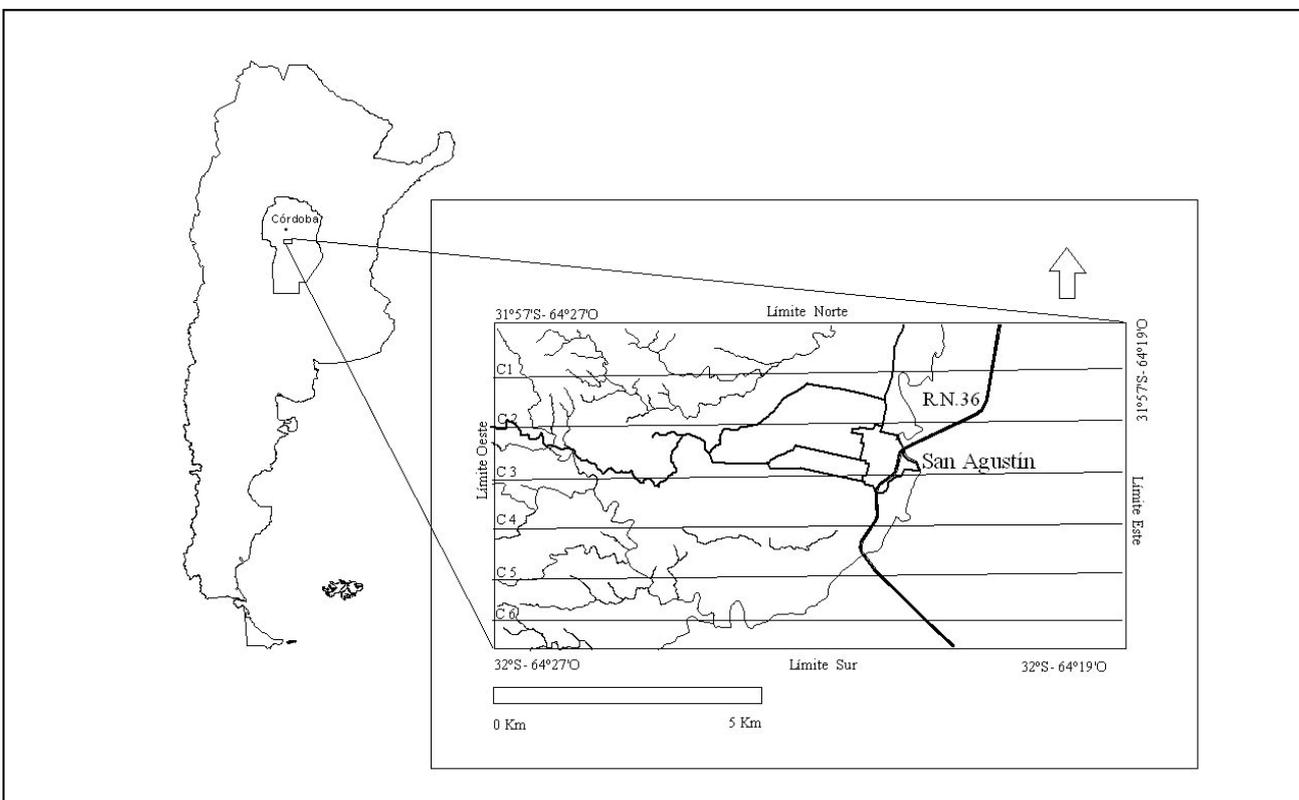


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

de las unidades delimitadas, tales como aguas superficiales y subterráneas, macizos rocosos, suelos, vegetación, y paisaje, puede determinar su calidad para la conservación.

El criterio de zonificación utilizado ha sido esencialmente geomorfológico, teniendo en cuenta que una geoforma es el resultado de un proceso constitutivo, y que los materiales que forman el subsuelo también provienen de ese mismo proceso.

En la zona de estudio se encuentran presentes las grandes unidades geomorfológicas definidas por *Capitanelli (1979)*, que fueron utilizadas como esquema regional, y subdivididas en función de la información específica del área de estudio.

Las herramientas para el análisis de tipo regional han sido las imágenes y los perfiles topográficos de Google Earth mediante los cuales se han definido las características del relieve, relacionadas con las pendientes: orientación, longitud, gradiente, etc., e identificando de esa forma a las principales geoformas.

ANTECEDENTES

Los trabajos llevados a cabo en la zona de San Agustín, forman parte de la tesis de Magister en Ingeniería Ambiental de *Navarro (2005)* y han seguido los criterios que fueron establecidos para la confección del Mapa Geocientífico de la Provincia de Valencia, (*Cendrero, et al., 1986*) y posteriormente tomados como base para diversos modelos de ordenamiento territorial, tal como el Plan General de Ordenación Urbana del Municipio de Ador (*Adhara, 2008*), el Nuevo Plan General de Ordenación Urbanística del Ayuntamiento de Peñíscola en la Generalitat Valenciana (2005). La metodología de determinación de la Calidad para la Conservación se encuentra desarrollada en *Centeno et al., (1994)*.

Romero et al., (2004) utilizaron esta metodología para desarrollar un trabajo de diagnóstico de calidad para la conservación de espacios agrícolas abancalados (aterrazados), en la

parte media y baja de la cuenca del Guiniguada en Gran Canaria (Islas Canarias).

En el país vecino de Chile, *Ferrando y De Luca (2011)* aplicaron una metodología similar en el sistema hidrológico inferior del Río Mapocho, con un reconocimiento geomorfológico y paisajístico que permitió establecer los procesos que lideran la evolución del modelado de las formas naturales.

OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo es la obtención de un esquema en el cual distintas unidades territoriales del entorno de la ciudad de San Agustín, puedan ser evaluadas de una manera integral en cuanto a su Calidad para la Conservación y su afectación por las actividades extractivas que se desarrollan en el área.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

El método utilizado parte del análisis del relieve en su conjunto, para la delimitación de zonas homogéneas en cuanto a la forma de las pendientes y el conjunto de características que de allí se desprenden.

Análisis Geomorfológico

Las principales unidades geomorfológicas fueron definidas en el área mediante la realización de cortes transversales, efectuados en sentido Este-Oeste, de modo tal de cortar las principales estructuras regionales que presentan desarrollo Norte-Sur. Mediante la herramienta de Google Earth se realizaron ocho cortes identificados como Límite Norte (LN), Límite Sur (LS) y Corte 1 (C1) a Corte 6 (C6), cuya ubicación se muestra en la Figura 2.

En base a la información obtenida de los cortes, y al relevamiento de campo se definieron las principales unidades geomorfológicas (Figura 3).

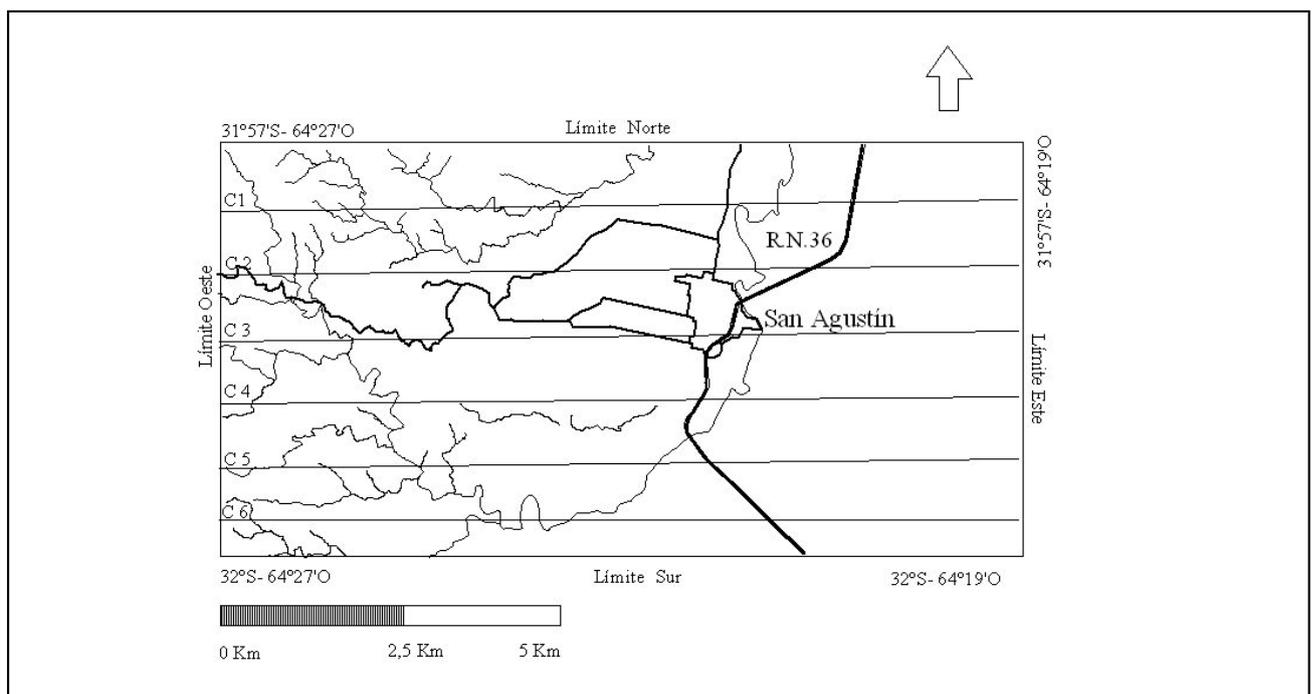


Figura 2. Ubicación de los cortes transversales C1 a C6.

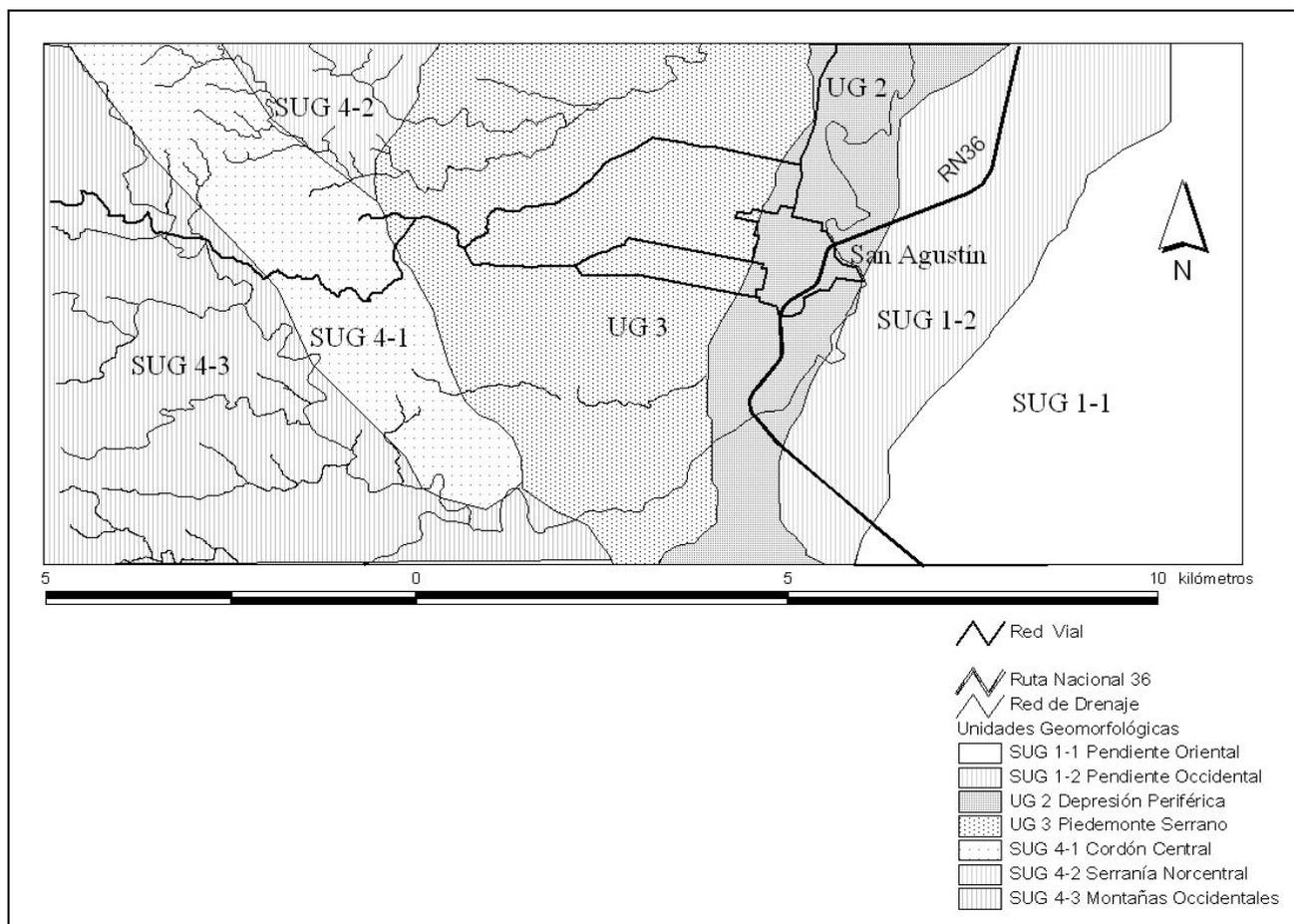


Figura 3. Principales unidades y subunidades geomorfológicas definidas en el área de estudio.

Unidad Geomorfológica UG1 (Plataforma Basculada): constituye un bloque del antiguo basamento cristalino, separado de la montaña a lo largo de una falla longitudinal correspondiente al abrupto de Sierras Chicas. Mediante la geomorfología cuantitativa se han podido diferenciar dos subunidades: **Subunidad Geomorfológica SUG1-1 (Pendiente oriental):** corresponde a la basculación del bloque hacia el Este. El cálculos correspondiente a la Geomorfología Cuantitativa, se muestra

en la Tabla 1 y en forma resumida, junto a las otras unidades en la Tabla 2.

Subunidad Geomorfológica SUG 1-2 (Pendiente occidental) corresponde a la pendiente occidental de la Plataforma Basculada. Figura 3. Se inicia en la divisoria de aguas correspondiente al límite con la SUG 1-1 hasta la Depresión Periférica. Los valores obtenidos en forma similar a la SUG1-1, se muestran resumidos en la Tabla 2.

Tabla 1. Análisis geomorfológico cuantitativo de la SUG 1-1.

Corte	Altura snm		Longitud			Desnivel	Gradiente %	
	Máx	Mín	Desde	Hasta	m		Medio	Máx
LN	570	562	12900	14000	1100	8	0,73	4,3
C1	573	555	12900	13900	1000	18	1,80	5,4
C2	565	553	11800	13800	2000	12	0,60	3,0
C3	578	559	11200	13700	2500	19	0,76	4,6
C4	579	544	10400	13700	3300	35	1,06	3,2
C5	586	557	9540	13600	4060	29	0,71	3,9
C6	593	553	9260	13500	4240	40	0,94	4,6
LS	601	555	9140	13600	4460	46	1,03	4,2
Promedio	581	555	10893	13725	2833	26	1,0	4,2
DE	12	5	1549	167	1390	14	0,4	0,8

Tabla 2. Análisis geomorfológico cuantitativo resumen de las unidades geomorfológicas.

UG	Altura snm		Longitud			Desnivel m	Gradiente %	
	Máx	Mín	Desde	Hasta	m		Medio	Máx
SUG 1-1								
Promedio	581	555	10893	13725	2833	26	1,0	4,2
DE	12	5	1549	167	1390	14	0,4	0,8
SUG 1-2								
Promedio	580	558	10878	9241	1636	22	1,5	4,7
DE	12	19	1533	916	813	10	0,7	1,0
UG 2								
Promedio	562	557	8049	9046	1383	6	0,5	4,9
DE	24	20	952	958	513	5	0,3	1,6
UG3								
Promedio	657	562	4849	7856	3008	95	3,4	10,3
DE	20	25	955	695	1543	40	0,7	2,5
SUG4-1								
Promedio	815	701	2531	3512	1277	115	8,9	23,3
DE	101	59	1420	1014	304	66	5,3	7,8
SUG4-2								
Promedio	796	658	2985	4305	1320	138	12,1	32,5
DE	47	1	573	332	905	45	4,9	4,9
SUG4-3								
Promedio	889	724	109	3054	2945	165	7,3	10,3
DE	27	93	177	2238	2315	85	2,7	2,5

Unidad Geomorfológica UG2 (Depresión Periférica): depresión larga y estrecha, ubicada entre la zona de piedemonte y la Plataforma Basculada, cuyo fondo chato se encuentra ocupado por sedimentos modernos. Figura 3. Tabla 2.

Unidad Geomorfológica UG3 (Piedemonte Serrano): transición gradual entre la Depresión Periférica y la zona de montañas. Superficie ondulada, con inclinación hacia el Este, conformada por sedimentos coluvionales provenientes de las zonas escarpadas. Figura 3. Tabla 2.

Unidad Geomorfológica UG4 (Montañas): zona de montaña correspondiente al cordón de Sierras Chicas de las Sierras Pampeanas. Figura 3.

Subunidad Geomorfológica SUG4-1 (Cordón central): cordón con orientación noroeste – sureste con altura máxima en el sector norte, donde llega a los 948 m. s.n.m. Figura 3. Tabla 2.

Subunidad Geomorfológica SUG4-2 (Serranía Norcentral): conjunto de serranías con pendiente general hacia el Este muy abrupta. Figura 3. Tabla 2

Subunidad Geomorfológica SUG4-3 (Montañas Occidentales): pendiente oriental de Sierras Chicas, cortada por fallas en sentido Este – Oeste que organizan el drenaje de toda la zona. Figura 3. Tabla 2.

Determinación de la Calidad para la Conservación

Una vez identificadas las unidades geomorfológicas, se analizan en cada una de ellas los elementos básicos, ponderados de la siguiente manera:

Geología, Suelos y Vegetación. Se consideran elementos simples. El factor de ponderación, $\pi_i = 1$

Agua. Elemento de importancia tanto a nivel superficial como subterráneo, $\pi_i = 2$

Paisaje. Resultado de la interacción de un conjunto de parámetros simples, $\pi_i = 3$

Puntos Singulares presentes en cada unidad = (+1)

La puntuación para cada unidad geomorfológica se obtiene según la expresión:

$$V_{cc} = \sum (\pi_i * v_i) + n$$

donde:

V_{cc} = valor de calidad para la conservación

π_i = peso del elemento considerado

v_i = valor de calidad del elemento considerado

n = número de puntos de interés singular

Geología

Mediante el relevamiento de campo de la zona de estudio se determinó que los cuerpos geológicos existentes no presentan características especiales como para recomendar el establecimiento de protecciones. Se trata en general de macizos rocosos y de sedimentos muy abundantes en el territorio provincial. De acuerdo a la metodología utilizada se realizó una valoración sobre la base de: Interés científico o didáctico; Singularidad a escala regional y, Condiciones de acceso para su observación. Los resultados son los siguientes:

Sedimentos modernos eólicos. Relieves planos y muy abundantes en el territorio provincial, con buena accesibilidad y posibilidad de estudio en diversos lugares. **vi = 1**

Sedimentos de piedemonte. Relieves ondulados, abundantes en todos los entornos serranos. Buena accesibilidad y posibilidad de estudio en todo el oeste provincial. **vi = 2**

Basamento cristalino. Relieves de montaña, abundantes en toda la zona serrana provincial. Buena accesibilidad. Características de metamorfismo regional particulares. **vi = 3**

Cuerpos filonianos anfíbolíticos y calcáreos. Relieves escarpados de acceso restringido. Rocas de gran interés, presentes en escasos lugares del territorio provincial. **vi = 4**

Tonalitas San Agustín. Relieves ondulados en zona de llanura. Escasos y poco representados en el territorio provincial. Fácil acceso. **vi = 5**

Tonalita Calmayo. Relieve de lomas, con gran cantidad de afloramientos rocosos, escasa cubierta de suelos y vegetación abundante solo en las quebradas y valles. Excelente accesibilidad. **vi = 5**

Ponderación de la Geología en la Matriz de Calidad para la Conservación.

En el análisis se han considerado los porcentajes de terreno que cubren cada litología dentro de la respectiva unidad geomorfológica. Tabla 3.

Suelos

La información de base para el mapeo se obtuvo de la producida por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, disponible en Internet a través del Visor GeoINTA. La valoración de la calidad para la conservación de los suelos se realizó en base al Índice de Productividad (IP) (Arens y Etchevehere, 1966), debido a que el mismo incluye un conjunto de variables de importancia ambiental, y además existe disponibilidad de sus valores en la zona de estudio. En las llanuras orientales del área de estudio, se desarrolla una Asociación de Suelos, simbolizada como MKtc-2. Son Molisoles, de textura franco limosa, propios de áreas semihúmedas bajo cobertura de pasturas y con material parental loess. Son suelos profundos, con espesores entre 60 a 80 cm, con alta carga orgánica, enriquecida con nutrientes del suelo de la superficie (horizonte C). El Índice de Productividad es de 61.

Tomando como base el valor del Índice de Productividad de 61 de esta unidad, para un máximo de 80, correspondiente a la zona, se puede valorar su calidad para la conservación en base al siguiente esquema: IP = 0-20 - Calidad = 1; IP = 20- 40 - Calidad = 2; IP = 40 - 60 - Calidad = 3; IP = 60 - 80 - Calidad = 4.

A MKtc-2 le corresponde un valor de Calidad = 4.

La unidad simbolizada como EPLi-17, se ubica en el sector occidental, cubriendo toda las zonas de pendientes y valles, en los que no se encuentran afloramientos rocosos. Es un Complejo de Suelos. El orden principal de suelos es de los Entisoles. Son suelos incipientemente formados, pobres en materia orgánica y con horizontes incipientes. Textura franco-arenosa. Índice de Productividad = 6.

A EPLi-17 le corresponde un valor de Calidad = 1.

En forma similar al análisis efectuado para la geología, se han considerado los porcentajes de terreno que cubren cada unidad de suelos, dentro de la respectiva unidad geomorfológica. Tabla 3.

Tabla 3. Ponderación para el cálculo de la calidad para la conservación.

UG	Geología (vi * pi)	Suelos (vi * pi)	Acuíferos (vi * pi)	Vegetación (vi * pi)
UG 1	1 * 1 = 1	1 * 4 * 1 = 4	3 * 2 = 6	1 x 1 x 1 = 1
UG 2	1 * 1 = 1	0,966 * 4 * 1 = 3,86 0,034 * 1 * 1 = 0,034 Total = 3,89	3 * 2 = 6	0,97 x 1 x 1 = 0,97 0,03 x 0 x 1 = 0 0,41 x 4 x 1 = 1,64 Total = 2,61
UG 3	0,986 * 2 * 1 = 1,973 0,010 * 4 * 1 = 0,041 0,003 * 5 * 1 = 0,170 Total = 2,18	0,21 * 4 * 1 = 0,81 0,77 * 1 * 1 = 0,77 0,02 * 0 * 1 = 0 Total = 1,58	3 * 2 = 6	0,21 x 2 x 1 = 0,42 0,77 x 0 x 1 = 0 0,02 x 0 x 1 = 0 Total = 0,42
SUG 4-1	0,749 * 3 * 1 = 2,247 0,153 * 4 * 1 = 0,612 0,098 * 4 * 1 = 0,392 Total = 3,25	0,75 * 1 * 1 = 0,75 0,25 * 0 * 1 = 0 Total = 0,75	3 * 2 = 6	0,75 x 4 x 1 = 3 0,25 x 0 x 1 = 0 Total = 3
SUG 4-2	3 * 1 = 3	1 * 1 * 1 = 1	3 * 2 = 6	1 x 4 x 1 = 4
SUG 4-3	0,636 * 3 * 1 = 1,908 0,111 * 4 * 1 = 0,443 0,253 * 5 * 1 = 1,267 Total = 3,62	0,66 * 1 * 1 = 0,66 0,34 * 0 * 1 = 0 Total = 0,66	3 * 2 = 6	0,66 x 4 x 1 = 2,64 0,34 x 0 x 1 = 0 Total = 2,64

Vegetación

La vegetación se distribuye a lo largo del gradiente altitudinal formando pisos. Las diferencias de altitud determinan cambios en la vegetación que se manifiestan con la aparición de especies típicas. El "bosque serrano" se desarrolla en forma discontinua con plantas nativas en su mayoría y algunas exóticas. Por arriba de las comunidades de bosque y matorral serranos, a partir de los 1.000 metros de altitud, se presentan los pastizales y bosquecillos de altura. Se valora con mayor puntuación a la presencia de especies protegidas, singulares y la existencia de una alta densidad de elementos vegetales. En función de ellos, se aplica a cada unidad geomorfológica, un valor de 1 a 4.

1 - Agricultura extensiva; 2 - Vegetación exótica; 3 - Pastizales de altura (a partir de los 1000 m);

4 - Bosques Serranos.

En el análisis se han considerado los porcentajes de terreno que cubren cada tipo de vegetación, dentro de la respectiva unidad geomorfológica. Tabla 3.

Aguas subterráneas

En toda la zona de estudio, la capa freática se encuentra entre los 10 y 15 metros de profundidad, con un desarrollo consecutivo con la forma superficial del terreno.

La vulnerabilidad se evaluó en base a la metodología de *Foster e Hirata (1988)*, en la que se analizan y ponderan ciertas variables para conformar un índice cualitativo que permite calificar a la vulnerabilidad. Ellas son:

1. Carácter hidráulico del acuífero: Libre = 1; Semiconfinado = 0,5; Confinado = 0,2; Surgente = 0

2. Litología de la zona no saturada: material rocoso que se encuentra por encima del acuífero.

Materiales no consolidados: desde 0,2 para arcillas a 0,83 para gravas.

Materiales consolidados porosos: desde 0,43 para arcilitas a 0,95 para calizas.

Materiales consolidados densos: desde 0,55 para rocas ígneas y metamórficas a 1,20 para calizas cristalinas

3. Profundidad del acuífero. < 5 m = 0,9 ; 5 m -20 m = 0,7 ; 20 m -100 m = 0,5; > 100 m = 0,3

El Índice de vulnerabilidad (IV) es igual a $1 * 2 * 3$.

Para el caso en estudio, se adiciona el factor suelos que considera la atenuación, sobre todo de los agroquímicos, en base a las distintas texturas: Suelos arenosos = 0,9; Suelos limosos = 0,8; Suelos arcillosos = 0,3.

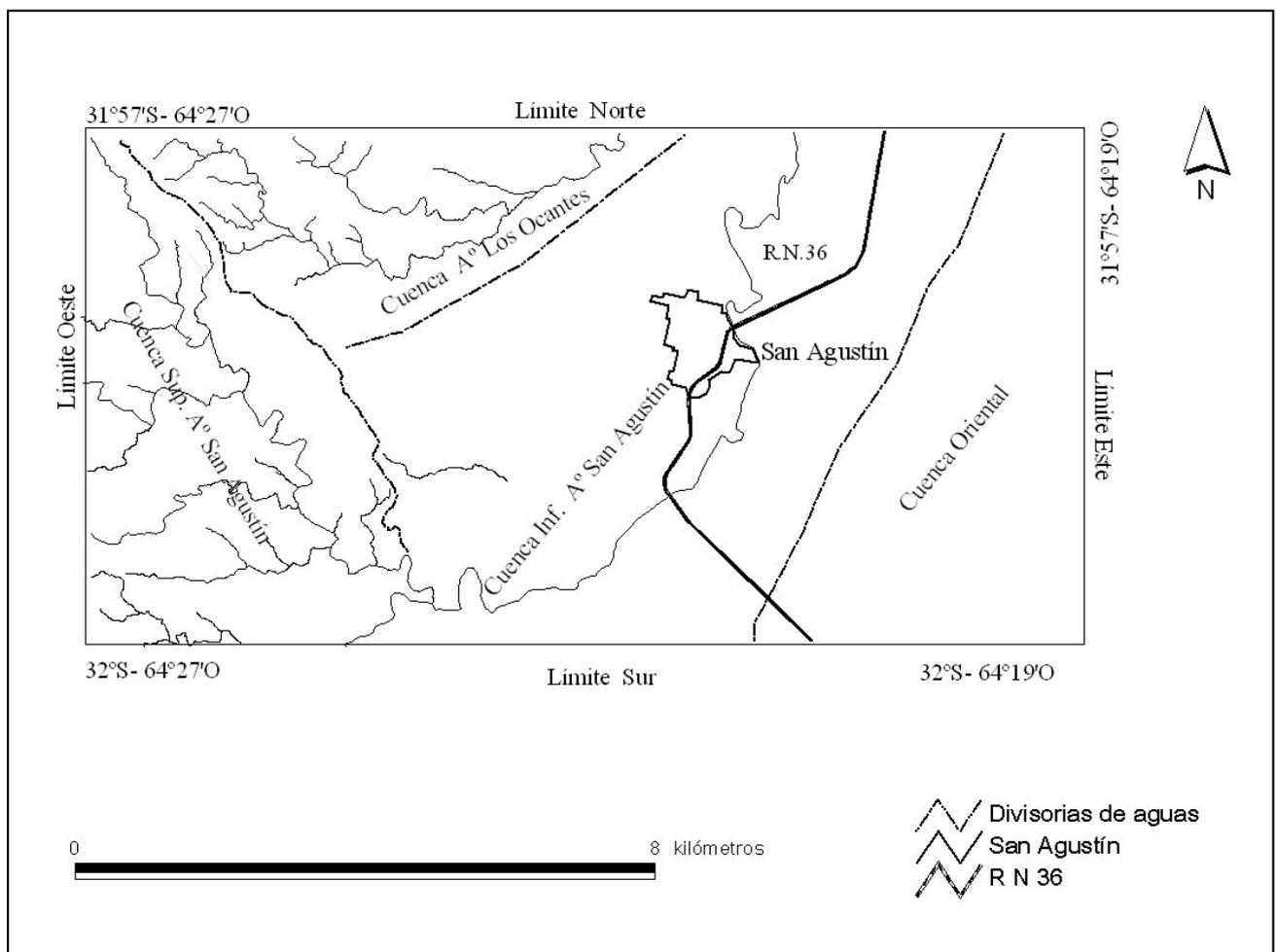


Figura 4. Cuencas definidas en el área de estudio.

La escala de vulnerabilidad definida en el trabajo de Foster e Hirata (1991), es la siguiente:

1. Vulnerabilidad muy baja a nula: < 0,1
2. Vulnerabilidad baja: 0,1 - 0,3
3. Vulnerabilidad moderada: 0,3 - 0,5
4. Vulnerabilidad alta: 0,5 - 0,7
5. Vulnerabilidad muy alta a extrema: > 0,7

En el área de estudio pueden definirse diversas cuencas subterráneas, dónde el agua freática va siguiendo las formas del terreno. Figura 4.

1. La cuenca suroccidental limitada al oeste por las mayores alturas de la zona y hacia el noreste por una divisoria de aguas, comprende toda la cuenca superior del A° San Agustín.

2. La misma divisoria de aguas separa la cuenca suroccidental de la cuenca centro occidental, que lleva sus aguas, al igual que el A° de los Ocantes, hacia la cuenca inferior del A° San Agustín.

3. La cuenca centro oriental se nutre de las aguas que provienen de las pendientes occidentales de la plataforma basculada y van hacia el A° San Agustín.

4. Finalmente la cuenca oriental, se forma con las aguas de la pendiente oriental de la plataforma basculada, alejándose en ese sentido de la zona de estudio.

Si bien las condiciones generales de vulnerabilidad del agua subterránea son similares, la dirección del flujo subterráneo definida por la geomorfología superficial, y las fuentes de contaminación generan un nivel de riesgo muy cambiante.

UG-1: Presenta un acuífero freático a 10 m. de profundidad, que se desarrolla dentro de un subsuelo de sedimentos modernos de origen eólico. Tabla 4

UG-2: Similar en el análisis a la Plataforma Basculada, presenta un acuífero freático a 10 m. de profundidad, que se desarrolla dentro de un subsuelo de sedimentos modernos de origen eólico. Tabla 4.

UG-3: Presenta un acuífero freático a 10 m de profundidad, que se desarrolla dentro de un subsuelo de sedimentos arenosos de origen coluvial. Tabla 4.

UG-4: Representa el sector donde ocurre la infiltración del agua y la recarga del acuífero. La protección del mismo, se consigue mediante la cubierta de vegetación autóctona: bosque serrano o pastizal de altura. De este modo se minimiza el escurrimiento superficial. El agua normalmente es captada por pozos en los valles intermontanos. La zona de infiltración está limitada hacia el Oeste por las mayores alturas de los cordones montañosos. La capa freática se encuentra a 10 m de profundidad. Tabla 4.

Tabla 4. Vulnerabilidad de acuerdo a Foster e Hirata (1988).

UG	Acuífero	Prof.	Subsuelo	Vulnerabilidad	Grado de Vulnerabilidad
UG 1	Libre: 1	10 m: 0,7	Loess: 0,5	0,35	3- Moderada
UG 2	Libre: 1	10 m: 0,7	Loess: 0,5	0,35	3- Moderada
UG 3	Libre: 1	10 m: 0,7	Coluvial: 0,6	0,42	3- Moderada
UG 4	Libre: 1	10 m: 0,7	Rocas: 0,63	0,44	3- Moderada

La ponderación de la vulnerabilidad de los acuíferos ponderada se muestra en la Tabla 3.

Recurso Paisajístico

El método aplicado para su evaluación en función de la calidad para la conservación, consistió en desglosar el paisaje, en una serie de parámetros perceptuales simples y de valoración sencilla. A cada uno de los parámetros se les ha asignado un valor de Calidad y otro de Fragilidad, entendiéndose por Calidad, el valor intrínseco de un paisaje desde el punto de vista visual, y por Fragilidad al riesgo de deterioro del mismo como consecuencia de la implantación de actividades humanas.

Calidad Visual del Paisaje

La calidad del paisaje puede definirse como un valor intrínseco, en función de la calidad de las vistas directas que desde él se divisan, y del horizonte escénico que lo enmarca (Serrano i Giné, 2009). Para definir la calidad del paisaje se emplearon las siguientes variables:

Relieve

Se sigue el criterio de asignar una mayor calidad a las unidades más abruptas, con valles estrechos y cimas empinadas,

frente a las que corresponden a valles abiertos dominados por formas llanas.

El relieve se determinó en base al gradiente medio (GM%) calculado para cada unidad geomorfológica (Tablas 1 a 7). Para obtener los entornos para las cinco categorías adaptados a la zona de estudio, se consideró el mayor valor de gradiente medio calculado en todas las unidades geomorfológicas y se lo dividió por cinco: $12,1\% / 5 = 2,42\%$. Tabla 5.

Complejidad Topográfica

La calidad visual de un paisaje será mayor en aquellas unidades ocupadas por formas que indican complejidad estructural. Por el contrario una forma simple, como puede ser una planicie inclinada, presentará una baja calidad.

Como criterio de categorización de las unidades geomorfológicas se consideró a la Desviación Estándar (DE) del Gradiente medio como representativo de la complejidad topográfica. Para obtener los entornos para las cinco categorías adaptados a la zona de estudio, se consideró el mayor valor de DE del Gradiente medio calculado en todas las unidades geomorfológicas y se lo dividió por cinco: $5,3 / 5 = 1,06$. Tabla 5.

Tabla 5. Categorías de calidad en función del relieve del área de estudio.

Relieve		Complejidad Topográfica		
Entornos GM %	GM (%) de la U.G.	DE de GM	DE de GM para las U.G.	Calidad
0,00 - 2,42	SUG 1-1 = 1 SUG 1-2 = 1,5 UG 2 = 0,5 UG 3 = 0,7	0,00 - 1,06	SUG 1-1=0,4 SUG 1-2 = 0,7 UG 2 = 0,3	1
2,42 - 4,84	UG 3 = 3,4	1,06 - 2,12		2
4,84 - 7,26		2,12 - 3,18	SUG 4-3 = 2,7	3
7,26 - 9,68	SUG 4-1= 8,9 SUG 4-3 = 7,3	3,18 - 4,24		4
9,68 - 12,1	SUG 4-2 = 12,1 SUG 4-2 = 4,9	4,24 - 5,30	SUG 4-1=5,3	5

Desnivel

El desnivel (D), considerado como la diferencia en metros entre la altura máxima y mínima sobre el nivel del mar fue calculado en el análisis geomorfológico, para cada una de las unidades. Tablas 1 a 7. Los valores medios calculados fueron los siguientes SUG1-1 = 26; SUG1-2 = 22; UG2 = 6; UG3= 95; SUG4-1= 115; SUG4-2= 138; SUG4-3= 165. Continuando con el mismo criterio de tomar el valor máximo y dividirlo por cinco, se obtienen la siguiente clasificación: 1= 0 a 33 m; 2= 33 a 66 m; 3= 66 a 99 m; 4 = 99 a 132 m; 5 =132 a 165 m. Tabla 6.

Vegetación y usos del suelo

La vegetación y los usos del suelo son factores fundamentales para evaluar la calidad del paisaje, por ser elementos de extensión territorial. La calidad se puede definir mediante la combinación de la presencia de vegetación natural y especies exóticas y a su vez la existencia de los tres estratos: pasturas-matorral-arboleda. Los valores de Calidad (C) se han establecido del siguiente modo:

Agricultura extensiva. Cultivos homogéneos. C = 1; Agricultura predominante sobre árboles y arbustos nativos y exóticos C = 2; Montes nativos y exóticos predominantes sobre agricultura C = 3; Monte de repoblación joven C = 4; Monte autóctono o de repoblación antigua C = 5.

En las subunidades SUG 1-1 y SUG 1-2, se desarrolla la actividad agrícola en forma extensiva, con predominio del cultivo de soja y maíz. La vegetación natural ha quedado restringida a algunos relictos de bosque natural incluidos en la matriz cultivada y en lomadas no aptas para labores agrícolas. Calidad = 1 Agricultura extensiva.

En la unidad UG 2 se encuentra la Localidad de San Agustín y campos con agricultura extensiva en la zona central. Hacia el sur se encuentra bosque serrano colindante con el piedemonte. Calidad = 2 La unidad UG 3 presenta bosque serrano predominante sobre campos de cultivo. En zonas de explotación minera abandonadas se han originando montes de repoblación joven. Calidad = 4.

En la unidad SUG 4-1 se encuentra el mayor emprendimiento minero de San Agustín, posicionado junto a otras tres canteras, desde la línea divisoria de aguas hacia el Este. Grandes extensiones de bosque autóctono rodean las canteras y

hacia el Oeste de la línea divisoria de aguas, el bosque nativo denso, domina el paisaje. Calidad = 4.

En las subunidades SUG 4-2 y SUG 4-3, se identifican los montes de repoblación antigua, surcados por ríos y arroyos, valorados tanto por su variedad en especies nativas, como por su densidad. Calidad = 5. Tabla 6.

Presencia de masas de agua

Se considera que la existencia de láminas de agua en un paisaje constituye un elemento de indudable valor. En el área de estudio la presencia de pequeños arroyos y vertientes, aunque no sean perennes, y no sean percibidos en el conjunto de la unidad, presentan un gran aporte paisajístico, por el verdor que implican para la zona y la flora (helechos, etc.) y fauna (ranas, etc.) que los habitan. La subunidad SUG 1-1 no posee agua. Calidad = 1. La subunidad SUG 1-2, está surcada por el Arroyo San Agustín. Calidad = 2. La UG 2 está recorrida en toda su extensión por el Arroyo San Agustín. Calidad = 2. En la unidad UG 3 se encuentra situado el Arroyo de los Ocantes, otros arroyos que atraviesan la parte central y el Arroyo San Agustín. Calidad = 2. En cuanto a las subunidades SUG 4-1, SUG 4-2 y SUG 4-3, están recorridas por vertientes y arroyadas estacionales. Calidad = 2.

Parámetro de Calidad para masas de agua.

Unidad sin agua = 1; Unidad con ríos, arroyos, canales o acequias = 2; Unidad con embalses, lagunas o represas = 3. Tabla 6

Infraestructura y población

Se ha considerado la presencia y densidad de rutas, caminos, calles y urbanización, disminuyendo la Calidad a medida que se incrementa la existencia de rutas principales, secundarias y terciarias, y de poblaciones dispersas y núcleos urbanos. Para el cálculo se considera el sistema de cuadrículas, calculando el área cubierta por cada una de las intervenciones humanas.

Se establece la siguiente escala para Calidad para infraestructura y población. Zona con urbanizaciones de alta densidad, industrias, canteras y vertederos. Acceso por rutas principales. Calidad = 1. Zona rural con poblaciones y edificaciones abundantes y acceso por rutas secundarias Calidad = 2. Zona rural con pueblos y edificaciones dispersas y acceso por rutas terciarias.

Calidad = 3. Zona rural con construcciones dispersas, escasas e inexistentes. Calidad = 4. Zona rural sin construcciones, ni vías de comunicación principales. Calidad = 5.

Las subunidades SUG 1-1 y SUG 1-2 presentan algunos puestos de estancias, construcciones dispersas e importantes áreas donde la edificación es inexistente. Se encuentra en ella, la ruta nacional 36, que impacta visualmente a ambas subunidades. La valoración de Calidad es de 4 por infraestructura y de 1 por vías de acceso. Valor de Calidad adoptado =3.

En la unidad UG 2 está ubicada la ciudad de San Agustín, con 2870 (*Censo 2001*). Se accede por la ruta 36. Calidad = 1. En la unidad UG 3 la zona es rural, con construcciones escasas. La valoración de Calidad es de 4. La subunidad SUG 4-1 es zona rural sin construcciones, ni vías de comunicación importantes. Calidad = 5. La subunidad SUG 4-2 no presenta edificaciones dispersas, ni zonas industriales o canteras. Calidad = 5. En la zona de SUG 4-3 se encuentra Villa Uruburu, con algunas casas y la Estancia Santa Rita, con su capilla de piedras. Calidad = 4. Tabla 6.

Tabla 6. Calidad por Desnivel (D), Vegetación (V), Agua (A) e Infraestructura y Población (IyP).

U.G.	Calidad por D	Calidad por V	Calidad por A	Calidad por IyP
SUG 1-1	1	1	1	3
SUG 1-2	1	1	2	3
UG 2	1	2	2	1
UG 3	3	4	2	4
SUG 4-1	4	4	2	5
SUG 4-2	5	5	2	5
SUG 4-3	5	5	2	4

Fragilidad o Vulnerabilidad Visual del Paisaje

La Fragilidad Visual se puede definir como la susceptibilidad de un territorio al cambio cuando se desarrolla un uso sobre él; es la expresión del grado de deterioro que el paisaje experimentarían ante la incidencia de determinadas actuaciones (*Serrano i Giné, 2009*). La calidad visual de un paisaje es una cualidad intrínseca del territorio que se analiza. La fragilidad, en cambio, depende del tipo de actividad que se piensa desarrollar. El espacio visual puede presentar diferente vulnerabilidad según se trate de una actividad u otra. Los factores utilizados para la valoración de la fragilidad del paisaje son los siguientes:

Vegetación (V)

Interviene en la manera en que puede ocultar un determinado uso del suelo. De allí la importancia de la estratificación en altura: Formación arbórea densa y alta, F = 1; Formación arbórea dispersa y baja, F = 2; Matorral denso F = 3; Matorral disperso F = 4; Pastizales y cultivos F = 5.

En las subunidades SUG 1-1 y SUG 1-2, se desarrolla la actividad agrícola en forma extensiva, con predominio del cultivo de soja y maíz. Fragilidad = 5 correspondiente a pastizales y cultivos.

En la unidad geológica UG 2 se encuentra San Agustín, una zona de campos con agricultura extensiva y una zona de bosque serrano disperso. Fragilidad = 4.

La UG 3 presenta campos de cultivo, entremezclados con bosque serrano. Fragilidad = 3.

En la subunidad SUG 4-1 hay grandes extensiones de bosque nativo denso. Fragilidad = 1.

En las subunidades SUG 4-2 y SUG 4-3, hay montes de repoblación antigua de alta densidad. Fragilidad = 1. Tabla 7.

Relieve (R)

La fragilidad del paisaje se incrementa con la pendiente, debido a que cualquier acción sobre el territorio o uso del suelo queda más expuesto mientras más empinado es el relieve.

Para la definición de la Fragilidad se utilizó la misma escala que para la Calidad. Tabla 7.

Incidencia Visual

Contemplada como la posición topográfica ocupada dentro de la unidad de paisaje. Se han clasificado las unidades geomorfológicas con un criterio basado en la altitud, pendiente y abruptuosidad de las formas. Se consideran de mayor fragilidad las zonas culminantes, algo menor las laderas y por último las vaguadas y fondos de valles. Tabla 7.

Relieve negativo, valles y vaguadas amplios y extensos, en unidades pequeñas. F = 1

Relieve negativo, valles y vaguadas amplios y extensos, en unidades grandes. F = 2

Relieve neutro, llanuras y mesetas. F = 3

Relieve positivo, resaltes, cerros, montes en unidades pequeñas F = 4

Relieve positivo, resaltes, cerros, montes en unidades grandes. F = 5

Accesibilidad

Aquí se incluye la influencia de la distribución de los observadores potenciales del territorio. Una actividad o uso del suelo tendrá mayor impacto visual en las proximidades de los espacios habitados y rutas.

Unidades sin caminos, no adyacentes a otras con caminos, a más de 1,5 km de núcleos habitados. F = 1.

Unidades con caminos terciarios, a más de 1,5 km de núcleos habitados. F = 2.

Unidades con caminos secundarios y entre 1,5 y 1,0 km de núcleos habitados. F = 3.

Unidades con caminos primarios y entre 1,0 y 0,5 km de núcleos habitados. F = 4.

Unidades atravesadas por caminos principales y que contienen núcleos habitados. F = 5.

Las subunidades SUG 1-1, SUG 1-2 son atravesadas por la ruta 36, caminos secundarios y de acceso a los campos. Fragilidad = 5. En la UG 2 se encuentra la zona más poblada, con mayor comunicación por su desarrollo industrial y agropecuario. Fragilidad = 5.

La UG 3 contiene caminos secundarios y calles y caminos para tránsito pesado que permiten el acceso del transporte a las canteras. Fragilidad = 4.

La SUG 4-1, es la zona de las principales canteras, rodeada de caminos secundarios y vecinales, cruzada en su parte central, por caminos terciarios y calles. Fragilidad = 4.

La SUG 4-3 incluye el camino que atraviesa la Estancia Santa Rita para perderse en las sierras hacia Villa General Belgrano y caminos vecinales. Fragilidad = 4.

La SUG 4-2 es la única que no tiene caminos y es adyacente a las anteriores. Fragilidad = 3. Tabla 7.

Tabla 7. Fragilidad por Relieve (R), Vegetación (V), Incidencia Visual (IV) y Accesibilidad (AC).

U.G.	Fragilidad por R	Fragilidad por V	Fragilidad por IV	Fragilidad por AC
SUG 1-1	1	5	2	5
SUG 1-2	1	5	2	5
UG 2	1	4	3	5
UG 3	2	3	4	4
SUG 4-1	4	1	5	4
SUG 4-2	5	1	5	3
SUG 4-3	4	1	5	4

Evaluación del Paisaje

Dado que no todos los parámetros descritos tienen la misma importancia para determinar la calidad global del paisaje, se ha aplicado un procedimiento de agregación ponderada, asignando a cada parámetro un peso o coeficiente que refleja la contribución de dicho parámetro al valor paisajístico de la unidad.

Pesos asignados para la Calidad (pic) y Fragilidad (pif).

Relieve pic=3; pif=3; Complejidad Topográfica pic=3; Desnivel pic=1; Vegetación pic=2; pif=2;

Presencia de agua pic=1; Infraestructura y Población pic=2; Incidencia Visual pif=3; Accesibilidad pif=2.

Cálculo de los índices de calidad (Vc) y fragilidad (Vf)

En base a los diferentes pesos de los elementos se utiliza la siguiente expresión:

$$Vc = \sum pi \times vi / \sum pi$$

$$Vf = \sum pi \times vi / \sum pi$$

Donde,

“vi” es el valor del parámetro “i”.

“pi” es el peso del parámetro “i”

Calidad Total del Paisaje.

Este parámetro denominado (Cp), se obtiene por combinación de los índices de calidad y fragilidad, según la expresión: $Cp = (2 \times Vc + Vf) / 3$

Se ha utilizado esta expresión, considerando la calidad del paisaje, como un factor más determinante, que la fragilidad, a la hora de establecer el interés para la conservación de la unidad.

Los valores obtenidos en Cp, se dividieron en categorías que se incorporan en la tabla de cálculo de la calidad de conservación, multiplicados por su peso.

Esta conversión, se realiza de acuerdo con la media (Cpm) y la desviación estándar (DE) del conjunto de las unidades y ajustando el valor en una de las cinco categorías de la siguiente tabla:

Rango de valor de Cp de la unidad	Categoría
$Cp \leq Cpm - 1,25 DE$	0
$Cpm - 1,25 DE \leq Cp \leq Cpm - 0,75 DE$	1
$Cpm - 0,75 DE \leq Cp \leq Cpm$	2
$Cpm \leq Cp \leq Cpm + 0,75 DE$	3
$Cpm + 0,75 DE \leq Cp \leq Cpm + 1,25 DE$	4
$Cpm + 1,25 DE \leq Cp$	5

Descripción del procedimiento para la evaluación del paisaje.

De las variables analizadas surge el resultado expresado en la Tabla 10, en donde los valores de calidad y fragilidad son multiplicados por los factores 1, 2 ó 3 y cuyo producto y sumatoria final, dará por resultado la elaboración de la matriz de calidad total del paisaje.

En este contexto, cada unidad geomorfológica fue valorada según los parámetros establecidos en el método adoptado en cuanto a calidad del paisaje (Vc) y fragilidad del paisaje (Vf) en categorías de 1 (baja) a 5 (alta).

Tabla 8. Matriz para el cálculo de la Calidad del Paisaje. CR: Calidad por Relieve; CCT: Calidad por Complejidad Topográfica; CD: Calidad por Desnivel; CV: Calidad por Vegetación; CA: Calidad por agua; ClyP: Calidad por Infraestructura y Población; FV: Fragilidad por Vegetación; FR: Fragilidad por Relieve; Fragilidad por Incidencia Visual; FAc: Fragilidad por Accesibilidad.

U. G.	CR (*3)	CCT (*1)	CD (*1)	CV (*2)	CA (*1)	ClyP (*2)	FV (*2)	FR (*3)	FIV (*3)	FAc (*2)	Vc	Vf	Cp
SUG 1-1	3	1	1	2	1	6	10	3	6	10	1,4	2,9	1,90
SUG 1-2	3	1	1	2	2	6	10	3	6	10	1,5	2,9	1,97
UG 2	3	1	1	4	2	3	8	3	9	10	1,4	3,0	1,93
UG 3	6	1	3	8	2	8	6	6	12	8	2,8	3,2	2,93
SUG 4-1	12	5	3	8	2	10	2	12	15	8	4,0	3,7	3,90
SUG 4-2	15	5	5	10	2	10	2	15	15	6	4,7	3,8	4,40
SUG 4-3	12	3	5	10	2	8	2	12	15	8	4,0	3,7	3,90

Resultados de calidad total promedio y desviación estándar.

La calidad total Cp se debe categorizar a fin de incorporar su valor en la tabla de cálculo de la Calidad para la Conservación, donde entraría multiplicado por su peso de 3.

Esta conversión se realiza de acuerdo con la media Cpm (Calidad Total Promedio) y la desviación estándar DE, del conjunto de las unidades y de esa forma se determina la categoría, siendo DE la desviación estándar de las muestras.

Los valores calculados son:

$$Cpm = 2,99$$

$$DE = 1,08$$

$$1,25 * DE = 1,35$$

$$0,75 * DE = 0,81$$

Rango de valor de Calidad Total y determinación de la categoría. Tabla 9

Tabla 9. Rangos de valor de calidad total y determinación de la categoría.

Rango de valor de Cp		Categoría
$Cp \leq Cpm - 1,25 DE$	$Cp \leq 2,99 - 1,35 = 1,64$	0
$Cpm - 1,25 DE \leq Cp \leq Cpm - 0,75 DE$	$1,64 < Cp \leq 2,99 - 0,81 = 2,18$	1
$Cpm - 0,75 DE \leq Cp \leq Cpm$	$2,18 \leq Cp \leq 2,99$	2
$Cpm \leq Cp \leq Cpm + 0,75 DE$	$2,99 \leq Cp \leq (2,99 + 0,81) = 3,80$	3
$Cpm + 0,75 DE \leq Cp \leq Cpm + 1,25 DE$	$3,80 \leq Cp \leq 4,34$	4
$Cpm + 1,25 DE \leq Cp$	$4,34 \leq Cp$	5

En base a estos rangos se establece la categoría para la Calidad del Paisaje.

SUG 1-1: Cp = 1,90 - Categoría = 1; SUG 1-2: Cp = 1,97 - Categoría = 1; UG 2: Cp = 1,93 - Categoría = 1; UG 3: Cp = 2,93 - Categoría = 2; SUG 4-1: Cp = 3,90 - Categoría = 4; SUG 4-2: Cp = 4,40 - Categoría = 5; SUG 4-3: Cp = 3,90 - Categoría = 4.

Puntos Singulares

Los puntos singulares se consideran como elementos mejorantes de la calidad, sumando un punto en la valoración de la unidad geomorfológica en la que se encuentran. Para la zona de estudio no se definieron puntos singulares.

Integración de datos para la obtención de la Calidad para la Conservación

El análisis efectuado para cada una de las unidades geomorfológicas, en cuanto a las variables: geología, suelos, aguas subterráneas, vegetación y paisajes, debe ponderarse con los factores apropiados para conformar el valor final de Calidad para la Conservación. En la Tabla 10, puede observarse el cálculo realizado para la zona de estudio.

Una vez obtenido el valor para la conservación de cada unidad geomorfológica VCC, se asignará un valor de categoría, de manera similar a la categorización del paisaje.

El valor promedio de los Vcc es $V_{ccm} = 20,22$ y la desviación estándar $DE = 5,86$, por lo que $1,25 * DE = 7,32$ y $0,75 * DE = 4,39$

De acuerdo a estos valores se clasificarán las unidades en función del siguiente listado. Tabla 11.

Tabla 10. Cálculo del Valor para la Calidad para la Conservación (VCC). G= Geología; S= Suelos; A= Aguas; V= Vegetación; Cp = Calidad del Paisaje.

U. G.	G (1*)	S (*1)	A (*2)	V (*1)	Cp (*3)	VCC
SUG 1-1	1	4	6	1	3	15
SUG 1-2	1	4	6	1	3	15
UG 2	1	3,89	6	2,61	3	16,5
UG 3	2,18	1,58	6	0,42	6	16,18
SUG 4-1	3,25	0,75	6	3	12	25
SUG 4-2	3	1	6	4	15	29
SUG 4-3	3,62	0,66	6	2,64	12	24,9

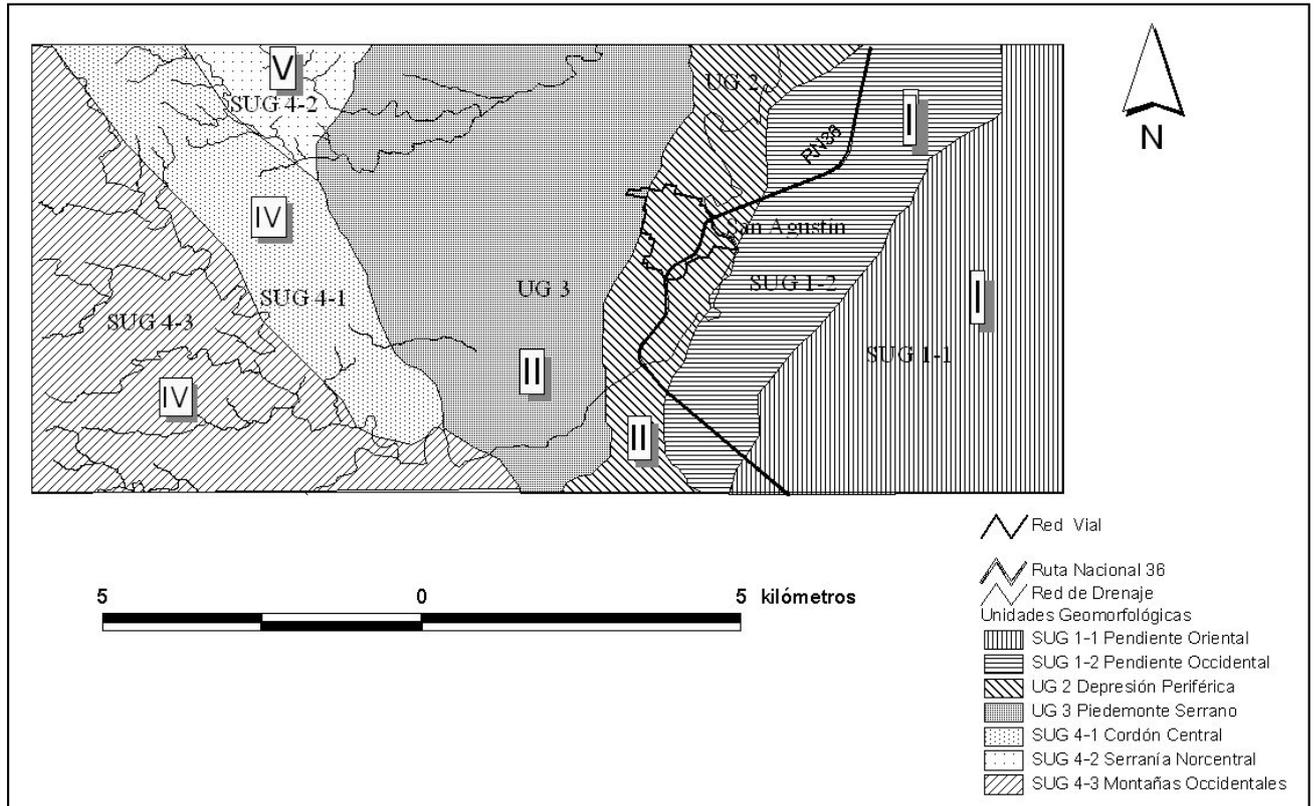


Figura 5. Categorización de las Unidades Geomorfológicas.

Tabla 11. Cálculo de la categoría para la calidad para la conservación.

Rango de valor de VCC de la unidad		Cat	Calidad
$V_{cc} \leq V_{ccm} - 1,25 DE$	$V_{cc} \leq 20,22 - 7,32 = 12,90$	0	Deficiente
$V_{ccm} - 1,25 DE \leq V_{cc} \leq V_{ccm} - 0,75 DE$	$12,90 < V_{cc} \leq 15,83$	I	Muy Baja
$V_{ccm} - 0,75 DE \leq V_{cc} \leq V_{ccm}$	$15,83 < V_{cc} \leq 20,22$	II	Baja
$V_{ccm} \leq V_{cc} \leq V_{ccm} + 0,75 DE$	$20,22 < V_{cc} \leq 24,61$	III	Moderada
$V_{ccm} + 0,75 DE \leq V_{cc} \leq V_{ccm} + 1,25 DE$	$24,61 < V_{cc} \leq 27,54$	IV	Alta
$V_{ccm} + 1,25 DE \leq V_{cc}$	$27,54 \leq V_{cc}$	V	Muy Alta

Esta categorización es el valor final al que se arriba, como resultado de todo el trabajo de evaluación de los factores tenidos en cuenta para la determinación de la calidad para la conservación.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos son acordes con las características de la zona de estudio. La calidad para la conservación se incrementa hacia el oeste, hacia la zona serrana, en la cual se dan los mejores paisajes y existe un uso del suelo adecuado. Las planicies orientales y la depresión central presentan categorías bajas acorde a su posición en el paisaje, la existencia de urbanizaciones, caminos, etc. y un subsuelo con sedimentos de origen eólico, aluvial, coluvial. En cuanto a la zona de montaña, se distingue un cordón serrano, con pendientes abruptas y visuales muy largas, extendidas hacia este y oeste del paisaje. Por su parte, las serranías suroccidentales presentan las mayores alturas de la zona de estudio y actividades de ganadería, que no afectan a la vegetación de bosque autóctono preservado. Tabla 12.

Tabla 12. Resultados de la categorización en función de la calidad para la conservación.

U. G.	VCC	Categoría	Calidad
SUG 1-1	15	I	Muy Baja
SUG 1-2	15	I	Muy Baja
UG 2	16,5	II	Baja
UG 3	16,18	II	Baja
SUG 4-1	25	IV	Alta
SUG 4-2	29	V	Muy Alta
SUG 4-3	24,9	IV	Alta

ÁREAS IMPACTADAS POR LA MINERÍA

La minería de calcáreos que se explotan para triturados pétreos, y como suplemento para suelos agrícolas es la principal en la zona. Como establecimiento representativo se analizó la firma Cantera San Agustín SA. A los fines de la presente

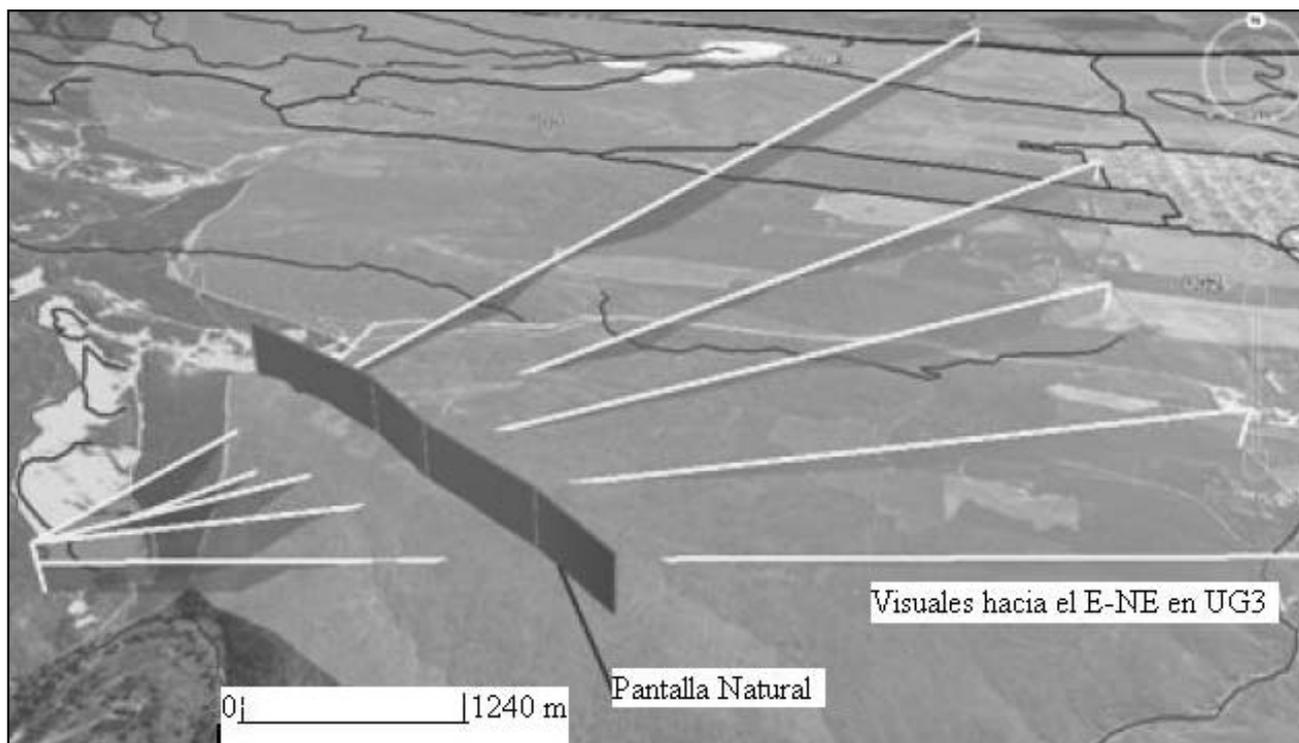


Figura 6. Impacto visual del frente sur de la cantera San Agustín sobre la UG3. Google Earth

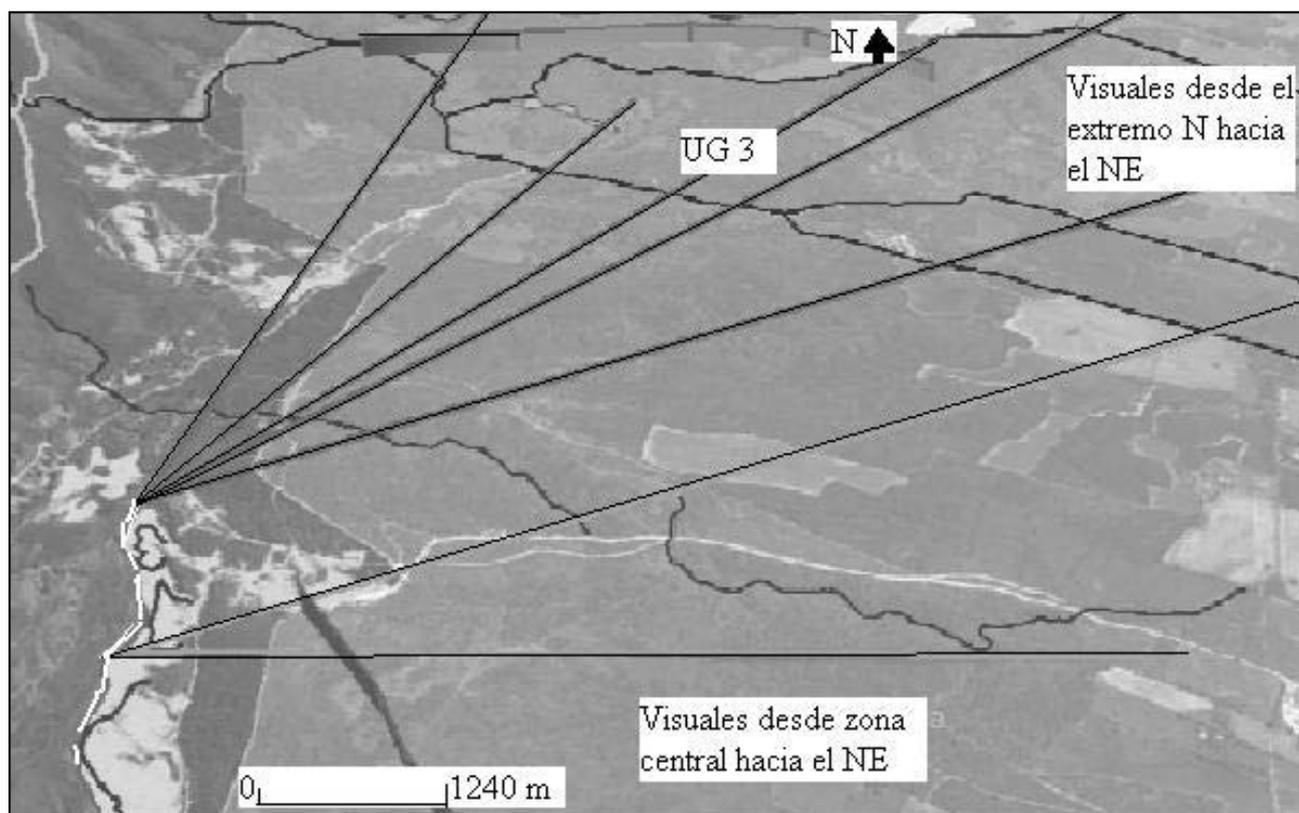


Figura 7. Impacto visual de los frentes centro y norte de la cantera San Agustín sobre la UG3. Google Earth.

investigación se realizó una visita a las instalaciones, frentes de cantera, plantas de trituración y pulverización del material pétreo y se tuvo acceso al informe de impacto ambiental. El principal impacto ambiental de la cantera es de tipo paisajístico, ya que en cuanto a la emisión de polvo, ruido y contaminación de agua, se realizan las medidas de control y mitigación exigidas por la Dirección de Minería.

El frente principal de la cantera San Agustín se extiende en sentido NNO–SSE, y está ubicado sobre la pendiente oriental de la SUG 4-1: Cordón Central. Esta unidad se encuentra afectada en su vertiente oriental por la actividad de la cantera, no así en la vertiente occidental. Dada su Calidad para la Conservación Alta (Categoría IV) sería recomendable minimizar las zonas sin remediación que no correspondan a frentes activos. La remediación debe llevarse a cabo con especies autóctonas, evitando la proliferación de las exóticas, con las que se ha venido trabajando.

El impacto de los frentes de cantera se proyecta hacia las unidades geomorfológicas orientales.

Las visuales proyectadas desde el frente sur, son interrumpidas por una pantalla natural formada por un cordón serrano, que evita la visualización del frente de cantera desde gran parte de las unidades UG1, UG2 y UG3. Por lo tanto el impacto queda limitado al valle cercano a dicho frente. Figura 6.

En forma similar se analizó el frente central y el frente norte de la cantera que impactan toda la zona central de la UG3 y son interrumpidas por una pantalla natural conformada por un cordón serrano ubicado al Norte de la misma.

El sector impactado visual y paisajísticamente por el frente de cantera se extiende entre las dos pantallas naturales de-

tectadas mediante el análisis geomorfológico con la herramienta Google Earth. Figura 8.

El sistema de avance del frente de explotación es por volteo, produciéndose voladuras en el pie del mismo, que afectan la parte superior. Este procedimiento no permite la remediación del banco superior (fitoremediación, envejecimiento del talud, etc.) ya que todo el frente de la cantera se derrumba por acción de las voladuras en la base. Teniendo en cuenta que el mayor impacto visual lo produce el banco superior, se tendrá que establecer un sistema de explotación de atrás hacia adelante, de forma tal que los frentes que vayan quedando inactivos puedan ser remediados mediante retaludado y fitoestabilización.

CONCLUSIONES

La actividad minera que se desarrolla en la zona estudiada produce principalmente un impacto de tipo visual paisajístico.

Debido a la ubicación de los frentes de cantera, estos impactan áreas que se encuentran ubicadas en un arco NE-E.

El impacto visual es disminuido por obstáculos naturales (lomadas).

Donde no existen obstáculos naturales, la visualización de los frentes de cantera afecta a zonas con distintas categorías de Calidad para la Conservación.

Cuando el impacto afecta a zonas con Calidad para la Conservación media y alta, se justifica la ejecución de medidas de retaludado y fitoremediación de los frentes.

Estas técnicas permiten mitigar y recuperar el paisaje, siendo necesario para su concreción la modificación del sistema de explotación por volteo que se utiliza en la actualidad.

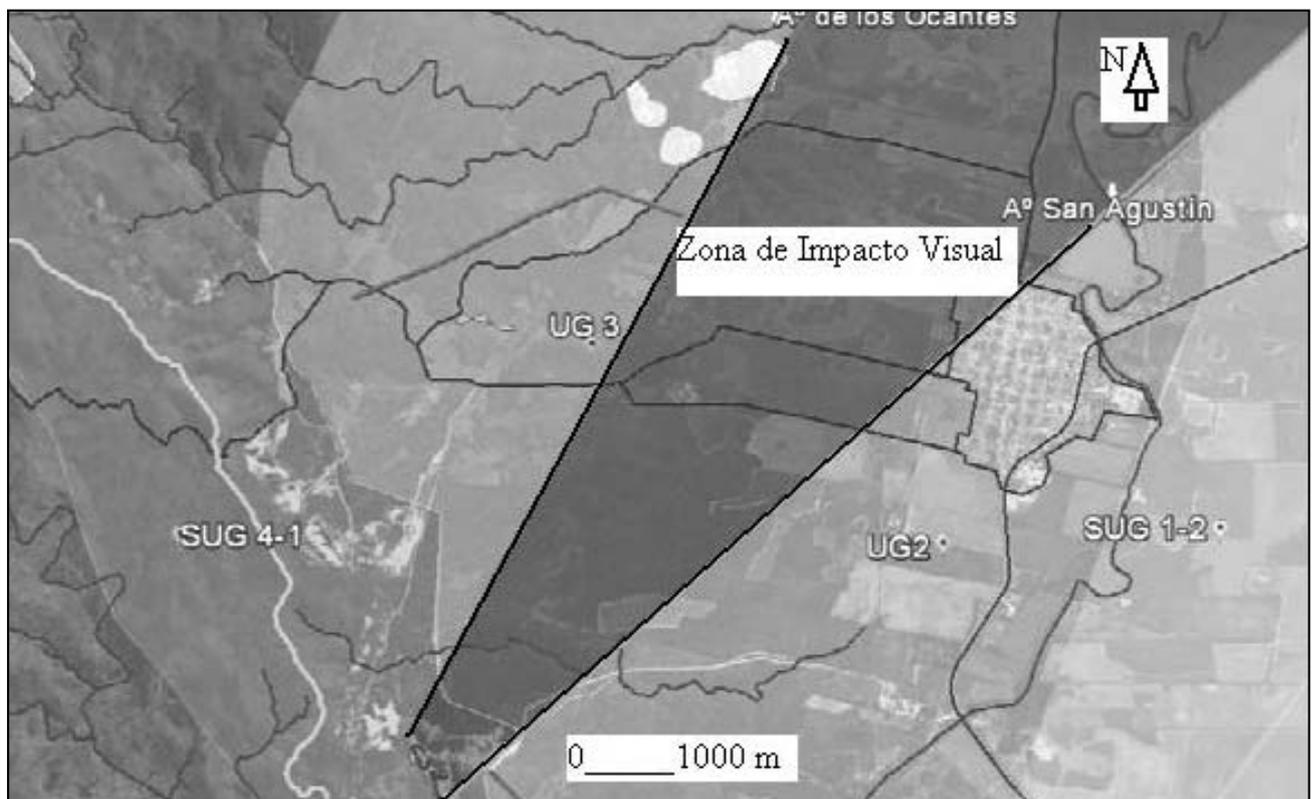
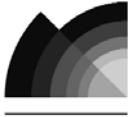


Figura 8. Zona de impacto visual de los frentes de Cantera San Agustín. Google Earth.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ARENS P. Y ETCHEVEHERE P. (1996).
Normas de reconocimiento de suelos. Secretaría de Estado de Agricultura y Ganadería de la Nación.
INTA. Buenos Aires. RA.
- ADHARA (2008)
Plan General de Ordenación Urbana de Ador.
Concierto Previo. Estudio del Paisaje. Estudios Territoriales.
- CAPITANELLI R.J. (1979)
Geomorfología.
En J.B. Vázquez, R.A. Miatello y M.E. Roqué (Eds) Geografía Física de la Provincia de Córdoba, Córdoba, pp.213-296. - Centeno J., Fraile M., Otero M. y Pividal A. Geomorfología Práctica. 1994, Ed. Rueda.
- CENDRERO UCEDA A., NIETO SALVATIERRA M., ROBLES CUENCA F., SANCHEZ DIAZ J., (1986)
Mapa Geocientífico de la Provincia de Valencia. Escala 1:200.000.
Diputación Provincial de Valencia. Valencia. Memoria 71 pp.
- CENTENO J., FRAILE M., OTERO M., PIVIDAL A., (1994)
Geomorfología Práctica.
Ed. Rueda Madrid. 66 pp.
- FERRANDO ACUÑA F., Y FRANCO DE LUCA N. (2011).
Geomorfología y paisaje en el ordenamiento territorial: valorizando el corredor inferior del río Mapocho.
Revista de Investigación Geográfica 43 : 65–86. Santiago. Chile
- FOSTER S., E HIRATA R. (1988).
Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas.
CEPIS /PAHOWHO. Technical report. Lima (Perú) 81 pp.
- GENERALITAT VALENCIANA. (2005)
Nuevo Plan General de Ordenación Urbanística del Ayuntamiento de Peñíscola.
Memoria de Impacto Ambiental.
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA.
Visor GeoINTA. Recursos Naturales. Suelos Córdoba.
Disponible en http://geointa.inta.gov.ar/visor/?p=model_suelos, último acceso 29 de Abril de 2015.
- NAVARRO M.E. (2015)
Determinación de la Calidad para la Conservación de Áreas Impactadas por la Minería en la zona de San Agustín, Provincia de Córdoba, Argentina.
Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. UTN. FR. Córdoba. Inédita.
- ROMERO L., RUIZ P., HERNANDEZ L., (2004).
Diagnósticos de Calidad para la Conservación de Espacios Agrícolas Abancalados.
Propuesta Metodológica para la cuenca de Guinigada (Gran Canaria, Islas Canarias). Geographicalia 45, pp.113-127.
- SERRANO I GINÉ D., (2009)
Les Muntanyes d'Ordal. Estudi de paisatge.
Tesis Doctoral. Facultat de Geografia i Historia. Universitat de Barcelona. Barcelona.



Sobre el empleo de suelos como relleno bajo contrapisos y losas flotantes: dos patologías en estudio

About the use of soils as backfilling under roofs and flats: two studied pathology cases

Orlandi, Sandra Graciela  - Manzanal, Diego Guillermo ^{1,2} - Espelet, María Alejandra^{1,3} - Ruiz, Alejandro ³

Recibido: 17 de mayo de 2015 • Aceptado: 01 de diciembre de 2015

Resumen

Las ciudades de Comodoro Rivadavia y Rada Tilly, distantes entre sí 20km, presentan topografías irregulares y con suelos que pueden variar desde formaciones de arcilitas hasta formaciones de areniscas, ambas principalmente de origen marino. La irregularidad en la topografía obliga muchas veces a que, durante la etapa de diseño arquitectónico, se incorporen solados que requieren de la colocación de materiales de relleno seleccionados y/o tratados previamente para hacerlos aptos. El empleo de materiales granulares es la solución óptima. Pero la mala compactación del mismo puede acarrear problemas constructivos. El empleo de suelos expansivos sin tratar en lugar de materiales seleccionados puede acarrear patologías tan extremas como en el caso de rellenos granulares mal compactados.

En este artículo son desarrollados y analizados dos casos, destacándose que el uso de dichos materiales en condiciones controladas no hubiese dado como resultado construcciones con problemas estructurales.

Palabras clave: *arcillas expansivas, material de relleno, compactación, patología.*

Abstract

Comodoro Rivadavia City and Rada Tilly City have a distance of 20km between them. They present irregular topographies and sometimes architectural designs include constructions with floors and slabs with refilled materials under them. Soils in these cities can be since clay stones to sand stones both with marine origin.

Refilled materials can be granular materials or local soils but both need to be inspected during their use. Good granular soil can be used but if the control during the construction is bad, it could bring several problems with it. The use of expansive soils as refilling without an appropriate treatment is as dangerous as the use of a bad compacted selected granular refilling.

Then the use of refilling is a critical point in the beginning of the construction and the incorrect employment of them would end in falls in the building.

1. Facultad de Ingeniería, (UNPSJB)
UNPSJB, LISHA, Ruta Provincial N°1 S/N, Km 4., Comodoro,
Rivadavia, Chubut, CP 9003, Argentina

2. Instituto de Tecnología y Ciencias de la Ingeniería INTECIN
(UBA-CONICET);

3. Laboratorio de investigaciones en Suelos Hormigones y
Asfaltos, UNSPJB

 sandra.orlandi@gmail.com

In this article, two historical cases are developed. One with refilling made with granular material and the other with an expansive clay. Both cases developed pathologies as a consequence of the refilling. And both ended in trials.

Key words: *expansive clays, refilling, compacting, pathology.*

CASO: Relleno compuesto por material granular

INTRODUCCION A LAS PATOLOGÍAS PRESENTADAS

El caso en estudio involucra una construcción en tres plantas. Dos de las plantas se encontraban francamente construidas sobre terreno natural, el cual poseía un fuerte desnivel entre la superficie ocupada por la planta baja y el primer piso (ambos apoyados sobre terreno natural). En cuanto a los solados del primer piso alrededor del 50% cubierto con porcelanato en unidades de 1m x 1m apoyados sobre un contrapiso con una malla de 4,2mm de diámetro de barra, no vinculada a la estructura perimetral. Debajo de este contrapiso, dada la fuerte pendiente del terreno natural, se optó desde el inicio, de acuerdo con las recomendaciones geotécnicas, por colocar un relleno compuesto por material granular proveniente de cantera.

Las patologías presentadas se muestran en las siguientes figuras.

En la Figura 1 puede observarse la rotura presentada en un muro desprovisto de elementos estructurales como consecuencia del asiento del contrapiso sobre el que descargaba. Dicho muro únicamente constituía un elemento de separación de ambientes. No contribuía de ninguna manera a distribuir las cargas sino que por el contrario constituía una descarga adicional sobre el contrapiso.

En la Figura 2 es posible observar la topografía con fuerte pendiente de los alrededores y más precisamente en el contrafrente de la vivienda.

En la Figura 3, obsérvese la deformación de las veredas perimetrales construidas sobre material de relleno en las que se ve acentuada la pendiente natural dada a las mismas.

La rotura del muro desprovisto de elementos estructurales puede observarse en la Figura 4 desde otro ángulo, en tanto

que la apertura de las juntas entre las paredes externas y las veredas, cuya pendiente se acentuó, son evidentes en la Figura 5.

El deterioro de la construcción no ocurrió en forma sostenida en el tiempo sino que en un corto lapso se desarrollaron las grietas, desniveles y desplazamientos. Incluso en un sector donde el contrapiso no cedió, una conexión entre un afluyente cloacal y una cámara de inspección sufrió un desplazamiento de 20 centímetros como consecuencia del asiento del material de relleno. De dicha falla no se cuenta con soporte fotográfico puesto que el propietario procedió al arreglo de la misma en forma inmediata por cuestiones de sanidad.

Muchas fueron las hipótesis desarrolladas por profesionales que tomaron contacto previo con la construcción, algunas de las cuales solamente mencionaremos sin desarrollar en detalle:

1. Pérdida de estanqueidad en una piscina colindante a la vivienda y que pertenecía a la misma.
2. Fallas en el sistema de fundación;
3. Fallas estructurales.

Cada una de las hipótesis previas fue analizada y descartada previamente al estudio que condujo al presente artículo.

ENSAYOS REALIZADOS

Del estudio de la patología, con el fin de obtener mayor información, se optó por la realización de roturas parciales en el contrapiso para muestrear el material de relleno. Del mismo, como ya mencionase con anticipación, no se tenían referencias ni existía evidencia de ensayos previos realizados. Se recorrió el área para detectar patologías similares o patologías comunes existentes. Se estudió el comportamiento de las estructuras de la vivienda en general buscando otras fallas y se documentaron todas aquellas relacionadas o no con la patología principal. Acotado el problema se programaron los primeros ensayos a realizar, pero



Figura 1. Roturas en muro.



Figura 2. Topografía del contrafrente.



Figura 3. Vereda perimetral.



Figura 4. Desplazamiento en muro no estructural.



Figura 5. Desplazamiento y rotación en junta en vereda perimetral.

aún así la secuencia a seguir quedó supeditada a las condiciones en que se encontrara el relleno una vez descubierto.

Al materializar un pequeño hueco que dejaba al descubierto un volumen de relleno se constató que el mismo no se encontraba en contacto directo con el contrapiso. Por el contrario existía un volumen vacío cuyo espesor era variable entre 8cm y 10cm. Se procedió al muestreo y clasificación (Figura 6).

La hipótesis principal era, en consecuencia, que el material de relleno no cumplía con las condiciones de calidad. Partiendo de esa hipótesis, la solución sería retirarlo en su totalidad, humedecerlo y compactarlo en la medida que se lo coloca nuevamente. Por esta razón se procedió a levantar todo el contrapiso. Al romper el mismo se verificó que la armadura no correspondía a la de una platea rígida y que adicionalmente no había vinculada a las estructuras perimetrales existentes. Si se lo hubiese diseñado como platea rígida o con vínculos a las estructuras perimetrales el comportamiento hubiese sido completamente diferente y el tipo de fallas también. Durante todo el proceso, se documentó el procedimiento.

Una vez descubierto el relleno se procedió al muestreo del mismo para su clasificación en laboratorio y determinación in situ de la densidad por medio de la utilización del ensayo del cono de arena.

Las primeras tres determinaciones del cono arrojaron como resultado que el material superficial clasificado como granular SM (Arena limosa con gravas) poseía una relación de entre el 67% y el 85% con respecto a la compactación determinada por medio del ensayo Proctor. Dicha variación tenía sustento en el hecho de que en los primeros treinta centímetros se realizaron cinco grupos de muestreos y ensayos. La humedad se encontraba muy por debajo de la humedad óptima obtenida del posterior ensayo Proctor realizado en laboratorio para el mismo material.

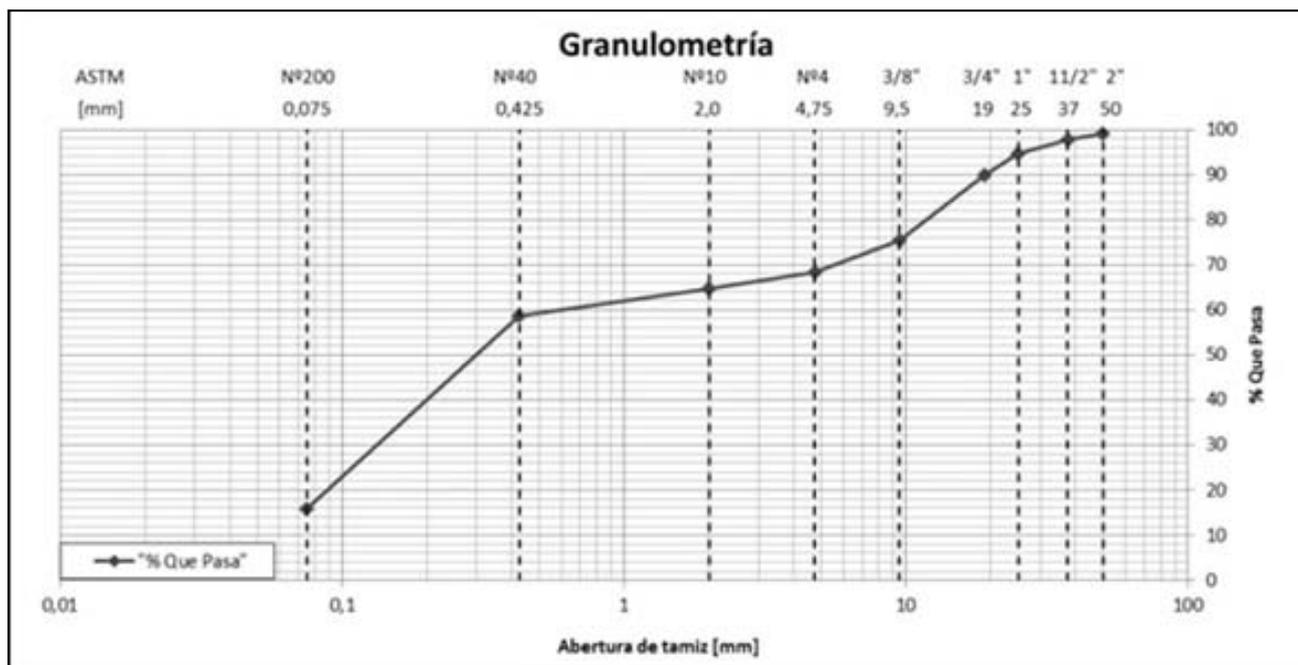


Figura 6. Granulometría de los primeros 30cm del relleno.

Respecto a la granulometría del material de relleno era adecuada para su uso, a pesar del faltante en algunos tamices, como puede observarse en la curva presentada en la Figura 7. Muchas veces suele utilizarse como referencia las parábolas de Fuller y Thompson para determinar si una granulometría es adecuada, pero debe destacarse que dichas parábolas fueron diseñadas y propuestas para verificar la aptitud de agregados para ser utilizados en la dosificación de hormigón.

CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL DE RELLENO

El material muestreado y clasificado en el espesor superior de 30cm correspondía a una arena limosa con fracción fina no plástica SM-ML. A mayor profundidad (3,5m) el material muestreado correspondía a una grava mal graduada con limos GP-GM. En ambos casos la fracción fina no presentaba plasticidad.

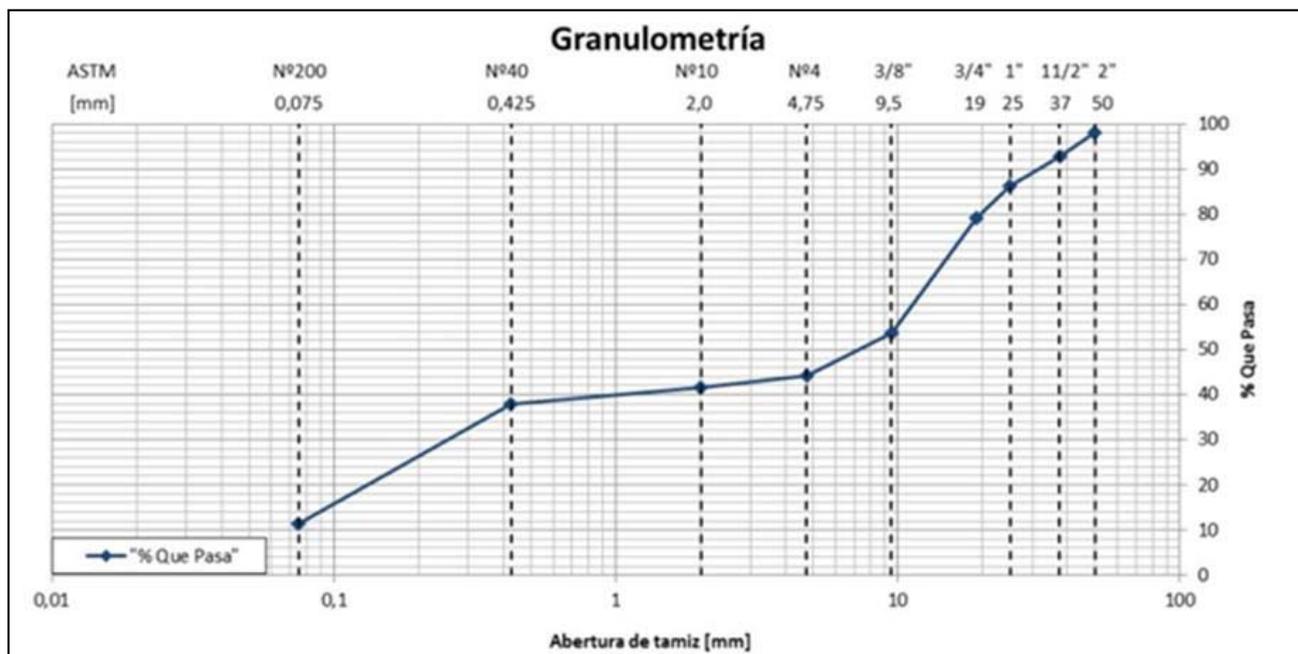


Figura 7. Granulometría a 3,5m de profundidad de relleno

Si se analizan las propiedades de ambos materiales puede observarse que, a pesar de algún comentario que se pudiere realizar sobre la curvatura de la curva granulométrica, el material encontrado era útil para el fin concebido. Pero la falta de compactación, fundamental para el correcto comportamiento de un material de relleno, hizo del mismo uno no apto para soportar las cargas transmitidas por el contrapiso y el solado.

Ya sea por la escasa densidad del relleno o por su inapropiado contenido de humedad el mismo no se encontraba compactado en condiciones óptimas. Fueron determinadas densidades in situ hasta la cota 3,20m, en la cual recién se alcanzó el 95%, recomendado como mínimo, de la densidad seca máxima. En el espesor de suelo constituido desde la superficie hasta los 3,20m todos los ensayos de densidad in situ arrojaron valores por debajo de los de diseño tomando como parámetro de comparación el material denominado como "1". Para la cota 3,20 se utilizó el material "2" como parámetro puesto que a esa profundidad se observó un cambio en las condiciones del material encontrado y se procedió a clasificarlo según Figura 7. En la Tabla 1 se encuentran las relaciones de densidad seca máxima y la real y las humedades correspondientes.

Muestra 1: Material de relleno. Prof. 0,30m
(M. 227/14).

De acuerdo al tipo de suelo, y a la energía de compactación que iba a ser utilizada para compactar en obra, el ensayo utilizado fue: Proctor N° V.

Densidad Máxima Seca: 2.040 kg/m³

Humedad Óptima: 10,5 %

Muestra 13: Material de relleno. Prof. 3,20m
(M. 252/14).

De acuerdo al tipo de suelo, y a la energía de compactación que iba a ser utilizada para compactar en obra, el ensayo utilizado fue: Proctor N° V (10). N° de capas: 5

Densidad Máxima Seca: 2.116 kg/m³

Humedad Óptima: 8,0 %

El siguiente corresponde a un croquis donde se muestra la disposición de los pozos en la sección de la planta en estudio (Figura 8)

Tabla 1. Comparación entre densidades y humedades in situ vs densidad y humedad surgidas de Ensayo Proctor.

Densidad N°[m]	Fecha	Humedad [%]	Humedad Óptima [%]	Densidad [kN/m ³]	Densidad Proctor Corregida [kN/m ³]	Compactación [%]
1/0.30m	01/07/14	3.6	10.5	15.004	20.355	74 (1)
2/0.30m	01/07/14	4	---	13.328	19.992	67 (1)
3/0.30m	01/07/14	1.7	---	15.19	19.992	76 (1)
4/0.30m	01/07/14	1.4	---	15.327	20.531	75 (1)
5/0.30m	01/07/14	1.6	---	17.611	20.629	85 (1)
6/0.60m	16/07/14	11.2	---	14.671	20.070	73 (1)
7/0.90m	16/07/14	10.6	---	13.142	20.110	65 (1)
8/0.90m	16/07/14	10.1	---	13.308	19.992	67 (1)
9/1.60m	25/07/14	11.7	---	13.103	19.992	66 (1)
10/1.60m	25/07/14	10.5	---	13.769	20.119	68 (1)
11/0.95m	25/07/14	7.5	---	13.504	20.315	66 (1)
12	25/07/14	7.3	8	20.217	21.197	95 (2)

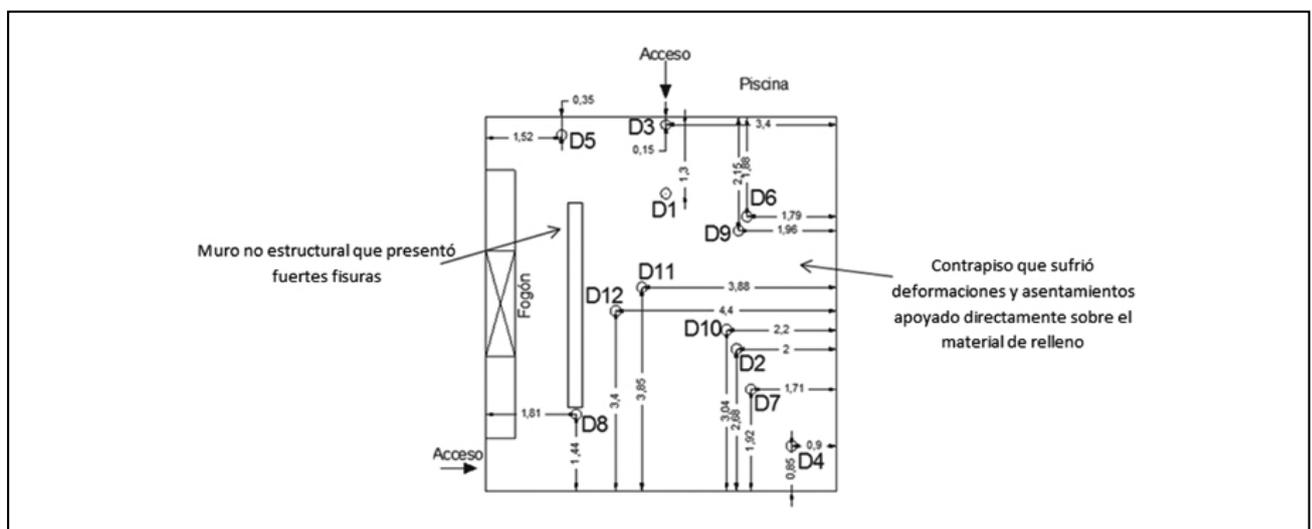


Figura 8. Croquis de ubicación de los ensayos in situ y muestreo para Proctor.

FALLAS ESTRUCTURALES RELACIONADAS

Entre las fallas estructurales que se presentaron se encuentran:

1. Deformación del contrapiso;
2. Rotura de elementos del solado (algunos elementos de porcellanato);
3. Asentamiento de muro que descargaba sobre el contrapiso deformado;
4. Desarrollo de fallas y apertura de las mismas, en algunos de los muros perimetrales y en la zona de contacto directo con el contrapiso.
5. Deformación de veredas perimetrales construidas sobre relleno.
6. Desplazamiento y pérdida de continuidad en la unión entre una tubería perteneciente al desagüe cloacal y una cámara de inspección.

Algunas de las mismas han sido señaladas en la Figura 9.

Durante la etapa previa a la extracción del material de relleno para su posterior colocación con el compactado de diseño una de las principales dudas que surgió fue la razón del asentamiento de todo el conjunto ocurrido mucho tiempo después de terminada la construcción.

Durante la etapa de investigación y recopilación de información no pudo determinarse si los asentamientos fueron de tipo progresivo o instantáneo. Dado que el material de relleno es de tipo granular, los asentamientos fueron de tipo instantáneo, en una o varios escalones y como consecuencia de una o varias cargas de tipo dinámico.

El origen de dichas cargas pudo deberse al tránsito de vehículos de gran porte en las inmediaciones de la vivienda (puesto que se trata de un barrio en franco proceso de expansión), a la vibración transmitida al terreno en la etapa constructiva de construcciones vecinas, a la compactación del material utilizado para la construcción de pavimentos en la zona, etc. Ninguna de las hipótesis es verificable, debido a que la vivienda se encontraba en una urbanización en pleno desarrollo, habiendo cambiado casi completamente dicha condición al día de la fecha.

En la correcta interpretación de las pruebas utilizando como fundamento el conocimiento y la experiencia se apoya el verdadero arte del análisis de las patologías.

CASO II: Relleno compuesto por material no seleccionado

INTRODUCCION A LAS PATOLOGÍAS PRESENTADAS

En esta construcción, cuya patología presentó sus primeros indicios ocho años atrás y que además tomó un mayor tiempo para su desarrollo, el origen de las mismas provocó daños generalizados en toda la construcción. A diferencia de la patología anterior los daños fueron también estructurales pero el material de relleno es sobre quien se centra la atención.

Se trata de una vivienda en dos plantas, construida en un terreno con topografía irregular, construcción fundada sobre pilotes cortos colados in situ, con descargas a nivel de cimentación muy diferentes en módulo, como consecuencia de tener un diseño arquitectónico irregular.

Realizado el estudio geotécnico se determinó la presencia de arcillas potencialmente activas, a las que en la etapa previa no se caracterizó en cuanto a su potencial. Estudios de investigación posteriores realizados en un terreno descubierto lindero, llevaron a la cualificación y cuantificación de la arcilla.

Dada la reacción que se conoce pueden presentar las mencionadas arcillas, el geotecnista incluyó en el informe una serie de recomendaciones constructivas todas ellas coherentes y consistentes con el Código de Edificación Municipal.

Una de las recomendaciones incluía la materialización de un volumen vacío debajo de los contrapisos y vigas de cimentación presentes en planta baja, que podía bien encontrarse vinculado a las estructuras vecinas o trabajar en forma independiente, tratándose entonces no de un contrapiso sino de una losa. Para ello dicha losa debía encontrarse diseñada, calculada y armada para soportar cualquiera de los estados de cargas mencionados.

Los daños en la construcción y las causas de los mismos son algunos de los siguientes, pero destacamos que en el presente artículo solamente haremos énfasis en el tratamiento del material de relleno.

Muchos de los muros perpendiculares a uno de los ejes medianeros presentaban fisuras como las que pueden observarse en la Figura 9 y Figura 10.

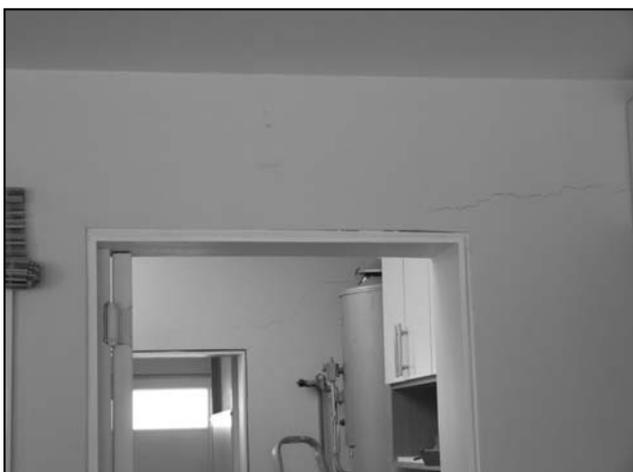


Figura 9



Figura 10

En el transcurso de un año ocurrieron roturas en pisos y deformaciones generalizadas en marcos de puertas en ambas plantas. Los pisos en la planta baja sufrieron deformaciones tipo “abombamiento”, coincidentes con lo que se intuía era la expansión del material de relleno.

ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Como consecuencia de las patologías desarrolladas se decidió levantar parte de los contrapisos para determinar las características del material de relleno. Cabe destacar que en el estudio de suelos original se recomendaba la colocación de piedra bola debajo de los contrapisos y en reemplazo del terreno original, en un espesor no menor a 40cm. También se recomendaba la materialización de un volumen vacío debajo de las vigas de fundación.

Las mesadas que se encontraban empotradas a muros que presentaron deformación perdieron la horizontalidad e incluso se rompieron, Figura 11 y Figura 12.

Una vez realizadas las calicatas lo que pudo observarse es que el relleno no coincidía con las recomendaciones dadas por el geotecnista. Tanto en la Figura 11 como en la Figura 12 puede observarse el material de relleno (obsérvese el corte limpio

típico de arcillas con humedad cercana al límite plástico) así como los elementos estructurales colocados debajo de las vigas portamuros con el fin de materializar el volumen vacío. Los bloques en “U” además de estar colocados en la dirección incorrecta no cumplían con la función para la que fueron colocados: materializar un volumen vacío debajo de las vigas de fundación. Puede observarse en las fotografías que las oquedades se encuentran llenas de material.

Sobre el material de relleno se realizaron ensayos de clasificación e identificación del material. Además, a posteriori y como parte de un proyecto de investigación, se realizó una calicata de 3,5m de profundidad en un terreno lindante. Para las muestras tomadas en dicha calicata se realizaron ensayos enfocados a identificar el tipo de arcilla sobre la que se encuentra cimentada la construcción. Entre otros: límites de Atterberg, humedad natural, pasante # 200, granulometría, ensayo de azul de metileno, ensayos de presión de hinchamiento; ensayo de presión de succión; porcentaje de hinchamiento (se utilizó un ensayo diseñado especialmente para este proyecto pero que cumple con una relación entre las dimensiones de las probetas necesaria para minimizar el efecto de las condiciones de frontera); ensayos de presión de succión, etc.



Figura 11



Figura 12



Figura 13



Figura 14

De la identificación del material de relleno surgieron los resultados presentados en las Tablas 2 a 9. El material de relleno se trataba de un material granular con fracción fina de características arcillosas. La fracción fina posee un alto porcentaje de índice plástico. En la Figura 15 los números corresponden a la ubicación de las calicatas en la planta baja. Las letras F corresponden a zonas afectadas. Así por ejemplo en F21 se encuentra apoyada la mesada de la Figura 13. En F12 y F16 está situada la viga cuya falla se presenta en la Figura 26. En F18 está situado un contrapiso deformado con afloramiento de sales. En F25 y F26 se encuentran sendas puertas cuyos marcos se deformaron presentando fisuras por la inexistencia de dinteles. En F10 se encuentra apoyada la mesada de la Figura 12.

En cada calicata se realizaron ensayos de clasificación del material. También se tomaron muestras del material encontrado dentro de los elementos en U. El objetivo fue identificar su potencial de expansión.

Cuando en la Figura 16 y Tabla 8 nos referimos a “viga fisurada” la misma corresponde a una viga que, contrariamente a lo esperado, falló por flexión, pero con una deformación provocada por tracción en la zona superior. Dicha viga fue calculada con cargas actuando desde arriba hacia abajo (acción de la gravedad) en tanto que los suelos en proceso de expansión

aplican su carga en todas aquellas direcciones en las que encuentren menos restricción. En este caso, las arcillas encontraron menor resistencia en sentido vertical con dirección franca hacia arriba (F12 y F16 en Figura 15)

La falla en dicha viga coincide con una zona de relleno de material cercano a la calicata 2. En dicha zona ocurrió la rotura, en las primeras fases de desarrollo de la patología, en una tubería de agua potable. Allí se produjo la inundación de una excavación realizada por el constructor con el fin de detectar el origen de las patologías. Dicha excavación fue abandonada por el constructor con que en cierta forma se produjo una suerte de ciclo de secado y humedecimiento, los cuales propician la activación y posterior reacción aún más severa de las arcillas. La no materialización de una ménsula prevista en el diseño y en línea con dicha viga, todo bajo la acción de un suelo expansivo, fueron el detonante de las fallas.

Analizando los resultados de los ensayos realizados a las muestras de las calicatas puede concluirse lo siguiente. Todas las muestras poseen una fracción fina en cantidades significativas. Todas las muestras analizadas en laboratorio arrojaron como resultado fracciones arcillosas, superficies específicas, límites de Atterberg, presiones de hinchamiento, porcentajes de expansión libre tales que permitieron identificar a las arcillas como de potencial de expansión muy alto.

En general el material de relleno se encontraba muy lejos de ser el material de relleno recomendado y se trataba de una mezcla de suelo natural con material granular de origen desconocido no seleccionado (en varias de las calicatas se detectaron desechos de origen humano). La humedad en la calicata 2, que es la que poseía suelos de características más activas, se encontraba cercana al límite plástico, a diferencia de las otras calicatas. Pero a diferencia de las demás calicatas la número 2 es la que poseía relleno de características más parecidas al terreno natural. Debe destacarse que la acción de humedecimiento y secado a la que fue sometido el material en dicha zona afecta de forma negativa a los suelos expansivos mismos que si además se encuentran amasados reaccionan más rápidamente. Todo ello los torna más inestables en presencia de agua.

Además, contradiciendo las recomendaciones del estudio geotécnico original, el volumen vacío debajo de las vigas de cimentación (materializado por los bloques en U) se encontraba

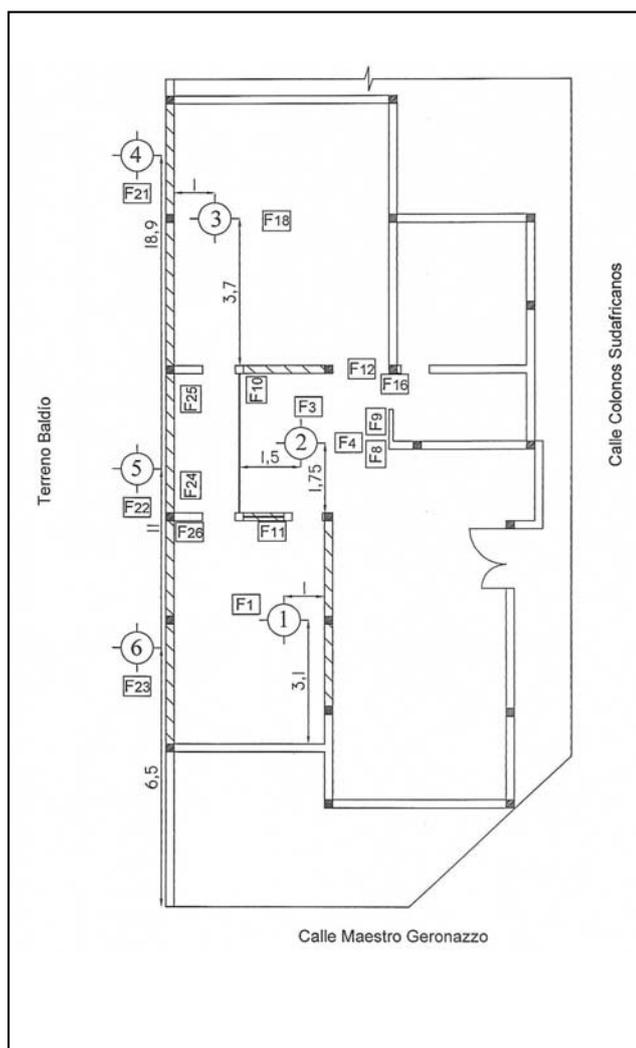


Figura 15



Figura 16. Viga que falló por flexión inversa para la que fue diseñada.

Tabla 2. Muestra obtenida de la Calicata 1.

Prof [m]	SUCS	GRANULOMETRIA (% PASA TAMIZ)									γ	Observaciones			
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200		ω_n	LL	LP	IP
0,00-0,20	GP	100	91	78	68	49	38	32	25	2	-	2,4	-	-	-
0,20-0,87	SC	100	97	94	91	80	71	64	56	32	-	14,5	27,1	17,4	9,7
0,87-1,00	GC-GM	100	96	89	85	68	57	51	45	16	-	7,4	21,9	15,6	6,3

Tabla 3. Muestra obtenida de la Calicata 2.

Prof [m]	SUCS	GRANULOMETRIA (% PASA TAMIZ)									γ	Observaciones			
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200		ω_n	LL	LP	IP
0,00-1,17	SC-SM	100	97	97	95	89	80	75	66	19	-	7,5	19,3	14,8	4,5
1,17-1,5	CH	100	100	100	100	100	100	100	100	99	-	36,5	103,6	41,8	61,8

Tabla 4. Muestra obtenida de la Calicata 3.

Prof [m]	SUCS	GRANULOMETRIA (% PASA TAMIZ)									γ	Observaciones			
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200		ω_n	LL	LP	IP
0,00-0,20	GP	100	91	78	68	49	38	32	25	2	-	4,1	-	-	-
0,20-1,02	SC	100	97	95	92	81	72	66	57	26	-	11,6	24,7	16,2	8,5
1,02-1,50	SC-SM	100	100	96	92	82	71	67	60	15	-	9,8	22,6	16,8	5,8

Tabla 5. Muestra obtenida de la Calicata 4.

Prof [m]	SUCS	GRANULOMETRIA (% PASA TAMIZ)									γ	Observaciones			
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200		ω_n	LL	LP	IP
0,75	GP-SC	100	95	87	80	62	46	42	42	35	11	6,5	25,2	19	6,2

Tabla 6. Muestra obtenida de la Calicata 5.

Prof [m]	SUCS	GRANULOMETRIA (% PASA TAMIZ)									γ	Observaciones			
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200		ω_n	LL	LP	IP
0,68	CL	100	100	100	98	92	85	84	81	57	-	11,6	38,8	21,3	17,5

Tabla 7. Muestra obtenida de la Calicata 6.

Prof [m]	SUCS	GRANULOMETRIA (% PASA TAMIZ)									γ	Observaciones			
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200		ω_n	LL	LP	IP
0,75	SC	100	96	93	89	78	67	65	59	22	-	8,3	26,1	16,9	9,2

Tabla 8. Muestra obtenida debajo de viga fisurada en el interior de bloques "U".

Prof [m]	SUCS	GRANULOMETRIA (% PASA TAMIZ)									γ	Observaciones			
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200		ω_n	LL	LP	IP
(*)	MH	100	100	100	100	100	95	86	78	69	-	39,4	66,3	40	26,3

(*): MATERIAL EXTRAÍDO DEL INTERIOR DE LOS BLOQUES "U" BAJO VIGA VOLADIZO

Tabla 9. Muestra obtenida debajo de viga en voladizo en el interior de bloques "U".

Prof [m]	SUCS	GRANULOMETRIA (% PASA TAMIZ)									γ	Observaciones			
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#200		ω_n	LL	LP	IP
(*)	SC	100	100	100	100	94	89	85	78	48	-	23,9	30,8	22,6	8,2

(*): MATERIAL EXTRAÍDO DEL INTERIOR DE LOS BLOQUES "U" BAJO VIGA FISURADA

totalmente lleno. El relleno consistía de un material compuesto principalmente de material fino con alto potencial de expansión y con humedad cercana al límite plástico. Como los bloques en U habían sido utilizados como encofrado de fondo de viga, los mismos trabajaron en forma monolítica con las vigas de fundación haciendo imposible el análisis de tensiones que produjeron la falla del conjunto.

Puede observarse que el material de relleno no es bajo ningún punto de vista un material apto para su utilización.

En el caso en estudio, el agua necesaria para activar la arcilla fue provista por varias fuentes. El diseño arquitectónico no cumplió con la premisa bajo la cual toda fundación en contacto con arcillas expansivas debe cumplir: alejar el agua de las mismas. Terrenos absorbentes y desagües pluviales se encontraban desagotando en la zona de influencia de las cimentaciones.

Como mencionamos anteriormente, posterior al estudio de la patología de la vivienda, se extrajeron muestras de una calicata practicada en un terreno lindero a la construcción en cuestión (Figura 17). Algunos de los resultados son los que a continuación se describen.

El material fue identificado como una arena limosa o arena arcillosa con contenido de carbonatos, fuertemente fisurada, preconsolidada, misma que al ser extraída en bloques o damas, como consecuencia de la pérdida de confinamiento, presentaba rápidamente fisuramiento y pérdida de humedad (Figura 18). La toma de muestras inalteradas en volúmenes necesarios para la realización de ensayos en laboratorio (tales como el de consolidación o triaxial) fue una labor imposible. Mientras se trataba de realizar baños de parafina, con el fin de preservar la humedad de las muestras, las mismas se fisuraban.

Es así que la mayor parte de los ensayos relacionados con la expansividad de las arcillas presentes en el suelo fueron realizados sobre muestras remoldeadas.

Las principales características determinadas para el suelo natural arrojaron los siguientes resultados.

De los resultados presentados, surge que el suelo puede ser clasificado como una arcilla principalmente montmorillonítica con muy alto potencial de expansión. De los ensayos de expansión realizados se obtuvieron valores de hasta un 60%

Tabla 10. Propiedades de la arcilla.

Propiedades de las arcillas	Valor	Unidad
Límite líquido	1.05	[%]
Límite plástico	0.40	[%]
Límite de Contracción	0.22	[%]
Índice de liquidez	-0.092	[]
Fracción pasante #200	0.54	[%]
Actividad de la arcilla	1.35	[]
Superficie específica de la fracción arcillosa	228.15	m ² /gr
Gravedad específica	2.70	[]
Peso específico húmedo relativo	1.86	[]

sobre muestras remoldeadas y porcentajes menores en muestras inalteradas. Se reprodujeron muestras a distintas densidades, con capas de arena fina intercaladas en el espesor de la muestra, con papel de filtro intercalado, y el resultado fue igualmente reactivo en todos los casos. Adicionalmente se realizaron ensayos en máquina de corte, de presión de expansión en ciclo de consolidación y expansión controlada, presión de hinchamiento en ensayo Lambe e hinchamiento libre en anillos sumergidos drenando por ambas caras.

Todos los ensayos permitieron concluir que la falla fue debida, en algunos sectores, a la colocación de un material potencialmente activo, dentro de una mezcla cuya función era principalmente relleno.

La presencia de agua activó la arcilla remoldeada, produciéndose en consecuencia presiones de hinchamiento y variaciones de volumen para los cuales la estructura no estaba diseñada. En cuanto a los valores desarrollados de presiones de hinchamiento no se obtuvieron resultados concluyentes, puesto que se trabajó con diferentes densidades para un abanico de densidades. Pero si es claro que las muestras que peor reaccionaron fueron las que poseían densidades más cercanas a la densidad natural y aquellas con humedades menores.



Figura 17. Calicata en terreno colindante.



Figura 18. Fisuras y pérdida de humedad.

CONCLUSIONES PARA AMBOS CASOS

De la observación detallada de los dos casos anteriores podemos concluir lo siguiente:

1. Basándonos en la experiencia de los autores, entre las patologías más comunes que se encuentran en la zona, las generadas por arcillas expansivas son las más comunes. A su vez son las más costosas en cuanto al abordaje en su remediación. Son menos frecuentes las patologías que involucran materiales granulares, por lo menos en obras civiles de pequeña envergadura. Estudios realizados a posteriori sobre arcillas locales condujeron a porcentajes de expansión libre mayores al 67% con presiones de hinchamiento mayores a 294 KPa encontrándonos actualmente en franco proceso de estudio y caracterización de las mismas.
2. El desconocimiento del tratamiento que cada uno de los materiales de relleno presentados necesita para su estabilización condujo al desarrollo de ambas patologías.
3. Materiales de relleno sin inspección durante la etapa constructiva o que no cumplieron con las especificaciones de diseño resultaron en patologías tan o más importantes a las que surgirían de un deficiente diseño estructural.
4. En ambos casos los elementos estructurales en contacto con los materiales de relleno podrían bien haber sido diseñados para trabajar en forma independiente del resto de la estructura o por el contrario para trabajar en forma conjunta. Ambas consideraciones requieren criterios de diseño estructural completamente diferentes no tenidos en cuenta en la etapa de cálculo estructural.
5. Por ello es que tanto el diseño estructural, la interpretación del estudio geotécnico, el buen manejo del Código de Edificación Municipal e inspección en obra, constituyen en conjunto las bases de un correcto proyecto y ejecución en obra con el fin de lograr un objetivo común: una larga vida útil de la construcción transcurrida en condiciones óptimas.
6. Por último, la revisión del Código de Edificación Municipal debería considerarse una rutina. De este modo toda experiencia profesional que se desarrolle en la zona de aplicación del mismo sería utilizada para mejorar la calidad de las construcciones y enneutralizar los daños en las mismas. El Código de Edificación Municipal resulta obsoleto cuando no se incorporan avances tecnológicos o nuevas experiencias en el área de aplicación de los mismos.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

AASHTO M145-66

Sucs (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

ABDULJAUWAD, S.N., AL-SULAIMANI, G.J., 1993

Determination of swell Potential of Al-Qatif Clay
Geotechnical Testing Journal, American Society for Testing and Material, Vol. 16, núm. 4, pp469-484.

ASTM D 5298-10

Ensayo de presión de succión osmótica y matricial, método del papel de filtro.

BRAJA, M. DAS, 2012

Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, 7ma edición
Editorial Cengage Learning. ISBN-13: 7978-607481747-8 / ISBN-10: 60748147-2.

CÓDIGO DE EDIFICACIÓN DE LA CIUDAD DE COMODORO RIVADAVIA, 1999

Corresponde a Ordenanza N° 6874/99.

GIACOSA R., PAREDES J., NILLNI A., LEDESMA M., COLOMBO F., 2004

Fallas normales de alto ángulo en el Neógeno del margen Atlántico de la Cuenca del Golfo San Jorge (46°S-67° 30'O, Patagonia Argentina.
Boletín Geológico y Minero, 115 (3): 537-550; ISSN: 0366-0176.

MIURA O. R., ESPELET, M. A., 2011

Informe LISHA N° 016/11, Solicitante: Eduardo Corna.

MIURA O., ESPELET M. A., 2011

Informe LISHA N°061/11 Solicitante: Eduardo Corna.

NORMA IRAM 10501/2007

Geotecnia. Método de determinación del límite líquido y del límite plástico de una muestra de suelo.
Índice de fluidez e índice de plasticidad.

NORMA IRAM 10507/1986

Mecánica de suelos. Método de determinación de la granulometría mediante tamizado por vía húmeda.

NORMA IRAM 10509/1982

Mecánica de suelos. Clasificación de suelos, con propósitos ingenieriles.

NORMA IRAM 10511/1972

Mecánica de suelos. Métodos de ensayo de compactación en laboratorio.

- NORMA IRAM 10512/1977
Mecánica de suelos. Métodos de análisis granulométrico.
- NORMA IRAM 10519/1970
Mecánica de suelos. Método de laboratorio para la determinación de humedad.
- NORMA IRAM 10526/1975
Mecánica de suelos. Método del volumenómetro para la determinación de la densidad in situ.
- NORMA IRAM 1594/1994
Agregados. Determinación de arcilla. Método del azul de metileno.
- ORLANDI S., 2013
Informe Técnico Peritaje Juicio Corna Fajardo Cortés, Comodoro Rivadavia.
- ORLANDI S., ESPELET, M. A., 2014
Informe LISHA N° 393/14 Solicitantes: Gutierrez/Knez. Comodoro Rivadavia.
- ORLANDI S., ESPELET, M. A. 2014
Informe LISHAN° 398/14 Solicitantes: Gutierrez/Knez. Comodoro Rivadavia.
- ORLANDI S., ESPELET, M. A., 2014
Informe LISHA Complemento N° 501/14 Solicitantes: Gutierrez/Knez. Comodoro Rivadavia.
- PACHO, MANUEL (EIFA), 2004
Informe Geotécnico Estudio de Ingeniería Florentino Ameghino.
Vivienda Deop.
- PAREDES J, 2002
Asociaciones de facies y correlación de las sedimentitas de la Formación Chenque (Oligoceno-Mioceno) en los alrededores de Comodoro Rivadavia, Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina
Asociación Argentina de Sedimentología, Revista (2002), vol. 9 n° 1: 53-64., ISSN 0328 1159.
- TREVISÁN, SILVANO JORGE, 1988
Métodos Edométricos para estimar la presión de hinchamiento en suelos activos, descripción comparativa de las trayectorias de esfuerzo.
X Camsig- La Plata, 1988
- VN-E1 65 (ASTM D422)
Tamizado de suelos por vía húmeda.
- VN-E2 65 (ASTM D4318)
Límite Líquido.
- VN-E3 65 (ASTM D4318)
Límite plástico e índice de plasticidad.
- VN-E5-93
Compactación de suelos. AASHTO T-99/Tipo I ó IV de DNV (ASTM D698), Proctor modificado: AASHTO T-180/Tipo II ó V de DNV (ASTM D1557).
- VN-E7-65
Análisis mecánico de materiales granulares.
- VN-E8-66
Control de compactación por el método de la arena. ASTM D2167, AASHTO T-205.
- VN-E26, ASTM D2216
Determinación del contenido de humedad de agregados pétreos.

INSTRUCCIONES PARA AUTORES

La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente publica: Artículos Originales, Artículos Invitados, Notas Técnicas, Reseñas de Libros, Artículos especiales sobre casos de estudio históricos de interés relevante, Discusiones Técnicas breves de artículos y comunicaciones publicadas en la Revista y Anuncios de eventos.

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

a) De carácter general:

- Las contribuciones deben ser originales.
- El/los autor/es deberá/n garantizar que el artículo no ha sido publicado, total o parcialmente, con anterioridad.
- El/los autor/es deberá/n garantizar que el artículo no será publicado en otras publicaciones en cualquier idioma sin el consentimiento de los propietarios de los derechos de autor (o copyright), que los derechos de terceros (terceras partes) no serán violados y que el editor no será considerado legalmente responsable si existe algún reclamo de indemnización.
- Se podrán recibir trabajos escritos en español, portugués o inglés.
- El Comité Editorial y la Dirección de la Revista se reservan la posibilidad de invitar a especialistas reconocidos a enviar artículos sobre temas de interés específico

b) Sobre el formato y la extensión del texto, tipos de letra, páginas, párrafos y leyendas:

- La versión original deberá ser editada en Microsoft Word (.doc o .docx).
- En la primera página se deberá incluir el título del artículo, que debe ser conciso, informativo e indicativo del contenido del mismo y escrito sin utilizar abreviaturas. Se debe utilizar letra Times New Roman tamaño 12, mayúscula, negrita y centrado, sin subrayar.
El título se debe expresar en español y en inglés. Si el trabajo está escrito en portugués, también se debe incluir en inglés. Si el trabajo está escrito en inglés, también se debe incluir en español.
- Debajo del título, el texto centrado, en letra Times New Roman tamaño 10, con los datos de los autor/es y afiliaciones. Los nombres de los autores se deben escribir en letra normal, las afiliaciones y direcciones de correo electrónico en letra cursiva. Se deberá identificar con un superíndice al autor que se deba dirigir la correspondencia.
- Desde la segunda página comienza el desarrollo del trabajo. En el caso que el idioma del trabajo sea español, se debe incorporar, en forma consecutiva, el "Resumen" de hasta 250 palabras, las "Palabras clave" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Abstract" y las correspondientes "Keywords". A continuación se inicia el desarrollo del artículo.
- En el caso que el idioma del trabajo sea inglés, la primera sección será el "Abstract" de hasta 250 palabras, seguido de las "Keywords" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Resumen" y las correspondientes "Palabras clave" en español. A continuación se inicia el desarrollo del artículo.
- En el caso que el idioma del trabajo sea portugués, la primera sección será el "Resumo" de hasta 200 palabras, seguido de las "Palavras chave" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Abstract" y las correspondientes "Keywords" en inglés. A continuación se inicia el desarrollo del artículo.
- Todo el texto deberá estar escrito en letra Times New Roman punto 12 a interlineado sencillo, con sangría de un centímetro y sin doble espacio entre párrafos. Se conservarán

los tipos de letra destacados que el autor considere convenientes, así como los correspondientes a determinados términos científicos o expresiones latinas o extranjeras. Deberá estar escrito en una sola columna.

- El tamaño de la hoja es A4 (210 x 297 mm). El área de trabajo será de 170 mm de ancho y 247 mm de altura. Es decir, 20 mm de márgenes derecho e izquierdo y márgenes superior e inferior de 25 mm. Se debe usar justificación completa.
- La extensión no deberá superar las 20 páginas en el caso de Artículos Originales. En el caso de Artículos Invitados la extensión podrá ser superior, siempre que el interés del contenido lo justifique y previo acuerdo con la Dirección de la Revista y el Comité Editorial. En el caso de las Notas Técnicas la extensión no deberá superar las 3 carillas, y en el resto de las situaciones mencionadas una página. En todos los casos la fuente y los márgenes se conservan.
- Es obligatorio el uso del sistema métrico decimal.
- Cuando una abreviatura, o un acrónimo, aparezca en el texto por primera vez, su significado deberá ser aclarado en forma completa entre paréntesis.
- No se aceptarán notas de pie de página. La información respectiva deberá incorporarse en el texto.
- Las expresiones matemáticas deben ser elaboradas con el procesador de texto y formar parte del mismo. Las ecuaciones deben estar centradas y separadas por una interlínea. Todas las ecuaciones deben estar numeradas consecutivamente, usando numerales en paréntesis alineados al margen derecho. La secuencia de paréntesis deberá ser la usual en Matemática:}}).
- Las fórmulas deben ser digitadas. Deje un espacio amplio alrededor de la fórmula.
- Los subíndices y superíndices deben ser claros.
- Los caracteres especiales y otras letras no latinas deben ser explicados en el margen, donde sean usados por primera vez. Tenga especial cuidado en diferenciar entre cero (0) y la letra "o", y entre uno (1) y la letra "l".
- Proporcione el significado de todos los símbolos inmediatamente después de la ecuación en la que son usados por primera vez.
- Para fracciones simples use el símbolo "/" en lugar de la línea horizontal; por ejemplo: Sy/Xm en lugar de $\frac{Sy}{Xm}$
- En las fórmulas químicas deben especificarse la valencia de los iones como, por ejemplo, Ca^{2+} y CO_3^{-2} , no como Ca^{++} o CO^{-3} .
- Los números de isótopos deben indicarse mediante un superíndice antecediendo a los símbolos químicos, por ejemplo: ^{18}O .
- Donde sea posible se debe evitar la escritura repetida de fórmulas químicas en el texto. En lugar de ello se debe dar el nombre completo del compuesto. Se exceptuarán aquellos casos de nombres muy largos y frecuentes, o de compuestos que son descritos como el producto final de una determinación gravimétrica (ejemplo: fosfato como P_2O_5).

c) Sobre el formato de figuras y tablas:

- Se incluirán como figuras todas las ilustraciones, mapas, fotografías, gráficos, etc., presentes en el texto, que deberán llevar numeración arábiga correlativa por orden de aparición y se ajustarán al tamaño de la caja.
Las ilustraciones deben diseñarse teniendo en cuenta el formato de la página de la revista. Su tamaño original debe permitir una reducción del 50%, sin pérdida de claridad. Deben

tener una resolución mínima de 300 dpi.

- Se deben evitar los espacios en blanco sobrantes alrededor de la figura, o la presencia de grandes sectores sin información en el interior de la misma.
- Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente después de la misma, la que no se debe incluir en el cuerpo de la figura. Se usará letra Times New Roman punto 12, a interlineado sencillo. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Figura n: donde n es el número de orden que corresponda. Se recomienda que las leyendas sean cortas y concisas.
- Las figuras serán citadas en el texto como (Figura n), siendo n el número de orden que corresponda, sea directamente como Figura 1, por ejemplo, o bien entre paréntesis como (Figura 1). Se deberán limitar, como máximo, a una caja de 15 x 23 cm, debiendo considerar el espacio ocupado por el epígrafe. Se las deberá enviar como archivos individuales en uno de los formatos aceptables (.tif, .jpg, .pdf o .eps). No se aceptan archivos incluidos en documentos de otros formatos, como Word o PowerPoint, por ejemplo. En el caso de una figura compuesta por varias imágenes las mismas deberán estar debidamente identificadas con una letra en la esquina inferior derecha de la misma.
- Las fotografías (y figuras en formato raster con tono continuo) deben ser pancromáticas, contrastadas, claras y con una luz adecuada, ni demasiado clara ni oscura. Deben ser enviadas como archivos .tif, .jpg, .pdf o .eps. No se aceptarán fotografías en color. Las fotografías en color serán reproducidas en escala de grises, salvo que él o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos.
Deberán incluir escala, vertical y horizontal en caso de ser distintas, cuando no existan elementos en la misma que permitan su dimensionamiento (escala, cinta métrica, martillo geológico, brújula, vehículo, etc.).
- Las figuras delineadas o dibujos deben ser contrastados y claros.
- Las figuras de tipo mapa deben estar orientadas, incluir escala gráfica e indicación de la localización geográfica (trazas UTM o Lat/Long). Deberán tener referencias adecuadas a los símbolos, rastras, etc. utilizados. No se aceptarán mapas en color. Los mapas en color serán reproducidos en escala de grises, salvo que él o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos.
- Se debe utilizar la misma tipografía en todas las ilustraciones.
- Los gráficos deben poseer ejes de coordenadas correctamente rotulados y con indicación de la unidad de medida correspondiente, en el caso que corresponda.
- Las tablas deben ser remitidas en páginas separadas, indicando su ubicación dentro del texto. Se deben remitir como archivo de texto y no como imagen.
- Las Tablas serán citadas en el texto iniciando con mayúscula en citas directas, o indirectas entre paréntesis. Es decir como Tabla 1, o bien (Tabla 1).
- La información presentada en las tablas no debe aparecer repetida en las figuras.
- Cada tabla debe llevar, del mismo modo que las figuras, una leyenda breve y explicativa, en la parte inferior. Se usará letra Times New Roman punto 12, a interlineado sencillo. La tabla y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Tabla n: donde n es el número de orden que corresponda.

d) Sobre las referencias bibliográficas y las citas de trabajos de otros autores

- No se admite la reproducción de figuras o tablas originales

de otros artículos o capítulos de libros si no se dispone de la autorización expresa de quién detente los derechos, es decir de la editorial responsable de la publicación correspondiente o bien del autor o los autores. La reproducción autorizada de tablas, fotografías u otras ilustraciones procedentes de otros trabajos deberá incorporar en el epígrafe la cita del trabajo original de donde fue obtenido. Con respecto a las figuras, en el caso que la misma se reelabore, o de una tabla, que sea editada, se deberá indicar “modificada a partir de ...” seguido de la cita del artículo original.

- A los autores que deseen incluir figuras tablas o secciones completas de texto que ya han sido publicados en otras publicaciones, se les requiere obtener el permiso del/de los propietario/s del copyright y que incluyan evidencias que dicho permiso ha sido concedido al presentar sus artículos. Todo ello sin perjuicio que otras inclusiones de párrafos, definiciones, conceptos o clasificaciones provenientes de otros autores puedan ser aceptadas con la cita expresa de la referencia correspondiente. Cualquier material recibido sin esa documentación será considerado como originado por los autores, quienes, por lo tanto, deberán asumir la responsabilidad legal correspondiente.
- Las referencias bibliográficas serán incluidas bajo el título de TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO. Las mismas deberán estar ordenadas alfabéticamente.
- La cita de trabajos en el texto estará referida a la lista bibliográfica final, indicando apellido de los autores (en mayúsculas) y año de publicación entre paréntesis, por ejemplo: (Caminos, 1975). En caso de ser más de dos autores se usará et al. (en itálica, sin subrayado ni negrita). Cuando se cite más de un trabajo del mismo autor se separarán por una coma, por ejemplo: Caminos (1956, 1978). En el caso de ubicar varios autores dentro del paréntesis se separarán entre ellos por un punto y coma. Si se citan varios trabajos del mismo autor y del mismo año se agregarán, a continuación del año, letras, de acuerdo al orden de aparición en el texto.
- Las citas bibliográficas estarán justificadas a la izquierda y la segunda línea tendrá una sangría especial francesa de 15 puntos ó 0,75 cm.
- Los artículos en publicaciones periódicas se citarán empleando texto en cursiva sea para el título de la revista o actas de congreso o reunión científica, en el caso de artículos o el título del libro, en el caso de textos:
CARRANZA TORRES, C.M., 1991. Cálculo analítico de redes de filtración. Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, Vol. VI: 250-267.
- Los artículos en textos:
MATEOS RUIZ, R.M. y M. FERRER GIJÓN, 1994. Methodology for landslides hazard map 1:10,000 in the area of Monachil (Granada, Spain). En R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha (eds.), 7th International Congress International Association of Engineering Geology, Vol III: 2059-2064, Rotterdam.
- Los libros de textos:
DEARMAN, W.R., 1991. Engineering geological mapping. Butterworth-Heinemann Ltd, 387 pp. Oxford.
- En el caso de citar un párrafo o frase de otro trabajo, éste deberá aparecer entre comillas y cursiva, acompañada de la correspondiente cita. Por ejemplo,..... según Casio et al., (1980), “la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma”... o bien directamente “la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma” (Casio et al., 1980).
- Las citas correspondientes incluirán a la totalidad de los autores. Ejemplo para Casio et al., (1980):

CASIO, M.; MARCINUS, F; SALINA, R y HUBBARD, R.T., 1980. La caída del imperio romano. *Revista de Occidente*, Vol 180: 224-234.

- Las citas correspondientes de páginas Web se efectuarán de acuerdo al siguiente modelo: Barker, A and C Jones 2007. Reassessing the direction of postgraduate environmental assessment education: the Manchester experience 1996–present. En *Environmental Assessment Lecturer's Handbook*, ed. T B Fischer et al., pp. 29-38. Disponible en <<http://www.penta-eu.net>>, ultimo acceso 28 de Junio de 2010.

e) Notas Técnicas

- Es un artículo original que describe un proceso o técnica sin incluir, necesariamente, una exposición teórica y datos. También puede referirse a un estudio de caso, el que por

lo novedoso de los datos que se obtienen o de las técnicas utilizadas, el/los autor/es consideran de interés su difusión. La extensión total del manuscrito, que no debe superar las 3 (tres) páginas y ajustarse a los parámetros mencionados en el punto b, incluye Resumen, Abstract, palabras clave, keywords, hasta 2 (dos) figuras y una tabla acorde a lo establecido en el punto c. Las referencias bibliográficas deberán respetar lo establecido en el punto d.

f) Arbitraje

- La evaluación por pares es efectuada mediante el envío del original a dos evaluadores. En el caso de disparidad de opiniones, se remite a un tercer evaluador.
- Los Editores se reservan la posibilidad de tomar la decisión final en el caso que la tercera evaluación no establezca si el artículo debe ser aceptado, o no, para su publicación.

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

FORMULARIO DE SUSCRIPCIÓN O COMPRA

ENVIAR A:

Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería
Maipú 645 - Piso 1° - C1006ACG
Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina

(Una vez completado el formulario envíelo a la dirección antes mencionada)

1. Suscripción a la *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, por el corriente año (marcar la siguiente casilla) []

2. Deseo adquirir los números *atrasados*:

_____ []

3. Deseo comprar los artículos:

_____ []

Indique si desea recibir su pedido en formato *papel* (por correo tradicional), o en formato *electrónico en fichero pdf* (por correo electrónico):

FORMA DE PAGO

Adjuntando cheque a nombre de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería.

Mediante depósito en la Cuenta Corriente N° 20566/5 Sucursal 115 del Banco Santander Río

Mediante transferencia bancaria a la Cuenta Corriente. CUIT: 30 - 67660597- 1.

CBU 0720 11542 000000 2056654

Solicitud de *factura* para pago mediante transferencia.

PRECIO DE COMPRA (Desde 01-04-2015):

Para Argentina: Gastos de envío incluidos.

- Compra de número vigente: **480** Pesos
- Compra de número atrasado: **420** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **210** Pesos por artículo

Para el exterior: Gastos de envío no incluidos.

- Compra de número vigente: **55** Dólares
- Compra de número atrasado: **45** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **25** Dólares por artículo

PRECIOS DE SUSCRIPCIÓN (Desde 01-04-2015):

Para Argentina: Gastos de envío incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **600** Pesos, en formato electrónico, y **800** Pesos en edición papel
- Suscripción Instituciones: **2400 / 3200** Pesos
- Compra de número atrasado: **420** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **210** Pesos por artículo

Para el exterior: Gastos de envío no incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **67** Dólares, en formato electrónico, y **89** Dólares en edición papel
- Suscripción Instituciones: **268/356** Dólares
- Compra de número atrasado: **45** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **25** Dólares por artículo

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

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

Los Socios de ASAGAI reciben sin cargo alguno la revista.

Copyright
© Editorial ASAGAI. 2015
Printed in Argentina

Se terminó de imprimir en Diciembre de 2015