



ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

Número 24 · Mayo 2010

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Las rocas como materiales para hormigón

Maiza, Pedro José - Marfil, Silvina Andrea

Rocas de las sierras de Córdoba como agregados para el hormigón.

Comportamiento frente a la reacción álcali-sílice (ras)

Locati, F. - Marfil, S. - Batic, O - Baldo, E.

Recuperación de canteras en la región centro este de la provincia de Entre Ríos

Msc. Lic. Muñoz, Luis - Ing. Treppo, Oscar - Ing. Calvo, Carlos

Caracterización ambiental y morfológica de los márgenes de cuerpos de agua artificiales en la planicie costera del Río de La Plata

Marcomini, S.C. - López, R.A. - Kalesnik F.

Geología ambiental del balneario Orense Barrera Austral, provincia de Buenos Aires

Quesada, Agustina - Marcomini, Silvia

Lavas torrenciales (huaycos) y ¿cambio climático?.

En el cañón de Torontoy (cuenca media del río Vilcanota-Urubamba. Cusco - Perú)

Carreño C., Raúl

Limitaciones de estimaciones y simulaciones de la colapsibilidad en suelos loessicos de Córdoba

Rocca, Ricardo J.

Biodisponibilidad de metal zinc en latosol e chernosol tratados con lodo de esgoto

Almeida Cruz, Bruno - Alamo, Renata C. J. - Polivanov, Helena - Barroso, Emilio

Geoinformática aplicada al análisis multitemporal del carreamiento en el piedemonte sur de la sierra de San Luis

Ojeda, Guillermo

Modelación hidromecánica de pilas de lixiviación de minerales

Delahaye, Carlos H.

Institucional

Portada: Frente de cantera - Fotografía: Geólogo Francisco Locati

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



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

ISSN 1851 - 7838



9 771851 783008



ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



Publicación Oficial de la

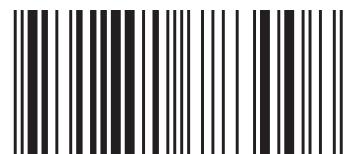
ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA

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

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

Numero 24 · 2010

ISSN 1851-7838



MISIÓN Y OBJETIVOS DE LA PUBLICACIÓN

Misión y objetivos de la publicación

La revista tiene por objeto fomentar la publicación y difusión de artículos originales de calidad en todos los ámbitos de la geología aplicada a la ingeniería y al ambiente; ingeniería geológica y geotécnica; peligrosidad geológica y la difusión de noticias sobre eventos y publicaciones de interés en la temática.

Está dirigida a científicos y profesionales geólogos, ingenieros y tecnólogos.

The aims of this journal are the publication and diffusion of original quality papers in all fields of engineering and environmental geology; geological and geotechnical engineering; geological hazards and the diffusion of news about related events and publications of interest.

It is addressed to scientist and professional geologists, engineers and technologists.

Leyenda de protección de derechos de autor

Todos los artículos publicados en esta Revista cuentan con protección de los derechos de autor. Ningún material publicado podrá ser reproducido fotográficamente o almacenado en microfilm, en bases de datos electrónicas, etc. sin obtener previamente el permiso por escrito del editor.

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

Precio de la revista

Quienes estén interesados en adquirir un ejemplar de la Revista, cuyo costo es de 200 pesos, deberán contactarse con la Editorial (editores@asagai.org.ar).

En la página 109 encontrará el formulario a completar a tal efecto.

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.

REVISTA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA Y AL AMBIENTE

DIRECTOR

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

COMITÉ EDITORIAL

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

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

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

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

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

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

PRODUCCIÓN EDITORIAL

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

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

COMISIÓN DIRECTIVA

PRESIDENTE	<i>Norberto Jorge Bejerman</i>
VICEPRESIDENTE	<i>María Beatriz Ponce</i>
SECRETARIO	<i>María Alejandra Gonzalez</i>
PROSECRETARIO	<i>Silvina A. Marfil</i>
TESORERO	<i>Rubén A. López</i>
PROTESORERO	<i>Juan Carlos Malecki</i>
VOCAL TITULAR	<i>Fabio S. Luna</i>
VOCAL TITULAR	<i>Julio Luis del Río</i>
VOCAL TITULAR	<i>Adrián Silva Busso</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Daniel Héctor Origlia</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Ángel Marcos</i>
REVISORES DE CUENTAS	<i>Guillermo Turazzini</i> <i>Fernando Díaz</i> <i>Carlos Marconi</i> <i>José L. Guerrero</i>

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

INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Staff		I
Comisión Directiva		II
Las rocas como materiales para hormigón	<i>Maiza, Pedro José Marfil, Silvina Andrea</i>	1
Rocas de las sierras de Córdoba como agregados para el hormigón. Comportamiento frente a la reacción álcali-sílice (RAS)	<i>Locati, F - Marfil, S. - Batic, O. Baldo, E.</i>	13
Recuperación de canteras en la región centro este de la provincia de Entre Ríos	<i>Muñoz, Luis - Treppo, Oscar Calvo, Carlos</i>	25
Caracterización ambiental y morfológica de los márgenes de cuerpos de agua artificiales en la planicie costera del Río de La Plata	<i>Marcomini, S.C. - López, R.A. Kalesnik, F.</i>	35
Geología ambiental del balneario Orense. Barrera Austral, provincia de Buenos Aires	<i>Quesada, Agustín - Marcomini, Silvia</i>	41
Lavas torrenciales (huaycos) y ¿cambio climático?. En el cañón de Torontoy (cuenca media del río Vilcanota-Urubamba. Cusco - Perú)	<i>Carreño C., Raúl</i>	49
Limitaciones de estimaciones y simulaciones de la colapsibilidad en suelos loessicos de Córdoba	<i>Rocca, Ricardo J.</i>	63
Biodisponibilidade do metal zinco em latossolo e chernossolo tratados com lodo de esgoto	<i>Almeida Cruz, Bruno Alamino, Renata C. J. Polivanov, Helena - Barroso, Emilio</i>	73
Geoinformática aplicada al análisis multitemporal del carcavamiento en el piedemonte sur de la sierra de San Luis	<i>Ojeda, Guillermo</i>	83
Modelación hidromecánica de pilas de lixiviación de minerales	<i>Delahaye, Carlos H.</i>	91
Instrucciones para autores		107
Formulario de suscripción o compra		109
Institucional. Conferencia sobre deslizamientos de terreno y peligros asociados		111



Las rocas como materiales para hormigón

Maiza, Pedro José ^{1,2} - Marfil, Silvina Andrea ^{1,3} ✉

Recibido: 10 de Agosto de 2008 • Aceptado: 17 de Julio de 2009

Resumen

Se consideran los principales minerales y rocas de la corteza terrestre, que son utilizados con frecuencia como agregados para hormigón. Para tal fin, puede calificarse a las rocas como: graníticas (ígneas y metamórficas granudas), volcánicas y sedimentarias (litificadas), a las que deben agregarse conglomerados, arenas, limos y arcillas (inconsolidados). Dentro de esta simplificación han quedado excluidas la mayoría de las rocas metamórficas, especialmente aquellas que presentan fisilidad (pizarras), esquistocidad (esquistos en general) y texturas de mortero (cataclasitas). Todas ellas deben ser tratadas con rigurosidad por las características físicas, mineralógicas y texturales que definirán comportamientos específicos muchos de los cuales serán perjudiciales si se incorporan al hormigón.

Muchas de las partículas que constituyen los agregados pétreos están recubiertas parcial o totalmente por la precipitación de carbonatos, sílice, material arcilloso/limoso, materia orgánica, sulfatos o por otros sedimentos los que dificultan seriamente su determinación. Aún con ayuda de estereomicroscopio, sólo podrá observarse la superficie externa cubierta y no se identificará la composición litológica de la partícula. Si está recubriendo una roca granítica o cuarzo no ocasionará inconvenientes, pero si enmascaran terrones blandos, arcillosos, vidrio volcánico, calcedonia o areniscas opalizadas será un problema serio.

Los yacimientos de origen fluvial, glacioluvial o marino costero, presentan composición litológica muy variada. Los componentes líticos de gravas y arena pueden estar enmascarados superficialmente por sílice criptocristalina o por óxidos de hierro asociados con sílice, tornándolos potencialmente reactivos frente a los álcalis lo que podrá ocasionar reacciones deletéreas en el hormigón que tiendan a disminuir sus prestaciones durante la vida útil de la obra.

Palabras clave: Agregados, hormigón, minerales, rocas.

Abstract

The main minerals and rocks of the earth's crust that are frequently used as aggregates for concrete will be considered in this work. For this purpose, rocks can be classified as granitic (grainy igneous and metamorphic) rocks, volcanic and sedimentary (lithified) rocks, as well as conglomerates, sands, silts and clays (non-consolidated). The great part of metamorphic rocks have been excluded from this simplification, in particular those presenting fissility (shales), schistosity (schists in general) and mortar textures (cataclasites). They must be all rigorously treated since their physical, mineralogical and textural characteristics will define specific behaviors that would be damaging if they are added to concrete.

Mención Especial del Premio Horacio V. Rimoldi - 2009

1 Dpto. de Geología. Universidad Nacional del Sur.
San Juan 670. 8000 Bahía Blanca. Tel.: 0291-4595184.
Fax: 0291-4595148

✉ E-mail: smarfil@uns.edu.ar

2. Investigador Principal CONICET.

3. Investigador Independiente CIC.

Many of the particles making part of the rock aggregates are partially or totally covered by the deposition of carbonates, silica, clay/siltstone material, organic material, sulphates or by other sediments that makes difficult their determination. Even using a stereomicroscope only the external covered surface will be observed and the lithological composition of the particles will not be identified. If granitic rock or quartz are covered

there will be no problem, but if soft clods, clay clods, volcanic glass, calcedonie or opalized sandstone are hidden there will be a serious problem. Deposits from river, glacial river or marine coastal origin show lithological composition highly varied. Lithic compounds of gravel and sand can be masked in the surface by criptocrystalline silica or by iron oxide associated with silica, making them potentially reactive in the alkali presence what can cause deleterious reactions in concrete tending to decrease their features during the lifetime of the construction.

Keywords: *Aggregates, concrete, minerals, rocks.*

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista de los agregados, rocas que composicional y texturalmente pueden considerarse semejantes, la acción de procesos termodinámicos conduce a la deformación de las estructuras de sus componentes y modifican totalmente su comportamiento.

El cuarzo es un mineral inocuo, pero si está deformado (desarrollo de extinción ondulante) se comportará como un mineral reactivo dependiendo del grado del tectonismo que lo afectó, y si estas condiciones se intensifican y culminan con un microfracturamiento llegando a la policristalinidad, cambiará hasta la superficie específica del mineral original y se comportará como una especie deletérea.

Al evaluar una roca debe considerarse su nivel de alteración ya que dependiendo de éste sus posibilidades de reaccionar son totalmente distintas.

La adecuada identificación de los minerales y rocas constituyentes de los agregados es de vital importancia para predecir su comportamiento en servicio.

Además de la composición hay que considerar su estabilidad en un medio fuertemente agresivo como puede ser el hormigón de cemento portland. Otro factor a tener en cuenta es el grado de exposición y humedad a la que estará sometida la obra.

Se debe identificar la presencia de componentes fácilmente lixiviables que pueden disminuir la compacidad de las rocas, producir reacciones químicas, desarrollar alta capacidad de intercambio catiónico y/o de absorción de agua provocando un aumento de volumen, presencia de minerales muy blandos, friables, con marcados planos de clivaje o exfoliación que afecten las propiedades físico-mecánicas y la presencia de crustificaciones superficiales que modifiquen la adherencia con la matrix.

MATERIALES

A continuación se dará una breve descripción de algunos de los minerales y rocas más frecuentes. Estos se encuentran en los agregados gruesos (canto rodado y piedra partida) como parte de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas y a medida que el tamaño de grano disminuye aparecen como minerales individuales en especial en las arenas. (*Dana and Dana 1951; Winchell 1933; ASTM C-294 1981; Chang, et al. 1998; Corneils and Hurlbut 1993*).

MÉTODOS

Se utilizó microscopía de polarización sobre secciones delgadas. Para ello se trabajó con un microscopio de polarización Olympus, trinocular BH-2, con cámara de video y programas computarizados para el tratamiento de imágenes.

Minerales de sílice

Cuarzo

Es la variedad de sílice más abundante y frecuente. Es un mineral duro, resistente a la meteorización por lo que es un componente muy abundante en las arenas y gravas. Adopta una morfología acorde con las condiciones de erosión, transporte y sedimentación y con la evolución del sedimento. Puede presentarse en granos absolutamente redondeados hasta irregular y anguloso y si es de grano extremadamente fino, adopta factura concoidal. Cuando está bien cristalizado se comporta como inocuo en el hormigón (Figura 1a) mientras que si ha sufrido procesos de deformación se transforma en potencialmente reactivo. En la Figura 1b se muestra clastos de cuarzo de grano fino y con extinción ondulante, como consecuencia de los procesos de deformación que ha sufrido.

Opalo

Es una forma de sílice hidratada. No tiene estructura cristalina definida. Se encuentra con frecuencia en rocas sedimentarias, principalmente en chert, diatomitas y como cemento de areniscas. También es frecuente como mineral secundario rellenando cavidades y fisuras en rocas. Es un material metaestable, especialmente en medio alcalino, y reacciona con los álcalis del cemento. En clastos monominerales, es un constituyente común de arenas, principalmente fluviales, presenta fractura concoidal.

Calcedonia

Es una variedad de sílice fibrosa. Es un material metaestable en medio alcalino. Su presencia es frecuente en chert, franita, jasperoide y otras variedades de sedimentos de origen químico. Se presenta como relleno de cavidades, como reemplazo de fósiles, como material cementante de rocas sedimentarias y en forma masiva. También en calizas y dolomías, como nódulos, lentes y bandas. Aún en bajas proporciones cuando aparece como constituyente de los agregados los transforma en potencialmente reactivos. En la Figura 1c se observa un clasto de calcedonia al microscopio de polarización.

Tridimita y cristobalita

Son variedades de sílice microcristalina. Se encuentran en algunas rocas volcánicas y metamórficas, generalmente en cavidades. Ambas son metaestables a presión y temperatura ordinarias y se comportan como potencialmente deletéreas en hormigón de cemento portland. Estas formas de sílice son comunes en vulcanitas desvitrificadas, en tobas alteradas y en sedimentos cuyos cementos son silíceos. Cuando están más o menos puras tienen fractura irregular - concoidal. Su identificación es difícil aunque imprescindible y debe realizarse con métodos específicos, puesto que las arenas o gravas que las contienen, aún en cantidades ínfimas, serán potencialmente reactivas en el hormigón.

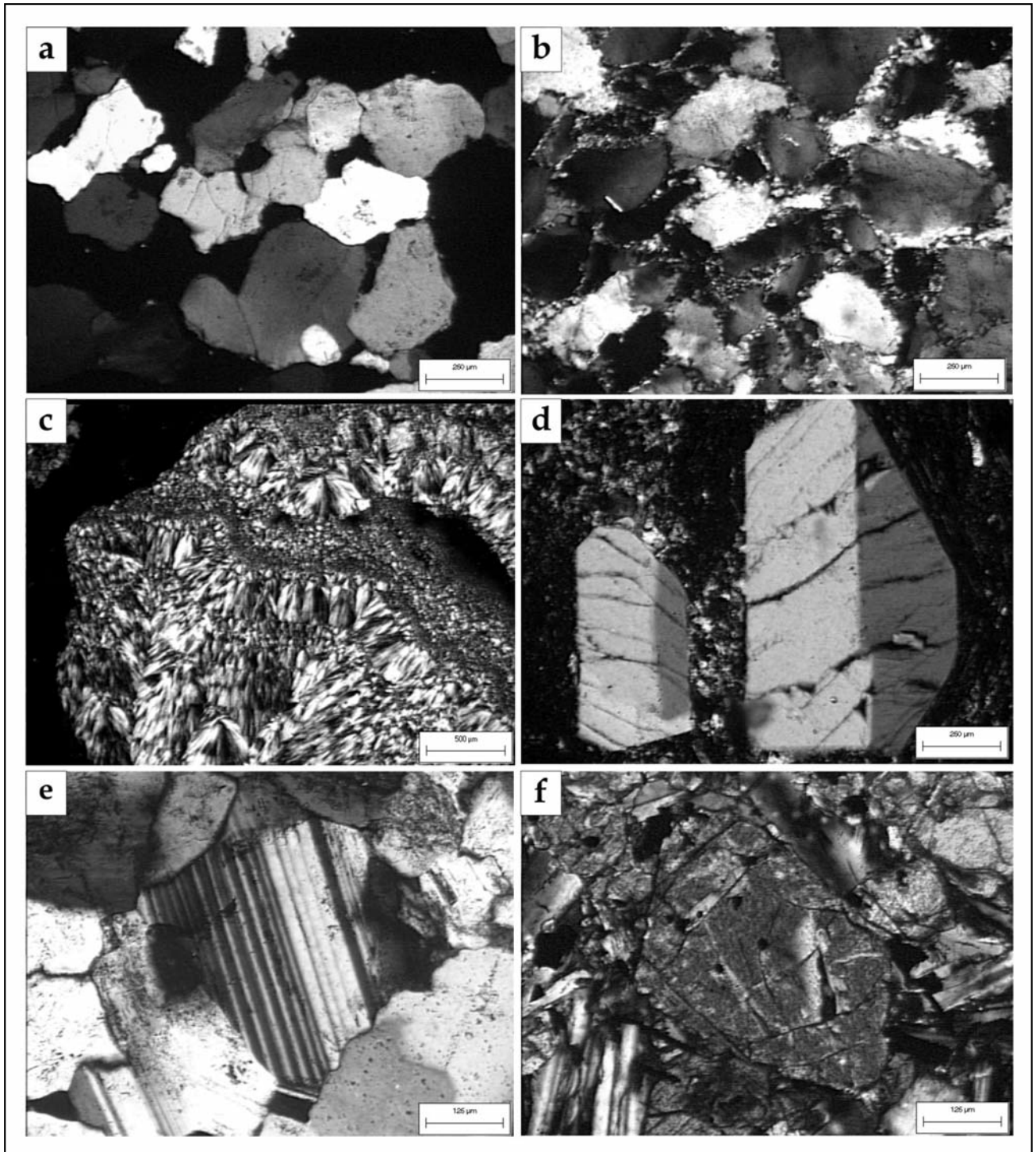


Figura 1. Minerales: a. cuarzo granular grueso. b. granos de cuarzo de grano fino, con extinción ondulante. c. calcedonia. d. feldespato (sanidina). e. feldespato (plagioclase). f. olivino.

Feldespatos

Constituyen un grupo muy abundante entre los minerales formadores de roca en la corteza terrestre. Se dividen en feldespatos potásicos y plagioclasas, diferenciados por su composición química y cristalográfica. Dentro de los primeros se encuentran ortosa, (Figura 1d), sanidina y microclino. Las plagioclasas (Figura 1e), forman una serie isomorfa entre el extremo sódico (albita) y el cálcico (anortita), con miembros intermedios oligoclase, andesina, labradorita y bytownita. Son muy estables en medio alcalino y suelen presentarse alterados a minerales arcillosos del

grupo de la illita y/o caolinita, ya que se hidrolizan en medio ácido.

Minerales ferromagnesianos

Olivinos, piroxenos y anfíboles

Tanto las rocas ígneas como metamórficas contienen minerales oscuros o máficos que son generalmente silicatos de hierro y/o magnesio. Estos minerales incluyen el grupo de los olivinos, (Figura 1f) que forman una serie isomorfa entre el extremo de hierro (fayalita) y el de magnesio (forsterita); los

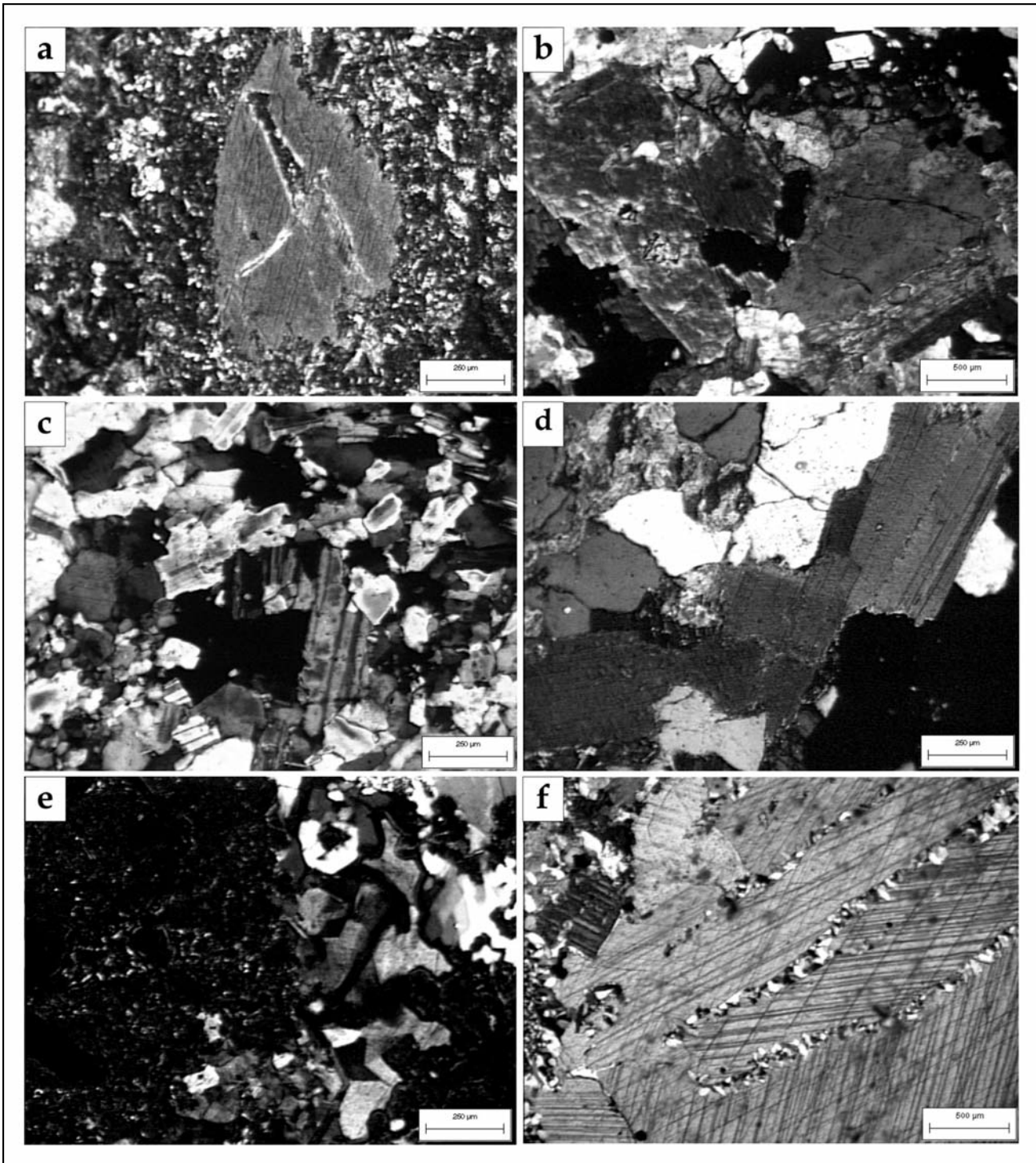


Figura 2. Minerales: a. piroxenos (augita). b. anfíboles (hornblenda). c. micas (moscovita) d. micas (biotita). e. ceolitas (clinoptilolita-heulandita). f. calcita.

piroxenos (el más común es la augita (Figura 2a)) y anfíboles (el más común es la hornblenda (Figura 2b)).

Si bien estos minerales son metaestables en el ambiente exógeno en especial los olivinos, no provocan reacciones deletéreas cuando constituyen agregados para hormigón.

Son muy frecuentes constituyentes de las rocas básicas y ultrabásicas y menos abundantes en las ácidas, sobre todo los

anfíboles y algunos piroxenos. Se los puede encontrar en las arenas, pero debido a la facilidad de disgregación y a la susceptibilidad de meteorización, generalmente no son constituyentes monominerales comunes. Bajo esta forma se los identifica fácilmente por su color (negro, rojizo, verdoso) y sus clivajes característicos.

Micas

Los minerales de este grupo se caracterizan por tener clivaje muy perfecto en una dirección y por lo tanto suelen formar láminas extremadamente finas. Cuando constituyen parte de los agregados pueden presentar problemas precisamente por esa propiedad. Dentro de las micas se pueden agrupar en las incoloras o levemente coloreadas: muscovita (Figura 2c) y las oscuras: biotitas (Figura 2d).

Minerales arcillosos

Son minerales secundarios, en general de grano muy fino, formados por alteración de los principales minerales primarios formadores de roca y del vidrio volcánico. Estos minerales pueden clasificarse como grupo de la montmorillonita, la illita y el caolín. La montmorillonita tiene alta capacidad de intercambio catiónico y cambia de volumen por humedecimiento y secado. Esta propiedad lo torna un material peligroso cuando constituye parte de los agregados pétreos. Por lo común no se reconocen clastos de estos minerales, ni en los agregados gruesos ni en las arenas aunque son constituyentes principales de las lutitas, limolitas, arcilitas y de algunas rocas metamórficas y vulcanitas alteradas. Es común hallarlos en las adherencias de clastos de rodados y arenas. Pueden encontrarse como integrantes de la mayoría de los clastos líticos en proporciones muy variables. Su identificación es dificultosa ya que su cristalinidad es pobre y su estructura no siempre es uniforme.

Ceolitas

Se caracterizan por su alta capacidad de intercambio catiónico y por su contenido variable de agua. Son minerales secundarios formados principalmente como relleno de cavidades, en el interior de fisuras dentro de las rocas ígneas, como producto de alteración hidrotermal o por procesos exógenos de los minerales primarios formadores de roca. Algunas ceolitas como las del grupo de la heulandita, natrolita y laumontita pueden producir efectos deletéreos en el hormigón, debido a su capacidad de aportar álcalis al medio, aunque son minerales estables en medio alcalino. Son componentes principales de las tobas alteradas y comúnmente se originan a partir de las fases vítreas en medio alcalino. (Bish et al. 2001). En la Figura 2e se observa una ceolita del grupo de la clinoptilolita - heulandita.

Carbonatos

La calcita, (Figura 2f) es el principal constituyente de las calizas sedimentarias y metamórficas (mármoles), aunque se encuentra en muchos otros tipos de roca. Aparece en cavidades de las rocas ígneas, como adherencia superficial, en venillas, rellenando diaclasas y en la mayoría de las rocas aflorantes de la corteza terrestre, especialmente cementando sedimentos modernos (tosca), muchas veces asociada a ceolitas. La dolomita es un mineral muy común, se la encuentra en vetas y yacimientos de reemplazo en calizas y dolomías sedimentarias y metamórficas (mármoles magnesianos).

Debe tenerse especial cuidado cuando el agregado presenta dolomita en su composición, en especial si es de grano fino ya que en medio alcalino se produce el fenómeno de dedolomitización dando como producto final calcita con un consecuente incremento de volumen que produce expansiones deletéreas en el hormigón.

Sulfatos

El más común es el yeso ($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), formado como consecuencia de la hidratación de anhidrita (SO_4Ca), la que

puede encontrarse en el yeso como mineral residual. El yeso aparece en venillas. Puede estar asociado a calcita, dolomita y halita.

Es un constituyente común de las rocas sedimentarias, especialmente de depósitos salinos marinos y continentales precipitado por evaporación. En yacimientos sedimentarios está asociado a limos, arcillas y margas vinculado con la oxidación de sulfuros.

Oxidos e hidróxidos de hierro

Los óxidos de hierro más comunes son la magnetita (Fe_3O_4) y la hematita (Fe_2O_3). De los hidróxidos se destaca la goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$). Los óxidos se presentan como minerales accesorios en muchas rocas ígneas oscuras y son comunes como detritos en arenas y sedimentos. La limonita es el producto de alteración de minerales que contienen hierro. En muchas rocas sedimentarias aparece como cemento ferruginoso, como crustificaciones en clastos de grava o tiñendo rocas de cualquier origen.

ROCAS

De acuerdo a su origen se clasifican en ígneas, sedimentarias y metamórficas. Estos tres grupos se subdividen de acuerdo a su composición química y mineralógica, textura y estructura interna.

Estas rocas constituyen agregados gruesos (piedra partida y canto rodado) y finos (arenas naturales y de trituración). Cuando el agregado es piedra partida su evaluación es simple ya que está constituido por un solo tipo de roca, que podrá presentar a lo sumo variaciones texturales y en la intensidad de la alteración. Las arenas provenientes de la trituración de rocas tienen un tratamiento similar.

Los cantos rodados y arenas naturales son más difíciles de evaluar ya que en general son agregados polimícticos constituidos por una variedad de rocas y minerales, en general de diferente origen, composición y grado de alteración. Por ello su examen debe abarcar el mayor número de clastos individuales o agrupados por semejanzas litológicas y ser exhaustivo. Debe ponerse especial cuidado cuando el agregado presenta pátinas superficiales que enmascaran la mineralogía y/o grado de alteración.

ROCAS IGNEAS

Se considera que entre el 65 y 70 % de la corteza terrestre está constituido por rocas ígneas. En la superficie terrestre los afloramientos de estas rocas no son cuantitativamente homogéneos ya que la roca plutónica más abundante es el granito/granodiorita (roca ácida) (Figura 3a) y la volcánica es el basalto (roca básica) (Figura 3b) (Williams 1968).

Las rocas básicas, tanto plutónicas como volcánicas, son menos evolucionadas, menos diferenciadas que las rocas ácidas. Se forman a mayor temperatura y en condiciones fisicoquímicas particulares por lo que cualquiera de sus componentes mineralógicos sufrirá procesos de desintegración más rápidamente al quedar expuestas al ambiente exógeno. Se meteorizará más rápido un olivino que un piroxeno y éste a su vez que un anfíbol. Fenómenos similares se desarrollarán entre una anortita y una albita y entre ésta y la ortosa. En la tabla I se comparan desde el punto de vista de la composición química las rocas mencionadas. La tabla II indica la mineralogía simplificada.

Tabla 1. Composición química promedio de las rocas ígneas

Oxidos principales	Gabro/ Basalto (%)	Diorita/ Andesita (%)	Granito-granodiorita / riolita-dacita (%)
SiO ₂	45 / 50	55 / 60	65 / 70
Al ₂ O ₃	15 / 17	14 / 16	13 / 15
Fe ₂ O ₃	19 / 22	14 / 16	4 / 6
MgO	7 / 9	3 / 5	0,5 / 2
Na ₂ O	2 / 3	4 / 5	5 / 6
K ₂ O	0,5 / 1	3 / 4	3 / 6

Tabla 2. Composición mineralógica promedio de las rocas ígneas

Principales minerales	Gabro / Basalto (%)	Diorita / Andesita (%)	Granito-granodiorita / riolita-dacita (%)
Cuarzo	< 5	<10	25 / 35
Plagioclasa	45 / 55	50 / 65	30 / 35
Feld. alcalinos	< 5	< 10	25 / 30
Pírox. + anf. + biot.	20 / 25	10 / 15	< 5
Olivinos	5 / 10	-	-
Opacos	2,5 / 5	1,5 / 4,0	0,5 / 2

Desde el punto de vista litológico, si son holocristalinas, estas rocas no presentan minerales que puedan considerarse deletéreos. Esta característica determina que ninguno de sus componentes sean metaestables o que puedan reaccionar dentro de un período de tiempo que por lo menos represente la vida útil de la obra.

Totalmente diferente es el comportamiento de las rocas volcánicas. Estas, dependiendo de la velocidad de enfriamiento, generarán distintas cantidades y tipos de vidrio volcánico. La metaestabilidad del vidrio volcánico dependerá de la edad de la roca (a mayor edad, mayor desvitrificación), de su composición (son más vulnerables los vidrios básicos que los ácidos) de sus texturas (los más compactos y masivos son más resistentes que los porosos o de texturas perlíticas), del desarrollo de los procesos de alteración, factor que acelera notablemente la desvitrificación y de la condición química del medio que favorezca la hidrólisis.

Una riolita holocristalina (Figura 3c) tendrá un comportamiento semejante a un granito, pero si tiene texturas que indican presencia de vidrio (holohialina, vitroclástica, vitrofídicas) será altamente reactiva (Figura 3d).

ROCAS SEDIMENTARIAS

Se producen por la descomposición física y/o química de los minerales y rocas desarrollándose una serie de procesos que van desde la disgregación hasta la hidrólisis, que conduce desde un aumento de la permeabilidad hasta el colapsamiento de las estructuras cristalinas liberando aniones y cationes en medios hidromórficos de quimismos que van desde ácido ($\text{pH} \cong 4$) al alcalino ($\text{pH} \cong 9$) y desde francamente oxidante a reductor.

Afectados los componentes primarios estarán sometidos en diferentes etapas con distinta intensidad a meteorización, erosión, transporte y depositación, condicionados por los ras-

gos fisiográficos y climáticos. No siempre actuarán todos los procesos que caracterizan a cada etapa y a la vez serán sometidos a cambios postdeposicionales generalmente agrupados en la diagénesis.

El análisis químico es útil para comprender la evolución del material desde el punto de vista geoquímico e interpretar los sedimentos o diferenciarlos. Generalizando, puede decirse que los sedimentos tienden a enriquecerse en sílice, hierro y alúmina y a empobrecerse en calcio, magnesio y elementos alcalinos.

Teniendo en cuenta el tamaño de los componentes litológicos de las rocas sedimentarias pueden agruparse como: sedimentos detríticos o clásticos y los de precipitación química. Los clásticos pueden clasificarse por tamaño decreciente como: grava, arena, limo y arcilla. Solo se considera el tamaño del grano y no su composición mineralógica ni química, características fundamentales a tener en cuenta cuando los sedimentos mencionados serán utilizados como agregados (*Pettijohn 1976; Adams 1997*).

Los sedimentos de origen químico más comunes son:

Calizas, dolomías, cherts, ftanitas, siderita, óxidos e hidróxidos de hierro, glauconita, celadonita, fosforita, yeso, otros evaporados y residuos orgánicos.

Como agregados, con muchos reparos pueden considerarse las calizas y dolomías. Estas últimas son potencialmente reactivas frente a la reacción álcali-carbonato y como siempre contienen cantidades variables de sílice generalmente como chert y arcillas, también frente a la reacción álcali-sílice (RAS).

Todas las formas de sílice micro, cripto y policristalinas de cualquier tipo de sedimentos tornan a estos en potencialmente reactivos.

En la tabla 3 se muestra la composición química de algunas rocas sedimentarias.

Tabla 3. Composición química de las principales rocas sedimentarias.

Oxidos (%)	Areniscas	Lutitas	Arcillitas	Calizas	Chert
SiO ₂	70 / 95	60 / 70	50 / 65	0 / 10	90 / 95
Al ₂ O ₃	< 5	10 / 20	10 / 12	0 / 3	0 / 3
Fe ₂ O ₃	2 / 5	4 / 8	5 / 10	0 / 0,5	0 / 1
MgO	1 / 2	0 / 1	2 / 4	3 / 6	0 / 0,5
CaO	1 / 3	2 / 4	0 / 1	35 / 40	0 / 0,5
Na ₂ O	0 / 0,5	0,5 / 1,5	1 / 3	0 / 0,5	0 / 0,5
K ₂ O	1 / 2	2 / 4	2 / 4	0 / 0,2	0 / 0,3

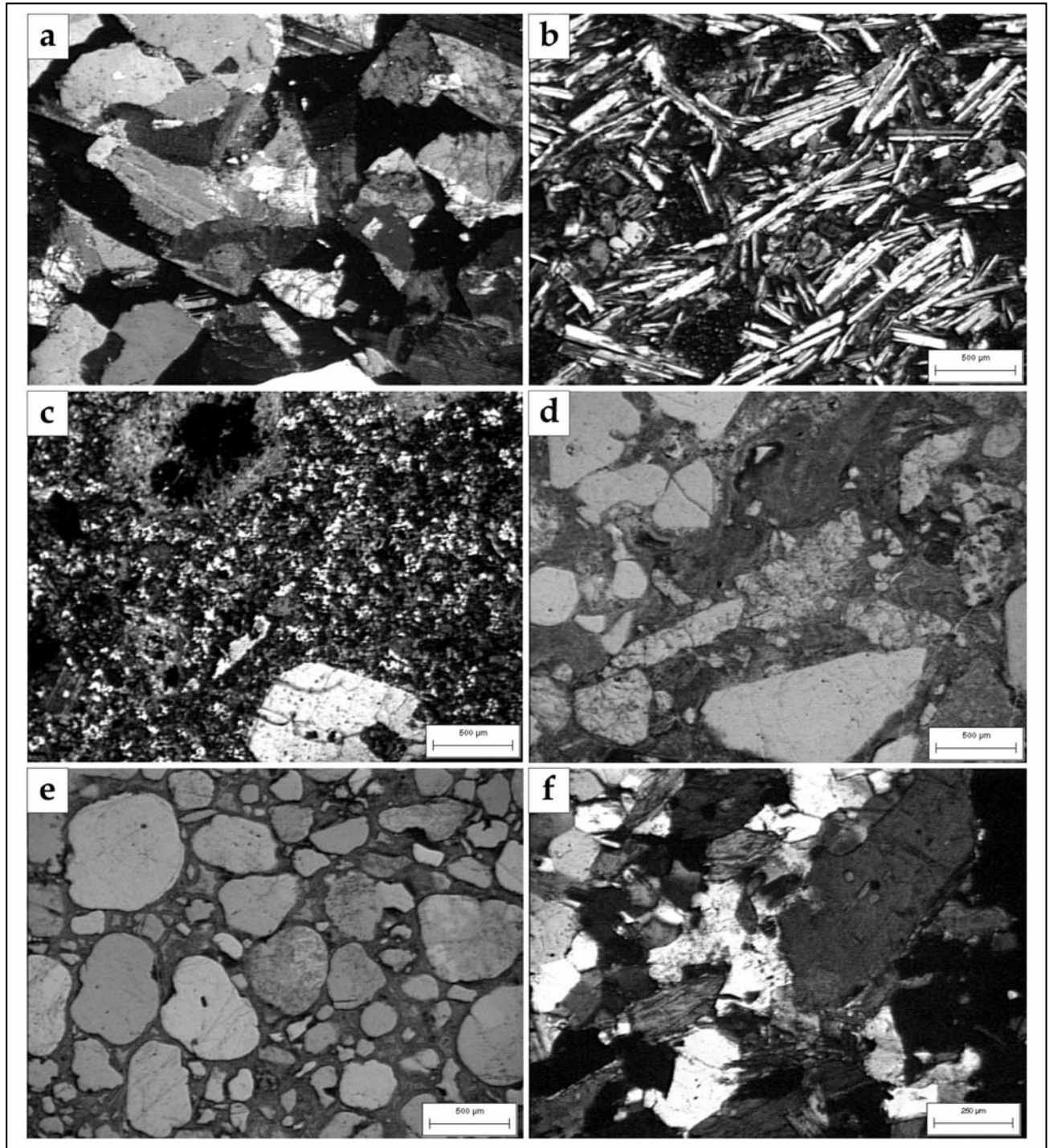


Figura 3. Rocas: a. granito. b. basalto. c. riolita holocristalina. d. riolita vítrea. e. arenisca silicea, cementada por sílice criptocristalina. f. esquistó anfibólico.

La composición mineralógica y litológica de los sedimentos puede ser oligomíctica (constituidos por un solo mineral o roca) o polimíctica (integrado por varios minerales o rocas). De esta forma una arena puede estar constituida casi exclusivamente por granos de cuarzo, de vulcanitas, de granito, fragmentos de pizarras, o mezcla de ellos, y seguirá siendo arena mientras se mantenga dentro de los límites de tamaño. Además conservará sus características y denominación la mezcla de todas las arenas mencionadas. Este mismo comentario es válido para las gravas.

Cuando estos sedimentos son estudiados para establecer su incorporación a un hormigón, los componentes deben agruparse en conjuntos de minerales y rocas cosanguíneas y de cada uno de ellos determinar la litología y/o mineralogía.

Los sedimentos consolidados, conglomerados, brechas, areniscas, lutitas, arcillitas, etc., están constituidos por los sedimentos correspondientes cementados por sílice, carbonatos, cementos ferruginosos. El proceso de cementación natural se realiza a partir de agua enriquecida en los iones mencionados y por reacción química, consolidan al sedimento. Estos procesos se agrupan generalmente bajo la denominación de litificación y diagénesis. Pueden contribuir a ellos la temperatura y la presión dependiendo de las condiciones de la cuenca de sedimentación donde se desarrolla el proceso. Los sedimentos consolidados para su uso en hormigón son considerados como una roca y deberán ser sometidos a trituración para obtener el tamaño adecuado. Los cementos silíceos o la sílice contenida en los cementos carbonáticos o ferruginosos, presentan elevados índices de lixiviación, razón por la cual deben ser estudiados con mucho detalle. En la Figura 3e se muestra una arenisca silícea, constituida por clastos de cuarzo cementados por sílice criptocristalina.

ROCAS METAMORFICAS

El metamorfismo puede ser puramente mecánico o puramente térmico sin modificaciones químicas importantes aunque hay cambios texturales y mineralógicos.

Cuando en el proceso se producen aportes o salidas de materiales principalmente gases magmáticos se desarrollará un proceso neumatólitico y si predominan los fluidos el proceso será hidrotermal. Si el proceso llega a tal temperatura y presión que se alcanza a la fusión parcial, se estaría desarrollando la migmatización y si es total se alcanzará la anatexis. Las características petrográficas de las rocas metamórficas permiten diferenciar cada uno de los procesos citados aunque las zonas de transición entre la diagénesis y el metamorfismo de bajo grado y entre el metamorfismo y la fusión total (granitos de anatexis) son dificultosos.

Los principales cambios mineralógicos que se manifiestan en las rocas metamórficas son de tipo polimórfico (cianita, andalucita, sillimanita), la generación de especies nuevas por aporte o pérdida de elementos (ceolitas, prehnita, pumpelita, arcillas, etc.) y deformación, trituración y hasta modificación de la estructura cristalina por la acción de tensiones, principalmente de cizalla.

Desde el punto de vista de las rocas metamórficas como agregados para hormigón, los factores más importantes que deben tenerse en cuenta son: las condiciones de formación de las nuevas especies ya que serán más inestables los minerales formados a mayor presión y temperatura; la deformación que presentan especialmente los minerales tenaces (cuarzo), ya que las

texturas de mortero, la policristalinidad y la presencia de especies como tridimita, cristobalita y aún la sílice amorfa, serán muy perjudiciales. (Monttana, 2002)

Generalizando se puede concluir que las rocas graníticas a medida que progresa el metamorfismo se transformarán en brechas tectónicas y terminarán como milonitas. Una limolita evolucionará desde la pizarra (metamorfismo de bajo grado) a filita, a micacita y culminará en gneis. Si alcanza a la fusión parcial en una granulita o hornfels de cuarzo, finalizará en una metacuarcita y una caliza como ya se dijo en mármol.

En la Figura 3f se muestra un corte delgado de un esquistos anfibólico.

ROCAS PIROCLASTICAS Y TOBAS

Estas rocas están constituidas principalmente por vidrio volcánico, cristales y clastos líticos. Si están compuestas principalmente por vidrio o partículas vítreas se denominan "tobas vítreas", si predomina la fracción cristalina "tobas cristalinas" y si predominan los fragmentos líticos "tobas líticas".

Además estos componentes son comunes a casi todos los sedimentos por lo que a las arcillas, limos, arenas y gravas que contienen un porcentaje importante de tobas se les agregará la denominación "tobáceas". Por sus características petrográficas (por lo general muy vesiculares) y físicas (materiales livianos) hace que durante su distribución sufran procesos de diferenciación importantes, tanto por la acción del viento como por el agua ya que algunos son tan livianos que pueden alejarse considerablemente de la fuente de origen y hasta flotar en el agua. Composicionalmente, si bien son, por mucho, más abundantes las tobas ácidas (riolíticas y dacíticas), también se producen las basálticas y andesíticas. En general puede asegurarse que estos materiales rápidamente se meteorizan ya que el vidrio es metaestable, son muy permeables y están expuestos en medios químicos totalmente diversos. En un ambiente alcalino, originarán montmorillonita (saponita, nontronita, si la toba es básica), beidélita y se caolinizarán si el medio es ácido, existiendo fases transicionales entre estos extremos. En todos los casos hay un excedente importante de sílice que comúnmente cristalizará como tridimita, cristobalita, ópalo y/o calcedonia originando una silicificación que podrá constituirse en el proceso de cementación más importante de la litificación.

Cuando estas rocas son identificadas como componentes de agregados tanto gruesos como finos, deben tomarse todos los recaudos necesarios para prever su potencial reactividad, especialmente determinar su composición mineralógica, litológica, textura y alteraciones dirigiendo la atención a la presencia de vidrio volcánico, fresco, alterado, relíctico y a la identificación de los minerales de alteración, montmorillonita, ceolitas y arcillas. Además de definir las características de la sílice y demás componentes del cemento de la toba su porción cristalina y lítica, puede ser importante, relacionarla con su origen ya que es aceptado que las tobas más antiguas que el Terciario no tendrían vidrio relíctico y las formas de sílice metaestables habrían adquirido cierta estabilidad.

ALTERACIONES

Prácticamente no existen rocas expuestas en el ambiente exógeno que no muestren evidencias de la acción de procesos erosivos sean estos físicos, químicos o biológicos. Pueden afectar a las rocas a distinta profundidad, que dependerá de la per-

Tabla 4. Sustancias nocivas (IRAM 1531 y 1512)

Sustancias nocivas	Máximo admisible en peso (%) (Agregado grueso)	Máximo admisible en peso (%) (arena)
Terrones de arcilla	0,25	1
Partículas blandas	5,00	2
Ftanita ("chert") contenido como impureza y no como uno de los constituyentes principales.		
a) obras en clima frío	1	
b) obras en clima templado	5	
Material que pasa tamiz 74 μ	1	2 a 5
Materia carbonosa		
a) cuando interese el aspecto superficial de la estructura.	0,5	0,5
b) en todos los demás casos.	1	1
Sulfatos expresados como anhídrido sulfúrico	0,0075	0,1
Otras sales solubles	1,5	1,5

meabilidad, del grado de fracturamiento y de su composición mineralógica y textura.

Los principales procesos químicos que se desarrollan se enmarcan en la hidratación e hidrólisis, oxidación y reducción, acción del CO₂ (carbonatación) y disolución. Los materiales que no son modificados, permanecerán como inatacados.

Todos los minerales primarios al ser afectados por los procesos mencionados sufrirán un aumento de volumen, a veces considerable o aportarán iones al medio que lo tornará más agresivo. Tendrán características físicas que las harán menos resistentes, sus componentes serán alcanzados más rápida y fácilmente, favoreciendo su desintegración, aportarán al medio aniones y cationes que dependiendo de las condiciones químicas originarán arcillas (si el medio es ácido, se formarán caolines; si el medio es alcalino, montmorillonita/smectitas, ceolitas y si es neutro a levemente alcalino, illita).

En la mayoría de estos procesos de alteración hay una tendencia a relacionar químicamente a la sílice y la alúmina tomando del medio los cationes disponibles y necesarios para formar las nuevas estructuras cristalinas, especialmente Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Fe⁺⁺, etc. y si ello no es posible migrarán como iones solubles o complejados principalmente por la materia orgánica. (Melgarejo 1997; Delvigne 1998; González Bonorino 1972).

En muchas de estas reacciones la cristalización de las nuevas especies mineralógicas consumirá parcialmente la sílice disponible. El exceso puede migrar como complejo solubilizado si el medio es francamente alcalino o precipitar en alguna de las formas de sílice, desde totalmente estable como cuarzo a una forma lábil como el ópalo.

Los agregados que serán utilizados en hormigones deben ser evaluados considerando el desarrollo de los procesos de alteración y calificando el nivel alcanzado. Entre los minerales primarios, los feldespatos pueden presentar caolinización (si el medio es ácido) o sericitización (si es neutro a levemente alcalino). En ambos casos habría exceso de sílice. Si el feldespato es una plagioclasa es muy probable que también haya carbonatación (a pH levemente alcalino) proceso que fijará al calcio movilizado.

La biotita, anfíboles y piroxenos al hidrolizarse liberarán hierro y magnesio dando lugar a la cristalización de cloritas. Este grupo de minerales incorporará los cationes mencionados, junto con la sílice y alúmina disponible. En todos los casos la

sílice estará en exceso dando lugar a la cristalización de algunas de sus formas cristalinas ya que el medio será levemente ácido a neutro.

A pesar de que el cuarzo es un mineral muy resistente y las demás formas de la sílice no tanto, el medio que se desarrolla en el hormigón es muy alcalino y por lo tanto, todas las superficies estarán expuestas a su lixiviación.

Si el agregado es una roca, influirán en su reactividad, toda la superficie y subsuperficie donde los minerales primarios y los de alteración participan desarrollando un complejo proceso de reacción, cuyo resultado es la sumatoria de cada una de las reacciones en cada mineral.

ENMASCARAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE LOS AGREGADOS POR ADHERENCIAS SUPERFICIALES

Muchas de las partículas que constituyen los agregados pétreos están recubiertos parcial o totalmente por la precipitación de carbonatos, sílice, material arcilloso/limoso, materia orgánica, sulfatos o por otros sedimentos los que dificultan seriamente su determinación. Es prácticamente una costumbre denominar a estos granos como "alteritas", criterio que se propone eliminarlo ya que es peligroso su uso.

La depositación de carbonato de calcio sobre agregados gruesos naturales es muy común a partir de la precipitación de calcita desde aguas continentales circulantes o percolantes ya sea por saturación o por desecación, fenómeno que se manifiesta sobre sedimentos de cualquier composición.

Al realizar observaciones aún con ayuda de un estereomicroscopio, sólo podrá observarse la superficie externa cubierta por calcita y no será posible identificar la composición litológica del clasto. Si está recubriendo una roca granítica o un casto de cuarzo no ocasionará inconvenientes, pero si enmascara terrones blandos, arcillosos, o vidrio volcánico o calcedonia o areniscas opalizadas será un problema serio.

No tan frecuente, en la naturaleza se presentan clastos de composición litológica muy variada, constituyendo yacimiento de gravas cuyo origen es principalmente fluvial. Los componentes líticos de gravas y arena pueden estar enmascarados por sílice criptocristalina o por óxidos de hierro asociados con sílice, tornándolos reactivos. En el caso del carbonato, podría eliminarse la cobertura utilizando una solución ácida, pero el segundo es muy difícil.

Estos fenómenos no son los únicos, pues es común que haya adherencias superficiales de sedimentos más finos que no permiten determinar al núcleo cubierto. Más raro son los enmascaramientos por materia orgánica los que podrían eliminarse utilizando peróxido de hidrógeno.

Todos los problemas mencionados deben resolverse identificando la especie mineralógica y /o litológica ya que pueden participar activamente en la reacciones del hormigón sea mediante la eliminación de la capa externa que los oculta y mediante la utilización de secciones delgadas con el microscopio de polarización.

En el agregado grueso se resuelve más fácilmente ya que los individuos de interés pueden ser estudiados en cortes delgados individuales. No es así con las arenas ya que se deberán aglutinar para su estudio utilizando algún cemento que permita obtener una pastilla que soporte el tratamiento al ser confeccionada la sección delgada. De esta forma es posible identificar a cada uno de los minerales o rocas que los componen.

ESTABILIDAD QUÍMICA

Si bien la mayoría de los minerales y rocas formados a elevadas presiones y temperaturas son metaestables bajo las condiciones ambientales, las principales especies que producen reacciones deletéreas cuando son utilizadas como agregados en hormigón y que pueden afectar seriamente la durabilidad de las obras son: el vidrio volcánico, las variedades de sílice micro y policristalina, algunas arcillas o rocas arcillosas y el cuarzo tensionado con elevado ángulo de extinción ondulante.

Estas especies en medios fuertemente agresivos como es el pH elevado del hormigón tienden a solubilizarse (hidrolizarse), liberando sílice y elementos alcalinos que se combinan para formar en principio geles que luego cristalizan en estructuras ceolíticas con el consecuente incremento de volumen y desarrollo de presiones que superan la resistencia a la tracción del hormigón.

Estas reacciones se producen si, además de las condiciones químicas, se dan factores tales como elevadas temperatura y humedad. Deben sumarse las adherencias superficiales que pueden presentar los clastos principalmente los rodados, cuando se trata de minerales arcillosos en especial materiales expansivos del tipo montmorillonita, sílice criptocristalina libre o asociada con carbonatos.

RESISTENCIA FÍSICA Y/O MECÁNICA

En este punto se deben tener en cuenta dos aspectos principales. El primero vinculado a las características estructurales de los minerales y rocas dados por desarrollo de planos de clivaje muy perfecto en una dirección (micas), planos de fisilidad o esquistosidad muy marcados (filitas, esquistos, pizarras) y rocas sedimentarias finamente estratificadas. Esto disminuye notablemente la resistencia de los materiales en esos planos lo que provoca su desintegración o rotura en esas direcciones, degradando las estructuras que lo contienen.

El otro aspecto está vinculado con la dureza de los clastos del agregado, por ejemplo la presencia de minerales de alteración tipo montmorillonita, terrones blandos, o rocas blandas o muy alteradas, que lo tornan deleznable.

La presencia de crustificaciones superficiales provoca, por otra parte una notable disminución en la adherencia agregado/mortero, llegando en muchos casos a la separación total.

ENSAYOS NORMALIZADOS

Existen normas que especifican los requisitos a tener en cuenta para realizar los estudios petrográficos de los materiales a ser utilizados como agregados. Entre ellas puede citarse la norma *IRAM 1649* (Aridos para hormigón. Examen petrográfico), *IRAM 1531* (Aridos gruesos para hormigones de cemento Portland) e *IRAM 1512* (Arido fino natural para hormigones de cemento portland).

Para que el agregado sea aceptado no debe contener sustancias nocivas en proporciones mayores a las indicadas en la tabla IV (*IRAM 1531* y *1512*) y la suma de los valores obtenidos no deberá superar el 5%.

Para evaluar la durabilidad, el agregado debe ser sometido al ensayo por ataque con sulfato de sodio según la norma *IRAM 1525* y al ensayo de desgaste Los Angeles (*IRAM 1532*). Petrográficamente debe ser analizado desde el punto de vista de la reacción álcali agregado, en especial cuando la obra estará sometida a la acción de humedad. Para ser aceptado el contenido de especies deletéreas no debe superar los porcentajes indicados en la tabla 5.

Tabla 5. Examen petrográfico (*IRAM 1531*)

Rocas y minerales	% máximo
Opalo y ftanita ("chert") opalizada	0.25
Ftanita ("chert") cuarzosa o calcedónica	5
Riolitas, dacitas, latitas o andesitas, vítreas o criptocristalinas y sus correspondientes tobas, ceolitas y vidrio volcánico	3

CONCLUSIONES

El estudio petrográfico de los materiales a ser utilizados como agregados para hormigón es de fundamental importancia antes de decidir su uso.

Debe ponerse especial cuidado en los minerales considerados potencialmente reactivos. Estos son: las variedades pobremente cristalizadas de la sílice (tridimita, cristobalita, ópalo, calcedonia) y el vidrio volcánico, tanto fresco como alterado (desvitrificado) contenidos en clastos individuales o en las pastas de rocas volcánicas ácidas y/o básicas.

Las adherencias superficiales producen enmascaramiento de los componentes del agregado y en algunos casos dependiendo de su composición pueden generar falta de adherencia o reacciones deletéreas.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ADAMS, A. E.; MACKENZIE, W. S. AND GUILFORD, 1997.
Atlas of sedimentary rocks under the microscope.
Longman. England. 104 pag.
- ASTM C-294, 1981.
Standard descriptive nomenclature of constituents of natural mineral aggregates.
Annual Book of ASTM Standards, Part. 14. Philadelphia, USA
- BISH, D. L. AND D. W. MING, 2001.
Natural zeolites: occurrence, properties, applications.
Reviews in mineralogy and Geochemistry. Vol. 45. Mineralogical Society of America. 654 pag. Washington D.C.
- CHANG, L. L.; HOWIE P. A. AND M. A. ZUSSMAN , 1998.
Rock-forming minerals.
2nd. Edition. Vol I, II, III, IV and V.
- CORNEILS, K. AND C. S. HURLBUT JR., 1993.
Manual of Mineralogy.
After J. D. Dana. Ed. John Wiley and Sons Inc.
- DANA, J. D. AND E. S. DANA, 1951.
Manual of Mineralogy.
Vol. II. Ed. John Wiley and Sons Inc.
- DELVIGNE, J. E., 1998.
Micromorphology of mineral alteration and weathering.
Mineralogical Association of Canada. 494 pag. Canadá.
- GONZÁLEZ BONORINO, F., 1972.
Introducción a la Geoquímica.
OEA. Ed. Chesneau. Washington D. C. 140 pag.
- IRAM 1512, 1968.
Arido fino natural para hormigón de cemento portland.
- IRAM 1525, 1985.
Agregados. Método de ensayo de durabilidad por ataque con sulfato de sodio.
- IRAM 1531, 1968.
Aridos gruesos para hormigones de cemento portland.
- IRAM 1532, 2000.
Agregados gruesos. Método de ensayo de resistencia al desgaste con la máquina "Los Angeles".
- IRAM 1649, 1968.
Reactividad alcalina potencial en áridos. Exámen petrográfico.
- MELGAREJO C., 1997.
Atlas de las Asociaciones minerales en lámina delgada.
Coor. Joan Carls Melgarejo. Ed. Universitat de Barcelona. Pp. 1052.
- MONTTANA, A.; SASSI, F. P.; THOMPSON, J. B. AND S. GUGGENHEIM, 2002.
Micas. Crystal chemistry and metamorphic petrology.
Reviews in mineralogy and geochemistry. Vol. 46. 499 pag. Washington D. C.
- PETTIJOHN, F. J., 1976.
Rocas Sedimentarias.
3ra. Edición. Editorial Universitaria de Buenos Aires. 731 pag.
- WILLIAMS, W. TURNER, F. J. Y GILBERT, 1968.
Petrografía.
Editorial Continental. México. 430 pag.
- WINCHELL, A. N., 1933.
Elements of optical mineralogy. Part II. Descriptions. Of minerals.
John Wiley and Sons. 459 pag. London.



Rocas de las sierras de Córdoba como agregados para el hormigón Comportamiento frente a la reacción álcali-sílice (RAS)

Locati, F.¹ ✉ - Marfil, S.² - Batic, O.³ - Baldo, E.¹

Recibido: 15 de setiembre 2009 • Aceptado: 05 de abril de 2010

Resumen

Si bien existen abundantes antecedentes respecto a la reacción álcali-agregado (RAA) en Argentina (Marfil and Maiza 2001; Batic et al. 2008a), estos son particularmente escasos para los hormigones con agregados que provengan de las Sierras de Córdoba (Campos 2005; Locati 2006; Locati et al. 2008; Bonalumi et al. 2009).

La reacción álcali-sílice (RAS) se produce cuando ciertos agregados que contienen sílice de estructura amorfa, desordenada o pobremente cristalina (o cuarzo tensionado y deformado), reaccionan con los oxhidrilos presentes en la solución de poro del hormigón a pH elevado, formando un gel ávido en agua que se expande en presencia de Ca^{2+} (Batic y Sota 2001). Es por esto que resulta de gran interés evaluar el comportamiento de diferentes tipos de rocas, especialmente aquellas que han estado sometidas a deformación y modificación de su microestructura original.

Las Sierras Chicas constituyen el área más cercana a la Ciudad de Córdoba y la principal fuente de triturados pétreos para la construcción en la zona centro-este del país, por lo que resulta de suma importancia conocer su reactividad alcalina potencial. Para ello se efectuaron análisis petrográficos sobre diferentes litologías y se determinó la reactividad alcalina potencial mediante el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674). Los resultados obtenidos permitieron calificar a los materiales en tres grupos: Uno de rocas no reactivas, otro de rocas potencialmente reactivas frente a la RAS y un tercer grupo intermedio que necesita de ensayos complementarios para pronosticar su comportamiento en obra.

Palabras clave: Agregados, hormigón, reacción álcali-sílice, Sierras de Córdoba.

Abstract

There are works related to the alkali-aggregate reaction (AAR) in Argentina (Marfil and Maiza 2001; Batic et al. 2008a), but only a few studying aggregates from Sierras de Córdoba (Campos 2005; Locati 2006; Locati et al. 2008; Bonalumi et al. 2009).

The alkali-silica reaction (ASR) is produced between siliceous aggregates with amorphous, disordered or weakly crystalline structure and the hydroxyl from the alkaline concrete pore solution. This process generates a hygroscopic gel which takes water from the surrounding solution and expands in Ca^{2+} presence (Batic y Sota 2001), so is important to evaluate the behavior of different kind of rocks, especially those which were suffered deformation processes affecting its original microstructure.

¹ CICTERRA-CONICET-UNC.
UNC-FCEfYN - Cátedra de Geología General,
Av. Vélez Sarsfield 1611, (X5016GCA) Córdoba, Argentina.
Tel: +54-351-4344980/4981 ext. 113; Fax: +54-351-4334139.

✉ E-mail: flocati@efn.uncor.edu,

² Dpto. de Geología - UNS. San Juan 670. (8000) Bahía Blanca.

³ LEMIT. Calle 52 y 121 (1900). La Plata.

The Sierras Chicas is the nearest area to the Córdoba City and it is the main source of brittle aggregates for the central-eastern zone of the country, therefore is very important to know its potential reactivity. In this way petrographic analysis were made and the potential alkali reactivity was determined (IRAM 1674). The results allowed qualified the materials in three groups: One with no-reactive rocks, other with potential alkali reactive rocks and an intermediate group of rocks that need complementary tests in order to understand their behavior.

Keywords: Aggregates, concrete, alkali-silica reaction, Sierras de Córdoba.

INTRODUCCIÓN

La producción comercial de las canteras de la provincia de Córdoba se centra en el triturado pétreo (Córdoba es responsable del 40% del triturado pétreo nacional) y la arena de trituración, tanto para la construcción de caminos así como para otras obras civiles como edificios, premoldeados, etc. Las metamorfitas, lideran con el 70% del volumen total de producción (Bonalmi et al. 2008).

Gran parte de los materiales de trituración, provienen del sector más oriental de las Sierras Pampeanas de Córdoba (Figura 1), compuestas principalmente por gneises, esquistos, migmatitas, anfibolitas, mármoles y rocas ígneas ácidas, básicas y ultrabásicas (Baldo et al. 1996; Rapela et al. 1998). Ciertos sectores del complejo ígneo-metamórfico fueron afectados por fajas de deformación (Martino 2003), sufriendo modificaciones internas asociadas a procesos de deformación dúctil a frágil-dúctil, evidenciados por el desarrollo de microestructuras cristalinas de deformación, recuperación cristalina y recristalización, como generación de dislocaciones intracristalinas que producen la extinción ondulante del cuarzo, generación de lamelas y bandas de deformación, subgranulado y desarrollo de mirmequitas (intercrecimiento simplectítico de cuarzo vermicular y plagioclasa sódica por reacción con el feldespato potásico). Estas microestructuras de alta inestabilidad son sitios potenciales para el ataque de la solución alcalina de poro del hormigón como lo demuestran los trabajos de tesis doctoral de Jensen (1993), Wigum (1995a) y Broekmans (2002).

Las rocas que contienen cuarzo tensionado o cuarzo micro a criptocristalino en sentido general son clasificadas como rocas de reacción lenta/tardía (Wigum 1995b; Swamy 1992; Ponce and Batic 2006; entre otros). Esto se debe a que el ingreso de los hidróxidos alcalinos en estructuras cristalinas deformadas se produce de forma más lenta que en estructuras silíceas amorfas o con arreglos cristalinos más dilatados que los del cuarzo como sucede en el ópalo, calcedonia, vidrio volcánico, tridimita, cristobalita, etc. Los canales a través de los cuales los fluidos alcalinos ingresan y se ponen en contacto con los agregados inestables se relacionan con planos de permeabilidad secundarios como ser: microfisuras, planos de foliación de la roca, bordes de granos o con sitios defectuosos en la estructura cristalina de los minerales. Así, las manifestaciones por RAS en rocas con sílice amorfa y de reacción rápida se producirían en estadios tempranos de la vida en servicio de la estructura de hormigón, mientras que en rocas de reacción lenta se producirían en 10 o 30 años, o incluso menos dependiendo además de las condiciones ambientales, HR (humedad relativa) y temperatura que rodean a la estructura de hormigón.

De lo anterior se desprende que el análisis petrográfico orientado a definir los procesos que afectaron las rocas metamórficas y la caracterización de las microestructuras resultantes, son de suma importancia para determinar el

comportamiento potencial que puedan llegar a manifestar en una estructura de hormigón.

El gran aumento en la demanda de rocas como agregados para obras civiles ha generado la necesidad de incrementar también los estudios tendientes a su correcta caracterización y evaluación de sus propiedades, con la premisa de que todas las rocas pueden tener un uso pero no todas sirven para lo mismo. Teniendo en cuenta esto y debido a que la explotación de triturados pétreos en la Sierra de Córdoba se encuentra en plena expansión, se ha encarado el estudio de diferentes tipos de rocas ígneas y metamórficas con el fin de evaluar su comportamiento como componentes del hormigón, especialmente frente a la reacción álcali-sílice.

En el presente trabajo se muestran algunos resultados preliminares de la investigación llevada a cabo sobre estos materiales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los agregados analizados se distribuyen a lo largo del cordón montañoso oriental de las Sierras Pampeanas de Córdoba, abarcando principalmente la Sierra Chica y en menor medida la Sierra de Las Peñas y el sector sur de la Sierra Norte (Figura 1). Las muestras se dividen en dos grupos, aquellas provenientes de canteras actualmente en producción y las que provienen de áreas potencialmente explotables. El primer grupo está constituido por muestras polilitológicas que resultan de las mezclas naturales o provocadas de la explotación de una cantera. El segundo proviene de áreas con potencial de ser explotadas y corresponden a muestras monolitológicas.

Es importante aclarar que no todas las canteras de las Sierras Chicas producen agregados polilitológicos, existen algunas en las que se explota una sola litología o en donde la mayor parte de los frentes de la cantera muestran una misma composición.

Se realizó el muestreo de triturados pétreos de canteras actualmente en explotación (DUM 02, EGO 19, SBL 3) y de afloramientos de áreas potenciales (CAN 34, SLP 2, ES 04, SLP 1, AG 05, CAN 30, ES 02, ES 03, YOC 06), recolectándose aproximadamente 30 kg por cada muestra. Se efectuó el examen petrográfico de las diferentes muestras enfatizando en la presencia de microestructuras favorables para la RAS y se determinó la reactividad alcalina potencial mediante el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674). Esta última establece que expansiones menores del 0.10% a 16 días indican agregados de comportamiento inocuos y expansiones de más de 0.20% comportamientos potencialmente deletéreos. Para expansiones entre 0.10% y 0.20% se recomienda recabar información complementaria para poder discriminar entre agregados inocuos y deletéreos. Otra posibilidad es la de extender los ensayos a 28 días.

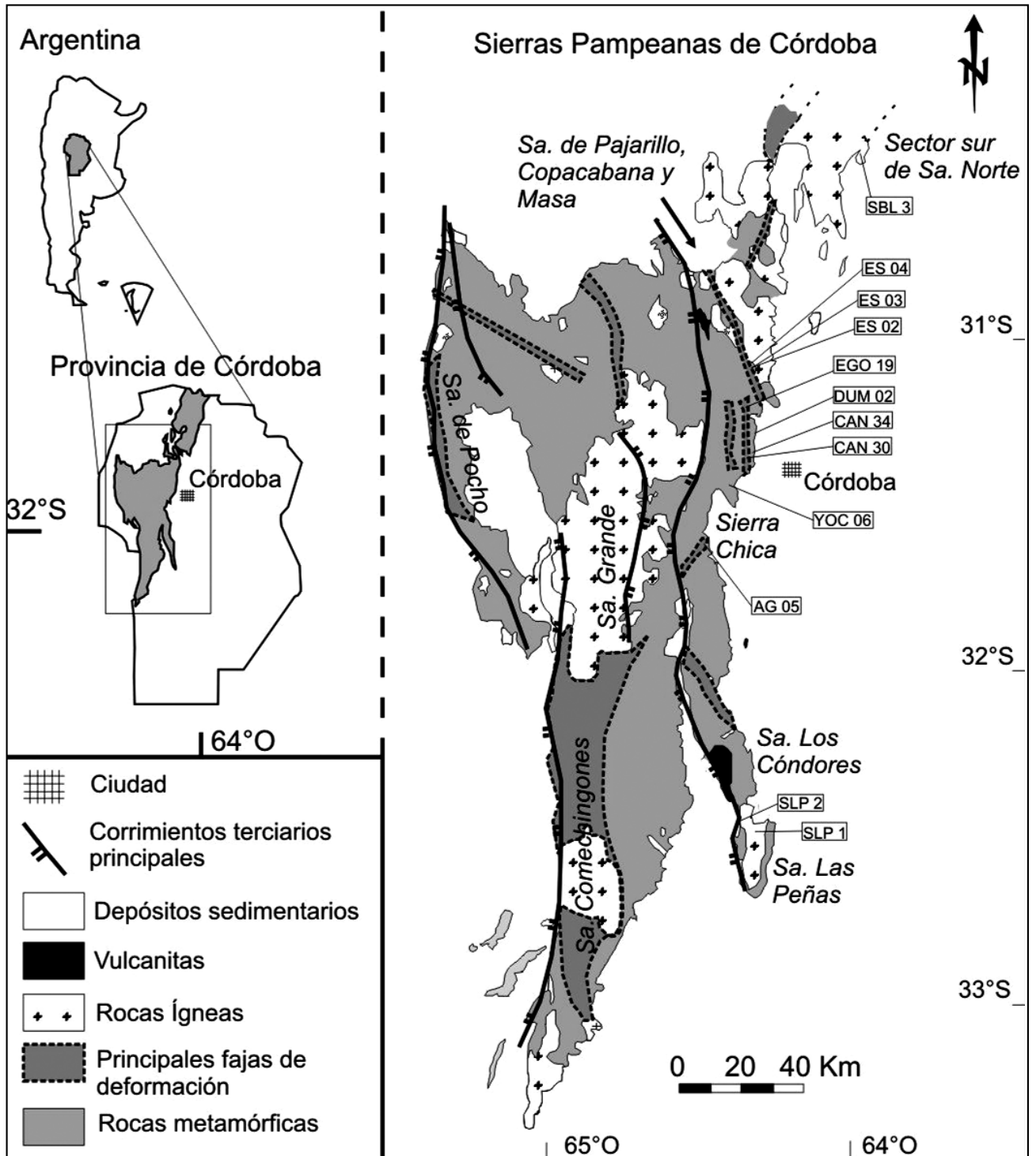


Figura 1. Ubicación de las muestras en las Sierras Pampeanas de Córdoba. El área de estudio comprende parte de la Sierra de las Peñas, Sierra Chica y el sector sur de la Sierra Norte (Modificado de Martino 2003).

CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA DE LOS MATERIALES Muestra SLP 1 "Metadorita"

Coordenadas de la muestra:

Latitud: 32°28'37.44"S - **Longitud:** 64°17'24.48"O

Proviene de un plutón de roca básica que conforma parte de las denominadas "Ortoanfíbolitas El Potosiorco", en la Sierra de las Peñas. Es una roca de textura granoblástica (Figura 2a) de contactos cristalinos poligonales formada principalmente por plagioclasa (55%), hornblenda (35%), cuarzo (2-5%) y clorita,

titanita, rutilo, epidoto, sericita, minerales opacos (5-8%). La hornblenda (≤ 2 mm) es subhedra a anhedra, con zonación interna y en ocasiones se altera a clorita. La plagioclasa (≤ 3 mm) es subhédrica a euhédrica y presenta alteración parcial a sericita, epidoto y calcita, principalmente en la zona central de los cristales. Se observan venillas con calcita que atraviesan la roca. El cuarzo (≤ 2 mm) es escaso, de tipo anhedro, y no presenta evidencia de intensa deformación. Algunos granos poseen extinción ondulante o desarrollo de bandas de deformación. El subgranado es poco frecuente. La alteración de la roca es importante, principalmente sobre las plagioclasas.

Muestra SLP 2 "Gneis granatífero"

Coordenadas de la muestra:

Latitud: 32°28'4.22"S - Longitud: 64°19'29.12"O

Corresponde a una roca de textura granolepidoblástica (Figura 2b) con dominios de filosilicatos orientados que alternan con sectores no orientados. Está compuesta por cuarzo (50%), biotita (25%), plagioclasa (~15%), granate (5%) y como

acesorios, circón, sericita, clorita, epidoto, apatita, muscovita y minerales opacos (≤5%). En general la roca se observa poco alterada con algunas plagioclasas sericitizadas y biotitas cloritizadas. Se reconocen venas tardías rellenas de cuarzo y epidoto, posiblemente de origen hidrotermal. La plagioclasa es subhedra a anheda (≤ 6 mm). La biotita es subhedra (≤ 2 mm) algunas con evidencias de flexión. El granate (≤ 1 mm) es redondeado, muy fracturado y con inclusiones de cuarzo, biotita y minerales opacos principalmente.

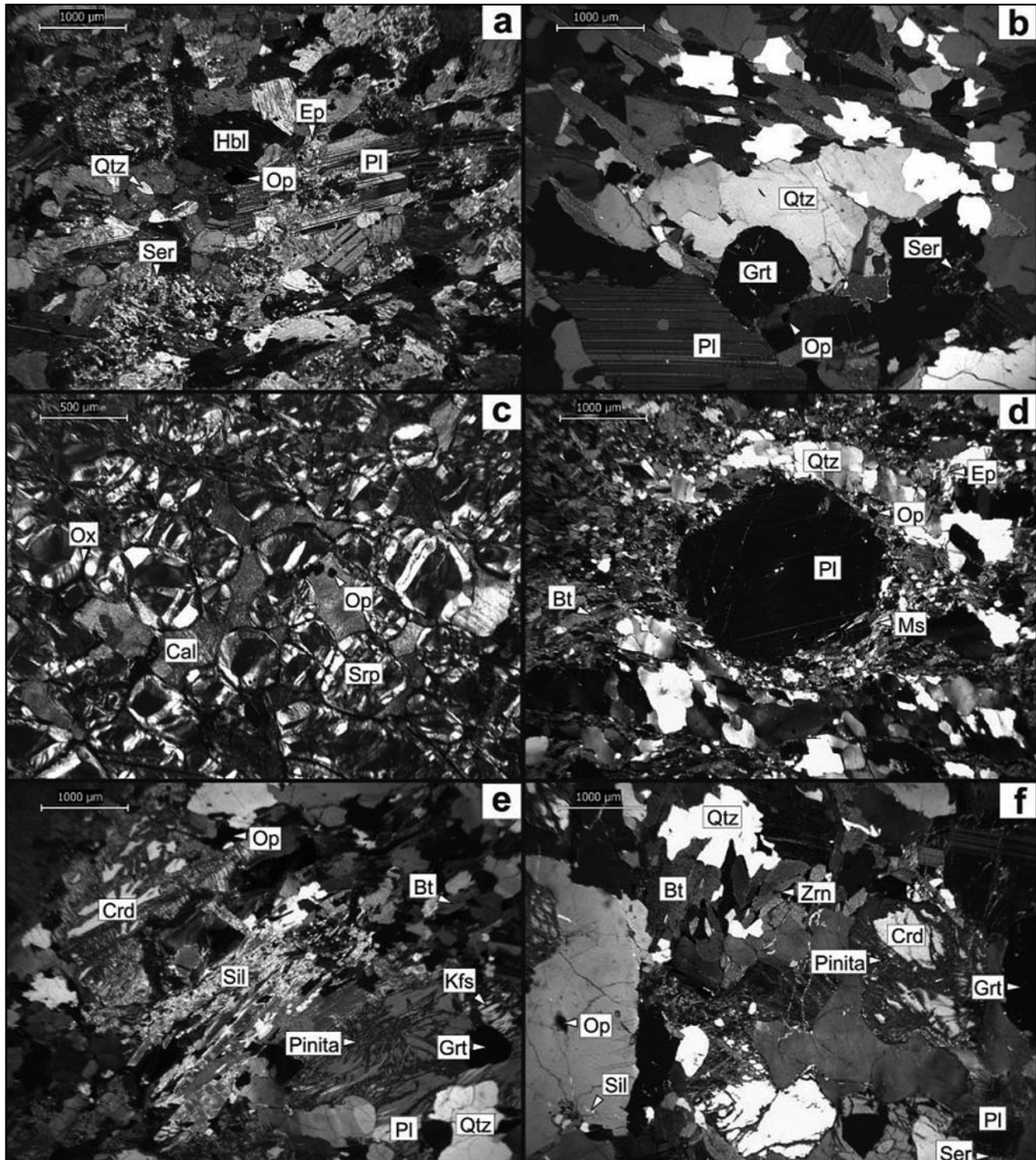


Figura 2. Fotomicrografías. a) Muestra SLP 1, b) Muestra SLP 2, c) Muestra AG 05, d) Muestra YOC 06, e) Muestra CAN 30, f) Muestra CAN 34. (Nicoles cruzados). Abreviaturas minerales según Kretz (1983), Qtz: cuarzo, Pl: plagioclasa, Kfs: feldespato potásico, Bt: biotita, Ms: muscovita, Sil: sillimanita, Grt: granate, Crd: cordierita, Srp: serpentina, Cal: calcita, Hbl: hornblenda, Cpx: clinopiroxeno, Ep: epidoto, Ser: sericita, Chl: clorita, Zrn: circón, Op: mineral opaco, Ox: óxidos, A.A.: Agregado anfibolítico, A.G.: Agregado granítico, A.Gn.: Agregado gnéisico.

El cuarzo es anhedral y se dispone elongado de forma paralela a la biotita generando la foliación de la roca. Como evidencias de deformación se observa una débil extinción ondulante, en bloques o en bandas. El tamaño es variable (≤ 8 mm) prevaleciendo los de menor tamaño (~ 1 mm).

Muestra AG 05 "Serpentinita"

Coordenadas de la muestra:

Latitud: 31°40'20.81"S - Longitud: 64°26'37.08"O

Proviene de un cuerpo de roca ultramáfica, elongado en el sentido de la foliación general del sector. Se compone de masas globulares de serpentina (Figura 2c), posiblemente pseudomorfos de olivino, de tamaño aproximado ≤ 1 mm. Predomina la serpentina de tipo laminar sobre las fibrosas (85-90%). En general se observan bandas serpentínicas separadas por acumulaciones de minerales opacos (de hasta 4 mm) que en ocasiones aparecen asociadas a óxidos ($\sim 2\%$), éstos últimos también rodean los glóbulos de serpentina. Hay calcita (≤ 1 mm) en agregados poligonales ubicados entre los glóbulos de serpentina y rellenando venas que atraviesan la roca (8-13%). No se observó presencia de cuarzo.

Muestra YOC 06 "Gneis milonitizado"

Coordenadas de la muestra:

Latitud: 31°26'44.50"S - Longitud: 64°22'44.40"O

Se trata de una roca con foliación milonítica compuesta principalmente por cuarzo (40%), biotita + muscovita ($\sim 35\%$), plagioclasa (20%) y en menor proporción clorita, circón, calcita, granate, minerales opacos ($\sim 5\%$). Se caracteriza por la presencia de porfiroclastos de plagioclasa y granate (≤ 3 mm) en una matriz fina y orientada constituida por bandas ricas en biotita y otras ricas en cuarzo y plagioclasa (Figura 2d). La biotita (≤ 2 mm) es subhedra, se encuentra plegada y en ocasiones presenta evidencias de deformación frágil (desarrollo de kink-bands). La plagioclasa aparece como porfiroclastos redondeados o como pequeños cristales en la matriz (≤ 1 mm). El granate es anhedral y también se encuentra como porfiroclastos subsféricos (≤ 1 mm). Se observa una "corona" de biotita y muscovita subhedra en la parte externa del granate. El cuarzo se dispone en bandas alargadas en la dirección de la foliación de la roca, constituidas a su vez internamente por pequeños granos de cuarzo de bordes sinuosos, a veces difusos y de extinción ondulante (≤ 1 mm). Presenta extinción en parches, desarrollo de bandas de deformación e incipiente generación de subgranos.

Muestra CAN 30 "Migmatita protomilonitizada"

Coordenadas de la muestra:

Latitud: 31°22'2.02"S - Longitud: 64°21'27.22"O

Es una roca foliada de textura granolepidoblástica (Figura 2e) con porfiroclastos de que definen una distribución bimodal en el tamaño de grano. En general la roca es de grano grueso (~ 4 mm) aunque los tamaños menores llegan a ~ 25 μ m. Está compuesta por cuarzo (20%), granate (20%), cordierita (15%), feldespato potásico (15%), biotita (10%), plagioclasa (10%), sillimanita (5%) y sericita, circón, calcita, clorita, apatita, caolinita, pinita (alteración de la cordierita que puede estar constituida por sericita, cloritas y óxidos de hierro), minerales opacos y óxidos ($\sim 5\%$). Se observan porfiroclastos de cordierita, granate, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. El granate es subhedra, en general está redondeado y presenta inclusiones

de biotita, cuarzo y sillimanita (≤ 6 mm). La cordierita es subhedra a anhedral (≤ 4 mm) y está parcialmente pinitizada. La plagioclasa (≤ 3 mm) es subhedra a anhedral y se encuentra escasamente sericitizada y descompuesta a calcita. La formación de mirmequitas es frecuente. El feldespato potásico (≤ 6 mm) es anhedral, peritítico y se altera parcialmente a caolinita. La biotita es subhedra a anhedral (≤ 2 mm) y está parcialmente cloritizada. La sillimanita (prismática), biotita y algunos cristales de cuarzo y feldespato potásico se encuentran agrupados en bandas alargadas en el sentido de la foliación de la roca. Tanto la sillimanita como la biotita evidencian comportamiento frágil (desarrollo de kink-bands). El cuarzo (≤ 3 mm) es anhedral y se vuelve euhedral en sectores recrystalizados. Presenta abundantes inclusiones fluidas y se dispone en cristales alargados con extinción ondulante y en bloque, desarrollo de bandas de deformación y formación de subgranos (escasa). Presencia de mirmequitas.

Muestra CAN 34 "Migmatita heterogénea"

Coordenadas de la muestra:

Latitud: 31°21'10.10"S - Longitud: 64°20'58.00"O

Es una roca composicionalmente similar a la muestra CAN 30, se diferencia por tener una granulometría mayor y uniforme, no presentar deformación por cizalla y menor grado de alteración (Figura 2f). Es una roca poco foliada, de textura esencialmente granoblástica y con desarrollo de bandas claras y oscura alternadas, las bandas claras corresponde a un leucosoma granítico (Kfs, Pl, Qtz, Grt) y la parte mas oscura a un mesosoma (Bt, Crd, Grt, Sil, Pl, Qtz, Kfs). Ambos sectores poseen una distribución unimodal en el tamaño de grano (4 mm - 10 mm). Las zonas donde se concentra la biotita y la sillimanita poseen menor tamaño y allí se puede encontrar también cuarzo, cordierita, plagioclasa y feldespato potásico. Las microestructuras que se desarrollan en el cuarzo son similares a la muestra CAN 30 pero aquí predomina la extinción ondulante y el desarrollo de mirmequitas es mayor. El cuarzo vermicular que conforma la textura mirmequítica posee ~ 30 μ m de ancho.

Muestra DUM 02 "Anfibolita"

Coordenadas de la muestra:

Latitud: 31°19'2.55"S - Longitud: 64°20'9.54"O

Se trata de una mezcla de triturado pétreo con fragmentos que oscilan entre 0,25 y 0,5 mm (pasante Tamiz N° 35, retenido Tamiz N° 60) y provienen principalmente del triturado de un banco de anfibolita. Constituyen partículas monominerales y agregados polimineralicos definidos genéricamente como anfibolíticos y graníticos (Figura 3a). La muestra está compuesta por hornblenda (40%), agregados anfibolíticos (31%), plagioclasa (15%), cuarzo (4%), agregados graníticos (3%), clinopiroxeno (2%) y clorita, calcita, titanita, serpentina, biotita, epidoto, minerales opacos, óxidos ($\leq 5\%$). El cuarzo presenta extinción ondulante, desarrollo de bandas de deformación y subgranulado escaso (≤ 20 μ m).

Muestra EGO 19 "Gneises biotíticos milonitizados con y sin granate"

Coordenadas de la muestra:

Latitud: 31°16'27.37"S - Longitud: 64°20'0.64"O

Muestra de triturados pétreos de granulometría entre 0,25 a 0,5 mm. Los fragmentos provienen principalmente de la

trituration de gneises biotíticos con y sin granate, ambos con evidencias de deformación dúctil (Figura 3b). Los clastos constituyen partículas monominerales y agregados poliminerálicos definidos genéricamente como gnéisicos. La mineralogía de la muestra se compone de biotita (33%), cuarzo (29%), plagioclasa (6%), muscovita (2%) y clorita, calcita, epidoto, granate, óxidos ($\leq 5\%$), además de los agregados gnéisicos (26%). El cuarzo presenta extinción ondulante, desarrollo de bandas de deformación, formación de subgranos ($\leq 20 \mu\text{m}$) y granos recristalizados.

Muestra ES 02 "Granitoide milonitizado"

Coordenadas de la muestra:

Latitud: $31^{\circ} 5'30.70''\text{S}$ - Longitud: $64^{\circ}19'23.00''\text{O}$

Proviene de un intrusivo ácido con marcada foliación y textura milonítica (Figura 3c). Está compuesta por cuarzo (40-45%), plagioclasa (20-25%), feldespato potásico (15%), biotita (5-10%) y sericita, calcita, epidoto, clorita, muscovita, zircón, minerales opacos, óxidos ($\leq 5 \text{ mm}$). La plagioclasa es subhedra a anhedra ($\leq 3 \text{ mm}$) y se encuentra alterada a sericita, epidoto

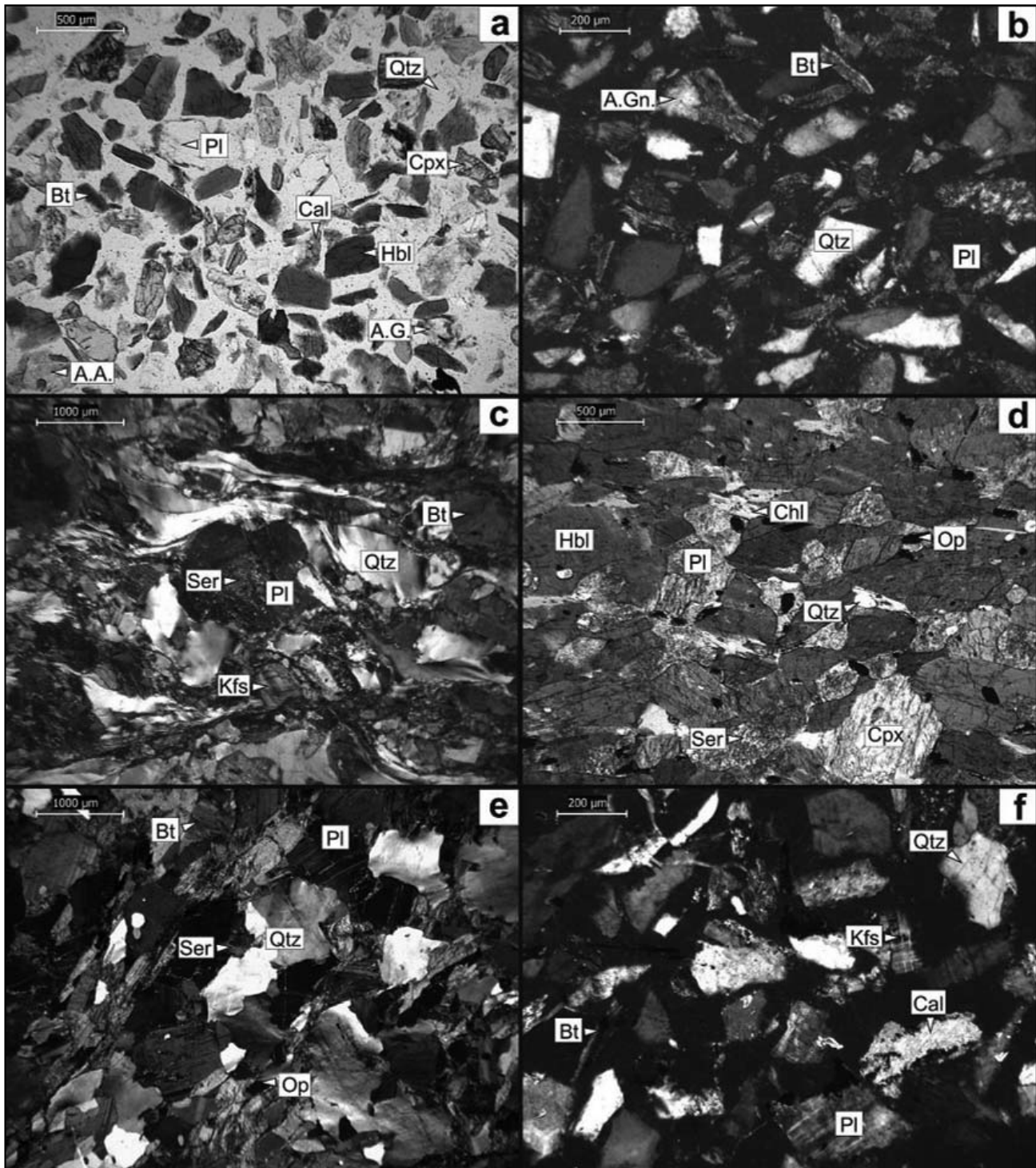


Figura 3. Fotomicrografías (continuación). a) Muestra DUM 02, b) Muestra EGO 19, c) Muestra ES 02, d) Muestra ES 03, e) Muestra ES 04, f) Muestra SBL 3. (Nicoles cruzados, a y d Nicoles paralelos).

y calcita. El feldespato potásico es anhedral (≤ 8 mm), peritítico y se dispone elongado en el sentido de la deformación. Tanto la plagioclasa como el feldespato potásico se presentan como porfiroclastos parcialmente rotados con desarrollo de planos de ruptura y deslizamiento en bloques producto de su comportamiento frágil ante la deformación. En algunos sectores ambos evidencian extinción ondulante y recristalización en la zona de borde de los cristales. El epidoto (≤ 2 mm) aparece reemplazando a la plagioclasa y en microfisuras. La biotita es anhedral (≤ 2 mm), en ocasiones deformada y cloritizada, y se dispone en finas fajas orientadas junto con epidoto y muscovita separando las bandas más ricas en cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico. Los minerales opacos aparecen parcialmente alterados a óxidos férricos. El cuarzo se dispone en cintas alargadas y anastomosadas (~ 4 mm) con fuerte extinción ondulante. Es común el desarrollo de bandas de deformación y subgranos que localmente evolucionan a granos recristalizados (ambos ~ 20 μm).

Muestra ES 03 "Anfibolita"

Coordenadas de la muestra:

Latitud: 31° 5'51.40"S - **Longitud:** 64°19'3.70"O

Corresponde a un cuerpo tabular foliado de 30 a 40 metros de espesor que se intercala con ortogneises. La roca presenta textura nematoblástica (Figura 3d) con una marcada orientación de los anfíboles y está compuesta por hornblenda (60%), plagioclasa (20%), clinopiroxeno (10%) y en menor proporción titanita (5%), epidoto, clorita, cuarzo, calcita, sericita, minerales opacos, óxidos (5%). La hornblenda es euhédrica a subhédrica ($\leq 1,5$ mm), parcialmente cloritizada y en sectores se altera a calcita y epidoto. La plagioclasa presenta bordes rectos debido a que limita con los anfíboles. Presentan intensa alteración a sericita, calcita y epidoto. Los piroxenos son subhedros a anhedral (≤ 1 mm) y por lo general se concentran en zonas o bandas, lo mismo se observa con los minerales opacos ($\leq 0,4$ mm). La titanita por lo general es prismática aunque en ocasiones es anhedral ($\leq 0,3$ mm). El cuarzo es anhedral (≤ 100 μm) con extinción ondulante y aparece rellenando intersticios o en venillas. El espesor de las venillas es ~ 300 μm aunque las hay de ~ 20 μm .

Muestra ES 04 "Ortogneis deformado"

Coordenadas de la muestra:

Latitud: 31° 5'51.40"S - **Longitud:** 64°19'3.70"O

Es una roca de foliación grosera con escasas fajas cataclásticas y presencia de material fundido (pseudotaquilitas) que ocasionalmente cortan la textura granolepidoblástica general (Figura 3e). Está compuesta por cuarzo (35%), plagioclasa (35%), biotita, clorita, minerales opacos ($\sim 25\%$) y en menor proporción epidoto, apatita, circón, sericita ($\sim 5\%$). La plagioclasa es subhedral (≤ 4 mm), presenta maclas polisintéticas deformadas y se encuentra parcialmente alterada a sericita, epidoto y calcita. La biotita es subhedral (≤ 4 mm) y se encuentra parcialmente a totalmente cloritizada. Presenta evidencias de deformación y posee inclusiones que producen halos pleocroicos y minerales opacos asociados (≤ 1 mm). El cuarzo (≤ 2 mm) es anhedral y de contactos intergranulares netos. Generalmente presenta extinción ondulante y es común el desarrollo de lamelas y bandas de deformación. El subgranulado es muy incipiente y se localiza en algunos bordes de granos. Se observa también en la roca el desarrollo de finas fajas cataclásticas asociadas a deformación frágil donde se produce la trituración del cuarzo, principalmente

asociada a contactos entre granos y el desarrollo de pseudotaquilitas de muy poco espesor (ancho máximo 0,5 mm).

Muestra SBL 3 "Mezcla de granitos"

Coordenadas de la muestra:

Latitud: 30°26'11.40"S - **Longitud:** 63°58'24.40"O

Agregado pétreo de 0,25 a 0,5 mm proveniente de la trituración de granitos porfíricos de grano grueso y facies de grano más fino no porfíricas (Figura 3f) del sector sur de la Sierra Norte de Córdoba. Los fragmentos constituyen partículas monominerales debido a que el tamaño de grano de la roca original era mayor que el tamaño del material triturado. La muestra está compuesta por plagioclasa (35%), cuarzo (32%), feldespato potásico (12%), biotita (9%), calcita (7%), muscovita (3%) y óxidos (2%). Se observan algunos agregados de calcita que corresponden a productos de alteración de la roca original y agregados de material loessoide. El cuarzo presenta extinción ondulante aunque predominan los no tensionados.

RESULTADOS DEL ENSAYO SEGÚN IRAM 1674

En la Figura 4 se muestran los valores de expansión a 16 días en el ensayo acelerado de las barras de mortero sumergidas en NaOH a 80°C según lo establecido en la norma IRAM 1674.

Con el objetivo de evaluar la reactividad de las diferentes muestras de probable reacción lenta, se extendieron los ensayos hasta 28 días (Hooton and Rogers 1992; Falcone et al. 2008; IRAM 1674).

Si se considera que se trata de agregados de reacción lenta y se utilizan los límites sugeridos en la bibliografía para evaluar este tipo de agregados, puede observarse que los resultados obtenidos después de 28 días, permiten agrupar los materiales estudiados en 3 zonas: Las muestras DUM 02, AG 05, SLP 1, ES 03 y SBL 3 quedan comprendidas en la primer zona con valores de expansión entre 0 y 0,05 %; las muestras SLP 2, YOC 06, CAN 34, ES 04 y CAN 30 en la segunda zona con valores de expansión entre 0,10 y 0,15 %; y las muestras EGO 19 y ES 02 en la tercer zona con valores de expansión entre 0,20 y 0,25 %.

DISCUSIÓN

Según la norma IRAM 1674 las muestras con valores de expansión menores que 0,10% a 16 días de ensayo deberían clasificarse como inocuas. Siguiendo este criterio, las muestras que quedan comprendidas en la primer y segunda zona deberían calificarse como no reactivas, sin embargo al extender el ensayo a 28 días puede observarse que las muestras de la segunda zona siguen reaccionando sin estabilizarse.

Las muestras de la tercer zona muestran porcentajes de expansión a 16 días entre 0,10 y 0,20%. En este rango las rocas podrían comportarse de forma inocua o potencialmente reactivas. La norma IRAM 1674 sugiere para este tipo de comportamiento extender los ensayos a 28 días. Transcurrido dicho período las muestras superan el 0,20% calificándolas como potencialmente reactivas.

Otra posibilidad es considerar el límite especificado por el Proyecto CIRSOC 201 (2005) el cual establece que agregados cuya expansión sea igual o mayor que 0,10% a 16 días deben ser considerados potencialmente reactivos o bien ampliar los estudios utilizando la norma IRAM 1700 considerada definitiva.

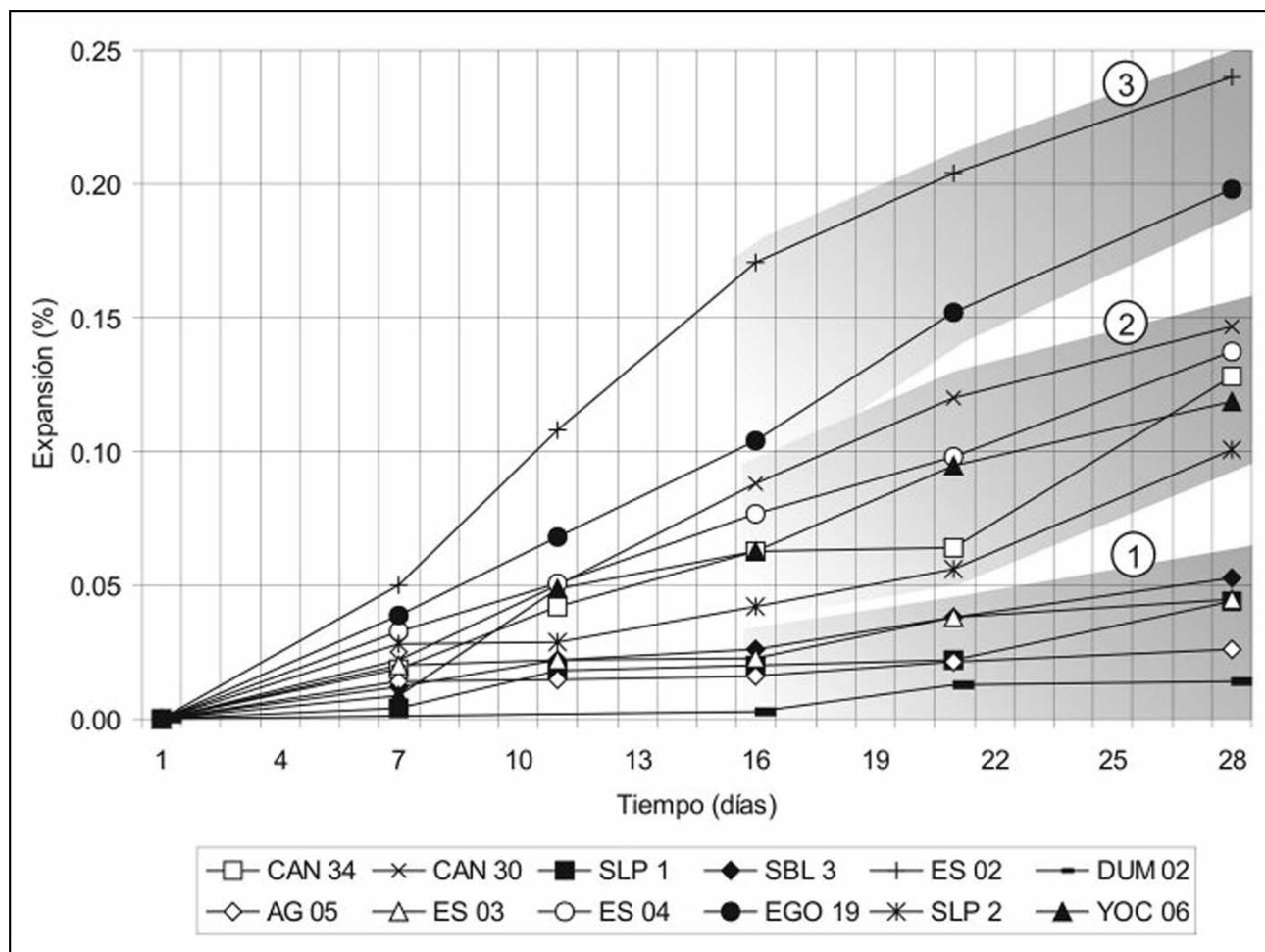


Figura 4. Curvas de expansión según el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674). Se definen tres zonas. Una de baja expansión (1), otra de expansión intermedia (2) y una tercera zona de alta expansión (3).

La utilización del ensayo acelerado de la barra de mortero como método para predecir la potencial reactividad de agregados de reacción lenta muchas veces evidencia comportamientos diferentes de los que realmente se producen en obra. Esto, llevó a algunos investigadores a proponer modificaciones al ensayo acelerado como extender el límite de 16 días a 54 días (Wigum and French 1996). En esta línea Falcone et al. (2008) estudiaron el comportamiento de rocas graníticas de reacción lenta de nuestro país y propusieron disminuir el límite de 0,10% a 0,07% o 0,08%, o bien prolongar el ensayo según norma IRAM 1674 hasta los 28 días a fin de poder identificar algunos agregados reacción lenta/tardía.

Si bien la norma IRAM 1700 (método del prisma de hormigón) sigue siendo un método efectivo a la hora de caracterizar los agregados de reacción lenta (Batic et al. 2008b, Falcone et al. 2008), exige de tiempos de ensayo más prolongados (un año) en la obtención de los resultados.

Tanto las experiencias de los países nórdicos (y otros países de Europa) así como las experiencias nacionales coinciden en la misma línea de acción. Utilizar métodos que den resultados en tiempos reducidos asegurando que realmente muestren el comportamiento de los agregados en obra. En este sentido, extender el período de ensayo mejora en gran medida la evaluación de los materiales de reacción lenta ya que aquellos que

antes se calificaban como no reactivos pero que evidenciaban reacción en obra, ahora sí son detectados, y está dentro de los tiempos esperados.

Sin embargo todavía falta realizar más estudios para poder establecer un límite que evidencie el comportamiento real de los diferentes tipos de agregados en obra.

El análisis de los datos que se muestran en la Tabla 1 permite observar que el comportamiento reactivo de las rocas afectadas por fajas de deformación o que en general han sufrido procesos de tensión, depende de la confluencia de varios factores (siempre que haya disponibilidad de humedad y álcalis para producir la RAS) que de aparecer en forma esporádica producirán efectos menos nocivos.

Cuanto mayor sea el contenido de cuarzo de la roca, más disponibilidad de sílice habrá para combinarse con los hidroxilos de la solución de poro del hormigón y a mayor densidad de microestructuras asociadas con el cuarzo tensionado y deformado, mayores serán los sitios inestables susceptibles de ser atacados (Wigum 1995b).

Por otro lado, la presencia de estructuras de orientación mineral como la foliación de las rocas, generan planos por donde los fluidos pueden ingresar más fácilmente (Kerrick and Hooton 1992).

Tabla 1. Comparación de las diferentes muestras en relación al contenido de cuarzo en la roca, tamaño de grano, características microestructurales del cuarzo, grado de foliación, grado y tipo de alteración, y zona a la que pertenecen en el diagrama de expansión vs. tiempo (Figura 4).

Muestra	% de cuarzo	Tamaño de grano	Microestructuras asociadas al cuarzo	Foliación de la roca	Alteración	Reactividad (zonas)
DUM 02	4%	Granos: ¿?*. Subgranos: $\leq 20\mu\text{m}$.	Extinción ondulante, bandas de deformación (abundancia media), subgranulado (escaso).	Media	Débil a media - Plagioclasa (sericita)	1
AG 05	No se observa	-	-	Sin foliación	Fuerte - Serpentinización y oxidación de minerales opacos.	1
ES 03	~ 2%	Granos: $\leq 100\mu\text{m}$. Venillas: de 20 a 300 μm de ancho.	Extinción ondulante (abundante).	Fuerte	Media a Fuerte - Hornblenda (clorita, calcita, epidoto), plagioclasa (sericita, calcita, epidoto).	1
SLP 1	~ 5%	Granos: $\leq 2\text{mm}$.	Extinción ondulante (abundante), bandas de deformación (escasas), subgranulado (muy escaso).	Débil	Fuerte - Plagioclasa (sericita, epidoto, calcita).	1
SBL 3	32%	Granos: ¿?*	Extinción ondulante (escasa).	Sin foliación	Débil - Plagioclasa (sericita, calcita).	1
SLP 2	50%	Granos: variable ($\leq 8\text{mm}$), prevalecen los ~ 1mm. .	Extinción ondulante, en bloques o en bandas (escasa)	Fuerte	Débil - Plagioclasa (sericita), biotita (clorita).	2
YOC 06	40%	Granos: $\leq 1\text{mm}$.	Extinción ondulante en parches y bandas de deformación (abundante), subgranulado (escaso).	Fuerte	Débil - (alteración del granate principalmente a muscovita).	2
CAN 34	20%	Granos: 4-10 mm. Vermes en mirmequitas: ~ 30 μm .	Extinción ondulante (abundancia media), mirmequitas (abundante).	Débil	Débil - Plagioclasa (sericita), cordierita (pinita).	2
ES 04	35%	Granos: $\leq 2\text{mm}$. Agregados relícticos: $\leq 20\mu\text{m}$. Subgranos: $\leq 50\mu\text{m}$.	Extinción ondulante, lamelas y bandas de deformación (abundante), subgranulado (escaso). Presencia de finas fajas cataclásticas ($\leq 5\text{mm}$ de ancho) con agregados relícticos y material vítreo.	Media a débil	Débil - Plagioclasa (sericita, calcita, epidoto), biotita (clorita).	2
CAN 30	20%	Granos: $\leq 3\text{mm}$.	Extinción ondulante en parches y bandas de deformación (abundante), subgranulado (escaso). Abundantes inclusiones fluidas. Mirmequitas (escasas).	Media	Media - Plagioclasa (sericita, calcita), cordierita (pinita), feldespato potásico (caolinita), biotita (clorita).	2
EGO 19	29%	Granos: ¿?*. Subgranos: $\leq 20\mu\text{m}$.	Extinción ondulante, bandas de deformación (abundante), subgranulado (abundancia media) y recristalización de granos (abundancia media).	Fuerte	Débil a media - Plagioclasa (sericita, epidoto, calcita), biotita (clorita).	3
ES 02	40-45%	Cintas de cuarzo: ~ 4mm. Granos y subgranos: ~ 20 μm .	Extinción ondulante, bandas de deformación y subgranulado (abundante), recristalización de granos (escasa).	Fuerte	Media a débil - Plagioclasa (sericita, epidoto, calcita), biotita (clorita), minerales opacos (óxidos).	3

* No se informa tamaño de grano debido a que la mayoría son agregados monominerales producto de la trituración.

Otro factor de importancia es el tamaño de grano de la roca. *Wigum et al. (2006)* analizan los antecedentes sobre el tema haciendo referencia a la diversidad de opiniones al respecto. Estudios previos (*Bonalumi et al. 2009*) muestran para rocas de Córdoba afectadas por fajas de deformación que el tamaño de grano o subgrano que es más perjudicial es el que posee algunas decenas de micras. *Wigum (1995)* menciona que en realidad lo que más influye en la reacción es el área total de borde de grano disponible (m^2/cm^3), más que el tamaño de grano, ya que la primera abarca bordes de grano y subgranos mientras que la última solamente a los bordes de grano.

Además se ha tenido presente que la alteración de las rocas también es un factor a tener en cuenta en el estudio de la estabilidad del volumen del hormigón ya que algunos minerales como la serpentina, ceolitas y algunas arcillas pueden variar su volumen en presencia de agua (*Poklepovic et al. 2008*) dando valores de expansión elevados pero por causas diferentes a las de la RAS.

CONCLUSIONES

Los estudios realizados muestran que el ensayo acelerado de la barra de mortero (*IRAM 1674*) además de ser un método idóneo para detectar agregados de reacción rápida, también es efectivo para detectar agregados de reacción lenta si se toman algunas precauciones como extender el ensayo a 28 días o reducir el límite de la expansión a 0,07% a 16 días.

La reactividad de los agregados de reacción lenta está vinculada con la generación de discontinuidades en la estructura cristalina del cuarzo producto de los procesos de deformación que afectan la roca. La presencia de extinción ondulante o en bloque, lamelas y bandas de deformación y el subgranulado del cuarzo, son características microestructurales que generan sitios

de alta inestabilidad y es donde comenzará la disolución del mineral silíceo inestable bajo condiciones de elevada alcalinidad.

Las texturas mirmequíticas pueden generarse por desestabilización del feldespato potásico bajo procesos de deformación. El cuarzo vermicular que se genera también constituye sitios potenciales de ser atacados por los hidroxilos de la solución de poro del hormigón.

Los procesos de deformación y en especial los asociados a fajas de deformación dúctil, aumentan la potencialidad reactiva de las rocas que contienen cuarzo en su composición. Si estas rocas van a ser utilizadas como agregados para hormigón que estarán sometidas a humedad elevada, se recomienda utilizar medidas que prevengan la RAS como el uso de adiciones puzolánicas, otra posibilidad puede ser diluir el agregado proveniente de estos sectores con otros materiales inocuos. En cualquiera de los casos se recomienda el estudio previo de los agregados mediante ensayos petrográficos y ensayos de laboratorio que evalúen su reactividad.

Como regla general se puede inferir que cuanto mayor sea el contenido de cuarzo de la roca, más marcada sea su foliación, mayor sea la cantidad de microestructuras asociadas a tensión presentes en el cuarzo y más cercano sea el tamaño de grano a algunas decenas de micras, más reactivo será el agregado.

Tomando como referencia el criterio del Proyecto *CIRSOC 201 (2005)* se puede decir que de los 12 tipos litológicos analizados, provenientes del sector oriental las sierras de Córdoba, solo 2 resultan potencialmente reactivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dpto. de Geología de la UNS, al LEMIT de La Plata, a la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la U.N.C, a la CIC (Prov. de Bs. As.) y al CONICET por el apoyo brindado.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BALDO, E.G., CASQUET, C. Y C. GALINDO, 1996
El metamorfismo de la Sierra Chica de Córdoba (Sierras Pampeanas). Argentina.
Geogaceta 19: 51-54.
- BATIC, O.R. Y J. SOTA, 2001
Reacciones Deletéreas Internas.
En: E.F. Irassar (Ed.) Durabilidad del Hormigón Estructural, Seminario de Durabilidad del Hormigón Estructural - XIV Reunión Técnica AATH, Capítulo 4: 157-216, Buenos Aires.
- BATIC, O.R., SOTA, J.D. Y D.D. FALCONE, 2008a
Caracterización de los agregados de nuestro país frente a la RAS.
1º Cong. Argentino de Áridos. Memorias. I: 419-426, Mar del Plata.
- BATIC, O.R., SOTA, J.D. Y D.D. FALCONE, 2008b
Evaluación de agregados graníticos de la provincia de Buenos Aires frente a la RAS.
1º Cong. Arg. de Áridos. I: 427-435, Mar del Plata.
- BONALUMI, A.A., SFRAGULLA, J.A., CABRERA, J.I. Y N.M. BRIOLINI, 2008
Los áridos de trituración en Córdoba: un panorama actualizado.
1º Cong. Arg. de Áridos. I: 19-23, Mar del P.
- BONALUMI, A., SFRAGULLA, J., LOCATI, F. Y D. CAMPOS, 2009
Defectos petrogenéticos de las rocas metamórficas de Córdoba utilizadas en la construcción.
Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente 23: 17-26.
- BROEKMANS, M.A.T.M., 2002
The alkali-silica reaction: mineralogical and geochemical aspects of some Dutch concretes and Norwegian mylonites.
PhD Thesis, Utrecht University, 144 pp.

- CAMPOS, D. G., 2005
Estudio potencial de la reacción álcali-agregado con agregados de la provincia de Córdoba (Cantera 1).
Trab. Final (inédito). Esc. de Ing. Civil, FCEFYN, UNC.
- FALCONE, D.D., SOTA, J.D. Y O.R. BATIC, 2008
Discusión sobre métodos para evaluar agregados potencialmente reactivos.
III Cong. Int. AATH-17ª Reunión Técnica, 329-336, Cba.
- HOOTON, R. D. AND C. A. ROGERS, 1992
Development of the NBRI rapid mortar bar test leading to its use in North America.
9th ICAAR, Volume 1: 461-467, London.
- IRAM 1674, 1997
Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial.
Método acelerado de la barra de mortero, 14 pp.
- IRAM 1700, 1997
Agregados.
Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado, 16 pp.
- JENSEN, V., 1993
Alkali aggregate reaction in southern Norway.
PhD Thesis, University of Trondheim, 262 pp.
- KERRICK, D.M. AND R.D. HOOTON, 1992
ASR of concrete aggregate quarried from a fault zone: results and petrographic interpretation of accelerated mortar bar test.
CCR 22: 949-960.
- KRETZ, R., 1983
Symbols for rock-forming minerals.
American Mineralogist 68: 277-279.
- LOCATI, F., 2006
Estudio de la potencialidad de la reacción álcali-agregado usando agregados de la provincia de Córdoba, un enfoque petrológico.
Trabajo Final (inédito). Escuela de Geología, FCEFYN, UNC.
- LOCATI, F., MARFIL, S., BALDO, E. Y O. BATIC, 2008
Comportamiento de rocas metamórficas con venas de pseudotaquilitas de las Sierras Chicas de Córdoba, frente a la reacción álcali-sílice.
III Congreso Internacional de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón - 17ª Reunión Técnica. Memorias, 257-264, Córdoba.
- MARFIL, S.A. AND P.J. MAIZA, 2001
Deteriorated pavements due to the alkali-silica reaction. A petrographic study of three cases in Argentina.
Cement and Concrete Research. 31: 1017-1021.
- MARTINO, R.D., 2003
Las fajas de deformación dúctil de las Sierras Pampeanas de Córdoba: Una reseña general.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 58 (4): 549-571.
- POKLEPOVIC, M. F., SILVA, R. Y E. QUINTANA, 2008
La petrografía en la evaluación físico-mecánica de los agregados: determinación de ensayos rutinarios para monitorear la calidad.
1º Cong. Argentino de Áridos. Memorias. I: 465-474, Mar del Plata.
- PONCE, J.M. AND O.R. BATIC, 2006
Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate.
Cement and Concrete Research 36: 1148-1156.
- PROYECTO CIRSOC 201 (PROYECTO EN TRÁMITE DE APROBACIÓN), 2005
Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.
Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC) del Sistema INTI, <http://www.inti.gov.ar/cirsoc/>
- RAPELA, C.W., PANKHURST, R.J., CASQUET, C., BALDO, E., SAAVEDRA, J., GALINDO, C. AND C.M. FANNING, 1998
The Pampean Orogeny of the southern proto-Andes: Cambrian continental collision in the Sierras de Córdoba.
In: R.J. Pankhurst, C.W. Rapela (Eds.) The Proto-Andean Margin of Gondwana, Geol. Soc. London Spec. Publ. 142: 181-217.

- SWAMY, R.N. (ED.), 1992
The Alkali-Silica Reaction in Concrete, Blackie, Glasgow and London, and Van Nostrand-Reinhold,
336 pp. New York.
- WIGUM, B.J., 1995a
Alkali-aggregate reactions in concrete: properties, classification and testing of Norwegian cataclastic rocks.
Doctor Ingeniør thesis, University of Trondheim, 227 pp.
- WIGUM, B.J., 1995b
Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks and their use for predicting
alkali-reactivity in concrete.
Engineering Geology 40: 195-214.
- WIGUM, B.J. AND W.J. FRENCH, 1996.
Sequential examination of slowly expanding alkali-reactive aggregates in accelerated mortar bar testing.
Mag. Concr. Res. 48 (177): 281-292.
- WIGUM, B.J., PEDERSEN, L.T., GRELK, B. AND J. LINDGÅRD, 2006.
State-of-the art report: Key parameters influencing the alkali aggregate reaction.
SINTEF, SBF52 Å06018, 131 pp.



Recuperación de canteras en la región centro este de la provincia de Entre Ríos

Muñoz, Luis ¹ ✉ - Treppo, Oscar ¹ - Calvo, Carlos ¹

Recibido: 16 de Setiembre de 2009 • Aceptado: 20 de Abril de 2010

Resumen

Se presenta una reseña de los trabajos realizados en el marco de un proyecto de investigación y desarrollo que tiene como finalidad establecer metodologías y procedimientos para el reacondicionamiento de excavaciones en explotaciones del pasado, como así también adecuar planes de explotación y reacondicionamiento en las actuales y futuras.

Se identificaron tres áreas de características tales que demandan soluciones diferentes para el acondicionamiento final y/o uso poscierre. Sobresalen tres tipos: Reacondicionamiento o restauración, cría de peces y reserva de fauna y flora.

Los ensayos efectuados en aguas de canteras con presencia de peces permiten avalar la aptitud de otras canteras ensayadas.

Palabras clave: *Explotación de canteras, reacondicionamiento, canto rodado, suelo calcáreo, medio ambiente.*

Résumé

On présente une notice des travaux réalisés dans le cadre d'un projet de recherche et développement qui a pour but établir des méthodologies et des 1procédés pour le reconditionnement d'excavations dans des exploitation et reconditionnement en actuelles et futures.

On a identifié trois aires de caractéristiques telles qui demandent différentes solutions pour le reconditionnement final et/ou j'use poscierre. Trois types ressortent: reconditionnement ou une restauratrion, e 'levage de poissons de poissons et reserve de faune et de flore.

Les essais effectués dans des eaux de carriers avec présense de poissons permettent d'avalier l'aptitude d'autres carrères essayées.

Des mots clefs: *Exploitation de carriers, reconditionnement, un chant roulé, soil calcaire, environnement.*

INTRODUCCIÓN

El trabajo consistió en la primera etapa del relevamiento de la información de campo y satelital que posibilite la evaluación y el desarrollo de metodologías y procedimientos de restauración, recuperación y / o reutilización de predios utilizados para la explotación de canteras de canto rodado y suelo calcáreo en la región centro este de la provincia de Entre Ríos.

Las diferentes características fisiográficas y ambientales de la zona involucrada requieren la realización de relevamientos detallados de cada caso, es decir de los yacimientos

¹ Universidad Tecnológica Nacional- Facultad Regional Concepción del Uruguay-Depto. Ing. Civil.

✉ E-mail: mniozl@frcu.utn.edu.ar

y canteras explotados en el pasado. El mismo incluye la tipificación del ecosistema correspondiente ya que la secuencia de trabajos a implementar deberá estar en relación a los procedimientos que se estandaricen para cada grupo de casos según la caracterización en la que resulten incluidos.

El reacondicionamiento o restauración parcial implica la recuperación de gran parte del valor económico-productivo, por lo que se realizará un agrupamiento de soluciones posibles para casos comparables.

Técnicamente, la recuperación de los predios conlleva la necesidad de efectuar correcciones topográficas llevando el terreno a una restitución del relieve lo más cercana a la original, o hacia condiciones que permitan mantener un drenaje adecuado del sitio, como así también la devolución o restauración del manto orgánico, a fin de restituir sus condiciones ambientales y su aptitud agropecuaria.

Los reconocimientos han permitido verificar la presencia de materiales acumulados en el pasado en los alrededores de las canteras, pertenecientes a material de destape, es decir horizontes o espesores de material ubicados por encima del nivel explotable que fue necesario retirar para extraer el de valor constructivo. Estos materiales están en casos mezclados con el horizonte orgánico en mayor o menor proporción.

Paralelamente los relevamientos permitieron dimensionar la reactivación producida en la región en las explotaciones de canteras, principalmente con motivo de la construcción de la autovía de la ruta 14, así como de las reservas existentes

Dichos relevamientos incluyeron una caracterización que incluyó ubicación, geología geomorfología, tipo de material, reservas estimadas, aguas, flora, fauna, cotas máxima y mínima (dirección de posibles drenajes), estado de accesos, superficie y propuestas de reacondicionamiento o destinos postcierre posibles de los predios. En la tabla 1 se puede visualizar un resumen de los parámetros más significativos.

TABLA 1.

Cantera N°	Coordenadas	Superficie	Tipo de material	Presencia de agua	Reacondicionamiento o destino
1	Lat 31°55'25.3"S Lon 58°12'39.4"O	2.5km ² Afectados saltuariamente	Canto rodado	No. Suelo permeable.	Recomposición morfológica o nivelación. (RN)
2	31°59'42,2" S 58°11'19,7" O	sin datos	Canto rodado	No permanente. Solo lluvias recientes	RN
3	32°09'14,3" S 58°12'38,0 O	20haa	Canto rodado	No se observa	RN
4	32°09'33,0" S 58°15'34,4" O	8ha	Arena limosa.	No se observa	RN
5	32°11'28,9" S 58°14'14,3" O	5ha	Arena y arena limosa	No se observa	RN
6	32°11'05,7" S 58°10'47,3" O	0,5ha	Canto rodado	No se observa	RN
7	32°10'05,7" S 58°10'47,3" O	5ha	Canto rodado	Permanente en viejas extracciones	RN
8	32°10'35,7" S 58°11'02,7" O	6ha	Canto rodado	Permanente. Pequeñas lagunas	RN
9	32°11'47,6" S 58°10'40,3" O	11ha	Canto rodado	Si, permanente	RN
10	32°12'50" S 56°10'11" O	3,8ha	Canto rodado	Sí, permanente	RN
11	32°18'14" S 58°08'42,7" O	1,7ha	Suelo Calcáreo	Si, permanente	RN
12	32°12'03" S 58°10'43,3" O	2,2ha	Canto rodado	Si, permanente	RN. Urbanización cercana

13A	32°12'0,3" S 58°10'15,2" O	3ha	Canto rodado	No se observa	RN
13B	32°12'15,4"S 59°10'13,7"O	1,5ha	Canto rodado	Permanente, Lagunas	RN
13C	Contigua a 13B	Sin datos	Suelo calcáreo		No definido
14A	32°27'35"S 58°14'33"O	3ha	Suelo Calcáreo	No se observa	RN. Parquización
14B	32°27'42"S 58°14'37"O	1,2ha	Canto rodado. Ripio	Sí, permanente	RN-Coordinar con
14C	32°27'32,9"S 58°14'47,5"O	Sin datos	Suelo Calcáreo	No se observa	No definido
15	32°29'55"S 58°15'58"O	8,5ha	Suelo Calcáreo	Sí, permanente	RN
16	32°29'42"S 58°15'43"O	1ha	Suelo Calcáreo	Si-Zona inundable	RN-Posibilidad de
17	32°30'18"S 58°16'44"O	5ha	Suelo Calcáreo	Si. 1000m ²	RN. Desagüe hacia sumidero profundo
18	32°29'56"S 58°16'30"O	2,5ha	Suelo Calcáreo	Sí. 50% de sup.	RN. Drenaje al E hacia cañada colectora
19	32°29'27"S 58°16'40"O	2 ha	Suelo Calcáreo	Sí. Toda el área excavada	RN y relleno con material de excavaciones de zona urbana
20A	32°30'43"S 58°18'20"O	1,6 ha	Suelo Calcáreo	Si,	RN Drenaje hacia el este
20B	32°30'38"S 58°18'20"O	0,6 ha	Suelo Calcáreo	Si, Permanente	RN Drenaje hacia el este
20C	32°30'40"S 58°18'03"O	1,5 ha	Suelo Calcáreo	Si, Permanente	RN Drenaje hacia el este
20D	32°30'42"S 58°18'01"O	Sin datos	Suelo Calcáreo	Si	RN Drenaje hacia el este
21	32°27'14"S 58°16'02"O	1 ha	Suelo Calcáreo	Inundada hasta sequía del año 2008	Difícil drenaje. relleno Parquización.
22	32°27'17"S 58°15'11"O	0,5 ha	Suelo Calcáreo	Sí. (500m ²)	RN. Drenaje hacia A° El Curro
23	32°24'57"S 54°14'48"O	26ha. 13 ha excavadas	Canto rodado y Suelo Calcáreo	Sí. 25% de excavaciones.	RN excavaciones secas. Drenaje al A°. Cría de peces.



Figura 1. Ubicación del área de estudio

Alternativas de Recuperación

Canteras tipo para restauración y nivelación con drenaje

Cantera Zona Liebig (Dto. Colón)

SECUENCIA ESQUEMÁTICA DE ACONDICIONAMIENTO

Los esquemas de la secuencia deben programarse al iniciar la explotación o al reactivar una cantera.

En los esquemas de la figura 4 pueden visualizarse los pasos a seguir para el caso de la planificación de una explotación partiendo de un área no intervenida con fines extractivos. Por lo tanto es la situación ideal en la que se pueden cumplir todos los pasos propuestos.

En el caso de reactivaciones el esquema se cumple desde el segundo paso (con uno de los frentes o con los que se reactiven).

En los casos en que el material se encuentra depositado desordenadamente y en general mezclado el suelo orgánico con el de destape subyacente, la calidad edafológica de la superficie final de suelo resultante, será menor. La secuencia se cumple desde el esquema correspondiente al tendido de taludes y relleno para la parte antigua. Esta secuencia también será válida para las eventuales restauraciones de las canteras abandonadas. También en estos casos el material correspondiente al suelo orgánico y de destape aparece mezclado

Según las características topográficas en la que se emplea la explotación debe adecuarse el drenaje final de la excavación, tanto del piso en general como del de evacuación localizada hacia cotas menores.



Figura 2. Explotación antigua



Figura 3. Explotación Actual. Cantera al NE de Concepción del Uruguay

Existen casos en que las explotaciones avanzan por debajo del nivel freático mediante bombeo. En estos casos, generalmente el relleno de restauración con el tendido de taludes y restitución de destape más el suelo orgánico permite situar el nuevo nivel superficial por encima del mismo.

CLASIFICACIÓN DE CANTERAS

De acuerdo a lo desarrollado se clasificaron las canteras de la siguiente manera:

Canteras tipo para desarrollo e incentivación de fauna (incluida ictiofauna) y flora a fin de constituir las en reservas.
Ejemplo: canteras de la zona de Campichuelo.

Las características de las mismas corresponden a áreas con el nivel freático alto que determina excavaciones inundadas y rápido desarrollo de vegetación acuática y terrestre, arbórea y arbustiva, región poco poblada, gran densidad de excavaciones, sin posibilidad de restauración, rodeadas de áreas totalmente deforestadas con fines agropecuarios, con la consecuente expulsión de la fauna.

Cantera tipo para cría de peces. Ejemplo: al sur de C. del Uruguay

Con la finalidad de verificar la posibilidad de destinar las excavaciones donde el drenaje no resultara factible por razones topográficas o de profundidad del nivel freático, se realizaron

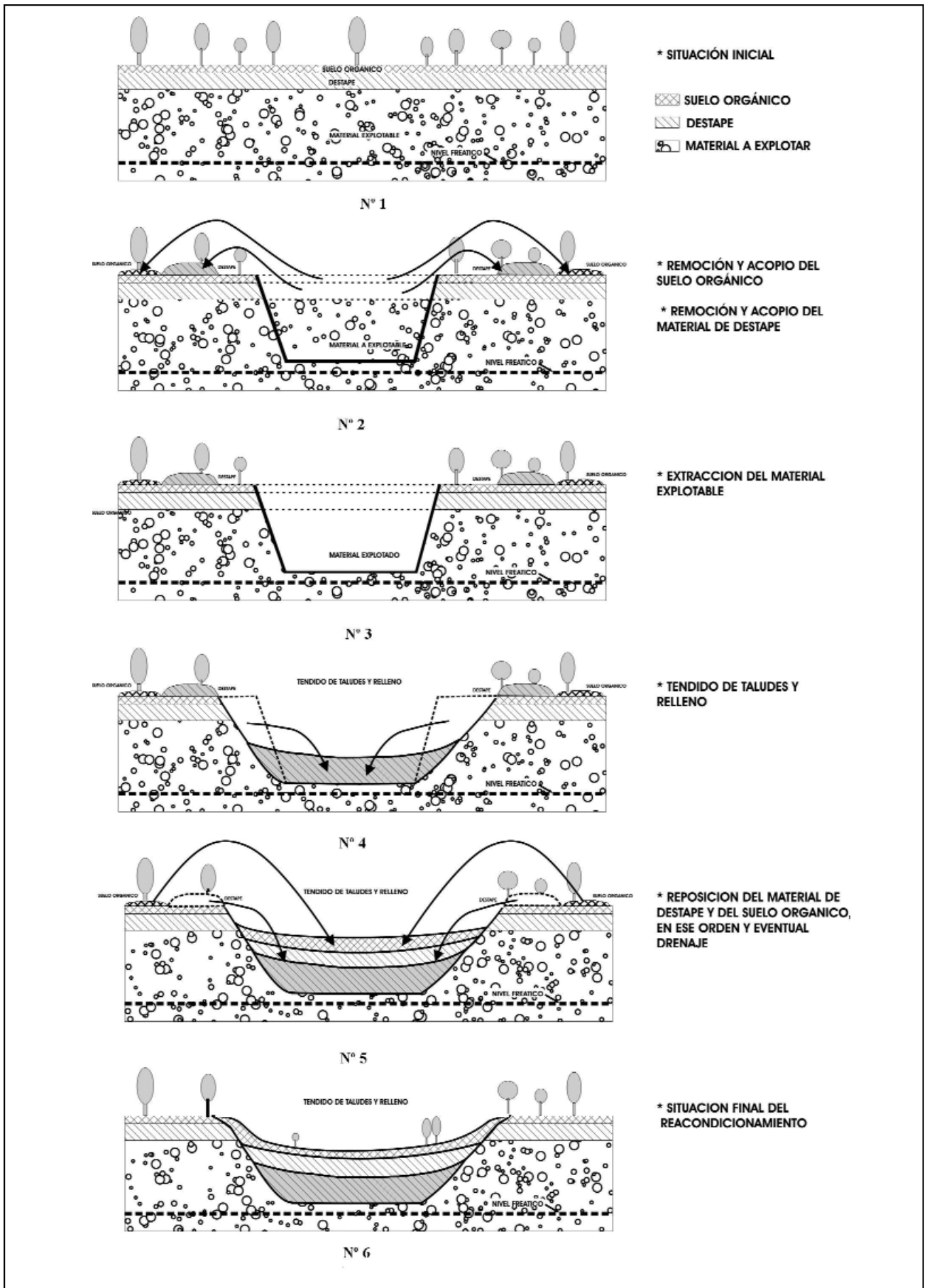


Figura 4.

ensayos de calidad de agua y de temperatura. Las temperaturas mínimas de invierno resultaron de 13 a 15 ° mientras que las máximas de verano oscilaron entre 24 °C y 28 °C.

En la tabla 2 se muestran los ensayos de calidad de agua de las canteras consideradas como representativas de las que tienen posibilidades de profundizar estudios con la finalidad de destinarlas a cría de peces.

Es de destacar que en la laguna de la cantera Blanc, se observó y fotografió una tararira (*hoplies malabaricus*), de buen tamaño (unos 50 cm), que no fue introducida por el operador actual, lo que permite deducir que hay peces que la habitan desde hace cierto tiempo, en las condiciones de calidad y temperatura verificadas y que se muestran en la tabla 2. En el momento

de la observación la temperatura del agua era de 21 grados. Por este motivo y referencias de vecinos de otras canteras sobre la presencia de peces, se deduce que en general los valores registrados avalan un destino poscierre de este tipo para algunos casos.

Canteras tipo para Urbanización

Ejemplo: Cantera de broza (tosca) zona suburbana, oeste de Concepción del Uruguay

Las principales características que reúne este tipo, son la proximidad o pertenencia a zona urbana, condiciones topográficas y geotécnicas adecuadas y cumplir con las condiciones ambientales requeridas para este tipo de emprendimiento.



Figura 5.



Figura 6.

Tabla 2.

Cantera/parámetros	Oxígeno disuelto	PH	Turbidez	Dureza	Alcalinidad	Nitritos	Nitratos	Ubicación
Puente Hierro	6,12	7,1	39,8	100	110	0,1	6	32°30'38" S 58°16'07" O
Puente Taborda	12,53	7,6	11	80	90	<0,01	<1	32°30'38" S 58°18'10" O
Campichuelo A	13,40	7,5	21	58	74	<0,01	<1	32°41'35" S 58°11'29" O
Campichuelo B	10,43	7,6	40	62	137	<0,01	<1	32°41'35" S 58°11'27" O
Cantera Vudú	10,04	7,0	16	20	22	<0,01	<1	32°38'02" S 58°12'36" O
Cantera Itá-I-Corá	11,4	7,9	5,4	64	185	<0,01	<1	32°10'47" S 58°10'55" O
Cantera Blanc	10,42	8,1	5,5	80	120	<0,01	<1	32°24'25" S 58°13'48" O
Cantera Talita	10,81	8	3,2	200	130	<0,01	<1	32°30'46" S 58°16'38" O



Figura 7.

El acondicionamiento de estas áreas con dicho destino es incentivado por el valor agregado a los terrenos recuperados.

Canteras tipo para Parquización

Ejemplo: Cantera de canto rodado zona suburbana, noreste de Concepción del Uruguay

Este grupo corresponde a áreas de explotaciones que han quedado en la periferia o incluidas dentro de la zona urbanizada con el paso del tiempo, en ubicaciones tales que hacen adecuado un espacio verde o parque. Además de la ubicación, deben cumplir con el requisito de no ser excavaciones muy profundas, de modo de lograr pendientes aceptables tanto en sectores inundados como sin presencia de agua.



Figura 8.

Canteras tipo para explotación y planificación de uso poscierre

Ejemplo: Cantera de canto rodado La Chola II, Mabragaña Dpto Colón

En este caso la reactivación de una cantera o la apertura de una nueva ofrece la posibilidad de planificar la explotación y la restauración o el destino final con anticipación y con la disponibilidad de maquinaria que implica la actividad en ejecución. En este grupo la eventual restauración o el uso poscierre se ve optimizada por la planificación.

Frente de explotación actual



Figura 9.

CONCLUSIONES

Situaciones posibles

Para el caso de explotaciones en desarrollo la posibilidad de planificar la secuencia de reacondicionamiento debe incluir la historia reciente del material explotado, al no haberse previsto la separación del suelo orgánico del destape o estéril inferior

Para el caso de explotaciones futuras la planificación debe realizarse según se indica en los gráficos. Puede darse el caso de explotaciones que superen en profundidad el nivel freático, lo cual dependiendo de las características topográficas no impide aplicar la secuencia establecida. En muchos casos el relleno final del reacondicionamiento superará en cota al nivel freático.

Para el caso de reacondicionamientos de excavaciones realizadas en el pasado, en algunos casos es posible identificar en sectores material de destape con gran cantidad de materia orgánica, el cual será separado del resto del estéril. En el caso en que la mezcla del material de destape incluido el horizonte orgánico es total, las alternativas son aplicar la secuencia sin dicha distinción de horizontes con lo que resultará un suelo pobremente orgánico o cuando el espesor del manto orgánico circundante es considerable (por ejemplo 40 cm o más), tomar una fracción razonable del mismo de los alrededores e incluirlo en el área reacondicionada a fin de acelerar la evolución edafológica del suelo

Otras conclusiones preliminares correspondientes a la primera de las etapas del proyecto, son las siguientes:

1. Existen importantes reservas de canto rodado, suelo calcáreo y arena en la región relevada. Por otra parte existe la posibilidad de recuperación de magnetita (Fe_3O_4) de la fracción arena ya que contiene entre el 0,5 y 1% de este mineral de hierro.
2. La construcción de la autovía de la ruta 14 impulsó la apertura de nuevas canteras así como la reactivación de algunas abandonadas en el pasado.
3. Son variables las condiciones de explotación, como por ejemplo el destape, así como las características de los materiales, el porcentaje de grava (agregado grueso) de cada yacimiento, que oscila entre un 30 y 70%, como así también el porcentaje de finos.
4. Las condiciones y características de explotaciones antiguas y actuales varían principalmente de norte a sur, sobretudo en la menor profundidad del nivel freático en esa dirección y por lo tanto aumentando la presencia de

agua en la excavaciones. Lógicamente también hay menor profundidad del freático en los yacimientos más cercanos al río, aunque esta característica es menos relevante ya que están ubicados en la antigua terraza del Río Uruguay y por lo tanto en una cota relativamente constante, que por otra parte decrece de norte a sur.

5. La presencia del nivel freático es determinante en cuanto a la evolución natural de los predios abandonados, como así también la permeabilidad del fondo (que es menor por ejemplo en las canteras de suelo calcáreo (brosa). Cuando se alcanza el nivel freático (agua permanente) el nuevo ecosistema evoluciona con la presencia de vegetación y eventualmente fauna acuática, dependiendo de la profundidad. Cuando el terreno es permeable y por encima del nivel freático o topográficamente bien drenable se desarrolla vegetación arbórea y arbustiva del tipo renoval (es decir vegetación mayormente autóctona, que surge luego de haber sido eliminada por cierto tiempo la original o virgen) así como herbácea.

6. Se presentan diferentes alternativas de recuperación de los predios afectados según las características relevadas para la región, siendo las más significativas:

Tendido de taludes, relleno y nivelación con drenaje, lo que significa la recuperación de tierras asimilable a una restauración.

Desarrollo e incentivación de fauna y flora a fin de constituir las en reservas

Cría de peces

Urbanización o destino para radicaciones industriales

Reactivación, con planificación de explotación que favorezca y financie el reacondicionamiento final de la explotación antigua y la nueva.

RESEÑA DE TRABAJOS CONSULTADOS

Debido a que no se encontraron trabajos comparables en forma estricta que contemplaran regiones con ambientes variados, en lo que hace a condiciones hidrogeológicas (permeabilidad, profundidad del nivel de agua libre), diferentes estados de la fauna y flora, áreas involucradas de tipo rural con diferentes grados de intervención del medio natural y áreas suburbanas.

Hay, sin embargo, numerosos trabajos que abordan situaciones puntuales o de regiones con diferentes realidades desde el punto de vista productivo, socioeconómico y de legislación ambiental.

Se citan a modo de ejemplo algunos de ellos:

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ARCHIMBAUD, C. - A. MISHHELLANNY 1984.

Les études d'impact de carrières.

Pág. 209 a 221. *IAEG/AIGI. N° 29. Paris. France.*

GOSWAMI, S. C. 1984.

Quarring of aggregates in and around Gauhati: impact on the environment.

Bulletin IAEG/AIGI N° 29. Pág. 265 a 268. Paris. France.

LOUKACHE, V.K. - V. A. PROKOPENIA 1984.

Influence de l'extraction des sables et graviers sur l'environnement en Biélorussie.

Pág. 275 a 278. *Bulletin IAEG/AIGI.*

MAC LEAN, A. G. 1984.

Monitoring and modeling progressive rehabilitation in aggregate mining a decade of Ontario experience and look at the future.

Bulletin IAEG/AIGI n° 29. Pág. 279 a 284. Paris. France.

MERIGHI, A. BÉRANGER, C. - LAMBERT, D.- C. SOUBOUROU, 1984.

Architecture du paysage et carrières.

Bulletin IAEG/AIGI n° 29.. Pág. 303 a 306. Paris. France.

MOTTI, E.. 1984.

Aplication de la téledetection a la recherche des sites d'exploitation de granulats et a l'étude de leur impact sur l'environnement.

Bulletin IAEG/AIGI n° 29. Pág. 303 a 306. Paris. France.

SOUBOUROU, C. - C. BÉRANGUER . 1984.

Les explotations de granulats et les "études d'impact" sur le envirnment: avantages et inconvenient pour les professionnels, le bilan de cinc aneés d'experience et de reflexion.

Bulletin IAEG/AIGI n° 29. Pág. 321 a 324. Paris. France.

SUITE, W.H.E. 1984.

The challenges of aggregate management in a small developing country. Trinidad Tobago.

Pág. 325 a 328. *Bulletin IAEG/AIGI N° 29. Paris. France.*

En nuestro país hay numerosos trabajos puntuales de canteras o yacimientos en particular. Para el caso de enfoques regionales como el que nos ocupa se pueden citar:

GAMBA, MARÍA T.; GÓMEZ, CARLOS E.; HÉCTOR FASOLI, 1999

Tosqueras de Luján: Estudios de base para su recuperación autosustentable.

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente N° 13. Pág. 43 a 48. Bs. As. Argentina.

MUÑOZ, LUIS A. 2005.

La importancia del punto de partida en las evaluaciones de impacto ambiental.

El caso de las canteras de canto rodado y suelo calcáreo de la margen derecha del Río Uruguay entre los paralelos de 32 y 33 grados de lat. Sur.

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. N° 21. Pág. 75 a 90 Bs. As. Argentina.

Como bibliografía general actualizada sobre la problemática ambiental de explotaciones mineras y restauraciones que incluyen las efectuadas a cielo abierto, citamos:

SEGUPTA, M. 1993.

Environmental Impacts of Mining. Monitoring, Restoration, and Control.

Ed. Lewis publishers. USA. 500 páginas.



Caracterización ambiental y morfológica de los márgenes de cuerpos de agua artificiales en la planicie costera del Río de La Plata

Marcomini, S.C.¹✉ - López, R.A.¹ - Kalesnik, F.²

Recibido: 31 de octubre de 2009 • Aceptado: 20 de abril de 2010

Resumen

Durante las últimas tres décadas, numerosos emprendimientos urbanos se han desarrollado en el noreste de la provincia de Buenos Aires. Muchos de ellos tienen, como característica en común, dragar un sector del territorio generando un cuerpo de agua artificial y refular el material extraído a los terrenos adyacentes, para obtener cotas por encima de los niveles de inundación ordinarios y extremos del estuario del Río de La Plata. Este procedimiento se emplea con el fin de generar zonas aptas para desarrollos urbanos en las planicies estuáricas del Río de la Plata o en la denominada terraza baja (Yrigoyen 1993).

El caso testigo es el que corresponde a la laguna artificial que comparten el Náutico Escobar Country Club (NECC) y el Centro Urbano Barrancas de Escobar (CUBE), en las inmediaciones del Cazador, en el Partido de Escobar, al sur del río Lujan.

Como resultado del estudio se determinó que los bordes de la laguna se ajustan a las condiciones dinámicas naturales e inducidas por el hombre, permitiendo definir: costas de erosión, costas neutras y costas de acumulación.

Las recomendaciones para el manejo de la costa de la laguna, involucran medidas tendientes a controlar las actividades náuticas, los rellenos artificiales y la opción de realizar la reconstrucción estructural o no estructural de los márgenes erosivos.

Palabras clave: *Cuerpos de agua artificiales, humedales, tipo de costas, planicie costera del Río de la Plata, Estabilidad de márgenes costeros*

Abstract

Several urban undertakings have developed in the southern coast of the Río de La Plata estuary, northern Buenos Aires, during the last three decades. Many of the urban projects used to dredge land material to generate an artificial lake and deposit the sediments on the adjacent lands, to obtain elevations above the levels of ordinary and extremes floodings of the Río de La Plata. This procedure is employed in order to generate suitable zones for urban developments on the low estuarine plain of the Río de La Plata or over the surface of the usually called low terrace.

The case study corresponds to an artificial lake that share the Náutico Escobar Country Club (NECC) and the Centro Urbano Barrancas de Escobar (CUBE), in the surrounding area of El Cazador, Escobar, southern Lujan river.

This study determined that the lake margins were gradually adjusted to the natural lake dynamics and to the conditions induced by the man, defining: coasts of erosion, neutral coasts and accumulation coasts.

¹ Departamento de Geología, FCEyN, Universidad de Buenos Aires

✉ E-mail: scm@gl.fcen.uba.ar

² GIEH (Grupo Investigación Ecología de Humedales). Laboratorio de Ecología Ambiental. Dpto. Ecología, Genética y Evolución. FCEyN. Universidad de Buenos Aires

Some recommendations for the management of the coast of the lake, involve tools tending to control nautical activities, artificial nourishment and the possibility of carrying out structural or not structural reconstruction of the erosive margins.

Keywords: *Artificial lakes, wetlands, coastal type, Río de La Plata estuary plain, stability of coastal lake margins.*

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas han surgido numerosos desarrollos urbanos de barrios privados al noreste de la provincia de Buenos Aires, que ocupan las márgenes del antiguo estuario del río de La Plata. Muchos de estos emprendimientos tienen como característica en común, dragar un sector del territorio generando un cuerpo de agua artificial y refular el material extraído a los terrenos adyacentes, para obtener cotas por encima de los niveles de inundación ordinarios y extremos del estuario del Río de La Plata. Este procedimiento se emplea con el fin de generar zonas aptas para desarrollos urbanos en las planicies estuáricas del Río de la Plata o en la denominada terraza baja definida por *Yrigoyen (1993)*, que de otra manera no podrían urbanizarse por el recurrente riesgo de inundación durante las crecidas.

Este ambiente natural corresponde al sistema de humedales de la cuenca del Río Luján (*Kandus, 1997*), y como tal constituye un sistema clave por su contribución a la biosfera en términos de productividad y diversidad. Los mismos proveen un sinnúmero de beneficios y servicios a la sociedad, como lo es el mantenimiento de la calidad y disponibilidad del agua, el control de inundaciones, la circulación de nutrientes y sedimentos, la provisión de recursos para las poblaciones humanas y de hábitat para fauna silvestre así como en la conservación de la biodiversidad (*Mitch y Gosselink, 2000*).

A pesar de ello, estos ambientes fueron considerados como tierras marginales de la periferia, que debían ser “drenadas” o “recuperadas”, ya sean para mejorar las condiciones sanitarias o para su afectación a la ampliación del área urbanizable. La idea dominante de los desarrolladores urbanos es que estas llanuras de inundación y humedales temporarios asociados a los ríos son “improductivos” y “desperdiciados”, (*Fernández, L, 2002*).

En los últimos años y con el avance de la urbanización hacia los ríos, para favorecer la navegación deportiva y ampliar el espectro de usos de estos del territorio es que han surgido los barrios privados formados a partir del relleno artificial sobre estos humedales.

El objetivo del presente trabajo consiste en evaluar los cambios geomorfológicos, hidrodinámicos y ecológicos que ha producido el desarrollo de este tipo de emprendimientos en el ambiente, con el fin de elaborar pautas para el manejo sostenido de los recursos naturales minimizando el impacto sobre la biota y el medio físico.

METODOLOGÍA

La geomorfología fue relevada a partir de fotografías aéreas e imágenes satelitarias actuales extraídas de Google Earth. Las tareas de campo consistieron en la confección de perfiles morfológicos de los márgenes de la laguna y batimétricos del cuerpo de agua. Asimismo se realizó un muestreo sedimentológico de los sedimentos superficiales correspondientes al fondo de la laguna con un muestreador tipo snapper y de las playas artificiales. Los sedimentos fueron sometidos al análisis granulométrico empleando el sedígrafo y se realizaron los

correspondientes cálculos para la obtención de los parámetros estadísticos de moda, media, asimetría, percentil 1 y kurtosis.

El relevamiento ecológico se realizó mediante un muestreo sistemático, en el cual se ubicaron 13 transectas espaciadas regularmente en todo el perímetro de la laguna del CNE. Las mismas abarcan un gradiente ambiental desde vegetación acuática, vegetación de borde y vegetación de costa. En los casos en que se encontró vegetación nativa o espontánea se llevaron a cabo censos de vegetación representativa de las comunidades vegetales. El tamaño de los mismos fue de 5 x 5 m de forma tal de garantizar homogeneidad interna y en cada uno se estimó la cobertura de las especies utilizando la escala de Braun Blanquet modificada (*Mueller-Dombois y ElleMBERG, 1974*).

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza al noreste de la provincia de Buenos Aires, en el sector este del Partido de Escobar, ubicado en la margen sur del antiguo estuario del Río de La Plata. El emprendimiento se ubica a 280 m del Río Luján y a unos 300 m de la planicie deltaica subaérea del delta del Paraná (Figura 1). Al suroeste de la laguna se emplaza el paleoacantilado que delimitaba la antigua costa Holocena, conformado actualmente por una barranca ubicada a unos 750 m hacia el suroeste de la laguna.

La estratigrafía del sector corresponde al cortejo sedimentario de mar alto (Sistema deposicional del delta del Paraná, sistema deposicional de llanura costera) del Holoceno que fue descrito por *Cavallotto, (2002)*, *Cavallotto et al., (1999, 2002, 2004 y 2005)* y *Cavallotto y Violante, (2005)*. Comprende a los sedimentos depositados desde el momento en que el mar alcanzó su máximo nivel durante el climax de la trasgresión holocena hasta la actualidad. Está formado por un sistema de cordones litorales compuestos por depósitos de arena y conchillas, que conformaban antiguas playas, formadas hacen aproximadamente 6.000 años; y por planicies de marea formadas por sedimentos limo arcillosos. Se han podido distinguir tres Facies: Facies llanura con cordones de playa, Facies llanura de playa y Facies llanuras de marea.

Las unidades geomorfológicas reconocidas en el sector son: Planicie deltaica subaérea, Terraza de acumulación marina integrada por cordones litorales, Planicies de marea, Paleoacantilado, Cursos distributarios del delta del Paraná, Cursos fluviales transitorios continentales (Figura 1).

Como resultado del proceso antropogénico se ha generado en el área una laguna artificial, que fue formada a partir del dragado realizado en la década del 70. La misma tiene forma elongada y está orientada con rumbo O-NO E-SE, alcanzando su mayor extensión en la zona central y sudeste. Posee anchos que varían de 80 a 170 m en el oeste, entre 230 y 250 m en el centro 70 m hacia el sudeste y culmina en una pequeña depresión de 180 m. Alcanza una longitud aproximada de 2.200 m. La laguna tiene una profundidad máxima de 8 m. Hacia el noroeste posee profundidades del orden de los 6 m mientras que hacia el este, a partir del canal de acceso al río Luján, la



Figura 1. Mapa de ubicación y zonificación de unidades geomorfológicas.

profundidad media es de 3 m. La laguna se encuentra conectada al río Lujan por un canal de acceso de 28 m de ancho y 260 m de longitud, que posee actualmente una profundidad de 1,5 m.

La urbanización ocupa los márgenes rellenos de la laguna conformando hacia el sur el Náutico Escobar Country Club (NECC) y hacia el norte el Centro Urbano Barrancas de Escobar (CUBE).

RESULTADOS

Tipos de costa

La costa representa la zona transicional entre la dinámica propia de la laguna y los depósitos que antiguamente conformaban los sedimentos que constituían la planicie costera del Río de la Plata. A partir del dragado realizado en la década del 70 se inició un nuevo ciclo evolutivo de los márgenes costeros, tendiendo a ajustarse a las nuevas condiciones. Por ello, en la actualidad se pueden reconocer dos tipos de costa sobre la base de los materiales que las conforman, las que conservan los *ambientes naturales* y las formadas por el relleno artificial.

Las *costas de ambientes naturales* se encuentran circunscriptas al sector sureste de la laguna, con una extensión aproximada de 500 m, se caracterizan por una escarpa de entre 30 y 50 cm y una pendiente submareal baja. Poseen bajo relieve

relativo y en el perfil transversal hay baja incidencia de la remoción en masa.

Este tipo de costa tiene un muy bajo porcentaje de representatividad y está ubicada en el sector sudeste de la laguna (Figura 2). Los ambientes situados en esta sección cobran una singular importancia por constituir ambientes de humedales naturales cuya distribución es de carácter relictual en la región. Los ambientes de borde de laguna presentaron distintas especies de camalotes (*Eichhornia crassipes*), canutillo (*Panicum elephantipes*), seibos (*Erythrina crista-galli*) que se encontraron dentro del agua por retroceso costa y caraguatá (*Eryngium pandalifolium*). En estos ambientes se observó la presencia de parches de bosques de seibos de 5 m de altura con sotobosque dominado por enredaderas (*Mikania micrantha*) y un conjunto de especies herbáceas (*Commelina diffusa*, entre otras), destacándose la invasión del lirio europeo (*Iris pseudacorus*).

En el sector interno de estos ambientes se desarrollan ambientes de humedales dominados por pajonales de cortadera (*Cortaderia selloana*), totorales (*Thypha dominguensis*) y parches arbóreos aislados dominados por sauces (*Salix* spp.), chilcas (*Baccharis salicifolia*), entre otros.

Las costas de relleno ocupan la mayor parte de los bordes de la laguna del NECC, se caracterizan por la presencia de un albardón artificial, que se utilizó durante las tareas de relleno

no y representan topográficamente sectores altos. Generalmente el contorno del albardón se encuentra forestado. Las costas en estos sectores, presentan escarpas de hasta 1,8 m y en los sectores con playas artificiales, los rellenos con arena estabilizaron los taludes, observándose pendientes bajas.

La mayoría de los ambientes de costa de la laguna del NECC pertenecen a este tipo de ambientes (Figura 2). Del análisis de las transectas que se muestrearon en este tipo de ambiente se destaca lo siguiente. En los sectores que presentaron sedimentación activa se destaca el desarrollo de comunidades de herbáceas altas de espadaña (*Zizaniopsis bonariensis*), juncales de *Schenoaplectus californicus* y comunidades dominadas por *Panicum elephantipes*. También se observan sectores con acumulación de camalotes (*E. crassipes*).

Los ambientes de costa presentan distintos tipos de plantaciones de árboles con fines ornamentales y de protección de erosión de costa, destacándose plantaciones de sauce (*Salix sp.*), ciprés de los pantanos (*Taxodium distichum*) y plantaciones lineales de casuarina (*Casuarina cunninghamiana*). En la mayoría de los casos se observó un fuerte retroceso de costa lo que ocasiona exposición de sus raíces. En el sector sudeste de la la-

guna cobra relevancia la presencia de bosques naturales relictuales de seibo (*Erythrina crista-galli*) y tala (*Celtis tala*), a pesar de desarrollarse dentro de patrones de paisaje altamente modificados. En el interior de los mismos se desarrollan mosaicos de humedales dominados por pajonales mixtos de totora y cortadera y parches arbóreos de sauces (*Salix sp.*), mora europea (*Morus alba*), talas y ceibos, entre otros. Estos ambientes fueron incorporados dentro de la planificación de la "Reserva Natural" del NECC.

Estabilidad costera

Según las condiciones hidrodinámicas se pudieron diferenciar 3 tipos de costas: costas de erosión, costas neutras y costa de acumulación (Figura 3).

Las *costas de erosión*, predominan en los bordes de toda la laguna, se caracteriza por escarpas verticales activas que pueden alcanzar 1,80 m, labradas sobre el material inconsolidado producto de refulado. El retroceso de la línea de costa se evidencia por la caída y alabeamiento de los árboles perimetrales a la laguna (Figura 4). Los factores de mayor influencia, como agentes erosivos, son las olas generadas por embarcaciones y la



Figura 2. Mapa de los tipos de costa.



Figura 3. Mapa de estabilidad costera.

disminución del ancho del canal. Las zonas más comprometidas están determinadas por presencia de muescas de deslizamientos rotacionales, árboles alabeados, y la alta verticalidad de pendientes. Los rangos de erosión determinados se dan entre moderado y alto.

Costas neutras, se consideran así a los sectores donde la movilidad de la línea de costa es poco perceptible y donde, por tareas de acorazamiento, se fijó la línea de costa (Figura 5).

Costas de acumulación, se refiere a las costas, que por tareas de relleno (fundamentalmente aporte de arena), se han logrado estabilizar con condiciones similares a las de una playa (Figura 6).

DISCUSIÓN

Las principales causas del retroceso de los taludes laterales son el resultado de:

Tránsito de embarcaciones, las embarcaciones generan tres tipos de ondas: transversales, tangenciales y frontales. Las ondas tangenciales son las que producen mayores fenómenos erosivos ya que se propagan hacia los márgenes del canal favoreciendo la inestabilidad de los taludes.

Dragados, las tareas de dragado al incrementar la profundidad de los canales producen inestabilidad en el perfil de



Figura 4. Costas de erosión.



Figura 5. Costas neutra.



Figura 6. Costa de acumulación.

equilibrio de los laterales, de manera tal que generan mayor erosión y deslizamientos sobre los taludes.

Obras de defensa, los paredones verticales producen el fenómeno de reflexión en las olas tangenciales generadas por las embarcaciones, al interactuar con las defensas verticales, el oleaje se refleja aumentando la altura de ola incidente. La reflexión del oleaje en las márgenes del CUBE aumenta el efecto erosivo sobre la costa desprotegida del NECC por el impacto de las olas que se reflejan sobre este tipo de defensas.

Se recomienda como primera medida restringir la velocidad de las embarcaciones a velocidades tales que no generen significativo oleaje tangencial, ya que constituye la principal causa de erosión. Acordar con el club vecino la tarea de manejo y uso de la laguna, que incluye la restricción antes mencionada y la prohibición de construcción de paredones o similares (cable estacados, colocación de gaviones, etc.) en forma independiente sin que haya aceptación e uniformidad de acción en ambas márgenes.

También se deben ejecutar tareas en los márgenes erosivos para reconstruir las pendientes con el objetivo de proteger las raíces de los árboles, contener los planos de deslizamientos existentes, y no generar caras libres verticales. En segundo lugar generar un área de disipación, compuesta por un plano inclinado construido por relleno de materiales cuyo coronamiento este formado por material limo arcilloso, que tiene la finalidad de contener y proveer de nutrientes a las especies que tendrán como objeto estabilizar la pendiente. Las especies recomendadas para fijar estos dos sectores son ceibo, césped y gramíneas adaptables al medio.

Al frente de las obras de relleno, se recomienda continuar con las tareas de implantación de espadaña y junco, que tienen la finalidad de retener sedimentos y aumentar las condiciones de estabilización del talud.

De no interrumpirse o regularse la actividad náutica será necesario planificar obras de defensa estructurales y mantenimiento periódico de los márgenes de la laguna.

Es importante resaltar la existencia de una "Reserva Natural" dentro del predio del NECC, que a pesar de que la misma se encuentre dentro de la categoría de ambientes antropizados, en la misma se conservan ambientes de humedales que pueden ser considerados como parches relictuales pertenecientes a los bajíos ribereños del río Luján. Estos ambientes poseen funciones ecológicas de importancia como el desarrollo de una gran riqueza de especies vegetales, refugio de vida silvestre, actuar como cubetas de amortiguación de los picos de crecidas del río Luján, fijadores de dióxido de carbono, entre otras.

CONCLUSIONES

Los nuevos emprendimientos urbanos con proyectos que incluyen lagunas artificiales emplazadas en la terraza baja o antigua planicie estuárica del río de La Plata, alteran las características originales del paisaje y el equilibrio ecológico de los humedales asociados.

La expansión areal descontrolada de este tipo de emprendimientos modificará en el futuro las características naturales del sistema de humedales de la cuenca del Río Lujan y en consecuencia alterará la biosfera en términos de productividad y diversidad. Por este motivo es importante que los nuevos emprendimientos conserven parcialmente sectores con características naturales como "áreas de reserva" que pueden ser empleados como zonas de recreación, esparcimiento y educación sobre los sistemas costeros naturales.

Las costas de las lagunas artificiales estarán sujetas a distintos grados de estabilidad pudiéndose presentar costas erosivas, estables o neutras.

Las principales causas de erosión costera son debidas a la acción del hombre y se relacionan con la incidencia de olas producidas por embarcaciones a motor (en especial para la práctica de *wake board*), la cercanía de los dragados para aumentar el calado cerca de las márgenes costeras y la reflexión del oleaje producida por obras de defensa de costa como paredones verticales.

Para minimizar las tasas erosivas sobre la costa se recomienda restringir la velocidad de las embarcaciones a motor, prohibir la construcción de paredones o similares (cable estacados, colocación de gaviones, etc.) en forma independiente sin que haya aceptación e uniformidad de acción en ambas márgenes y generar un área de disipación al pie de las escarpas de erosión con la implantación de espadaña y junco para retener sedimentos y aumentar las tasas de sedimentación vertical.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CAVALLOTTO, J.L., 2002.
Evolución holocena de la llanura costera del margen sur del Río de la Plata.
Revista Asociación Geológica Argentina, 57(4): 376-388.
- CAVALLOTTO, J.L. Y R. A VIOLANTE, 2005.
Geología y Geomorfología del Río de la Plata. En: de Barrio, R., Etcheverry, R. O., Caballé, M. F. y Llambías, E. (Eds.) Geología y recursos minerales de la Provincia de Buenos Aires.
Relatorio XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata, Cap. XIV: 237-253.
- CAVALLOTTO, J.L., VIOLANTE, R.A., G. PARKER, 1999.
Historia evolutiva del Río de La Plata durante el Holoceno.
XIV Congreso Geológico Argentino, Salta, Argentina, Actas I, pp. 508-511.
- CAVALLOTTO, J.L.; VIOLANTE, R.A Y NAMI, H. G. CURRENT, 2002.
Late Pleistocene-Holocene Paleogeography and Coastal Evolution in Mouth of the Río de la Plata: Implications for the Human Peopling in the South America. 2002.
Research in the Pleistocene, 19: 13-16.
- CAVALLOTTO, J.L., VIOLANTE, R.A. Y G. PARKER, , 2004.
Sea level fluctuation during the last 8600 yrs in the Río de la Plata (Argentina). 2004.
Quaternary International, 114 (1): 155-165.
- CAVALLOTTO, J.L.; VIOLANTE, R.A Y F. COLOMBO, 2005.
Evolución y cambios ambientales de la llanura costera de la cabecera del Río de la Plata. 2005.
Revista Asociación Geológica Argentina, 60 (2): 353-367.
- FERNÁNDEZ, L. 2002.
Los servicios ecológicos que cumplen los humedales. El caso de Tigre, Buenos Aires.
Tesis de licenciatura de la carrera de Ecología Urbana. Universidad Nacional de General Sarmiento. Instituto del Conurbano.
- KANDUS P. 1997.
Análisis de patrones de vegetación a escala regional en el bajo Delta Bonaerense del Río Paraná (Argentina).
Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires.
- MITSCH, W.J. Y J.G. GOSSELINK. 2000.
Wetlands. (2a. Ed.).
Van Nostrand Reinhold Company, Nueva York.
- MUELLER-DOMBOIS, D. & E. ELLENBERGELLENBERG, 1974.
Aims and methods of vegetation ecology.
John Wiley and Sons. New York.
- YRIGOYEN, MARCELO R., 1993.
Morfología y Geología de la ciudad de Buenos Aires.
Actas Asoc. Arg. Geol. Apl. Ing.; VII, 7-38.



Geología ambiental del balneario Orense Barrera Austral, provincia de Buenos Aires

Quesada, Agustín ^{1,2} ✉ - Marcomini, Silvia ¹

Recibido: 16 de diciembre 2009 • Aceptado: 20 de abril de 2010

Resumen

El paisaje de la zona de estudio es compuesto, dominado por procesos eólicos que se representan en una faja de medanos de 1500 a 2500 metros de ancho a partir de la línea de costa, conocida como Barrera Austral. El inicio de la actividad humana en la zona geográfica de Balneario Orense, conocida como Punta Desnudez, fueron proyectos como La Forestal, y la formalización de la villa balnearia que trajeron las primeras alteraciones en la dinámica sedimentaria sobre el campo de dunas activo. Se estudió en detalle una secuencia de imágenes aéreas en la que se reconoce la evolución de los últimos 33 años y en donde es notable como el desarrollo fue realizado hacia la línea de costa invadiendo el campo de dunas activo. También se observa como en los alrededores del Balneario Orense hay una degradación generalizada del paisaje de dunas por avance de la vegetación. Se puede estimar que el área de alteración inducida por el hombre, por nuevos loteos, avance de vegetación alóctona, calle costanera, etc. se ha duplicado en el lapso de 33 años. Sin embargo, el estado incipiente de alteración del medio físico costero se presenta como una oportunidad para comenzar un programa de manejo costero a bajo costo, con estrategias orientadas a la regulación y prevención. Las principales recomendaciones son: vegetar la playa distal de Balneario Orense con spartina, delinear una zona de no edificación que incluya al campo de dunas activo, realizar un manejo sobre los terrenos forestados y mantener un monitoreo periódico de perfiles de playa.

Palabras clave: Barrera Austral, playa, Orense, manejo costero, urbanización.

Abstract

The Barrera Austral is a coastal dune field, 1500 to 2500 meters wide from the shoreline. The silviculture project known locally as La Forestal, and the formalization of the Balneario Orense resort village, brought the first changes in sediment dynamics on the active dune field to the present study area which is dominated by eolic processes. A sequence of three aerial images of the last 33 years shows that the urban development was made towards the coastline, and it was estimated that the area of human-induced disturbance in this period has at least doubled. It is also noted that there is a natural degradation of the dune landscape around the Balneario Orense by the raising amount of vegetation. However, this incipient physical alteration poses a good opportunity to begin a low cost program of coastal management with prevention and regulation strategies. The main recommendations are: Revegetate with Spartina on distal beach, cease the building over the active dune field, conduct proper management over forested lands and periodic beach profiles monitoring.

Keywords: Austral Barrier, beach, Orense, coastal management, urbanization.

¹ Departamento de Geología, FCEyN-UBA,

✉ E-mail: aguquesada@hotmail.com

² (011) 1566577898, Zapiola 2241 "b"

INTRODUCCIÓN

Dado que un número cada vez más creciente de personas elige zonas costeras de todo el mundo para vivir y recrearse (Martínez *et al.*, 2004) la geología ambiental costera surge como una especialización necesaria que contemple medidas de mitigación, de prevención y de remediación para conjugar las actividades humanas y la dinámica sedimentaria del sistema playa-duna. El principal riesgo geológico de las zonas costeras a nivel mundial es el retroceso de la línea de costa y la erosión de playa.

Los fenómenos de erosión en las costas de la provincia de Buenos Aires se pueden clasificar en naturales e inducidos. Los primeros están vinculados a las costas cohesivas con geoformas típicas de erosión (acantilados activos, plataformas de abrasión, etc.). La erosión inducida se produce cuando actividades humanas alteran las variables que regulan el equilibrio dinámico en las costas, tanto acantiladas como de dunas. Las acciones, más comunes, son: extracción de arena de la playa y duna costera, eliminación de la duna costera, incremento en la escorrentía superficial por impermeabilización del suelo e introducción de vías de drenaje artificiales (Marcomini y López, 1995).

El interés de los pobladores y políticos, detectado durante las salidas de campo, de Balneario Orense en temáticas ambientales y de preservación de la localidad, se presenta como un escenario favorable para la aplicación de un programa de manejo costero.

La localidad de Balneario Orense se ubica en la costa atlántica, al sur de la Provincia de Buenos Aires, en el partido de Tres Arroyos. El sitio es también denominado Punta Desnudez y es

parte de la Barrera Austral. En un marco geológico regional, el Balneario Orense, se encuentra en la cuenca de Claromecó entre los macizos de Tandilla y Ventania (Figura 1).

Geomorfológicamente es la parte media de la barrera medanososa austral, compuesta por dunas costeras con distinto grado de actividad, de 2 km de ancho, que se emplazan en forma continua desde Miramar hasta Bahía Blanca, con rumbo ENE-OSO.

El acceso vehicular desde la Ciudad de Buenos Aires se realiza por las RN 2 o 3 y luego de 570 km y desvíos correspondientes se llega a la localidad Orense, predominantemente agrícola y antiguamente, estación del ferrocarril. Desde allí se continúa 12 km por camino de tierra hasta arribar al balneario homónimo.

La primera casa del balneario fue de la familia Hurtado construida alrededor del año 1930, que se conserva aún y funciona en temporada como la biblioteca y oficina de informes turísticos del lugar. Luego fueron donadas tierras destinadas a loteo y generación de una villa balnearia. A partir de allí se ha ido desarrollando lentamente hasta alcanzar aproximadamente 300 casas de verano. Posee un balneario sobre la playa, dos hoteles y proveedurías. Además cuenta con servicio de electricidad y recolección de basura en verano. Balneario Orense, de extensas playas, bajos niveles aterrizados retirados del mar, y dunas inmensas y aisladas, es un bello páramo, de apenas 6 habitantes permanentes. Sin embargo, en temporada alta puede recibir hasta 15 mil personas provenientes principalmente de la ciudad de Tres Arroyos y alrededores.

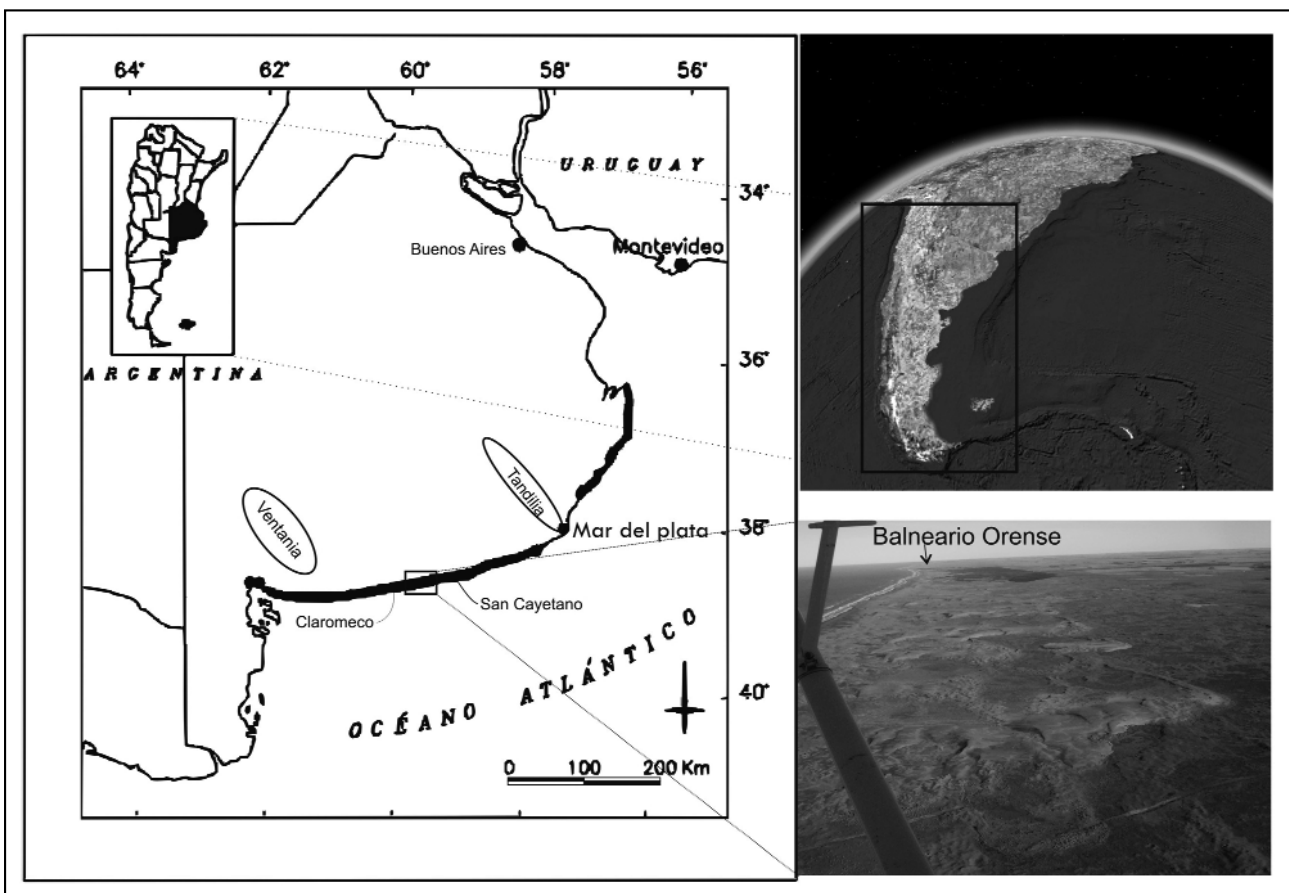


Figura 1. Mapa de ubicación.

Son objetivos del presente trabajo

- Describir las morfologías más características de las dunas existentes.
- Detectar los potenciales problemas ambientales.
- Recomendar medidas para el uso sustentable de la playa y de la región costera.

Los primeros trabajos desarrollados desde un enfoque regional, corresponden a informes sedimentológicos de arenas de playa, con especial énfasis en su origen y composición. Entre ellos pueden destacarse los trabajos de *Teruggi et al. (1959)*. Localmente, *Angelelli y Chaar (1969)* y *Chaar y Toubes (1978)*, *Cábana et al. (2005)* trabajaron con el objetivo de ubicar y determinar leyes de minerales pesados, en Claromecó y en los alrededores de Orense para determinar el contenido en Zircón en las arenas de dunas. *Cortizo e Isla (2007)* es la única publicación que incluye la presente zona de estudio y estudian el aumento de la vegetación sobre las dunas en las últimas décadas.

El inicio de la actividad humana en la zona geográfica de Balneario Orense, conocida como Punta Desnudez, fueron proyectos como La Forestal, y la formalización de la villa balnearia que trajeron las primeras alteraciones en la dinámica sedimentaria.

El 14 de noviembre de 1929 se formó la Comisión Probalneario con el propósito de organizar un centro turístico. La primera obra concretada por la entidad fue la traza de un camino que unía Orense con la costa. El 8 de abril de 1951 se procedió a la realización del remate de 228 lotes de terrenos correspondientes al primer loteo del Balneario Orense. La traza urbana de esta localidad es particular: presenta una plaza en forma circular hacia donde convergen todas las calles y una avenida costanera que bordea el Atlántico (*Juárez y Mantobani, 2006*).

Una de las anécdotas del lugar relata que la primera construcción, en los '30, La casa de la familia Hurtado, quedó sepultada bajo dunas activas de una temporada para la otra, y tuvieron que hacer un hueco para realizar la entrada a la casa durante aquel verano. Luego sobrevinieron plantaciones de pinos que se utilizaron efectivamente para estabilizar dunas del campo activo (Figura 2).

METODOLOGÍA

En el mes de junio de 2007 se realizó un viaje de campo a la zona de estudio en donde se relevaron las principales geomorfologías de playas y dunas, se reconocieron las distintas unidades del paisaje y se observó particularmente la interacción de la vegetación con los ambientes eólicos. Asimismo se realizaron entrevistas con algunos pobladores a fin de obtener información de la percepción histórica de la evolución de la urbanización en temas relacionados con la calidad de pesca, construcción de pozos y calidad de agua, forma de disposición de residuos, degradación de la playa, circulación y hábitos comunes.

En Dirección de Geodesia de la provincia de Buenos Aires fueron adquiridas las corridas de fotografías aéreas del año 1984 escala 1:25.000, las cuales fueron analizadas con estereoscopio de espejos y de bolsillo. Luego fueron comparadas con las imágenes satelitales públicas Google Earth, que para la zona son imágenes Quick Bird de 0,6 m de definición por cada píxel, y se estima por las características fisiográficas de Orense que corresponden al año 2006. Se efectuaron comparaciones de las geomorfologías eólicas y marinas entre ambos años para estimar la evolución a corto plazo del sistema costero.

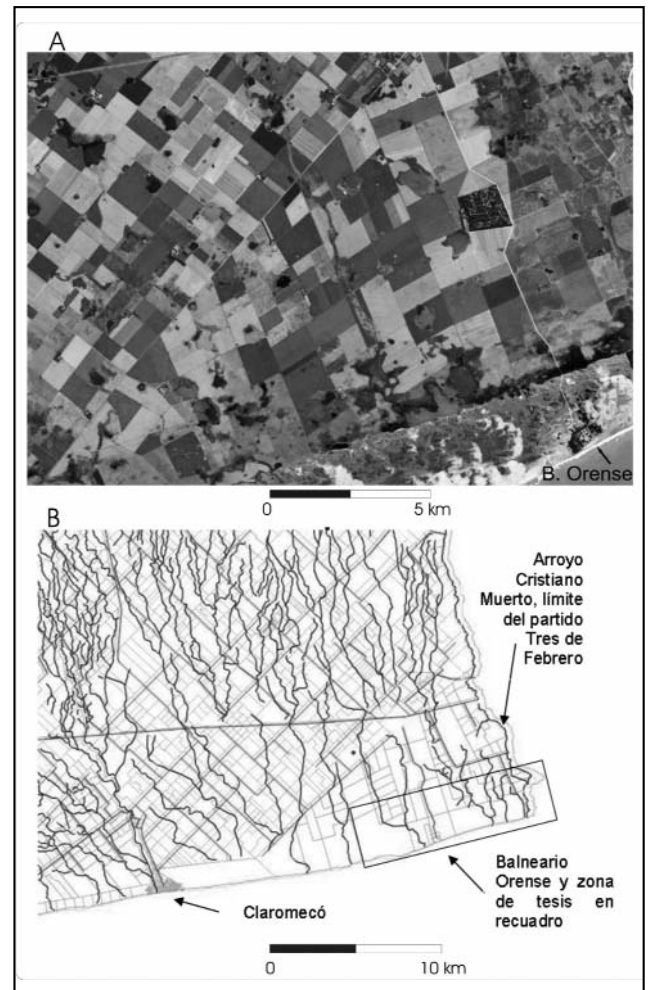


Figura 2. Fotografía aérea del diseño utilizado para forestar e inactivar duna litoral "medano 40", inmediatamente al oeste de Balneario Orense.

RESULTADOS

A partir de los reconocimientos de campo se hace una descripción de la geomorfología de la zona de estudio, de las características de la playa y del campo de dunas activo.

Geomorfología

El paisaje de la zona de estudio es compuesto, dominado por procesos eólicos que se representan una faja de medanos de 1500 a 2500 metros de ancho a partir de la línea de costa. En menor medida el paisaje es modelado por procesos marinos y fluviales.

La Barrera Austral es un campo de dunas costero transgresivo en los términos de *Hesp y Thom (1990)* que separa la planicie de acreción loésica, de los ambientes costeros de influencia marina.

Chaar y Toubes (1978) identificaron tres unidades en el campo de dunas de la Barrera Austral. En el presente trabajo se reconocieron cuatro unidades dentro del campo de dunas teniendo en cuenta el grado de actividad, las geomorfologías eólicas y el tipo y densidad de la cobertura vegetal.

De esta manera desde la costa al interior del continente se han identificado un *Campo de Dunas Activo* compuesto por grandes dunas complejas y planicies de progradación eólicas,

un *Campo de Dunas Semiactivo* con mayor cobertura vegetal en los sectores interdunales, un *Campo de Dunas de Transición* integrado por dunas parabólicas complejas y bajo relieve relativo y por último un *Campo de Dunas Inactivo*, de mayor altura con respecto al nivel del mar, completamente cubierto de vegetación herbácea con excepción de dunas en voladura de distintos tamaños.

El proceso marino está representado por geoformas de erosión tales como plataformas de abrasión y terrazas marinas y de acumulación como la playa donde se diferencian los subambientes de playa distal (zona entre la línea de alta marea y el pie de duna de crestas eólicas) y frontal (zona intermareal). La playa distal es ocupada rápidamente por dunas incipientes transformándose en extensas planicies de acreción eólica controladas estructuralmente por el sustrato duro de las sedimentos del Pampeano.

Además se han reconocido depósitos de bloques de procesos marinos erosivos antiguos y dos cordones de dunas costeras relicticas (*foredune*) a 200 y 400 m de la línea de costa que indicarían una trasgresión marina en el Holoceno (Marcomini et al., 2008), que se ubican dentro del campo de dunas activo.

El diseño de la red de drenaje es subdendrítico a subparalelo y de textura media, y evidencia un control estructural del sustrato profundo (Figura 3B). El único río permanente de la zona es el Arroyo Cristiano Muerto. Su bajo caudal proviene de una extensa cuenca desarrollada hacia el noroeste, en el sector continental. Su cauce es perpendicular a la costa y atraviesa la faja de dunas hasta su desembocadura que no presenta formas derivadas por la acción marina. El lecho del cauce pertenece a niveles del "Pampeano" y presenta también pequeños resaltos, que evidencian control estructural por dureza diferencial. El avance de dunas y la propia migración lateral del río re-trabajan sedimentos formando una planicie arenosa de baja pendiente en la zona de playa.

En la planicie de acreción loésica son comunes los paleocauces que evidencian una red de drenaje antigua, hoy desintegrada en un sistema de pequeñas lagunas circulares, diseminadas,

en ocasiones interconectadas, que puede reactivarse en épocas muy húmedas. Esta red de drenaje desproporcionada también ha determinado el paleorelieve en el sector continental (Figura 3A). La presencia permanente de lagunas longitudinales (Figura. 3A) inmediatamente posteriores a la faja de dunas evidencian un antiguo sepultamiento y endicamiento de ríos ligado al origen, desarrollo y movimiento del campo de dunas (López y Marcomini, 2000).

Características de la Playa

En los depósitos de playa los procesos eólicos no permiten el desarrollo de rasgos marinos y no existe una dirección neta de deriva de los sedimentos. Se determinaron tres tipos de perfiles de playa según las morfologías de: niveles aterrizados en playa distal, extensas planicies de playa distal y megadunas sobre la playa distal. La paleocosta pudo inferirse a partir de depósitos de bloques imbricados hallados a 2 m s.n.m. que se interpretan como antiguos depósitos bioturbados y re-trabajados en tormentas durante el Holoceno.

Las playas son de baja pendiente (Figura 4A). Sin embargo, tormentas de vientos del sur pueden afectar la dinámica predominante dejando al descubierto extensas plataformas de abrasión y generando escarpas o altas pendientes en la playa frontal. La dinámica normal de estas playas está dominada por procesos eólicos por lo que difícilmente se encuentra bermas u otras geoformas típicas de playa distal. Sin embargo sobre la plataforma se forman barras de lavado producto de la acción de la rompiente durante la alta marea.

Se identificaron tres tipos de perfiles de playa básicos:

1. Perfiles de playa con extensas planicies de progradación eólica en playa distal.
2. Perfiles de playa con niveles de terraza en playa distal.
3. Perfiles de playa con grandes dunas en playa distal.

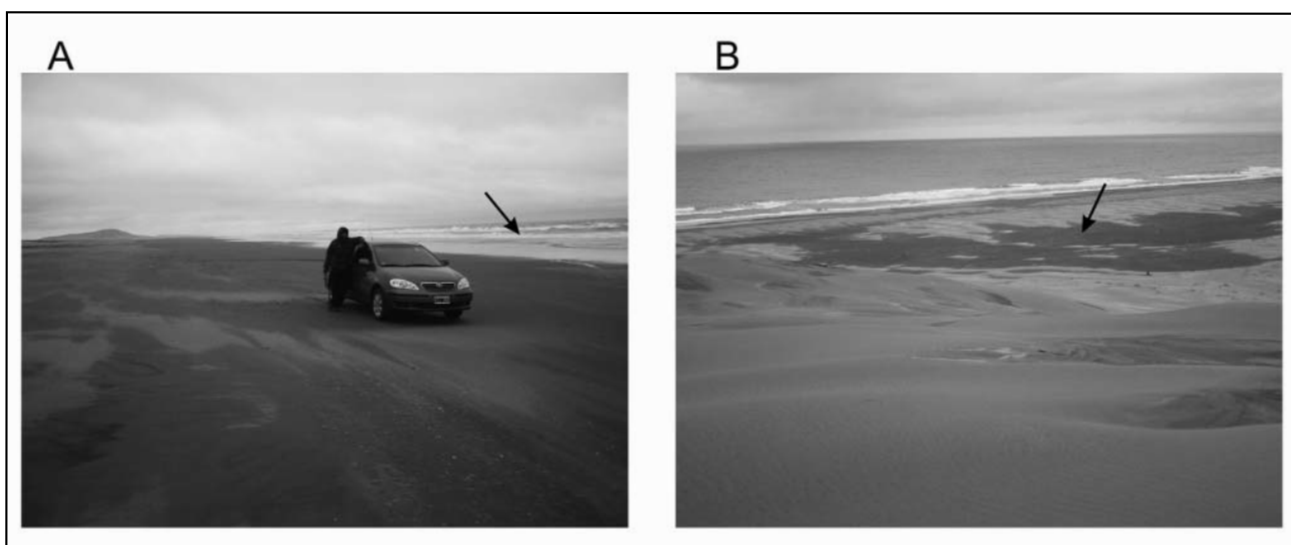


Figura 3A. Sistema de pequeñas lagunas circulares, de la red de drenaje antigua, que se observan en las parcelas agropecuarias de la planicie loésica.

Figura 3B. Red de drenaje del partido Tres Arroyos. La mayor parte de los ríos dibujados presentan régimen transitorio. Los principales ríos tienen hábito sinuoso y disposición perpendicular a la costa (Extraído del SIG del Gobierno del Partido de Tres Arroyos).

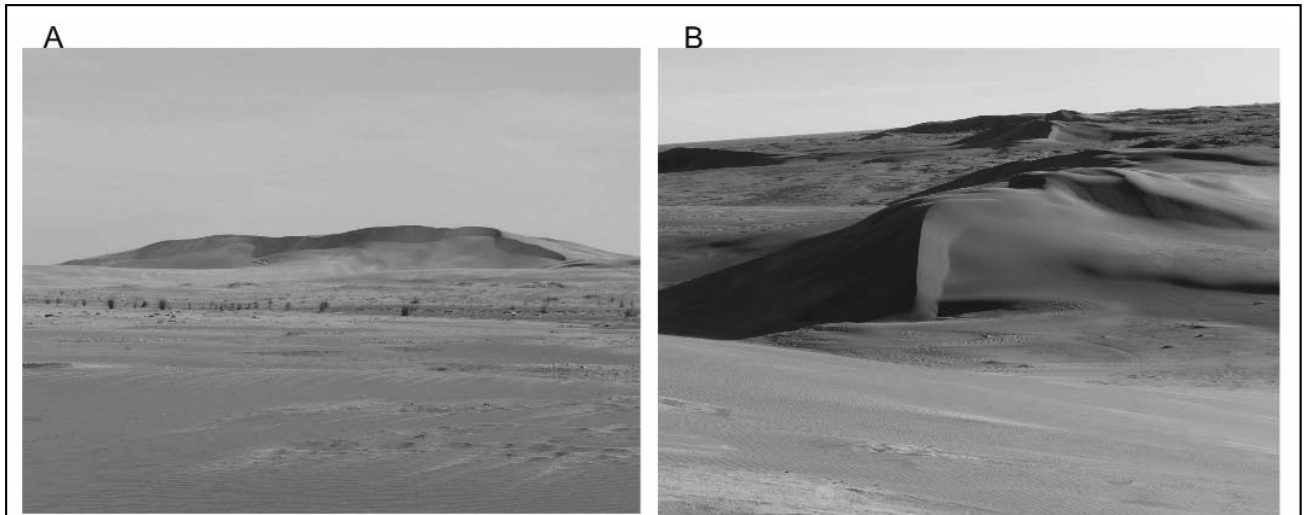


Figura 4. Perfil PB del tipo 1.

A) playas de 50 m de ancho muy extensas lateralmente con incipiente barra de lavado.

B) Vista desde la duna litoral, de las planicies de arenas eólicas controladas por sustrato duro en playa distal

Dado que el proceso eólico se ha reconocido como el factor predominante en la geomorfología, el tipo de perfil de playa permite inferir ciertos procesos de interacción playa-duna (Psuty, 1988) en sectores de la zona costera. Así en el caso de las playas de tipo 1, pequeñas dunas barchan de hasta 20 cm de altura se movilizan por la planicie retroalimentando la playa. En el tipo 2, tormentas con grandes olas toman arena directamente de las dunas complejas saturando el flujo de la deriva litoral. En el tipo 3, coincidente con la zona urbanizada, se ha registrado una densidad alta de bloques de tosca meteorizada formando un tipo de pavimento en la playa distal. Además se descubre intermitentemente afloramientos de plataforma de abrasión que según la percepción de algunos habitantes es cada vez mayor. Estos hechos constituyen indicios de desbalance hacia la erosión en la disponibilidad de arena.

El campo de dunas activo

En la zona los depósitos eólicos apoyan directamente sobre una superficie de erosión labrada sobre los sedimentos del Pampeano, la cual posee una leve inclinación hacia el mar. Se distinguió, además, en el sector interdunal la meteorización de estas sedimentitas pampeanas en bloques, conformando pavimentos del desierto.

A continuación se describen las tres geoformas principales del campo de dunas activo que es el más importante en la interacción Playa-Duna, por ser la fuente de arena para recarga de la playa y por que es la unidad que ha sido colonizada por la urbanización:

1 Planicies de progradación eólica

Son planicies arenosas que pueden extenderse de 50 a 500 m desde la playa distal hacia el NO, de escasa o nula vegetación constituidas por dunas incipientes formadas por montículos de arena. Estas planicies se encuentran a una cota de entre 3 y 8 m.

Inmediatamente al SO del Médano 40, límite de la localidad Balneario Orense, se han reconocido tres cordones de dunas costeras relicticas (*foredune*) (Figura 5). Uno de ellos ubicado a unos 400 m, otro a 200 m y otro a 150 m de la línea de costa actual. El cordón interior se encuentra estabilizado por la vegetación, mientras que el segundo y tercero están parcialmente vegetado por matas aisladas de *Spartina ciliata*.



Figura 5. Planicies de progradación eólica. Se registraron tres pulsos de progradación que presentan distinto grado de cobertura vegetal I, II y III.

2 Megadunas complejas litorales

Son megadunas de 10 a 40 m de alto aisladas o compuestas con una cara de barlovento extendida y convexa orientada al oeste, con dunas de menor escala superpuestas de un metro de alto aproximadamente 6 a 8 m de ancho y 3 m de largo. Cortizo e Isla (2007) clasificaron estas dunas como crestas transversales a barchanoides. En el presente trabajo se han estudiado con mayor detalle esta morfología de dunas, reconociéndose que las mismas conforman dunas complejas formadas durante distintos ciclos de depositación. El flanco de barlovento inclina el 14,5° al oeste. El flanco de sotavento de estas dunas esta compuesto por una cresta principal de 342° de azimut que inclina 30,7° al este, respondiendo a los vientos del oeste más frecuentes (y por ende también aproximadamente perpendicular a la línea de costa). Brazos longitudinales a la línea de costa, de menor tamaño, se adosan a esta cara principal (Figura 6B) en número de uno, dos o tres. Estas unidades tienen algunas características de dunas longitudinales reversibles funcionando indistintamente por separación de flujo con vientos del oeste o

invirtiendo su cara de deslizamiento dependiendo de la frecuencia e intensidad de los vientos del norte o sur (Figura 6C). Se ha observado también que se desplazan y cambian estacionalmente generando geformas semejantes a dunas en estrella (Figura 6 A y B).

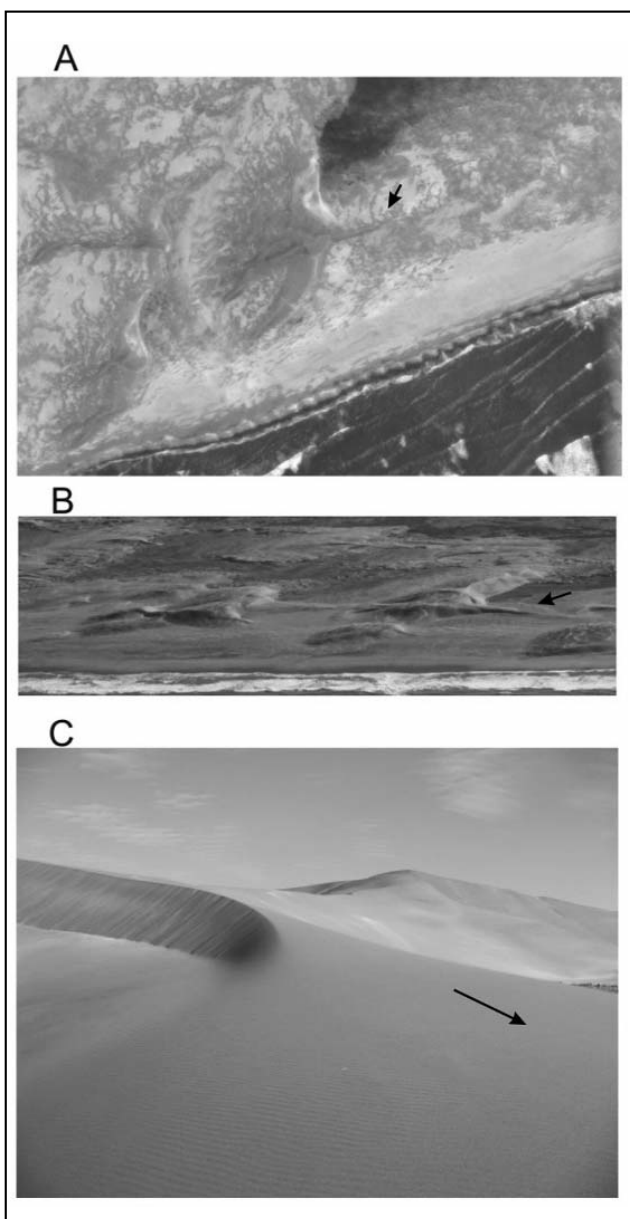


Figura 6. Megaduna litoral compleja. Se señala con flecha los brazos o cuernos desde distintas perspectivas.

A) Imagen satelital que muestra variaciones estacionales que modifican los brazos formando una duna tipo estrella.
B) Vista aérea. Nótese los cuernos o brazos longitudinales.
C) Acercamiento al brazo longitudinal desde la playa. Atrás la cara principal de avalancha.

Se ha determinado por comparación con fotografías aéreas del año 1984 que las dunas complejas carecen de movilidad, lo que permite inferir, junto con la observación de arena húmeda destapada durante fuertes vientos *in situ*, que solo una parte superficial de la arena está en movimiento y que el resto de la duna es un núcleo húmedo (*"wet core"*, en Hesp y Thom, 1990). Es decir la megaduna tiene arena activa pero se encuentra

estabilizada en profundidad por la cohesividad que ejerce la humedad en el sedimento. Es de esperar que con una sucesión de años secos, el núcleo húmedo se reduzca y sea posible que la megaduna migre.

3 Dunas longitudinales

Están en una posición más distal de la playa que las anteriormente mencionadas dunas complejas. Su perfil transversal es simétrico y tienen unos 10 metros de altura y 120 m de largo (Figura 7A). Su cresta es sinuosa con orientación, aproximadamente oeste este, paralela a la línea de playa, se las denomina en el presente trabajo como dunas longitudinales ya que la composición de vientos predominante en la zona forman ángulos de aproximadamente 45° con respecto al eje longitudinal. Poseen un núcleo húmedo y la cresta (Figura 7B), es la parte móvil reversible. Las interdunas son de granulometría gruesa de conchillas dado por un proceso deflacionario tipo "pavimento del desierto".

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En una secuencia de 33 años se reconocen los elementos producto del crecimiento urbano (Figura 8) es notable como el desarrollo fue realizado hacia la línea de costa invadiendo el campo de dunas activo. También se observa como en los alrededores del Balneario Orense hay una degradación generalizada del paisaje de dunas por avance de la vegetación. A la vera del camino que llega a Balneario Orense puede detectarse hacia 2006 el campo de dunas erosionado por la explotación de áridos. Una de las canteras es utilizada en la actualidad como el lugar de disposición final de residuos domiciliarios, excepto durante la temporada de verano en la que los residuos son transportados al basurero del pueblo de Orense. Se puede estimar que el área de alteración inducida por el hombre, por nuevos loteos, avance de vegetación alóctona, calle costanera, etc. se ha duplicado en el lapso de 33 años.

Consejos surgidos de la práctica de manejo costero en otras localidades indican que conviene no ocupar permanentemente zonas altamente dinámicas. En Villa Gesell, por ejemplo, la principal causa de erosión se debe al desbalance sedimentario en las corrientes litorales, intensificado por la acción directa e indirecta del hombre. En los inicios de 1990 se comienzan a percibir las primeras evidencias erosivas, especialmente relacionadas con los sectores céntricos de esta localidad, en respuesta fundamentalmente a un desbalance en el equilibrio entre el sistema de dunas y la playa producido por la urbanización (Marcomini y Lopez, 2007).

Los impactos ambientales reconocidos en la zona responden a tres factores principales: la urbanización, el turismo y la explotación de los recursos naturales. La urbanización presenta como principales alteraciones, la forestación de una megaduna litoral, la ocupación de terrenos bajos anegables, el loteo de terrenos frente a la playa, y la contaminación subterránea de suelos y aguas por no poseer una eficiente gestión de residuos sólidos e inexistencia de cloacas. Como causas específicas que pueden exponer la erosión costera en un futuro, relacionadas al turismo y la recreación, se identificó: el entoscamiento de la calle costanera y la ampliación de la misma, la circulación vehicular y la construcción sobre la playa distal como potenciales factores de alteraciones. Por otro lado la forestación de pinos, la explotación de áridos y la realización de canalizaciones para desagotar las lagunas del interior de la planicie de acreción loésica se identificaron como impactos



Figura 7. Dunas longitudinales
A) Vista desde la playa al NNO, cresta sinuosa.
B) Vista al Oeste, el perfil simétrico con cresta reversible.

asociados a actividades económicas y explotación de recursos naturales. El gran incendio en la forestal ocurrido durante el 2006 indica la necesidad de un manejo de este recurso. Se aconseja una extracción de los individuos juveniles (reclutas), realizar cortafuegos, y otras medidas para evitar la sobrecarga de material combustible en el suelo.

Las acciones más importantes a tener en cuenta de forma inmediata son: establecer un límite de edificación que respete el borde entre el campo semiactivo y activo; No modificar cauces o bajos para no favorecer el escurrimiento de aguas superficiales sobre la playa y planicie posterior, y el consecuente consumo de arena; Proteger la playa distal con vegetación de *spartina* ayudará a conseguir un balance positivo de arena por acumulación y evitará que se forme un pavimento de clastos de sedimentitas pampeanas sobre playa distal y planicies eólicas.

El relevamiento periódico de los perfiles de playa ha demostrado ser una potente herramienta de investigación para la toma de decisiones de manejo en otras localidades de la costa atlántica (Marcomini y Lopez, 1997). En el capítulo geomorfológico Quesada (2008) se presenta el primer antecedente de

levantamiento de tres perfiles de playa en Balneario Orense y se recomienda continuar con los mismos de forma bianual.

El estado incipiente de alteración del medio físico costero se presenta como una oportunidad para comenzar un programa de manejo costero a bajo costo, con estrategias orientadas a la regulación y prevención. Preservar la playa debe ser considerado como un gasto continuo, que en general, puede ser modesto si se lo comienza con tiempo (Panario y Gutierrez, 2006) y en este punto radica la importancia de tratar este capítulo en Balneario Orense donde las evidencias de erosión son apenas incipientes. De esta manera es importante analizar puntualmente cada acción que pueda tomarse como medida preventiva o correctiva en vistas a un crecimiento urbano.

CONCLUSIONES

Dado que las alteraciones ambientales inducidas por el hombre en la localidad aún no ocasionan procesos erosivos costeros, esto se presenta como una oportunidad para comenzar con estrategias para la realización de un programa de manejo costero a bajo costo sin la necesidad de aplicar medidas correctivas importantes sino que de forma preventiva reconocer los riesgos, determinar los recursos, y generar una planificación sustentable.

Se identificaron las alteraciones que están suscitando la urbanización, con problemas específicos como la estabilización de megadunas, loteo de terrenos frente al mar, ocupación de bajos anégaes y gestión de residuos; el turismo, con la circulación vehicular, la construcción de instalaciones recreativas en playa distal, ampliación de camino costanero; y causas específicas relacionadas a la explotación de recursos naturales como: extracción de áridos, canalizaciones para desagotar los campos y forestación de pinos con fines económicos.

Las principales recomendaciones son: vegetar la playa distal de Balneario Orense con *spartina*, trazar una línea de no edificación que incluya al campo de dunas activo, realizar un manejo sobre los terrenos forestados para evitar su ampliación y mantener un monitoreo periódico de perfiles de playa.

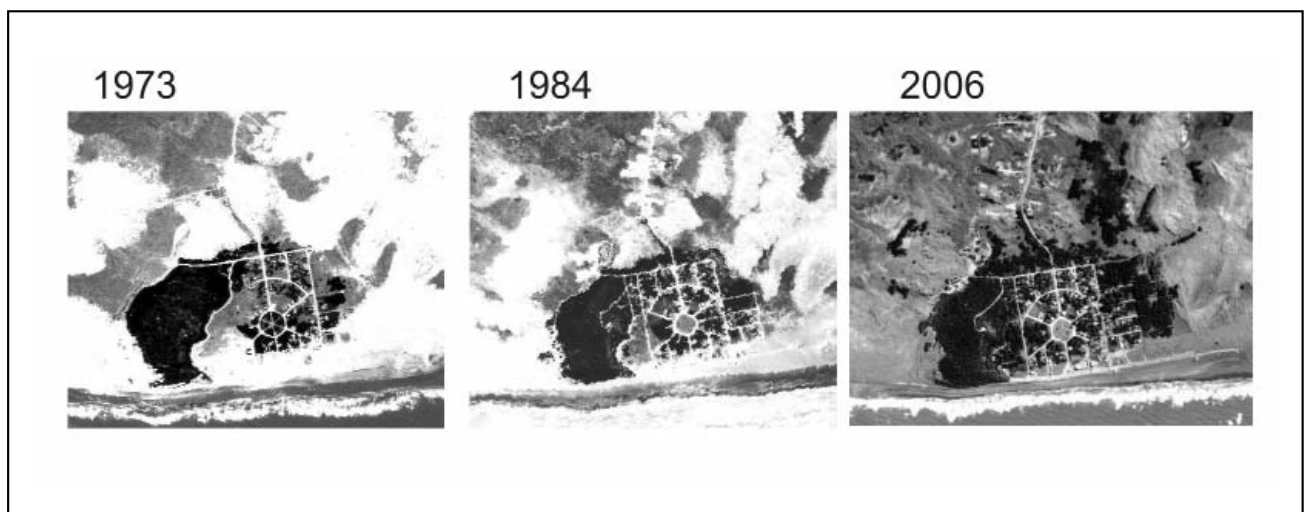


Figura 8. Evolución de la urbanización del Balneario Orense: Fotografías aéreas de 1973, 1984 e imagen satelital del 2006.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ANGELELLI, V. Y E. CHAAR, 1969.
Los Medanos del Area de Claromecó su Investigación por Circón.
Cuartas Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 1: 35-45.
- CÁBANA, M. C., LANFRANCHINI, M., M.TESSONE, 2005.
Depósitos Detríticos de Hierro, Titanio y Circonio Del Litoral Atlántico Bonaerense.
Relatorio Congreso Geológico Argentino XVI, La Plata 2005. PP 375-385.
- CHAAR, E. Y R. O.TOUBES, 1978.
El contenido en zircon de las dunas sita al oeste de Orense (prov. de Buenos Aires).
VII Congreso Geológico Argentino, Neuquén 1978. Actas, II: 673- nn
- CORTIZO, L. C. E F. I. ISLA, 2007.
Evolución de la barrera medanosa entre los arroyos Zabala y Claromecó,
Partidos de San Cayetano y Tres Arroyos, Buenos Aires.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 62 (1): 03-12.
- JUÁREZ, I. V. Y J. M. MANTOBANI, 2006.
La costa bonaerense: un territorio particular.
En Isla y Lasta (eds) Manual de manejo costero para la provincia de Buenos Aires. Universidad de Mar del Plata, 2006. 280 pp.
- HESP, P., B. G. THOM, 1990.
Geomorphology and evolution of active transgressive dunefields.
En "Coastal Dunes: Form and Process" Nordstrom, Psuty, Carter (eds) Capt. 12.: 253-289. John Wiley & Sons Ltd.
- LÓPEZ, R. A. Y S. C. MARCOMINI, 2000.
Geomorfología y ordenamiento territorial del sector comprendido entre la ciudad de Miramar
y el arroyo Nutria Mansa, partido de General Alvarado.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, 5 (3): 251-264.
- MARCOMINI, S. C. Y R. A. LÓPEZ, 1995.
Strategies for the coastal management of Villa Gesell, Argentina.
Proceedings of the Conference on Coastal Change'95, Bordomer 95, 819-831.
- MARCOMINI, S. C. Y R. A. LOPEZ, 1997.
Influencia de la urbanización en la dinámica costera, Villa Gesell, provincia de Buenos Aires, República Argentina.
Asociación Argentina de Sedimentología. Revista 4: 79-96.
- MARCOMINI, S. C. Y R. A. LOPEZ, 2007.
Erosión y manejo costero de Villa Gesell.
1era ed. Villa Gesell: Unión por Gesell, 2007. 1CD-ROM.
- MARCOMINI, S. C., QUESADA, A., R. A. LOPEZ, 2008.
Modelo evolutivo de costas erosivas con progradación eólica, Orense, provincia de Buenos Aires.
XII Reunión Argentina de Sedimentología. 106pp.
- MARTINEZ, M. L., PSUTY N. P., R. A. LUBKE, 2004.
A perspective on Coastal Dunes.
Ecological Studies, Vol. 171. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004. 14pp.
- QUESADA, A. 2008.
Geología Costera de Balneario Orense y Alrededores.
Trabajo Final de Licenciatura. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires (inédito), 107pp., Buenos Aires
- PANARIO D. Y O. GUTIERREZ, 2006.
Dinámica y fuentes de sedimentos de las playas uruguayas.
En Menafra R Rodríguez-Gállego L Scarabino (eds) 2006. Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo. 668 pp.
- PSUTY, N.P. (ED). 1988.
Dune / beach interaction.
Journal of Coastal Research, Special Issue 3, 136 pp.
- TERUGGI, M. E., CHAAR, E., REMIRO, J. R. Y T. LIMOUSIN, 1959.
Las arenas de la costa de la provincia de Buenos Aires entre cabo San Antonia y Bahía Blanca.
L.E.M.I.T., La Plata.



Lavas torrenciales (huaycos) y ¿cambio climático? En el cañón de Torontoy (cuenca media del río Vilcanota-Urubamba)

Cusco - Perú

Carreño C., Raúl

Recibido: 07 de diciembre 2009 • Aceptado: 26 de abril de 2010

Resumen

El cañón de Torontoy, tramo en el que el río Vilcanota-Urubamba cruza el núcleo de la Cordillera Oriental de los Andes, además de su importancia turística y energética (allí se encuentran la ciudad inka de Machupicchu y la hidroeléctrica del mismo nombre) es también escenario de frecuentes fenómenos hidrogeodinámicos que, en repetidas oportunidades, han causado grandes daños a la economía regional. Es común oír que las lavas torrenciales (huaycos) y deslizamientos de las décadas recientes se deben a los ENSO (El Niño Southern Oscillation) y al calentamiento global que, por el efecto invernadero, afecta a nuestro planeta. El análisis y la correlación de diversos factores morfoclimáticos específicos para esta zona y para cada evento catastrófico, ponen en duda dichas aseveraciones, apuntando más bien a una conjunción de factores estacionales y circunstanciales dentro de un contexto geoecológico altamente favorable a la ocurrencia de tales fenómenos. Estadísticamente no hay una mayor frecuencia de temporadas de Niño ni se ha notado un incremento en la ocurrencia de desastres en los últimos 70 años; sin embargo, no es posible descartar que el cambio climático tenga un rol algo más activo en el futuro, si se prueba que influye en la frecuencia e intensidad de los ENSO.

Palabras clave: Lava torrencial, deslizamiento, cambio climático, desastre natural, río Vilcanota-Urubamba.

Abstract

The Canyon of Torontoy, where the Vilcanota-Urubamba River crosses the heart of the Eastern Andes Range, apart their energetic and tourist importance (the Inka citadel and the power plant of Machupicchu are there) is also frequently threatened by hydro-geodynamic phenomena, which cause great damage to the regional economy. It is common to hear that the debris flow (huaycos) and landslides occurred during the last decades are due to ENSO and to global warming by the greenhouse effect. But the analysis and correlation of diverse morpho-climatic factors, specific for this area and for each catastrophic event, put in doubt such relationships, pointing on the contrary to a conjunction of seasonal and circumstantial factors within a geoecological highly prone natural context for the occurrence of this kind of phenomena. Statistically, there is not a rise neither in the frequency of Niño seasons nor in the occurrence of disasters during the last 70 years; however, it's not reasonable to discard an eventual increased role of those factors in the future, if the relationship between the climate change and the frequency and intensity of the ENSO is proved.

Keywords: Debris flow, landslides, climate change, natural disaster, Vilcanota-Urubamba River-

Grupo AYAR - Cusco - PERÚ.

✉ E-mail: raulcarreno@ayar.org.pe

ANTECEDENTES

En los últimos años, varios eventos catastróficos causados por lavas torrenciales (*Debris Flow*, a menudo confundidos con los llamados *Flash Floods*), conocidas en el Perú como *huaycos*, han causado severos daños a la economía regional en el Cusco. Los más llamativos y destructores fueron los ocurridos en el cañón de Torontoy, en el curso medio del río Vilcanota-Urubamba, en las cercanías del más importante centro arqueológico de América, Machupicchu. Los de 1998 destruyeron la Central hidroeléctrica que abastece de energía a la región.

Los diversos estudios realizados coinciden en señalar que las causas desencadenantes fueron las lluvias intensas pero que la causa de fondo era el cambio climático derivado del calentamiento global o efecto invernadero. Nada prueba fehacientemente esta socorrida hipótesis. Un análisis algo más detenido de las evidencias existentes muestra que la génesis de tales eventos fue variada y muy difícilmente atribuible en conjunto a un proceso climático global.

El análisis de los eventos de Aobamba, Sacsara-Santa Teresa, Alcamayo, Aguas Calientes, Mandorpampa y Runtumayo muestra que el origen y comportamiento de los fenómenos fue diverso y que –a pesar de que la mayoría advinieron durante períodos ENSO– las circunstancias climáticas fueron diferenciadas; pues en ciertos casos respondieron a episodios aislados de mayor precipitación ocasional, mientras que en algunos, como en Runtumayo, no se dieron ni situaciones excepcionales de lluvia ni de cambio brusco de temperatura que pudiesen explicar de manera satisfactoria los eventos.

BREVE RELACIÓN DE LOS EVENTOS CATASTRÓFICOS DERIVADOS DE PROCESOS GLACIARES

Los desastres ocurridos entre 1997-1998 y 2005-2006 en las quebradas de Aobamba, Sacsara-Santa Teresa y Runtumayo, así como los menores de otros años, debieron su origen a flujos de alta energía genéticamente relacionados con la ruptura de serajs, producto, a su vez, del avance de los glaciares de los nevados Salkantay-Palqhay y Huaqayhuillka, respectivamente, con caída de bloques de hielo en lagunas glaciares situadas a gran altura. Los flujos debieron salvar desniveles de hasta más de dos mil metros en distancias horizontales relativamente cortas (de 4 a 18 kilómetros). Con la información existente (no hay registros de la dinámica de glaciares) no es posible establecer si la causa de estas rupturas fue el avance derivado de la dinámica natural de las masas de hielo o algún proceso de ablación acelerada por el calentamiento global.

Aobamba

El 12 de julio de 1996, en pleno estiaje, se produjo un huayco originado por ruptura de serajs, con el consecuente desborde de la laguna glaciar de Sisaypampa, causando la muerte de cinco personas. El 27 de febrero de 1998, el 12 de marzo dos huaycos, tras recorrer unos 18 kilómetros, embalsaron el río Urubamba, formando un dique de aproximadamente 70 metros de altura, destruyendo buena parte de la central hidroeléctrica de Machupicchu, varios puentes y un largo tramo del ferrocarril Cusco-Quillabamba, inhabilitado hasta la fecha.

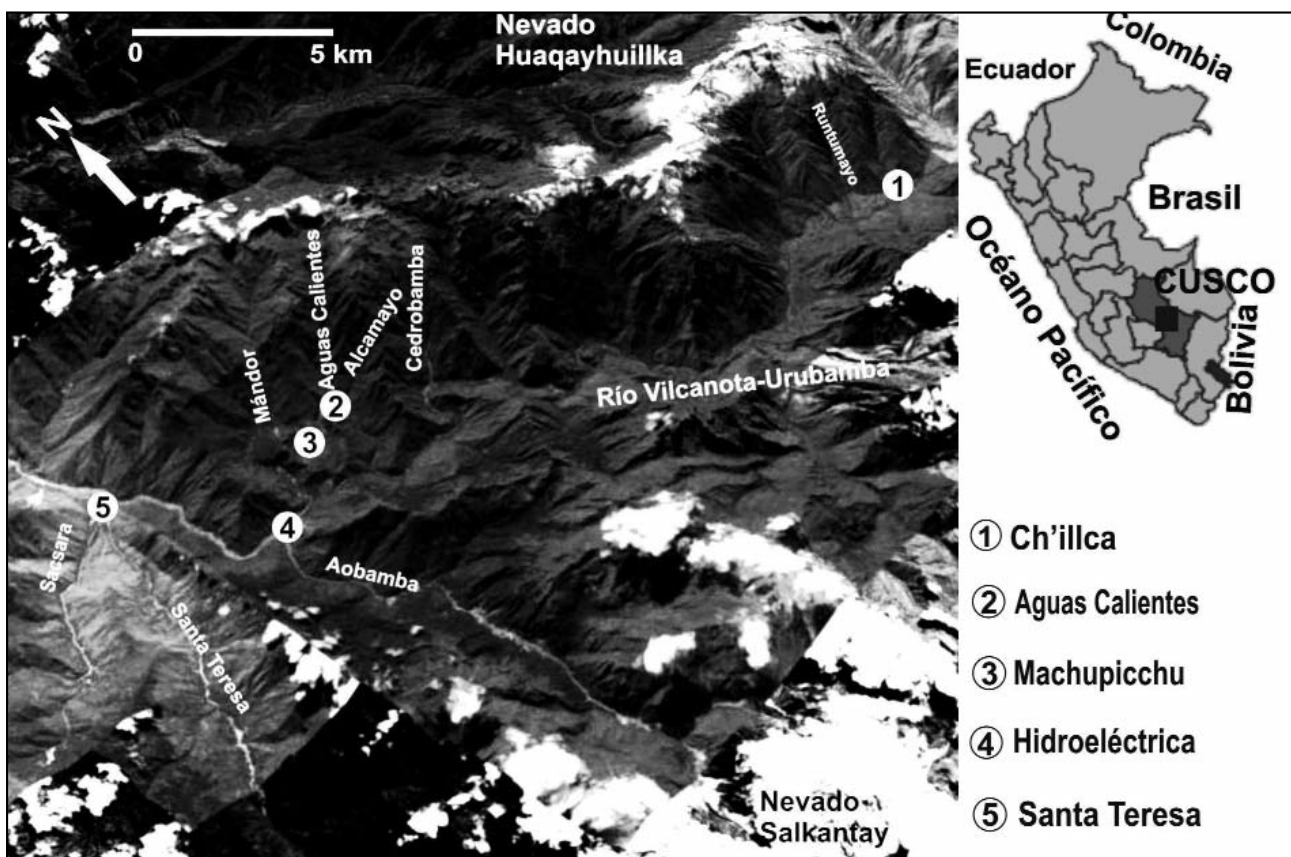


Figura 1. Ubicación y vista Google Earth del cañón de Torontoy.

El factor desencadenante fue otro desborde lagunar moderado que, de algún modo, aceleró un deslizamiento en la morrena frontal que le sirve de dique; el flujo fue realimentado por la erosión de anteriores depósitos aluviales y por la aceleración de deslizamientos pre-existentes, que generaron procesos consecutivos de embalse-desembalse en todo su trayecto.

El 22 de noviembre del mismo año, un tercer aluvión, también de origen glaciar, cerró este ciclo.

Sacsara-Santa Teresa

Este poblado situado a diez kilómetros aguas abajo de Machupicchu fue arrasado el 13 de enero de 1998 por una peculiar lava torrencial generada en la quebrada de Sacsara y que a manera de pulsos sucesivos se extendió por más de doce horas. También la causa fue un desborde lagunar por caída de hielo y roca de un glaciar del nevado Chaupimayo, que, de un modo aún no esclarecido, coincidió o agravó un problema de inestabilidad que se tradujo en un deslizamiento que involucró material morrénico que, como en el caso anterior, fue realimentado luego por distintos depósitos aluviales existentes a lo largo de la quebrada, incluyendo deslizamientos subactivos. El factor glaciar desencadenante fue atenuado y no hubo

grandes embalses sino, sobre todo, reactivación o aceleración de deslizamientos por erosión de pie; eso explica su larga duración y su mecanismo de pulsos sin un real *máximo* paroxístico de mayor energía, aunque el primer pulso se aproximase en algo a esa categoría. El 27 de enero ocurrió otro evento de menor magnitud.



Figura 2a. Laguna morrénica al pie del nevado Salkantay mostrando el efecto de rebalse por caída de masas de hielo que produjeron uno de los huaycos de Aobamba (foto: EGEMSA).



Figura 2c. Curso medio del río Aobamba con los efectos del paso de la lava torrencial de 1998; ambos flancos están afectados por deslizamientos subactivos.

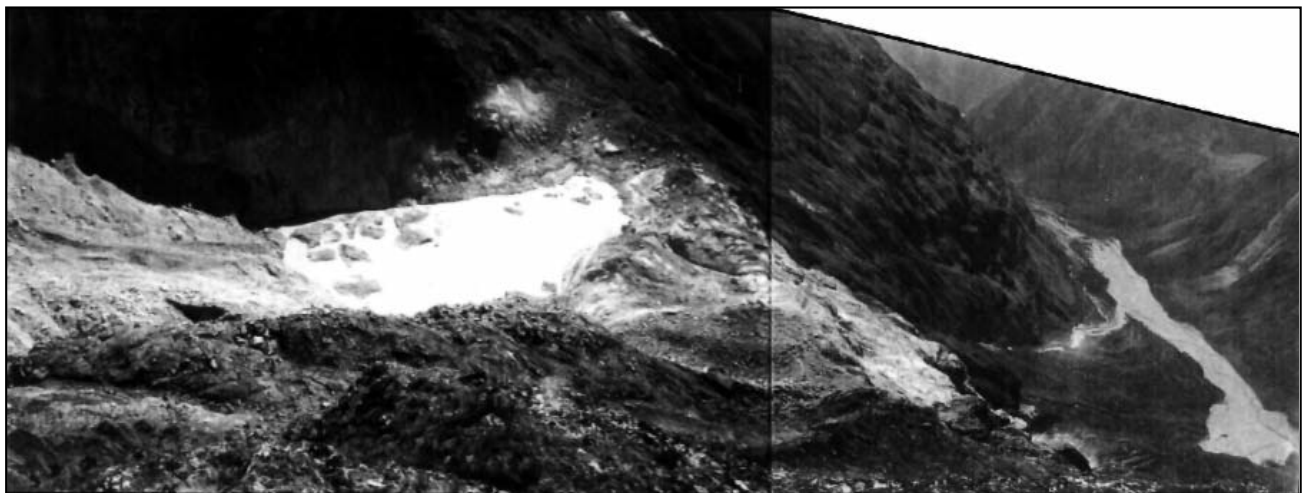


Figura 2b. Laguna de Sisaypampa, con remanentes de hielo y roca que produjeron su rebose y posterior aluvión (foto: EGEMSA).

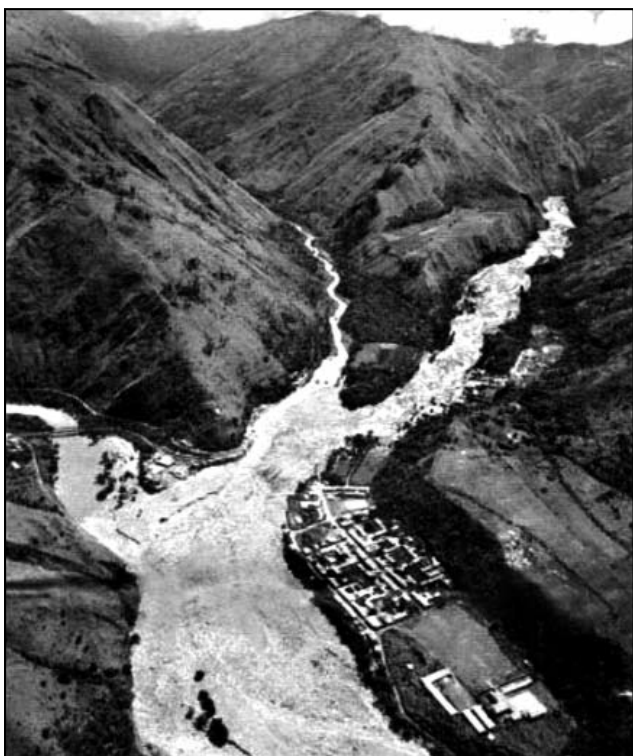


Figura 3. Foto de un diario local mostrando el aluvión de Sacsara. Abajo, a la izquierda, se ubicaba el antiguo pueblo de Santa Teresa. A la derecha, el pueblo nuevo construido a partir de 1998.

Runtumayo

El 11 y el 19 de octubre del 2005 y el 17 de enero del 2006 se dieron tres episodios de lavas torrenciales de relativamente menor magnitud provenientes del nevado Huaqayhuillka. El primero y más potente, represó al río Vilcanota, destruyó dos puentes, un tramo de la vía férrea, infraestructura de riego y algunos terrenos de cultivo. El acceso turístico hacia Machupicchu fue cortado o restringido durante varios días. A diferencia de los casos anteriores, no intervinieron aquí deslizamientos; pues el río corre por un estrecho cañón abierto entre un flanco rocoso estable y una potente morrena que antiguamente cubría toda la quebrada. Sólo la erosión de antiguos depósitos aluvia-



Figura 4. Embalse del Vilcanota-Urubamba, producto del huayco de Runtumayo.

les y fluvio-glaciares de la zona de transición del cañón hacia el cono aluvial de Runtumayo-El Palomar proveyó de material adicional a la lava torrencia, que, iteramos, fue de magnitud bastante moderada, lo cual condice con la granulometría media a fina del material aluvial, con relativa escasez de bloques mayores; los más grandes observados apenas superan los 2 m^3 . El embalse se extendió unos 600 metros, reteniendo unos 30.000 m^3 de agua, con una profundidad máxima de 7 a 8 metros.

Estos eventos del Huaqayhuillka se dieron en una temporada de alto déficit de precipitaciones (62%) y con temperaturas mínimas algo más elevadas pero en promedio muy cercanas al módulo histórico (figura 14). En las semanas previas al desastre, la temperatura media mínima estuvo casi 2°C por encima de la media histórica, mientras que la temperatura media máxima se mantenía casi 2°C por debajo de su promedio y sólo un día antes alcanzó a igualar dicho nivel (SENAMHI 2005). Por el lado del balance térmico, esto desmiente las conclusiones de ciertos informes oficiales que aseguraban que hubo un incremento de la temperatura desde antes, lo que habría causado un alud de nieve, el mismo que habría provocado el huayco. Es cierto que nevó horas antes, pero el incremento de temperatura se dio con posterioridad al desastre; de todos modos, por razones de temperatura específica y por el factor orográfico, era imposible que se diese una reacción tan rápida como para provocar un alud; es más, los aludes de nieve responden a mecanismos más complejos y no sólo al aumento de la temperatura, cuyo efecto, para un ambiente glaciar (y no periglaciar, como asumen los informes oficiales), es más atenuado a esa altitud.

Nuestros cálculos muestran que la acumulación promedio de nieve en esos días alcanzó $7,1 \text{ litros/m}^2$, con un pico de $14,04 \text{ litros/m}^2$, si tomamos el factor orográfico para una altitud de 4800 m s.n.m. , cantidades insuficientes como para justificar un fenómeno como el del 11 de octubre. Los parámetros meteorológicos de las semanas precedentes al desastre (en especial del factor clave para aludes de nieve que es la temperatura mínima) se mantuvieron más o menos constantes y próximos a las medias históricas; así, el marco climático previo era muy desfavorable para un alud, por lo que la hipótesis de un huayco producido por un alud de nieve debe ser completamente descartada.

Los eventos subsecuentes de diciembre 2005 y enero 2006 se dieron bajo condiciones normales de lluvia y temperatura, lo cual refuerza la teoría de que los huaycos fueron inducidos por la ruptura de glaciares como producto de su natural dinámica; las masas de hielo se rompieron al atravesar un hombro glaciar o umbral rocoso con cambio de pendiente.

Algunos habitantes de los sectores El Palomar y Olmirón recuerdan otro huayco de modesta magnitud que habría ocurrido hacia el período 1948-1951; del mismo modo, en un interfluvio de las vecinas quebradas de Huayt'ampu y Tiaparo, observamos los restos de otro flujo de hielo y sedimentos que no alcanzó el fondo de sus valles; por su magnitud y al no contar con información específica ni con fechas precisas de ocurrencia, obviamos su análisis.

EVENTOS GENERADOS POR DESLIZAMIENTOS

Varios reportes atribuyen el origen de muchos huaycos a procesos de saturación y fluidización de suelos, siguiendo las teorías y modelos informáticos muy de moda en los últimos tiempos. Como es sabido, estas modelizaciones se sustentan en la correlación de elementos como espesor del suelo, cubierta vegetal, precipitaciones, balance hidrológico, índices de

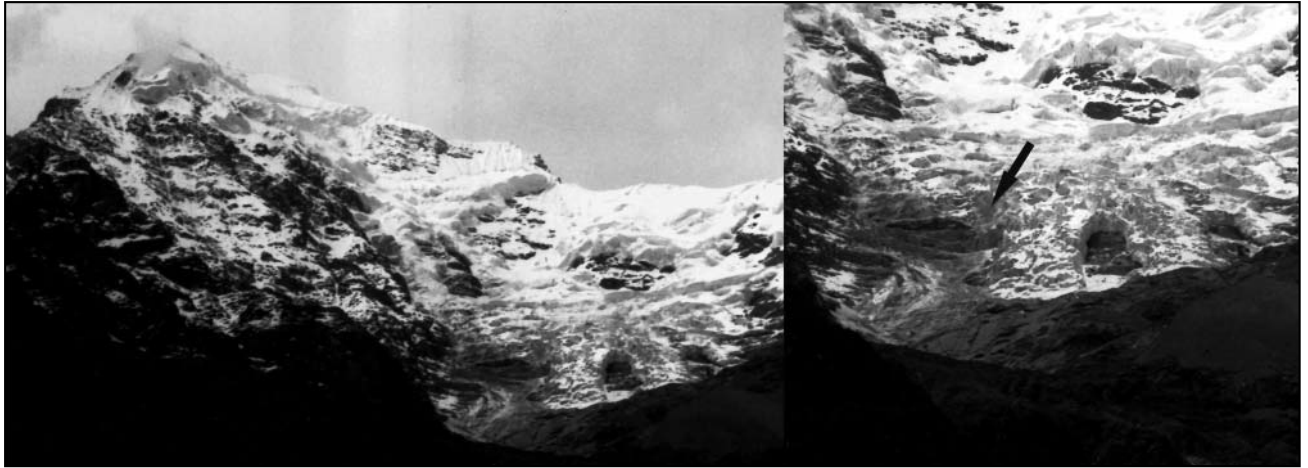


Figura 5: Nevado Huaqayhuillka y detalle del frente glaciar que produjo la lava torrencial de Runtumayo.

pendiente, etc., siendo aplicadas errónea e indiscriminadamente hasta para evaluar la susceptibilidad y los peligros por flujos de lodo y lavas torrenciales. Hay casos más graves (como el de los estudios hechos para Aguas Calientes), donde se han aplicado incluso simples modelos de crecida-inundación para evaluar peligros por lavas torrenciales.

Dichos modelos conllevan algunos prejuicios que los tornan inconsistentes y aun inaplicables para casos de deslizamientos de larga evolución, lentos y permanentes, como son la gran mayoría de casos de la cuenca media del Vilcanota y de otros ambientes similares. Esto, las evidencias de campo así como la naturaleza de los flujos demuestran que las causas no tuvieron mayor relación con la saturación-fluidización de suelos, pues está comprobado que tales flujos derivaron de episodios de aceleración paroxística y ruptura violenta de deslizamientos subactivos pre-existentes. En todos los casos, tal aceleración involucró sólo a los bloques inferiores y no al íntegro de las masas deslizantes.

Debemos destacar que, excepto el caso de Runtumayo, en todas las quebradas analizadas, incluso donde los huaycos fueron producto de actividad glaciar, los deslizamientos han jugado un rol preponderante, ya sea como causantes directos de las lavas torrenciales o contribuyendo a su desarrollo mediante el represamiento de los cañones.

Aguas Calientes

Ha sido la cuenca geodinámicamente más activa de los últimos tiempos, con por lo menos doce huaycos de diversa magnitud registrados en los años 1946, 1950, 1961, 1970, 1995, 1997 y 2007. Este hecho se explica por la existencia en su cuenca de varios grandes deslizamientos en diferentes estadios dinámicos, no pocos bastante activos. Son éstos los que, con cierta frecuencia, obturan el estrecho cañón y originan los huaycos que, en épocas anteriores no causaban daños o éstos eran de poca monta, debido a que o el pueblo del mismo nombre aún no existía (los inkas tuvieron la prudencia de no fundar ningún asentamiento en el lugar) o no pasaba de ser un campamento o era mucho más pequeño. Los gigantes bloques de granito y granodiorita que jalonan su cauce son una muestra suficiente de la magnitud de eventos anteriores que, sin duda, se repetirán en el futuro.

Este poblado —que es el centro de alojamiento y servicios para quienes visitan la ciudad inca de Machupicchu— ha experimentado un crecimiento urbano por demás irracional en un

cono aluvial compuesto formado por huaycos y altamente expuesto a ellos. Los trabajos preventivos (disipadores, peines, muros de encauzamiento y limpieza de cauce) han mostrado una efectividad muy menguada y en menos de dos años estuvieron completamente colmatados; de otro lado, sólo han sufrido el embate de un evento muy modesto (el huayco del 2007) y no es previsible su comportamiento ante un episodio mayor.

Alcamayo

El 10 de abril del 2004 ocurrió el más devastador evento de lava torrencial conocido hasta ahora, no por su magnitud (que fue relativamente menor) sino por sus efectos sobre el poblado de Aguas Calientes: once muertos, varias viviendas, un tramo de ferrocarril, dos puentes ferroviarios destruidos o dañados. Se formó una represa que elevó en algo más de tres metros el nivel del río Vilcanota-Urubamba.

Los procesos aluvionales de Alcamayo y Aguas Calientes, aunque debieron su origen a las intensas lluvias caídas en días y horas anteriores, tuvieron como causa intermedia y final la aceleración violenta de deslizamientos pre-existentes, que dieron lugar a diques temporales, cuya ruptura realimentó los huaycos. Al tratarse de cañones muy estrechos (hay tramos con menos de dos metros y zonas de cataratas), la obturación de los cauces se da de manera muy rápida y con poco volumen de detritos; los represamientos tampoco llegan a ser volumétricamente muy importantes; es la fuerte pendiente longitudinal de las



Figura 6. Uno de los deslizamientos de la cuenca de Aguas Calientes, cuya aceleración genera las frecuentes lavas torrenciales que afectan al pueblo del mismo nombre.



Figura 7. Algunos de los mayores bloques arrastrados por el huayco del 2004 en Alcamayo.

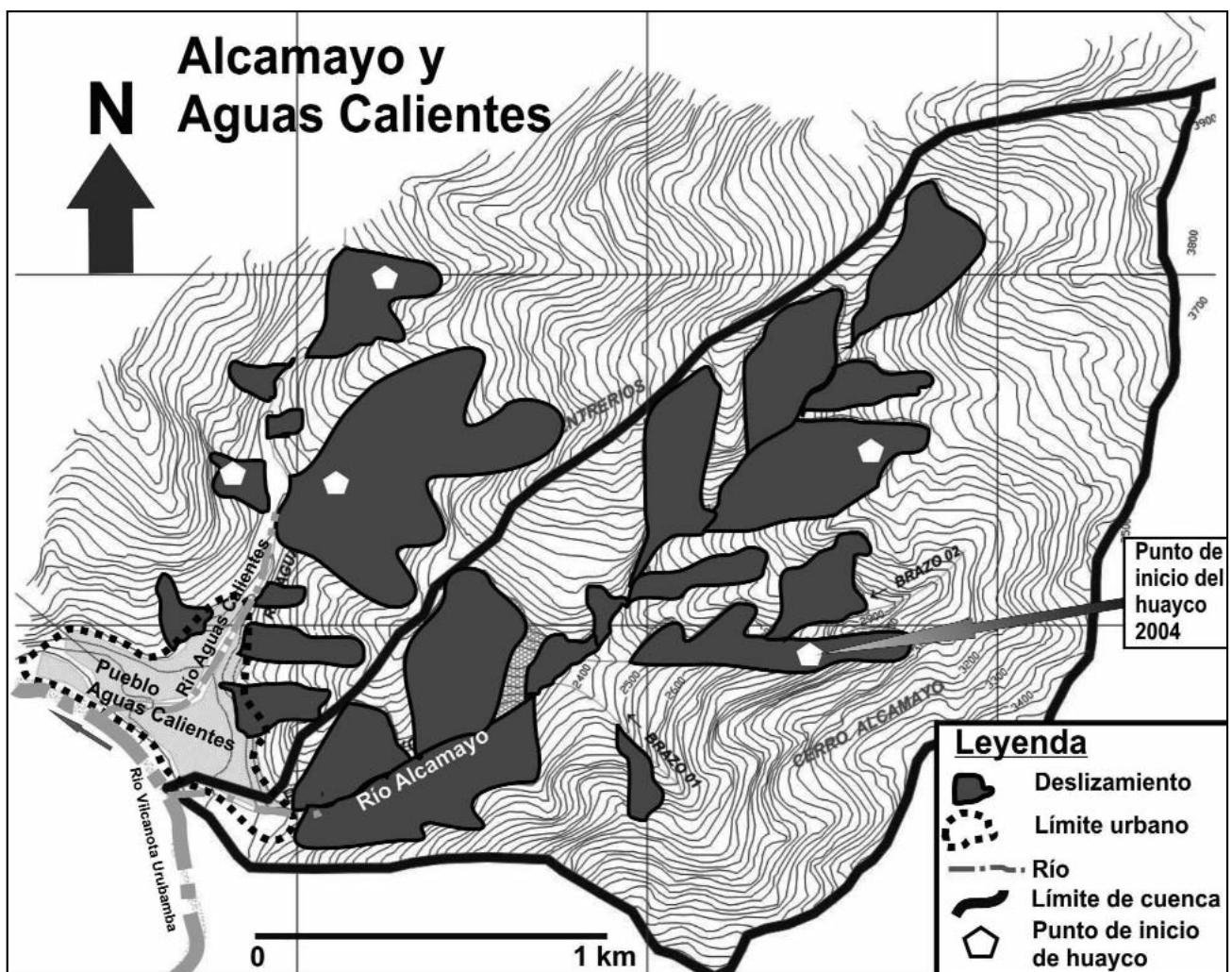


Figura 8. Mapa de deslizamientos de la cuenca de Alcamayo.

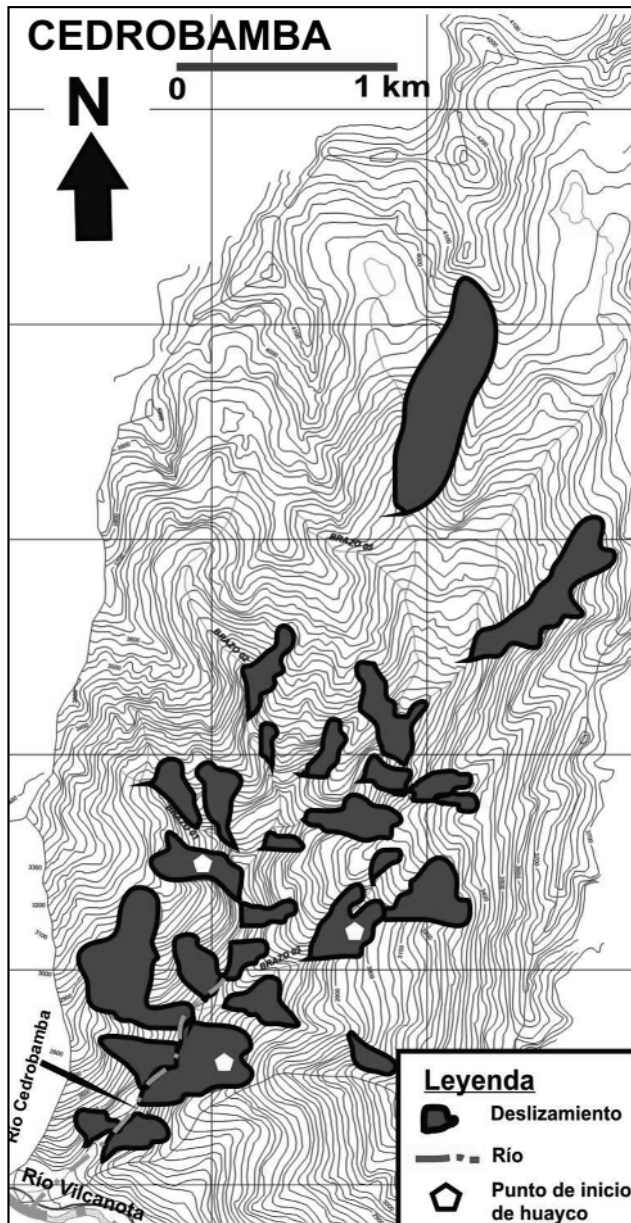


Figura 9. Mapa de deslizamientos de la cuenca Cedrobamba.

quebradas (0.72 de gradiente para Alcamayo y algo menos de la mitad para Aguas Calientes, aunque para un curso casi tres veces más largo) la que explica la enorme energía cinética y la consiguiente fuerza destructora de estos flujos, que en esta ocasión arrastraron bloques de hasta algo más de 200 TM, que, según su velocidad de llegada, desarrollaron energías totales de 12,000 a 51,000 kJ (Carreño y Kalafatovich 2004a). Eventos anteriores movieron bloques graníticos de más de 4,000 TM.

Cedrobamba-Leonchayoc

El 17 de enero, el 24 de marzo y el 10 de abril del 2004, tres huaycos de mediana magnitud destruyeron un tramo de ferrocarril, amenazando incluso la línea de alta tensión. Por ser prácticamente un despoblado no hubo víctimas. Al igual que en Alcamayo, la energía total desarrollada por algunos bloques arrastrados por el flujo superó los 50,000 kJ.

El factor desencadenante, aparte de las lluvias acumuladas, fue la formación de un deslizamiento-flujo en una ladera muy empinada que forma parte de un deslizamiento mayor y



Figura 10. Maquinaria pesada que al estar limpiando los aluviones del segundo episodio fue semi-enterrada por el tercer huayco de Cedrobamba.



Figura 11. Vista de la zona de llegada del huayco de Mandorpampa (foto: Cleto Quispe).

subactivo. En el trayecto se dieron los consabidos procesos de erosión, embalse-desembalse que, junto a un tramo de cataratas seguido por una llanura de poca pendiente, sirvieron para disipar la energía de la lava torrencial, por lo que su velocidad de llegada al cono aluvial fue atenuada y la mayor parte del material acarreado grueso quedó en el camino; gracias a ello, hubo poca dispersión-acumulación de los aluviones, sin que se haya producido un embalse propiamente dicho; sólo la fuerza erosiva del agua, con bastante carga sólida fina, erosionó la plataforma del ferrocarril (Carreño y Kalafatovich 2004b).

Mandorpampa

En el 2005 se dieron dos huaycos en esta quebrada que hasta entonces no había dado síntomas de mayor actividad. El primero obstruyó la ferrovía de acceso a la central hidroeléctrica e inhabilitó parte de un circuito ecoturístico. En lo posterior se han dado flujos menores y, en las cabeceras de la cuenca, se observan varios frentes de erosión y de reactivación-aceleración de deslizamientos.

CONDICIONANTE GEOMÓRFICO

Los casos analizados ocurrieron en el ámbito del llamado cañón de Torontoy, en el curso medio del río Vilcanota-Urubamba, cuando este cruza el batolito de Machupicchu, parte del cinturón batolítico de Vilcabamba, conjunto de plutones pérmicos ácidos a intermedios cuya composición es predominantemente granítica a granodiorítica, con presencia de otras rocas como tonalitas y abundantes diques de aplitas, cuarzozononitas y andesitas (Marocco 1978).

Por el condicionante litológico, el cañón muestra una fisiografía muy abrupta; por el factor estructural, los afloramientos rocosos, a pesar de su dureza y pronunciadas pendientes, son bastante inestables, existiendo una apreciable cantidad de deslizamientos gigantes y subactivos y abundancia de frentes afectados por *Toppling* y sensibles a derrumbes. Si a ello sumamos una historia tectorogénica que viene desde el Pérmico y acentuada durante la aún vigente orogenia andina, es fácil deducir un rico historial geodinámico.

El cañón carece en general de un fondo de valle, aparte de tramos con restos de terrazas fluvio-aluviales y conos aluviales no muy amplios. Abundan los farellones verticales a sub-verticales.

El perfil sedimentario de las terrazas y conos de deyección muestra claramente una larga sucesión de eventos aluviales con la típica composición granulométrica de los flujos de alta energía: una matriz con escaso contenido de arenas, limos, arcillas, horizontes edáficos muy poco desarrollados y abundancia de grandes bloques rocosos que, con frecuencia, superan las 100 toneladas.

Los pocos tramos donde se ve un piso plano de valle o terrazas más desarrolladas corresponden, en su totalidad, a embalses temporales causados por deslizamientos y, sobre todo, por huaycos provenientes de los afluentes del río Urubamba. Esto ha creado una sucesión de tramos algo menos torrentosos intercalados con otros donde abundan los rápidos, que son los restos de los antiguos diques efímeros.

Los parámetros morfométricos de cuenca confirman la estrechez de estas quebradas encañonadas y sus fuertes pendientes longitudinales, elementos contribuyentes a la alta susceptibilidad hidrogeodinámica de esta cuenca.

CONDICIONANTE HIDROCLIMÁTICO

Últimamente se ha hecho costumbre el establecer una relación casi automática entre desastres geodinámicos condicionados o desencadenados por factores hidroclimáticos y el llamado calentamiento global por el efecto invernadero. Por lo general, tal relación no cuenta con el sustento necesario que le otorgue plena validez, como sería el análisis temporal y de antecedentes, o, más sencillamente, la correlación entre la historia geodinámica de la zona y su estadística meteorológica.

La realidad muestra que son las condiciones locales, más que los factores globales, las que determinan la susceptibilidad y la ocurrencia de procesos hidrogeodinámicos. El cañón tiene un clima esencialmente húmedo, subtropical, con abundante vegetación y delgada cubierta edáfica.

Según cálculos regionalizados, las precipitaciones varían entre 1946 mm/año y 2002 mm/año, para las partes bajas, y alrededor de 1260 mm/año para cotas superiores a los 3000 m s.n.m., descendiendo hasta 741 mm/año a la entrada del cañón,



Figura 12. Ejemplo del muy abrupto e inestable relieve del cañón de Torontoy: a la izquierda, farallón afectado por procesos de toppling; derecha: uno de los frentes de origen de los huaycos de Aguas Calientes de 1998 y 2007.

Tabla 1. Morfometría básica de algunas de las cuencas del cañón de Torontoy

Cuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Longitud cauce (km)	Cota máxima (m s.n.m.)	Cota mínima (m s.n.m.)	Coefficiente Compacidad (k)	Ancho medio (km)	Factor de forma	Pendiente promedio
Aguas Calientes	15,52	19,82	8,5	4250	2010	1,42	1,5	sd	0,289
Alcamayo	3,40	9,10	2,70	3990	2045	1,38	1,28	0,47	0,542
Aobamba	135,9	sd	18,8	> 5000	1696	sd	2,4	sd	0,142
Cedrobamba	11,70	15,90	6,00	4400	2220	1,30	1,95	0,33	0,363
Runtumayo	-11 km ²	sd	4,8 km	> 5000	2714	sd	<0.4	sd	0,210
Sacsara	sd	sd	29	> 5000	1408	sd	2,4	sd	0,117

Fuentes: Plan MERISS 1994; Candia 1998; Carreño y Kalafatovich 2004a, b.

en Runtumayo-Chilca. Las temperaturas varían mucho, por la también grande variación altitudinal que supera los tres mil metros en casi todo el cañón.

A pesar de que la información meteorológica cubre un período corto, menor a los 50 años, se puede inferir, con precauciones, una cierta estabilidad de los parámetros climáticos, algo que se trasluce en los cálculos de caudales máximos y períodos de retorno que para los últimos quince años han dado resultados como:

Aguas Calientes: 49,5, 58,2, 60,2, 63,8, 69,0 y 75,7 m³/s para períodos de retorno de 10, 25, 50, 100, 200 y 1000 años, respectivamente (Candia 1998; PROFONAMPE 2000).

Alcamayo: 10, 13, 16 y 18 m³/s para períodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años (Carreño y Kalafatovich 2006a).

Aobamba: 160, 180, 200 y 220 m³/s para 10, 25, 50 y 100 años. Los caudales mensuales varían entre 1,9 y algo más de 10 m³/s (EGEMSA 1997).

Cedrobamba: 27, 30, 38 y 42 m³/s para 50, 100, 500 y 1000 años (Carreño y Kalafatovich 2006b).

Runtumayo: 1,7, 4,3 y 13,7 m³/s para períodos de 10, 100 y 500 años; descarga media = 0,121 m³/s. El promedio de carga sólida de este torrente se estimó en 263,765 TM/año (Plan MERISS 1994); esta última cifra confirma la fuerte torrencialidad de estos riachuelos con relación a la magnitud de su cuenca.

No se tiene datos para las demás cuencas. Otros cálculos anteriores y posteriores ratifican la mencionada invariabilidad genérica del clima local en términos de promedios a mediano plazo. Aunque esto podría servir para emitir afirmaciones a favor del condicionante local como factor de ocurrencia de los desastres, lo cierto es que no hay información suficiente o hay carencia casi total de datos glaciológicos, nivológicos e hidrogeológicos como para confirmar una u otra teoría.

Los contextos geomórfico y climático condicionan una respuesta hidrológica rápida en estas cuencas, lo que constituye una enorme desventaja para los programas preventivos y de alerta, pues dan lapsos de tiempo muy cortos para la alerta y evacuación en caso de emergencia.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Retomando lo señalado en un ítem anterior, las series sedimentaria de los conos y terrazas mayormente aluviales de-

muestran la intensidad y recurrencia de los huaycos que los construyeron.

No existen documentos históricos sobre la zona hasta prácticamente el siglo XX. El descubrimiento de Machupicchu en 1911 y la construcción del ferrocarril hacia Quillabamba, unas cinco décadas después, marcan el inicio de la memoria de todo este valle. Esto restringe la investigación histórica necesaria para establecer correlaciones temporales y parámetros de recurrencia.

La única inferencia que se puede aventurar es que los antiguos pobladores de esta agreste región conocían muy bien su carácter altamente dinámico, por lo que no fundaron ningún asentamiento en los conos y aprovecharon sólo de manera muy restringida algunas terrazas elevadas y, ante todo, laderas rocosas. El auge turístico, iniciado hace menos de cuarenta años, ha significado, por ejemplo, la ocupación completa del muy peligroso cono de Aguas Calientes, donde está la capital distrital, y, últimamente, la rápida urbanización de la terraza-cono de Santa Teresa y de la zona de San Miguel, anteriormente afectadas con cierta frecuencia por huaycos (el pueblo de Santa Teresa ha sido arrasado por ellos y reubicado tres veces en menos de setenta años).

La investigación de fuentes periódicas indica que en la cuenca de Aguas Calientes se produjo un deslizamiento con embalse-desembalse en febrero de 1946, y un evento accesorio menor dos semanas después; en 1961 se reporta un huayco menor; el 5 de marzo 1995 se dan sendos huaycos en éste y en el río Alcamayo; otro episodio similar se dio al parecer o en 1969 o en 1970 (Kalafatovich & Carreño, 1999). Como se indicó, el desastre más grave fue el ocurrido el 10 de abril del 2004, cuando un huayco proveniente del Alcamayo mató a once personas, destruyendo varias casas y puentes ferroviarios. En enero, marzo y abril se produjeron otros flujos en la cuenca de Cedrobamba, a la altura del km 101 del ferrocarril Cusco-Machupicchu.

Para Aobamba, se conocen ocurrencias el 12 de julio de 1996, febrero 1997, 13 enero, 27 de febrero, 12 de marzo, 22 de noviembre de 1998 (INGEMMET, 1999).

En resumen, en un período de algo menos de 70 años se pueden identificar hasta tres períodos de ocurrencia concentrada de procesos hidrogeodinámicos: las décadas de 1941-1950, 1961-1970 y 1997-2007. Se observa que, aparte de una similar duración (10 años por período), no hay una tendencia cíclica a plazo determinado; de otro lado, el balance entre años fríos (Niña) y cálidos (Niño) es bastante equilibrado: 5/5, 4/6 y 5/5 para las décadas señaladas, con intervalos de "calma" de

10-10-27 años. Obviamente que con este horizonte temporal no es posible inferir conclusiones acerca de los reales períodos de recurrencia ni, menos, de un eventual incremento en la actividad hidrogeodinámica ni, menos aún, para enlazarla con el proceso de calentamiento global.

DISCUSIÓN

Los casos analizados no pueden atribuirse a un efecto sistemático del cambio climático que hoy se pregona como respuesta casi universal para estos eventos. No hay información suficiente como para arribar a una conclusión de ese tipo, menos en una zona cuya condiciones morfoclimáticas son por demás favorable para la ocurrencia más o menos continua de este tipo de fenómenos. La estadística de eventos geodinámicos e hidrogeodinámicos no muestra un incremento de los mismos en las últimas décadas. Es más, durante varios ENSO (entre ellos el extremo de 1982-1983, el segundo mayor del siglo XX) no ocurrieron desastres similares; con todo ello, cualquier generalización resulta aventurada, por lo que consideramos que, al parecer, al menos en esta zona, los fenómenos torrenciales responden más a las dichas condiciones morfoclimáticas locales y ocasionales que a trastornos de impacto global.

El factor climático estacional

No se nota un incremento general de las lluvias, y varios de los huaycos se produjeron incluso en épocas o años con precipitaciones por debajo de la media histórica. Para ilustrar lo anterior, veamos los datos del desastre de Alcamayo (10 de abril del 2004): las precipitaciones estuvieron por debajo del módulo histórico; sólo en los días previos se dio un fuerte incremento, con un pico muy pronunciado en la noche del 9 de abril. Este evento de lluvia concentrada, sumada a la lluvia acumulada (mostrada por el estadígrafo de la media móvil para los días anteriores) basta para explicar la ocurrencia de los deslizamientos y sus huaycos derivados. En julio del mismo año se dio una corta temporada de lluvias con un máximo mayor que el de abril, pero no ocurrió nada, por cuanto el balance hidrológico entonces tendía al déficit y la media móvil era abiertamente descendente. Igual sucedió con el caso de Runtumayo, analizado anteriormente.

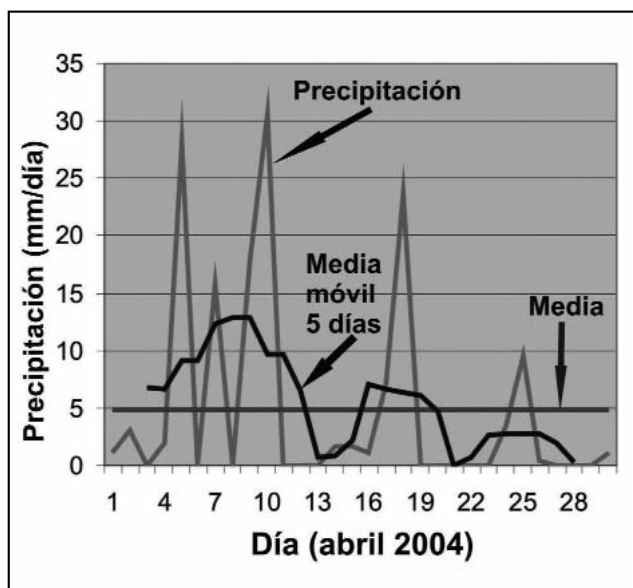


Figura 13. Evolución de las precipitaciones durante el desastre de abril del 2004 (datos regionalizados).

Cabe señalar que el *Índice multivariado de El Niño* MEI es un índice estadístico compuesto que correlaciona diversas variables que miden la incidencia e intensidad de los ENSO, tales como las temperaturas superficiales del mar y del aire, la presión al nivel del mar, los vientos zonales superficiales, nubosidad, etc. Los valores positivos corresponden a los eventos cálidos (Niño), y los negativos a una fase fría (Niña).

A partir de la información histórica y de la serie climática disponible (Rivera 1987; E. Zambrano 1996; Vilimek et al. 2006; CS-ENSO 2008; NOAA-ESRL 2009), y aplicando el MEI, se ha elaborado la tabla N° 2, donde se establece la siguiente correlación entre la naturaleza climática del año y la ocurrencia de eventos catastróficos. El MEI indicado es el mayor alcanzado durante el período en consideración (MEI = 0-1 ó 0 a -1: débil; 1-2 ó -1 a -2: moderado; 2-3 ó -2 a -3: fuerte; > 3 ó < -3: extremo); se sobreentiende que, como ya se indicó, los valores positivos corresponden a El Niño y los negativos a lo que se ha venido en llamar La Niña. Reiteramos que, con excepción de Runtumayo, siempre hubo intervención de deslizamientos, ya sea como causantes o contribuyentes a la ocurrencia de huaycos.

Al analizar series meteorológicas detalladas encontramos que no es posible establecer umbrales críticos; tampoco por el lado de las precipitaciones acumuladas parece existir una relación directa con el desencadenamiento de flujos. Por su morfología, estas cuencas tienen respuestas hidrológicas muy rápidas y, a pesar de la densa vegetación, el componente de infiltración apenas alcanza un 18% (Carreño y Kalafatovich 2006a), lo cual atenúa el efecto de las lluvias sobre la aceleración de los deslizamientos; esa baja infiltración implica una mayor escorrentía sub-superficial que, a su vez, debería incrementar la incidencia de flujos de lodo, algo que paradójicamente no se da, gracias, en buena medida, a la vegetación.

El factor de localización

Del mismo modo, llama la atención el que los huaycos se hayan dado más en la vertiente que da al Vilcanota (orientada al noreste) y sólo muy esporádicamente, y en mucho menor proporción, en la opuesta que da al río Apurímac. También en el caso del Huaqayhuillka los huaycos se dieron en la vertiente del Vilcanota y no en la opuesta del Alcamayo. Al no haber estudios meteorológicos específicos para esta zona, este hecho se mantiene inexplicado.

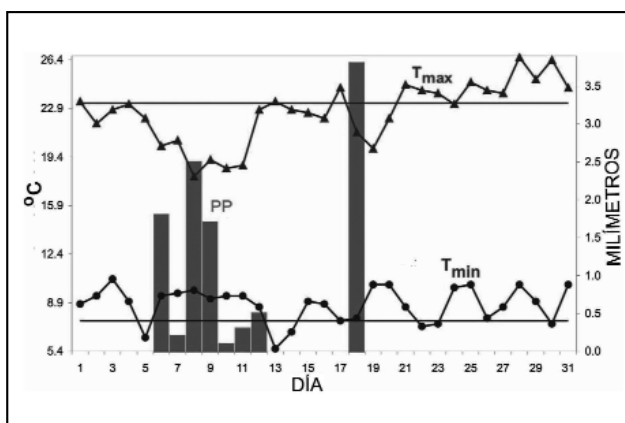


Figura 14. Parámetros meteorológicos de octubre 2005 - Estación de Urubamba (SENAMHI).

Ocurrencias paralelas

Entre 1961-1962, se dieron eventos similares en otras regiones del país; así, el 10 de enero de 1962 una gran lava torrencial proveniente de un nevado de la Cordillera Blanca, en Ancash, arrasó varios pueblos del Callejón de Huaylas; su origen respondió a un derrumbe-avalancha de hielo y roca proveniente del nevado Huascarán, el más alto del Perú, que cayó sobre una laguna (Dollfus y Peñaherrera 1963). Cabe anotar que en 1970, las localidades de Yungay y Ranrahirca (ésta última ya afectada por un evento similar en 1962) fueron completamente barridas por otra lava torrencial, esta vez desencadenada por un sismo, muriendo más de dieciocho mil personas.

De igual modo, en enero de 1945 otra serie de huaycos causó daños en diversos puntos del país; el más importante ocurrió el 17 de enero de 1945, que destruyó el pueblo de Chavín de Huántar, en el departamento de Ancash, al pie de la Cordillera Blanca, incluyendo parte del mayor centro arqueológico de ese departamento. También en esa oportunidad, el origen de la lava torrencial fue la caída de bloques de glaciares del nevado Ayhuinyaraju dentro de las lagunas morrénicas de Ayhuinya y Carhuacochoa (Indacochea e Iberico 1947; Spann 1947; Contreras 2009). Durante el ENSO 1997-1998 ocurrieron muchos otros huaycos en la región subandina del Perú.

Vemos que estos eventos (ocurridos todos en temporadas cortas de fuertes lluvias) coinciden con los de Torontoy, pero esto no autoriza a establecer la socorrida correlación con el cambio climático global, más sabiendo que, como lo señala Lagos (1999), tras analizar varias teorías y experimentos, no hay indicios de que tal calentamiento haya alterado el régimen de los ENSO en términos de frecuencia e intensidad. El modelo de Trenberth y Hoar halló que habría un incremento en la frecuencia de los ENSO con una disminución de años fríos. Estudios posteriores como los de Harrison & Larkin y Rajagopalan cuestionaron esta conclusión, demostrando –con otros modelos pero con las mismas series de datos–, que no había tal tendencia y que el calentamiento del Pacífico podía atribuirse “a la variabilidad natural en escala de tiempo interdecadal”.

¿ENSO O NO ENSO?

La controversia sobre las tendencias del ENSO subsiste, gracias a que las teorías en vigencia se sustentan en modelos de predicción basados sobre series estadísticas restringidas y tomando distintas variables: mientras unos afirman que una mayor emisión de GEI (gases de efecto invernadero) causará la persistencia e intensificación de los ENSO, con un predominio creciente de los Niño en detrimento de los años fríos, otros indican, como ya señalamos, que los ciclos ENSO dependen de otros factores. Tampoco debe olvidarse la corriente teórica iniciada por Milankovitch (igualmente muy bien sustentada) que da pruebas de que el calentamiento global es parte de un ciclo natural de larga duración y no de la contaminación. En cualquier caso, más allá de una conclusión tajante, para nuestro caso de análisis, sólo podemos constatar que los desastres ocurrieron más en años normales ligeramente fríos que en los afectados por el Niño o de MEI positivo; pero la diferencia no es abismal pues, como se ve en la tabla N° 2, a seis períodos normales se contraponen cinco de Niño, casi todos débiles a moderados.

El efecto del calentamiento global –al menos en esta región– no parece aún haberse traducido en un cambio significativo en la frecuencia e intensidad de las lluvias o en un incremento de catástrofes hidrogeodinámicas. Si consideramos que los cálculos y mediciones de caudales y precipitaciones están dentro del rango normal de desviación estándar e, incluso, hay disminución estacional de los mismos, entonces tampoco por este lado hay aún razón suficiente como para establecer una relación directa entre el calentamiento global y la ocurrencia de desastres. Sabemos que “El Niño/Oscilación del Sur nos ha visitado frecuentemente desde hace unos 5.000 años, cuando se consolidó el sistema actual de circulación atmosférica y oceanográfica en la región del Océano Pacífico [...] El intervalo de ocurrencia de este fenómeno va entre 1 y 11,5 años y su intensidad es prácticamente impredecible. Por ejemplo, en los 100 años transcurridos entre 1880 y 1980 se registraron aproximadamente 25 fenómenos El Niño, de los cuales tres fueron muy fuertes” (Jaksic 1998). De otro lado, no hay indicios suficientes como para determinar si hay fluctuaciones significativas en la llamada circulación de Walter, cuyos ciclos de dos a siete años se conocen como la Oscilación del Sur (Beckmann y Upton 1997).

Tabla 2. Cronología y origen de las lavas torrenciales en el cañón de Torontoy.

Año	Huayco relacionado a proceso glaciar	Huayco relacionado a deslizamiento	Año climático	MEI
1941	Sacsara-Santa Teresa		Año muy frío	-1,8
1946		Aguas Calientes	Año frío	-1,0
1950		Aguas Calientes, Alcamayo	Año muy frío	-1,4
1961	Sacsara-Santa Teresa	Aguas Calientes, Alcamayo	Año normal	-0,4
1970		Aguas Calientes, Alcamayo	Niño débil	0,4
1996	Aobamba		Año normal	-0,6
1997-1998	Aobamba, Sacsara	Aguas Calientes	Niño fuerte	2,9
2004		Alcamayo, Cedrobamba	Niño débil	0,5
2005		Mandorpampa	Niño moderado	0,9
2005-2006	Runtumayo		Año normal	-0,6
2007		Aguas Calientes	Niño moderado	1,2

Fuentes: NOAA-ESRL, 2009; CS-ENSO 2008; Rivera 1987, modificado por Zambrano 1996.

Es llamativo que el segundo Niño más fuerte del siglo (1982-1983, calificado como extraordinario y sólo inferior al extremo de 1915-1916) no haya causado mayores problemas en la zona, al igual que otros de menor intensidad, como los de 1986-1987 y 1991-1992, mientras que un Niño fuerte como el de 1997-1998 indujo la serie de huaycos de origen glaciar en la cordillera de Vilcabamba. Se asume que en años de Niño hay una mayor ocurrencia de desastres geodinámicos; para el caso de Torontoy esta relación no se cumple a plenitud.

La retracción de glaciares

A pesar del innegable proceso de retracción de glaciares, no se ha podido correlacionar este hecho con una mayor ocurrencia de catástrofes. Por cierto, a pesar de su evidente aceleración en las últimas décadas, el retroceso glaciar no es reciente pues se inició al terminar la última glaciación pleistocénica, emprendiendo una segunda etapa al finalizar la Pequeña Edad de Hielo, época en la que sí se ha probado que hubo grandes trastornos climáticos, al punto que para un caso cercano, ocurrido en Calca, aguas arriba del mismo valle del Vilcanota, un huayco y un deslizamiento determinaron la extinción de la cultura de los Sahuasira hacia el año 1300 (Carreño, *en edición*).

Al menos para la zona de entrada al cañón (zona de Chilca-Pisqak'ucho), el retroceso ha sido de algo más de 2100 metros desde la última glaciación, ya que para entonces los glaciares del macizo de Huaqayhuillka-Bonanta descendieron hasta la cota 2740 m s.n.m. (Kalafatovich 1956).

Los estudios glaciológicos en la zona no han superado la etapa de la comparación de fotografías diacrónicas, la que da una idea de la extensión pero no del espesor de los casquetes glaciares en retroceso. INGEMMET (2000) verificó que eran sobre todo los glaciares colgados del nevado Tocarhuay los más amenazantes. Transcribimos con reservas la disminución del área glaciar de los principales nevados de la cordillera de Vilcabamba involucrados en nuestro análisis, pero que no incluyen al macizo del Huaqayhuillka, que no ha sido estudiado.

En términos de temperaturas, sólo las del Niño 1997-1998 podrían coincidir con un incremento estacional más o menos persistente pero relativamente no muy alejado de la temperatura media máxima; este aumento de la temperatura promedio no permite, sin embargo, establecer una relación causal automática con el desprendimiento de serajs.

Lo más probable es que la ruptura y consecuente caída de bloques de hielo en lagunas morrénicas o proglaciares (con su secuela de desbordes que degeneran en lavas torrenciales)

responda a situaciones de ablación estacional y a la dinámica o avance-retroceso natural de los glaciares, especialmente cuando rebasan umbrales con pronunciado cambio de gradiente topográfica. Esto no exonera la influencia de un cambio climático global, que, en cualquier caso, podría ser considerado como un factor subyacente mas no incidentalmente decisivo para la ocurrencia de huaycos.

La retracción glaciar existe, pero debemos recordar que, a la casi generalizada teoría del calentamiento global por un efecto invernadero, se contraponen la probada corriente teórica de Milutin Milankovitch, que atribuye los ciclos climáticos a causas astronómicas relacionadas a los cambios orbitales del planeta. El retroceso de glaciares se da desde antes del tiempo al que estadísticamente se atribuye su inicio: la revolución industrial de comienzos del siglo XIX, por lo que cualquier correlación automática con el ahora muy pregonado calentamiento global corre el riesgo de ser más un prejuicio que una realidad científica, al menos, reiteramos, para el momento actual y para el caso de esta región del Torontoy.

CONCLUSIÓN

Los diversos huaycos ocurridos en la cuenca del cañón de Torontoy desde hace unos 70 años se originaron por efecto de la dinámica glaciar, en unos casos, y de la aceleración de deslizamientos, mayormente por efecto de lluvias intensas y acumuladas, en otros. Sólo una parte minoritaria de ellos estuvieron asociados a años de ENSO con MEI positivo. El análisis de la información disponible nos conduce más hacia la concurrencia de factores circunstanciales como causa de estos fenómenos hidrogeodinámicos, todo dentro de un pre-existente contexto morfoclimático y geológico de base muy favorable para la ocurrencia de los mismos, por la abundancia de deslizamientos subactivos y permanentes, por sus laderas muy abruptas y fracturadas, por las altas precipitaciones y una baja infiltración, etc.

En el caso de los glaciares, está probado que el retroceso de los mismos data de una época muy anterior a la Revolución Industrial, que es cuando se asume que comienza el actual proceso de calentamiento global por los GEI. Aunque en las últimas décadas años este proceso se haya acelerado, esto no permite establecer una relación de causalidad directa con los desastres ocurridos, sobre todo en un cañón donde la historia geológica muestra que los huaycos y deslizamientos se han dado de manera continua desde el Pleistoceno. En cualquier caso, no existen por ahora indicios suficientes como para correlacionar la frecuencia e intensidad de los huaycos y deslizamientos de esta zona con un proceso de cambio climático global.

Tabla 3. Evolución de algunos glaciares en la Cordillera de Vilcabamba.

Nevado	Área glaciares (km ²)		% área perdida 1963-1993		
	1963	1993	1998		
Paljay	4,76	1,65	1,16	29,7	75,63
Salkantay	8,59	5,21	3,98	23,61	53,67
Tocarhuay	sd	2,90	1,48	sd	48,97

Fuente. INGEMMET 2000.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BECKMANN, R. Y R. UPTON, 1997.
El Niño - riding the climate roller coaster. <http://www.science.org.au/nova/028/028key.htm>
- CANDIA, M., 1998.
Estudio hidrológico e hidrogeológico de la cuenca de Aguas Calientes-Machupicchu.
Informe de consultoría Programa Machupicchu-PNUD, 37 p. + anexos, Cusco.
- CARREÑO, R. 2009.
Two Landslides and one extinction: the history of Sahuasira Nation.
Landslides (en edición).
- CARREÑO, R. Y S. KALAFATOVICH, 2004a.
Evaluación de peligros y vulnerabilidad en la cuenca de Alcamayo (distrito de Machupicchu).
Informe de consultoría GRUDEC AYAR, 106 p. + anexos, Cusco.
- CARREÑO, R. Y S. KALAFATOVICH, 2004b.
Evaluación de peligros y vulnerabilidad en la cuenca de Cedrobamba (distrito de Machupicchu).
Informe de consultoría GRUDEC AYAR, 45 p. + anexos, Cusco.
- CARREÑO, R. Y S. KALAFATOVICH, 2006.
The Alcamayo and Cedrobamba catastrophic debris flow (January, March and April 2004)
in Machupicchu area-Peru. Landslides, volume 2006-1: 79-83.
- CONTRERAS, D. A., 2009.
Reconstructing landscape at Chavín de Huántar, Perú: A GIS-based approach.
Journal of Archaeological Science, volume 36: 1006-1017.
- Cs-ENSO, 2008.
Case Study: El Niño/Southern Oscillation.
<http://www.elnino.noaa.gov/>
- DOLLFUS, O. Y C. PEÑAHERRERA, 1963.
La lave torrentielle du 10 Janvier 1962 dans la Cordillère Blanche (Pérou).
Revue de Géomorphologie dynamique.
- EGEMSA, 1997.
Aprovechamiento de los recursos hídricos de la quebrada Aobamba en la Central Hidroeléctrica Machupicchu.
EIA. EGEMSA, Cusco.
- INDACOCHA, A. Y M. IBERICO, 1947.
Aluvionamiento de Chavín de Huántar el 17 de enero de 1945.
Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, volumen XX: 21-28.
- INGEMMET, 1999.
Estudio glaciológico de la cuenca del río Aobamba.
Informe Técnico. EGEMSA-INGEMMET-Dirección de Geotecnia, Lima.
- INGEMMET, 2000.
Evaluación del riesgo geológico en las áreas de Paccha Grande, laguna de Susaypampa y Corihuayrachina.
Informe Técnico. INGEMMET-Dirección de Geotecnia, Lima.
- JAKSIC, FABIÁN M., 1998.
Las múltiples facetas del fenómeno
El Niño/Oscilación del Sur. Ambiente y Desarrollo volumen XIV(2): 53-61.
- KALAFATOVICH, S. Y R. CARREÑO, 2001.
Recopilación, sistematización y diagnóstico de la información geológica, de peligros naturales y temas afines sobre Machu Picchu.
Programa Machu Picchu, PROFONAMPE, Cusco.
- KALAFATOVICH, C. 1956.
Las glaciaciones pleistocénicas en Urubamba.
Revista Universitaria UNSAAC: 235-252. UNSAAC, Cusco.
- LAGOS, P. 1999.
El Niño y el cambio climático en el Perú.
En Perú: vulnerabilidad frente al cambio climático.
A. Aproximaciones a la experiencia con el fenómeno El Niño. CONAM, Lima, pp. 65-94.
- MAROCCO, R. 1978.
Estudio geológico de la Cordillera de Vilcabamba.
INGEOMIN, bol. N° 4, serie D, 157 p., Lima.

- NOAA-ESRL, 2009.
ENSO.
http://www.cdc.noaa.gov/enso/enso.mei_index.html
- PLAN MERISS, 1994.
Proyecto de irrigación Chillca.
Plan MERISS-Inka, 228 p. + anexos, Cusco
- PROGRAMA MACHUPICCHU (2000)
Obras de protección del pueblo contra aluviones.
Expediente técnico. PROFONAMPE, 132 p. + anexos, Cusco.
- SENAMHI 2005.
Boletín meteorológico e hidrológico del Perú.
Vol. 9-10. Lima.
- SPANN, H. H., 1946.
Informe sobre el origen de la catástrofe de Chavín de Huántar.
Boletín del Instituto Geológico del Perú: 29-33.
- VILÍMEK V., J. KLIMEŠ, R. CARREÑO Y J. VLČKO 2006.
Catastrophic debris flows near Machu Picchu village (Aguas Calientes),
Peru. Environmental Geology (2006) 50: 1041-1052.
- ZAMBRANO, E., 1998.
El Niño.
Acta Oceanográfica del Pacífico-INOCAR, 8(1): 109-114.



Limitaciones de estimaciones y simulaciones de la colapsibilidad en suelos loessicos de Córdoba

Rocca, Ricardo J.

Recibido: 15 de Octubre 2009 • Aceptado: 28 de abril de 2010

Resumen

Los suelos loessicos de la ciudad de Córdoba se extienden a ambos lados del río Suquía y abarcan unas 39.000 hectáreas. Estos suelos macroporosos tienen distinto grado de colapsibilidad por humedecimiento, que va desde aquellos capaces de autocolapsar bajo su propio peso, hasta los que son potencialmente colapsables porque requieren de la acción de cargas externas para que se produzca el fenómeno. El potencial de los asentamientos generados por colapso tiene importantes variaciones laterales.

La generación de un mapa con elevada confiabilidad necesita de densidades de datos no disponibles en las bases de sondeos geotécnicos existentes. En la literatura geo-científica se emplean distintos procedimientos para solucionar este tema, donde se destacan la estimación geoestadística y la simulación estocástica.

La estimación geoestadística emplea algoritmos de interpolación con variancia de errores mínimo (kriging). Estos mapas suavizan detalles locales de la variación espacial, con valores pequeños sobreestimados, mientras que grandes áreas son subestimados.

En cambio, la simulación estocástica no tiene como objetivo minimizar la variancia del error local, sino que se enfoca en la reproducción de la estadística.

Se analizan los resultados empleando SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance), cuya versión 5, permite la implementación de ambos procedimientos, en un ambiente amigable para el usuario.

Los resultados obtenidos por ambos procedimientos han sido contrastados con información independiente que no ha participado de las interpolaciones. Se comentan las dificultades encontradas en la resolución del mapeo y las limitaciones generales y particulares referidos a los métodos y a su implementación.

Palabras Clave: *colapsibilidad, estimación geoestadística, kriging, simulación estocástica, Córdoba.*

Abstract

Loessic soils of Cordoba extend on both sides of the Suquia river, covering about 39,000 hectares. These macroporous soils have different degree of collapsibility due to wetting, ranging from self-subsident under its own weight, to potentially collapsible that require of external loads to produce the phenomenon. The potential settlement due to collapse has considerable lateral variations.

The generation of a map with high reliability needs a data density, not available in geotechnical databases. In the geoscientific literature, different procedures addressed this issue, highlighting geostatistics estimation and stochastic simulation.

Area Geotecnia. FCFN. Universidad Nacional de Córdoba.

E-mail: rjrocca@efn.uncor.edu

The geostatistical estimation algorithms use interpolation with

minimum error variance (kriging). These maps smoothed local details of the variation space, with small values overestimated, while large areas are underestimated.

In contrast, stochastic simulation aim is not to minimize the local error variance, but to focus on the reproduction of statistics. The use of SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance), allows the implementation of both procedures in a user-friendly environment.

The results obtained by both procedures have been contrasted with independent information not involved in the interpolations. Also, there are comments on difficulties encountered in solving the mapping and general and specific limitations relating to the methods and its implementation.

Keywords: *colapsibility, geostatistical estimation, kriging, stochastic simulation, Cordoba.*

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Córdoba ha sido objeto de estudios desde fines del siglo XIX (*Bodenbender 1890*) y analizado geotécnicamente desde la década de 1960 (*Reginatto 1970, Quintana Crespo 1991, Rocca et al. 1990, 1995, 1999, 2004, 2006*).

Córdoba se ha expandido desde el valle del Suquía hacia las planicies norte y sur (formadas por suelos loessicos Zonas 4 y 5. Figura 1, *Rocca et al. 1999*). Estos suelos tienen estructura interna macroroporosa que se caracteriza por ser colapsable y por lo tanto, se han generado numerosos problemas y daños en las construcciones localizadas en esas zonas.

Los loess pueden tener un disímil comportamiento de acuerdo a los distintos tipos de estructuras internas, cementaciones presentes y espesores. Si bien parecen uniformes macroscópicamente, la colapsibilidad es variable arealmente. Algunos de los suelos son autocolapsables, o sea que colapsan por el peso de su estructura interna, mientras que la gran mayoría son potencialmente colapsables requiriendo la acción de cargas externas para que se manifieste el fenómeno. Existen métodos estadísticos que simplifican la cuantificación de los asentamientos de las fundaciones directas de baja la carga generada por construcciones de una a tres plantas. (*Rocca 2002, 2005*).

La representación de la colapsibilidad es tridimensional (variación de asentamiento, en x,y,z), pero se puede reducir a bidimensional (valor integrado de asentamiento, en x, y). Esto se puede realizar mediante una integración en profundidad, del cálculo de los asentamientos por colapso de un perfil. A tal fin, se ha usado un método simplificado, donde el cómputo de los asentamientos se ha obtenido multiplicando en cada perfil individual, los espesores de cada tipo de loess por el asentamiento correspondiente a ese tipo, determinado estadísticamente (*Rocca, 2002*) y validado mediante ensayos in-situ (*Rocca, 2005*). Este método simplificado produce resultados que dependen de la carga externa aplicada y por consiguiente del número de plantas de las construcciones apoyadas sobre el terreno. En este trabajo solamente se presentan valores obtenidos para construcciones de una planta.

A partir de la información extraída de la Base de Datos Geotécnicos, desarrollada por el Área Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba, se ha realizado ese cómputo, aplicado a perfiles de distintos sectores de la ciudad de Córdoba donde se tienen estudios geotécnicos.

El problema que se presenta es la poca densidad de datos y el extenso territorio de la ciudad. En el mapeo del comportamiento de los suelos loessicos de la ciudad se presentan incertidumbres en los valores de los mapas de predicción.

La ciudad de Córdoba es un cuadrado de aproximadamente 24 x 24 km., es decir tiene 57600 hectáreas. Si se descuenta el valle del río Suquía y su afluente, el arroyo La Cañada, el área remanente está ocupado por suelos loessicos. Se los pueden encontrar en las planicies al Norte y al Sur del río (Zona Geomorfológica 4) y en una banda de Transición (Zona Geomorfológica 5). La planicie loessica tiene unas 33000 has, mientras que la banda de transición unas 6000 has.

Debido a la extensión y al limitado número de datos es necesario plantear cómo extrapolar los resultados de análisis en esos pocos sitios (menos del 2%), a otros situados en zonas sin datos (alrededor del 98%).

Este problema de la interpolación se puede resolver mediante distintos procedimientos, tales como las estimaciones geoestadísticas o por simulación estocástica del terreno. Es interesante señalar que esta disyuntiva ya ha sido estudiada en algunas geociencias, en problemas ambientales, en minería y en la edafología. (*Brus et al, 1997, Goovaerts 2000*).

En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de ambas metodologías contrastándolas con mediciones directas de otro conjunto de datos independientes.

SOLUCIONES GEOESTADÍSTICAS

La Geoestadística es una disciplina que estudia fenómenos que fluctúan en el espacio y sus métodos estadísticos son empleados por ciencias de la tierra. Se la puede definir como la aplicación de la teoría de funciones aleatorias a la descripción de la distribución espacial de propiedades de materiales geológicos (*Auvinet et al 2001*).

A fines de la década de 1960 fue establecida para mapear la distribución espacial de uno o más atributos. Las aplicaciones más recientes han migrado hacia la simulación condicional también llamada imagen estocástica. Permite dibujar realizaciones igualmente probables, alternativas, de la distribución espacial del atributo estudiado (*Deutsch et al 1998*).

Estimaciones e interpolaciones

Una forma común de análisis geoespacial es la interpolación, donde los datos puntuales son transformados en mapas continuos estimando los valores en los lugares no muestreados. Estos valores son sólo predicciones y existe incertidumbre sobre el valor exacto. Algunos métodos como en las estimaciones se pueden cuantificar la incertidumbre implícita. Los valores no muestreados son una función de la estructura de correlación que describe la variabilidad espacial.

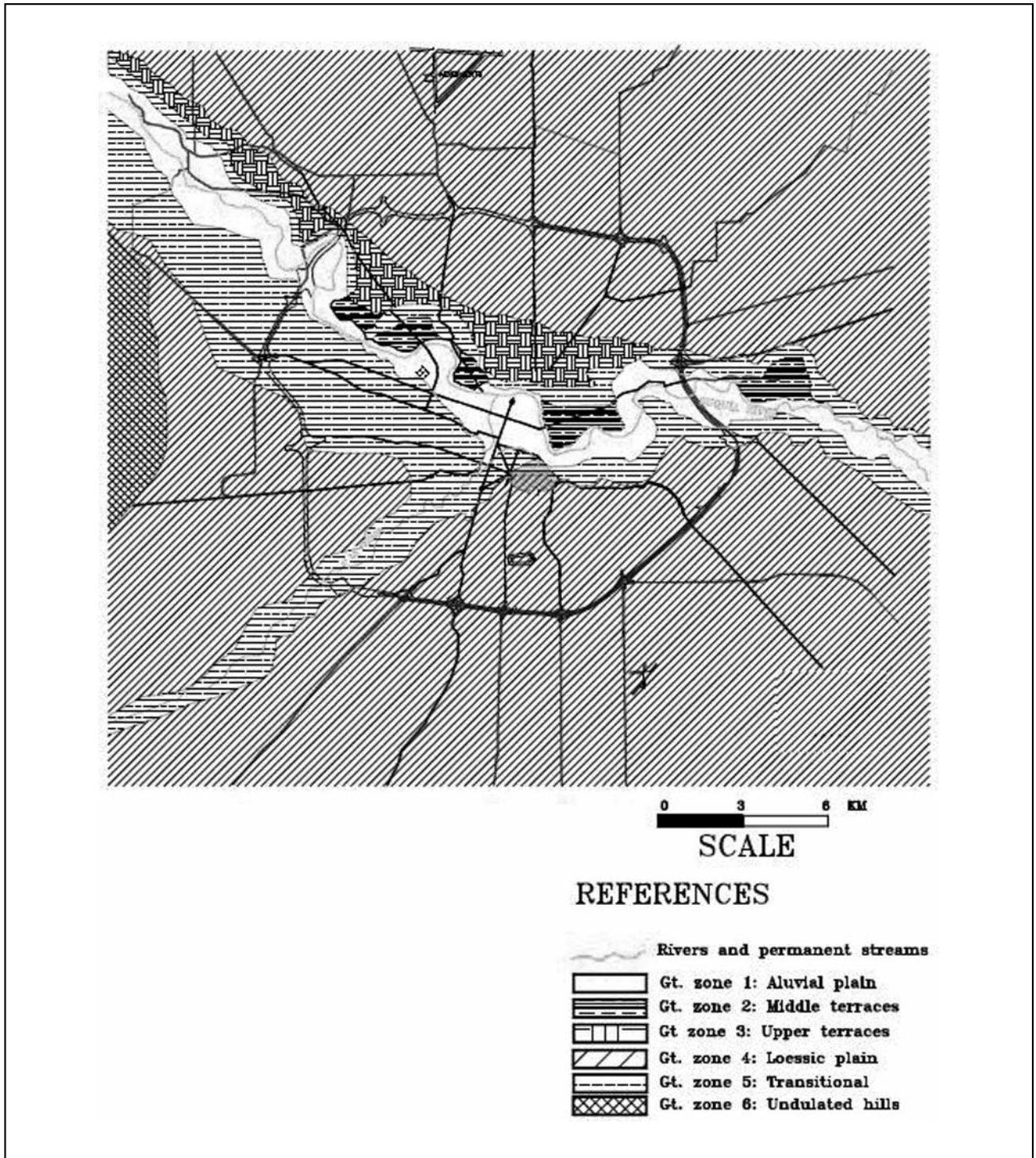


FIGURA 1. Características de los suelos presentes en la ciudad de Córdoba [según Rocca et al 1999].

La estimación de datos espacialmente se realiza en función del conocimiento que existe entre los valores de una variable (en este caso, asentamientos) situados a una distancia determinada h (lag). La relación entre los valores de dos puntos en función de la distancia, se expresa a través de correlogramas, covariancia o variogramas (Davis 1986, Deutsch et al. 1998, Isaak et al. 1989).

Una de las ventajas de la Geoestadística, sobre otras formas de interpolación, es que toma como base el kriging

(kriging) que es un estimador lineal no sesgado (BLUE: best linear unbiased estimator). Esto se debe a que está basado en la minimización de la variancia.

Asimismo, es posible obtener, además de los valores de las estimaciones, los correspondientes a la desviación estándar de la estimación, la que se suele tomar como la matriz de errores. Esto es la principal ventaja teórica sobre otros métodos más sencillos como el de la distancia inversa.

Los métodos geoestadísticos proveen este estimador formal de la confiabilidad de los datos interpolados permitiendo que se destaquen las áreas de incertidumbre estadística. Cualquier error estándar que sea mayor que la desviación estándar de la muestra denota una predicción no confiable (Giles 1994). Existen variados ejemplos de aplicación en ingeniería geotécnica (Auvinet et al. 2001, 2003, Parsons et al. 2002, Christian 2003, Baecher et al. 2003) y en particular a suelos colapsables (Ali et al. 1989).

Simulación estocástica

En la simulación estocástica la idea básica es generar un juego de representaciones equiprobables (realizaciones) de la distribución espacial de valores de atributos (en este caso asentamientos) y usar las diferencias entre los mapas simulados como una medida de la incertidumbre.

La simulación estocástica no tiene como objetivo minimizar la variancia del error local, sino que se enfoca en la reproducción de estadística tal como el histograma de muestreo o el modelo de semivariograma (Brus et al. 1997, Goovaerts 2000).

Hay realizaciones que están condicionadas a los valores de los datos. La simulación condicional fue inicialmente desarrollada para corregir el efecto de la suavización mostrado en los mapas producidos por los algoritmos del kriging. De hecho, las estimaciones por kriging son promedios móviles ponderados de los valores de los datos originales, por lo que ellos tienen menor variabilidad espacial que los datos originales.

El principio de simulación secuencial es una generalización en el que el condicionamiento se extiende para incluir todos los datos disponibles dentro del vecindario, incluyendo los datos originales y todos los valores previamente simulados. (Deutsch et al. 1998).

Tecnologías accesibles

La implementación de estos métodos requiere el empleo de software geoestadístico específico. Goovaert (2009) ha realizado una comparación entre las ofertas disponibles (Tabla 1). Algunos de estos programas tienen costos reducidos (y a veces gratis) con los que se puede generar variogramas y realizar las interpolaciones por kriging y otros permiten también hacer simulación. Los que resultaron particularmente útiles en este trabajo son:

El *Gslib* (Geostatistical Software Library) es un conjunto de programas desarrollados en D.O.S. por la Universidad de Stanford (Deutsch et al. 1998). Utilizan el formato de datos GeoEas (U.S. E.P.A.). Pueden generar salidas gráficas legibles por lectores de PostScriptum. Existen versiones en Windows, como el WinGslib y el SGeMS que hacen de interfase entre los distintos módulos de la biblioteca.

El *Vesper* (Variograma Estimation and Spatial Prediction with ERror) v.1.6, desarrollado por el Australian Centre for Precision Agriculture (Minasny et al. 2002). Es un programa integral que incluye el tratamiento experimental de los datos y desarrollo de variogramas, como así también realizar estimaciones con algunos tipos de kriging.

El *SADA* (Spatial Análisis and Decisión Assistance) V. 5 (2008) es el producto de The Institute for Environmental Modeling, un Consorcio liderado por la E.P.A. (U.S.A.) y varias universidades coordinadas por la U. Tennessee. Es un proyecto muy amplio destinado a problemas esencialmente ambientales.

Es de mencionar que el SADA combina a su accesibilidad (gratis) una muy buena prestación general para mapeos, tanto en 2D como en 3D. En la última versión 5 (2008) ha incorporado a su menú la simulación, con lo que es uno de los más completos en cuanto a sus prestaciones.

APLICACIÓN A LA CIUDAD DE CORDOBA

Para analizar las variaciones producidas por los códigos de procesamiento de los programas mencionados, se empleó un conjunto de 481 datos, que reflejan los asentamientos por colapso esperados en los sitios georeferenciados.

Los procedimientos para la interpolación parten del análisis exploratorio de datos. Estos conducen a la formulación de patrones de variabilidad espacial, en este caso a través de un variograma. Este modelado permite la interpolación a la grilla predeterminada de nodos y finalmente se modela la incertidumbre local y espacial.

Los variogramas son funciones ajustadas de los datos que como primer paso, precisan ser seleccionadas. A tal fin se empleó la validación cruzada, que es un procedimiento que elimina sistemáticamente un dato del conjunto, efectúa una estimación en ese punto y luego la compara con el dato eliminado. Cuando se analizaron los datos se encontró que la desviación estándar de la predicción del modelo esférico era un 10 % inferior al modelo exponencial, por lo que se optó por el primero.

Con los datos seleccionados se calcularon un considerable número de variogramas usando el optimizador de Vesper, el que se contrastó con el generado por SGeMS y SADA. A pesar de su gran amigabilidad, el optimizador del SADA resultó menos confiable que los otros dos.

Finalmente se decidió para la modelación un variograma esférico con las siguientes características (figura 2):

$$\text{Nugget} = 179,4; C1 = 141,5 \text{ (sill} = 179,4 + 141,5 = 320,9) \\ \text{y } a = 1554,5 \text{ m.}$$

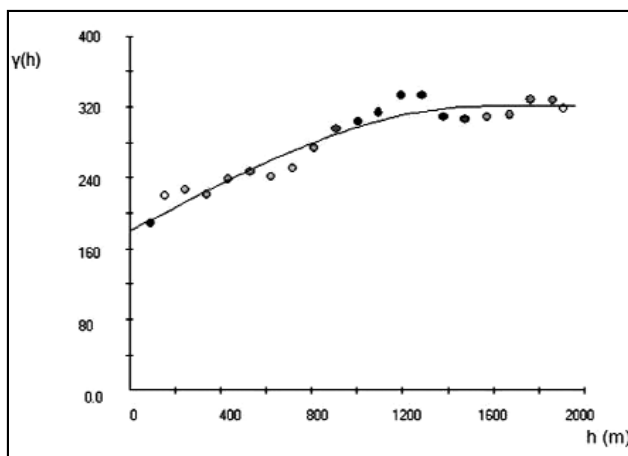


Figura 2. Obtención de variograma mediante ajuste de curvas por VESPER. $\gamma(h)$ es el semivariograma (o la mitad del variograma de orden 2), donde h es el desfase (lag) entre dos puntos, expresado en metros.

Una vez que se seleccionó el variograma, se realizaron la estimación por los Krigeado Ordinario (OK) y de Indicadores (IK) y las Simulación Gaussiana Secuencial (SGS) y de Indicadores (SIS) con los mismos datos. A tal fin se usó el SADA v.5.

Tabla 1. Comparación de disponibilidades de software (Goovaerts 2009).

Name	Data	V	K	CK	IK	MG	S	G
Agromet	2D	X	X	X				
AUTO-IK	2D	X			X			
BMELib	3D ST	X	X	X			X	
COSIM	2D						X	
EVS (C Tech)	3D	X	X		X			X
GCOSIM3D/ISIM3D	3D						X	
Genstat	3D	X	X	X				
GEO-EAS	2D	X	X					
GeoR	2D	X	X				X	
Geostat Analyst	2D	X	X	X	X	X		X
Geostatistical Toolbox	3D	X	X	X				
Geostokos Toolkit	3D	X	X	X	X		X	
GS+	2D	X	X	X			X	
GSLIB	3D	X	X	X	X	X	X	
Gstat	3D	X	X	X			X	
ISATIS	3D	X	X	X	X	X	X	X
MGstat	3D, ST	X	X					
SADA	3D	X	X		X			X
SAGE2001	3D	X						
SAS/STAT	2D	X	X					
S GeMS	3D	X	X	X	X	X	X	
SPRING	2D	X	X		X		X	X
Space time routines	2D, ST	X	X					
STIS(TerraSeer)	2D, ST	X	X			X	X	X
Surfer	2D	X	X					
Uncert	3D	X	X				X	
Variowin	2D	X						
VESPER	2D	X	X					
WinGslib	3D	X	X	X	X	X	X	

Note: V variography, K kriging, CK kriging, IK Indicator Kriging, MG multi-Gaussian kriging, S simulation, G GIS interfase

El Krigeado Ordinario toma la fluctuación local del promedio limitando el dominio de estacionalidad al vecindario local. Asume una distribución normal o lognormal de los datos.

En la Figura 3 se presentan la distribución geográfica de los asentamientos máximos producidos por colapso en la planicie loessica, empleando el variograma de la figura 2. Los asentamientos corresponden al caso de construcciones de una planta. Los correspondientes a dos y tres plantas muestran tendencias similares, con mayor magnitud.

Paralelamente se planteó el uso de la Simulación Gaussiana Secuencial empleando el mismo variograma. Se obtuvieron series de hasta 500 realizaciones o corridas. Estas salidas fueron promediadas por el postprocesador del SADA.

Los resultados de ambos análisis se encuentran en las Figuras 3a y 3b. Se ha graficado las zonas loessicas concordantes

con la zona 4 de la Figura 1. En correspondencia se aprecia los resultados de las respectivas variancias (Figuras 3c y 3d). Se puede apreciar que no existe igual confiabilidad zonal de los resultados. Para visualizarlo numéricamente, es necesario transformar la escala de Variancia en Desviación Standard. Cualquier error estándar que sea mayor que la desviación estándar de la muestra denota una predicción no confiable (Giles, 1994). A modo de ejemplo, en la figura 3c, los colores inferiores al rojo son los confiables, mientras que en la figura 3d, están representados por los colores azulados.

Las estimaciones y simulaciones son relativamente correctas, con coeficientes de correlación superiores al 80% en valores absolutos de asentamiento, cuando pertenecen a sitios que tienen datos vecinos dentro de los 300 m (Rocca 2006).

Tal como es de esperar se puede observar la suavización que produce el Krigeado con relación a la Simulación.

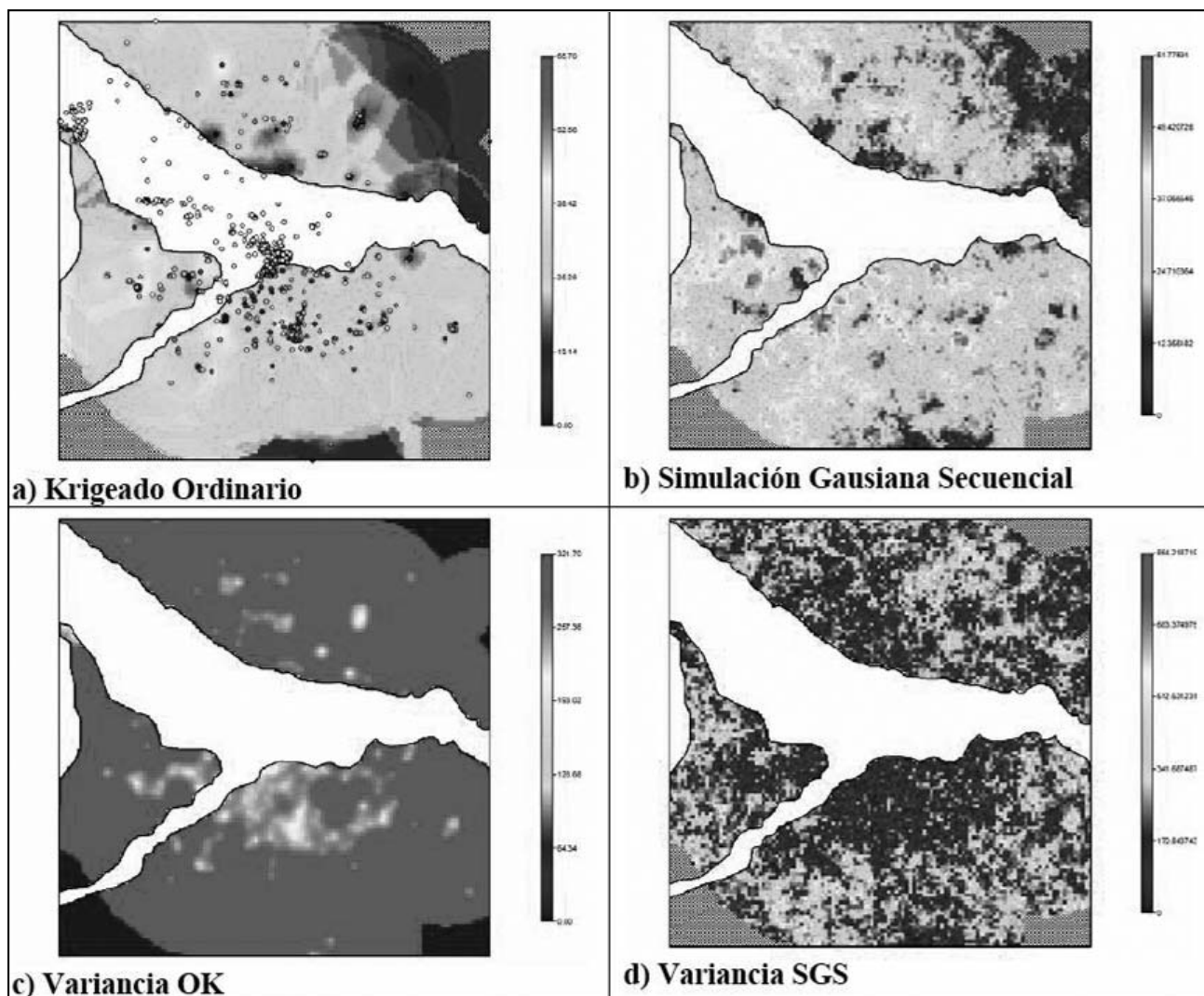


Figura 3. Salidas gráficas de las estimaciones por a) Kriging Ordinario y b) Simulación Gausiana Secuencial de las Zonas 4 norte y sur. Las figuras c) y d) representan las respectivas variancias. Las zonas vacías corresponden al valle del río Suquia y su afluente la Cañada y la región montañosa del oeste.

La correlación entre ambos métodos, OK y SGS se presenta en la figura 4. El valor del coeficiente de correlación es de 0,94, cuando el número de realizaciones de SGS es 10, mientras que sube a 0,98 considerando 100 realizaciones.

También se ha explorado el Kriging de Indicadores (IK) y la Simulación de Indicadores Secuenciales (SIS).

IK tiene como meta proveer un modelo para la distribución condicional de un atributo desconocido en cualquier punto no muestreado. Es un método no lineal en donde en lugar de asumir una distribución normal en cada lugar de estimación como en el OK, se construye la función de distribución acumulada (CDF) en cada punto basándose en el comportamiento y la estructura de correlación de los datos transformados del vecindario. Se requiere una serie de valores umbrales. A tal fin, se han definido 5 umbrales para modelar la curva de distribución de los datos.

Una vez que son fijados los umbrales, los datos son transformados por 0 y 1. Los ceros se emplean cuando los datos son mayores que el umbral y los unos cuando son menores.

IK calcula la probabilidad de que el punto estimado sea menor que el valor del umbral. Realizando esta operación para

cada umbral se aproxima la CDF en el punto de estimación. Luego de que la CDF se construye, se puede postprocesar para producir mapas de probabilidad, de estimaciones y de riesgo.

El IK puede ser realizado por SADA y SGeMS. En el SADA todo está integrado y es relativamente sencillo de ejecutar. Con el SGeMS el análisis se realiza a través de módulos que calculan el variograma, el IK y luego el postprocesamiento.

La figura 5 presenta los resultados comparándolas con la Simulación de Indicadores Secuenciales que es la contraparte del IK.

La correlación entre ambos métodos, IK y SIS se puede medir mediante el coeficiente de correlación que es de 0,86.

CASOS DE CONTROL

A los fines de contrastar los resultados obtenidos por estimaciones y simulaciones, se efectuó una correlación con valores calculados en distintas zonas de la ciudad. Es de destacar que los puntos calculados siguen una metodología simplificada que concuerda razonablemente bien con mediciones realizadas en ensayos de saturación a gran escala (Rocca 2005).

Como ejemplos extremos se han tomado tres puntos de control de los que se tiene información muy exhaustiva. El primero, en zona muy colapsable de la zona al sur del río Suquía y oeste del arroyo La Cañada (Barrio Villa Unión), el segundo, en ciudad Universitaria, situada también en la zona sur, al este de La Cañada y el tercero, en una zona poco colapsable de la zona norte del río Suquía (Barrio Alta Córdoba). La Tabla 2 resume los resultados obtenidos.

Si se normalizan los resultados en base los asentamientos calculados, es decir se sacan las relaciones entre estimación/simulación y lo calculado, se puede comparar los porcentajes con relación a este último. Los resultados se han graficado en la Figura 6.

Se puede apreciar que las mayores variaciones se dan en los suelos de baja colapsabilidad, con una gran tendencia hacia la sobrestimación. En contrapartida, los suelos de alta colapsabilidad resultan subestimados. Los suelos de mediana colapsabilidad son los que resultan más próximos a lo calculado.

Las implicancias relacionadas con las comparaciones de resultados, pueden analizarse más globalmente, si se toman rangos de valores, en lugar de valores absolutos. Este tipo de análisis puede hacerse siguiendo la clasificación china de colapsabilidad (Lin et al 1982). En ella existen tres rangos. El Tipo I donde el colapso es inferior a 15 cm., el Tipo II, corresponde al intervalo 15 a 35 cm. y el Tipo III a más de 35 cm.

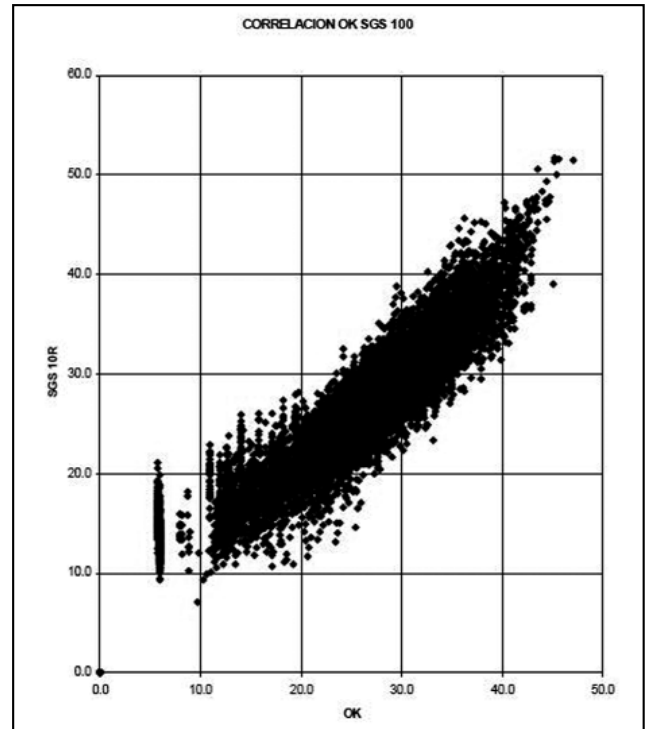


Figura 4. Correlación entre los valores obtenidos por krigado ordinario (OK) y simulación gaussiana secuencial (SGS), presentes en la figura 3.

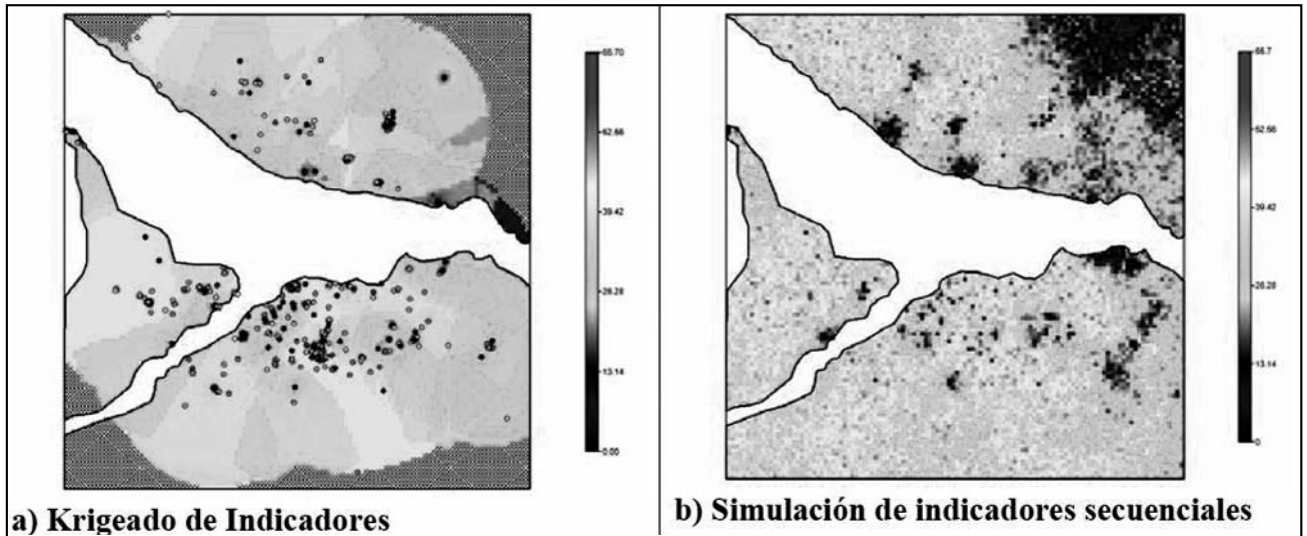


Figura 5. a) Krigado de Indicadores y b) Simulación de Indicadores Secuenciales.

Tabla 2. Comparación entre determinaciones geoestadísticas y el cálculo directo.

ASENTAMIENTO POR COLAPSO	OK	SGS-10r	SGS-100r	IK	SIS-10r	SIS-100r	calculado
ALTO	41,4	35,4	42,6	36,19	39,5	42,42	62,7
MEDIO	33,1	47,6	37,9	34,72	38,19	39,1	30,9
BAJO	17,8	22,7	19,2	19,91	9,05	13,58	9,1

OK: Krigado Ordinario
IK: Krigado de Indicadores
SGS: Simulación Gaussiana Secuencial
SIS: Simulación de Indicadores Secuencial
r: número de realizaciones.

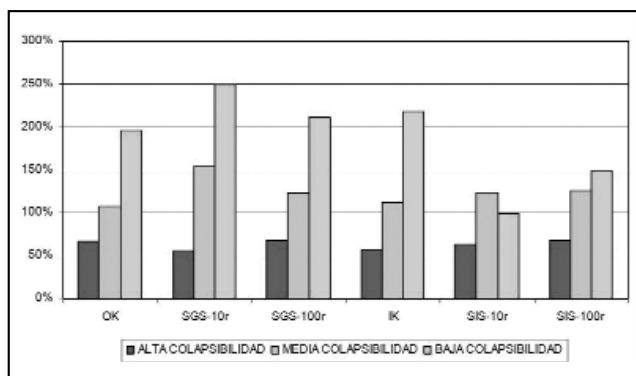


Figura 6. Relaciones entre las estimaciones/simulaciones y el valor de cálculo, expresado como porcentaje de éste.

Los resultados obtenidos en los puntos de control, tanto por estimaciones como simulaciones, pueden afectar en la tipología de los menos colapsables, que serían sobrecategorizados. En cambio, los suelos de alta colapsabilidad, si bien numéricamente son subestimados, no cambiarían de categoría debido a que tiene un rango amplísimo (mayor a 35 cm.).

En cuanto a la elección de metodología de mapeo, no existen diferencias sustanciales entre las estimaciones y las simulaciones en los puntos de control, en las que se muestran iguales tendencias. Hay que tener en cuenta que las simulaciones tienen mayor gasto computacional y tareas de postprocesamiento. Los mapas suavizados de estimaciones como los provistos por kriging son apropiados para mostrar las tendencias globales, mientras que los simulados tienden a ser usados en aquellos estudios en donde se deban reflejar los patrones de variabilidad local. Un caso típico es en las simulaciones de flujo.

Dado que una realización hace honor a los datos (al reproducir el histograma del muestreo) parece importante que puedan ser usado como un mapa de interpolación para esas aplicaciones donde la reproducción de los rasgos espaciales es más importante que la precisión local (*Deutsch et al 1998*).

CONCLUSIONES

La localización de los suelos colapsables de la ciudad de Córdoba ha sido representada por distintos mapas desde hace varias décadas y las zonas potenciales de generar daños han sido localizadas en las planicies loessicas al norte y sur del río Suquia.

La visualización de la variabilidad espacial del comportamiento de loess referidos a la colapsabilidad, se puede apreciar a través de la representación de los asentamientos máximos

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ALI, M.M., E.A. NOWATZKI AND D.E. MYERS, 1989.
Geostatistical methods to predict collapsing soils. Proc. XII Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Vol 1, pp 567-570.
- AUVINET, G., M. JUAREZ AND Z. MEDINA, 2001.
Geostatistical interpretation of soil exploration. Proc. XV Intl. Conf. Soil Mech. Geot. Engng. Istanbul. Vol 1, pp 373-376.
- AUVINET G., AND M. JUAREZ, 2003.
Geostatistical Characterization of the Lacustrine subsoil of Mexico valley. Proc. XII PanAm. Conf. Soil Mech. Geot. Engng. Boston. Vol 1: 61-66.

que ocurrirían en construcciones fundadas en forma directa. Esto se ha realizado multiplicando los espesores de los loess por las deformaciones que corresponden a cada tipo de loess, cuando son cargados con 1, 2 y 3 plantas.

Para extender los asentamientos resultantes por colapso en los puntos computados hacia el resto de la zona loessica se pueden emplear estimaciones geoestadísticas y simulaciones estocásticas.

Se ha partido de los datos contenidos en 481 perfiles en donde se han computado los asentamientos máximos por colapso debido al humedecimiento del suelo. Se ha tomado el caso de construcciones de una planta fundadas en forma directa.

Las interpolaciones se han realizado empleando SADA v. 5, que está integrado con un sistema de información geográfica. Este programa es el que brinda las mejores prestaciones en cuanto a costos y amigabilidad.

Se han producido mapas con los asentamientos esperables y sus variaciones areales por medio de Kriging Ordinario (OK) y Kriging de Indicadores (IK) y se han comparado con sus analogías estocásticas, la Simulación Gaussiana Secuencial (SGS) y la Simulación de Indicadores Secuenciales (SIS).

Se han tomado como referencia los umbrales de 15 y 35 cm, que son la base de clasificación usada en China. Los resultados del tipo I, que es el más bajo, tienden a ser sobrevaluados y los del tipo III, a ser subvaluados.

La confiabilidad de estas extrapolaciones se puede visualizar observando los mapas de variancia. En las zonas donde se observan los valores más altos son aquellos en donde es esperable tener una menor confiabilidad. Las estimaciones y simulaciones son relativamente correctas, con coeficientes de correlación superiores al 80% en valores absolutos de asentamiento, cuando pertenecen a sitios que tienen datos vecinos dentro de los 300 m.

El control realizado en puntos independientes no señala diferencias numéricas sustantivas entre los distintos métodos, en el sentido de que muestran igual tendencia. Hay diferencias en cuanto al mayor gasto computacional de las simulaciones estocásticas, por lo que se la debería reservar para problemas donde se deban reflejar los patrones de variabilidad local.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la U.N.C. y de la Agencia Córdoba Ciencia (Gobierno de Córdoba).

- BAECHER, G.B. AND J. CHRISTIAN, 2003.
Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering.
J. Wiley, 605 pp. Chichester. UK.
- BODENBENDER G., 1890.
La cuenca del valle del Río Primero en Córdoba.
Bol. Ac. Nac. Ciencias. Córdoba. Tomo XII, pp 5-54.
- BRUS, DJ AND J.J. DE GRUIJTER, 1997.
Random sampling or geostatistical modeling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with Discussion).
Geoderma 80, pp 1-44. Discussion 45-59.
- CHRISTIAN, J.T., 2003.
Geotechnical Engineering Reliability: How well do we know what are doing?
ASCE J.GGE Vol 130, No 10, pp 985-1003.
- DAVIS, J.A., 1986.
Statistics and data analysis in Geology.
J. Wiley, 646 pp., New York.
- DEUSTCH, C.V. AND A.G. JOURNAL, 1998. GSLIB.
Geostatistical Software Library and User's Guide.
Oxford U. Press, 369 pp. London. U.K.
- GILES, D., 1994.
Geostatistical interpolation techniques for geotechnical data modeling and ground conditions risk and reliability assessment.
B.O.Skipp, ed. Risk and Reliability in ground engineering.,pp 202-214. Thomas Telford, London.
- GOOVAERTS, P., 2000.
Estimation or simulation of soil properties? An optimization problem with conflicting criteria.
Geoderma 97, pp 165-186.
- GOOVAERTS, P. (2009)
Geostatistical software.
En Fisher and Getis eds. Handbook of Applied Spatial analysis. 129-138. Springer.
- INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL MODELING (2008)
SADA: Spatial Analysis and Decision Assistance.
V.5. University of Tennessee
- ISAAKS, E.H AND R.M. SRIVASTAVA, 1989.
An introduction to Applied Geostatistics.
Oxford U. Press, 561 pp. New York .
- LIN Z. AND W. LIANG, 1982.
Engineering properties and zoning of loess and loess-like in China.
Can. Geot. J. 19, pp 76-91.
- MINASNY, B., A.B.MCBRATNEY AND B.M.WHELAN, 2002.
Vesper. Australian Centre for Precision Agriculture, Mc Millan Bld A05,
The University of Sydney, NSW, Australia.
- PARSONS, R.L. AND J.D. FROST, 2002.
Evaluating site investigation quality using GIS and Geostatistics. J.
Geot. Geoenv. Engng. Vol 128: 451-461.
- QUINTANA CRESPO, E., 1991.
Sistema de evaluación geotécnica del terreno en áreas urbanas.
Asoc. Arg. Geol. Apl. Ing. Actas VI: 189-201.
- REGINATTO, A., 1970.
Propiedades mecánicas de algunos suelos de la ciudad de Córdoba.
Memorias 2 R.A.M.S.I.F. Vol. 1. Córdoba.
- ROCCA, R. J., 2002.
Cálculo del asentamiento por colapso en suelos loessicos de Córdoba. Proc.
XVI Congr.Arg. Mec. Suelos e Ing. Geotec. Trelew. pp 36-47.
- ROCCA, R.J., 2004.
Variaciones areales de la colapsabilidad en la ciudad de Córdoba.
XVI Congreso Arg. Mec.Suelos e Ing.Geot. Vol 1. Córdoba.
- ROCCA, R. J., 2005
Método simplificado para el cálculo del asentamiento por colapso en suelos loessicos de Córdoba.
Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, tomo 57: 137-146.

- ROCCA R.J., 2006.
Confiabilidad de las estimaciones de colapsibilidad de la ciudad de Córdoba.
XVIII CAMSIG. Vol I. San Juan
- ROCCA, R.J., E. QUINTANA CRESPO Y V. RINALDI, 1990.
Modelación geotécnica del subsuelo de la ciudad de Córdoba.
As. Arg. Geol. Apl. Ing. Actas V:121-130.
- ROCCA, R.J., E. QUINTANA CRESPO, M.G. GOIO Y E.G. ABRIL, 1995.
Carta geotécnica de la ciudad de Córdoba.
Asoc. Arg. Geol. Apl. Ing. Pub. Esp. 3: 322-340.
- ROCCA, R.J. AND E. QUINTANA CRESPO, 1999.
Geotechnical zonation of Cordoba city (Argentina) using cluster analysis. Proc.
XI PanAm. Cong. Soil Mech. Geot. Eng. Vol II: 659-666. Foz Iguazu. Brasil.



Biodisponibilidade do metal zinco em latossolo e chernossolo tratados com lodo de esgoto

Almeida Cruz, Bruno ¹ ✉ - Alamino, Renata C. J.¹ - Polivanov, Helena ¹ - Barroso, Emilio ¹

Recibido: 15 de setiembre 2009 • Aceptado: 05 de mayo de 2010

Resumen

El lodo procedente de la depuración de las aguas residuales en las estaciones de tratamiento es comúnmente utilizado como correctivo del suelo. Pero la presencia de metales pesados puede llevar a la contaminación del propio suelo y de las aguas subterráneas. En este trabajo se utiliza el metal zinc como un marcador en el transporte de metales pesados en columnas verticales de suelos. Dos suelos distintos fueron utilizados: Latosolos y Chernosolos. Primeramente se realizó la toma de las muestras de los dos suelos buscando preservar la estructura y también muestras en el estado perturbado, aparte del lodo. Después se caracterizaron los suelos desde el punto de vista químico, físico-químico y físico. Entonces se procedió a los testes en la columna, cuyo interés es simular la percolación de fluidos en el medio poroso. Las fracciones líquida y sólida fueran analizadas respectivamente por medio de la espectrometría de masa y de la espectrometría de emisión atómica. Los datos indican que el zinc se quedó biodisponible casi inmediatamente. Tomándose en consideración los valores referenciales propuestos por la Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental del Estado de São Paulo, se puede afirmar que las concentraciones de zinc en los suelos permiten clasificarlos como contaminados.

Palabras clave: Columna, lodo, zinc.

Abstract

O lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento tem sido largamente empregado como corretivo de solo. No entanto, a presença de metais pesados neste material pode levar a contaminação do próprio solo e da água subterrânea. Neste trabalho utilizou-se o metal zinco como marcador do transporte de metais pesados em colunas de percolação em laboratório. Dois diferentes solos foram utilizados: Latosolos e Chernosolos. Inicialmente realizou-se a coleta de amostras não deformadas e amolgadas de solo, além do lodo de esgoto. Em seguida foram realizadas as caracterizações químicas, físico-químicas e físicas dos materiais coletados. Seguiu-se com o ensaio de coluna que simula a percolação de fluidos no meio poroso. Após o ensaio, as frações líquida e a sólida foram analisadas utilizando espectrometria de massas e espectrometria de emissão atômica por plasma, respectivamente. Os resultados mostraram que o zinco tornou-se biodisponível instantaneamente. Considerando-se os valores de referência para concentração de Zinco da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, as concentrações de Zinco retido nos solos os caracterizam como contaminados.

Palavras chave: Ensaio de coluna, lodo de esgoto, zinco.

¹ Dept. Geologia, IGeo-UFRJ.

✉ E-mail: brunolacruz@gmail.com

INTRODUÇÃO

Desde a década de 70, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas visando à utilização de lodo de esgoto, que é um resíduo sólido, rico em matéria orgânica e nutrientes, gerado no tratamento de esgotos. Este material pode desempenhar importante papel na produção agrícola e na manutenção da fertilidade do solo devido às suas características, mas, por outro lado, ele também pode ser altamente tóxico, pois além da fração orgânica, tem-se uma fração inorgânica composta por partículas minerais, sais e metais pesados potencialmente tóxicos, dentre eles o Zinco (Zn).

A simples presença de elevadas concentrações de metais não é uma clara indicação de risco, no entanto, uma vez biodisponível, o elemento químico poderá ser transferido para o ecossistema. A disponibilidade e a solubilidade destes são controladas por fenômenos de adsorção, complexação, oxi-redução, e precipitação, podendo alcançar níveis tóxicos nos solos.

O processo de migração e retenção de poluentes no solo é influenciado por diversos fatores relacionados ao fluido percolante, ao próprio solo e às condições ambientais (tipo de solo, mineralogia, CTC, espécies de cátions adsorvidos, velocidade de percolação, teor de matéria orgânica, concentração do contaminante, presença de outras substâncias na solução percolante, condições hidrogeológicas, temperatura e pH do meio). Uma das maneiras mais difundidas de se estudar essa migração é através de ensaios de coluna de percolação. (Alamino 2010).

Segundo Oliveira et. al. (2002), o zinco se apresenta como um elemento móvel no perfil do solo, com grande potencial para atingir as águas subterrâneas por ocasião de aplicações sucessivas de composto de lixo urbano. Pigozzo et. al. (2004) em seu trabalho também chegou à conclusão de que a aplicação do lodo de esgoto no solo proporcionou elevados teores de metais no solo, os quais aumentaram gradativamente ao aumento das doses do lodo de esgoto aplicado.

Ensaio de coluna é um termo genérico que denomina a simulação da percolação ou do contato de fluidos com diferentes materiais com o objetivo de se estudar o fluxo do fluido e dos componentes desse e suas interações com o meio em questão. A vantagem do seu emprego dá-se devido à disseminação e consagração do seu uso e por utilizar amostras estruturadas semelhantes às condições de campo onde as superfícies de partículas não estão completamente expostas ou disponíveis para a interação com os contaminantes químicos.

OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da aplicação de lodo de esgoto em diferentes sistemas de solos. Utilizou-se o Zn como elemento indicador da transferência de metais pesados presentes no lodo de esgoto quando aplicado como regenerador em áreas degradadas. Para o estudo foram realizados ensaios de coluna de lixiviação, em sistemas compostos por lodo de esgoto e Latossolos e lodo de esgoto e Chernossolo, e através da análise do metal indicador buscou-se avaliar a biodisponibilidade do Zn e a sua possível transferência para solos e águas.

METODOLOGIA

Trabalhos de campo

Esta etapa constou da aquisição de amostras deformadas e indeformadas de: Chernossolo na Rua Caminho Rodrigues

s/n, Vila Kennedy, Rio de Janeiro - Brasil, próxima à Av. Brasil nº 34.926; de Latossolo, no km 111 da Rodovia Washington Luis, sentido Rio-Petrópolis, no município de Duque de Caxias, Rio de Janeiro - Brasil; e de lodo de esgoto na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Ilha do Governador, localizada no bairro Moneró, Rio de Janeiro - Brasil.

Os blocos de amostra indeformada foram parafinados e acondicionados em local apropriado para não perder as características originais de campo em um ambiente controlado (laboratório) e o lodo de esgoto foi acondicionado em sacos plásticos de 25kg.

Procedimentos laboratoriais

O lodo de esgoto foi caracterizado em laboratório para determinar o potencial agrônomico, a presença de substâncias inorgânicas, as propriedades físicas (granulometria, massa específica) e mineralógicas (difratometria de raios-X).

Os solos coletados foram caracterizados por meio de ensaios químicos e físico-químicos (análise química total; complexo sortivo; determinação de pH; determinação de condutividade elétrica; ataque sulfúrico; teor de carbono orgânico e percentual de matéria orgânica), físicos (teor de umidade, granulometria, porosidade, massa específica), mineralógicos (difratometria de raios-X).

A etapa seguinte constituiu na simulação de dois perfis onde o horizonte superior foi representado pelo lodo de esgoto e os inferiores por amostras indeformadas dos horizontes B do Latossolo e do Chernossolo. Esses perfis foram representados em colunas onde foi realizado ensaio de lixiviação, tendo como fluido percolante água adicionada do sal BaCl₂. Ao término desta etapa, as concentrações do metal Zn (no lixiviado e no solo da coluna) foram determinadas por meio de análise química.

Potencial Agrônomico

A determinação da fertilidade no lodo, ou seja, as concentrações dos elementos Fósforo (P), Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Enxofre (S), e Nitrogênios (N): - N Kjeldahl (soma dos nitrogênios orgânico e amoniacal presentes em detritos de nitrogênio orgânico oriundos de atividades biológicas naturais), N amoniacal e N nítrico - foram determinadas conforme a Resolução 375 do CONAMA (BRASIL 2006).

A análise do carbono orgânico foi realizada por via úmida, segundo as normas da Embrapa (1997). O percentual de matéria orgânica foi determinado multiplicando-se o teor de carbono orgânico pelo fator 1,724, pois admite-se que na composição média do lodo o carbono participe com 58% (Embrapa 1997).

Análise química total

A análise química total dos solos foi realizada por meio de espectrometria de fluorescência de Raios - X. No lodo de esgoto foi determinada por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado com determinação por ICP-AES de acordo com a norma US-EPA, SW-846, método 3051 (1994), conforme Resolução 375 do CONAMA (BRASIL 2006).

Complexo sortivo

Consistiu na determinação dos cátions trocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Al³⁺ e H⁺), conforme Embrapa (1997). Com esses dados foram calculadas o Valor S (refere-se a soma

das bases trocáveis), Valor T (refere-se a atividade das argilas), Valor V (saturação das bases trocáveis) e a saturação de alumínio trocáveis, conforme as equações 1,2,3,e,4. (Alamino 2010)

$$S = [Ca^{+2}] + [Mg^{+2}] + [Na^+] + [K^+] \quad (1)$$

$$T = S + [Al^{+3}] + [H^+] \quad (2)$$

Considerando-se T alto para valores $\geq 27 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ e T baixo para valores $< 27 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$;

$$V = \frac{S \times 100}{T} \quad (3)$$

Sendo classificado como: Eutrófico ($V > 50\%$) ou Distrófico ($V < 50\%$);

$$\text{Saturação de alumínio trocáveis: } \frac{100 [Al^{3+}]}{S + [Al^{3+}]} \quad (4)$$

Quando é maior que 50%, os solos são classificados como álicos.

Potencial de Hidrogênio (pH)

As determinações do pH em água e KCl foram realizadas por meio de pHmetro, conforme *Embrapa (1997)*. Com a finalidade de se obter a carga do solo calculou-se o valor de ΔpH (equação 5). Solos com $\Delta pH = 0$ são classificados como neutros, com $\Delta pH > 0$ são eletropositivos e com $\Delta pH < 0$, eletronegativos.

$$\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O}$$

Ataque Sulfúrico

Este ensaio foi realizado no Latossolo e no Chernossolo, a fim de obter as relações moleculares (k_i e k_r), e foi realizado conforme *Embrapa (1997)*. Esses dados permitem avaliar estágios de intemperização de solos. As equações para determinação das relações moleculares são:

$$k_i = \frac{SiO_2 \cdot 1,7}{Al_2O_3} \quad (6)$$

$$k_r = \frac{SiO_2 \cdot 1,7}{Al_2O_3 + (Fe_2O_3 \cdot 0,64)} \quad (7)$$

Difratometria de Raios-X

A mineralogia da fração argila dos solos e do lodo foi determinada pelo método da Difração de raios X. Para a retirada da fração argila adotou-se o método da *Embrapa-CNPS (1997)*. Depois de realizada as separações da fração argila foram confeccionadas lâminas orientadas pelo método do esfregaço (*Theissen & Harvard, 1962*). Após este procedimento, os materiais foram submetidos ao difratômetro Rigaku - Termoflex velocidade de $1^\circ/\text{min}$, ddp de 40kV e corrente de 30mA. Em seguida as lâminas foram submetidas a uma atmosfera saturada de etilenoglicol por 4 horas para determinar os minerais expansivos. Posteriormente as lâminas foram aquecidas a temperaturas de 500°C para a identificação de possível colapso e/ou destruição da estrutura dos argilominerais.

Ensaio Físicos

Foram determinados a granulometria, limites de Atterberg e porosidade.

Granulometria

Para o reconhecimento do tamanho dos grãos dos solos e do lodo, realizou-se a análise granulométrica, de acordo com a norma, NBR-7181 (*ABNT, 1984*). Esta norma prescreve o método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por combinação de sedimentação e peneiramento.

Limites de Atterberg

Os teores de umidade limites entre os estados de consistência são chamados de Limites de Consistência ou de Atterberg e se baseiam no fato de que um solo pode existir em qualquer um dos quatro estágios de plasticidade dependendo da quantidade de água que nele estiver presente. Os limites recebem as seguintes denominações: limite de liquidez (LL) e Limite de plasticidade (LP). Com esses dados determinou-se o índice de plasticidade (IP).

Limite de liquidez

A determinação do limite de liquidez (LL) foi executada segundo Norma NBR-6459, (*ABNT, 1984*) que representa o teor de umidade limite entre o estado plástico e líquido do solo.

Limite de plasticidade

O limite de plasticidade (LP) foi feito de acordo com a norma *ABNT NBR-7180 (1984)*, que representa o teor de umidade limite entre os estados semi-sólido e plástico.

Índice de plasticidade - IP

O IP foi determinado pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, conforme equação 8, portanto refere-se a faixa de umidade na qual o solo se comporta plasticamente

$$IP = LL - LP \quad (8)$$

Massa específica dos sólidos (ρ_s) e massa específica aparente (ρ_a)

A massa específica dos sólidos (ρ_s) e a massa específica aparente (ρ_a) foram obtidas de acordo com a norma *ABNT NBR-6220*, onde a massa específica aparente de uma amostra de solo é determinada pela razão entre a massa total da amostra e seu volume (equação 9), e a massa específica dos sólidos é a razão entre a massa dos sólidos e o volume total da amostra (equação 10).

$$(\rho_a) = \frac{M_t}{V_t} \quad (9)$$

$$(\rho_s) = \frac{M_s}{V_t} \quad (10)$$

Porosidade aparente (η_a)

A porosidade aparente é a razão entre o volume de vazios (V_v) e o volume aparente (V_a) de uma amostra de solo, sempre expressa em porcentagem. Sua determinação é regida segundo a norma *ABNT NBR-6220*, e dada pela seguinte expressão:

$$\eta_a = \frac{V_v}{V_a} \quad (11)$$

Pode ser definida, também, indiretamente através da relação entre a massa específica aparente e a massa específica dos sólidos, dada pela equação 12.

$$\eta_a = \frac{1 - \rho_a}{\rho_s} \quad (12)$$

Este ensaio não foi realizado para o Chernossolo, pois os valores para o mesmo foram retirados da bibliografia de Polivanov *et al* 1990.

Ensaio de coluna de percolação

O ensaio de coluna de percolação simula a percolação ou o contato de fluidos com diferentes materiais com o objetivo de estudar o fluxo do fluido e dos componentes desse e suas interações com o meio em questão.

Este ensaio propõe estudar uma possível extração de metais da fração biodisponível dos perfis simulados (lodo-solo), onde o horizonte superior foi representado pelo lodo de esgoto e o inferior representado pelos horizontes B, tanto do Latossolo quanto do Chernossolo. Os ensaios foram realizados com as amostras indeformadas dos solos, de modo que suas características de permeabilidade fossem mantidas tais como as encontradas em condições naturais. Por cima das camadas indeformadas, foi adicionado o lodo de esgoto, previamente seco e moído, simulando uma camada de horizonte O.

Neste trabalho, entende-se por fração biodisponível, a concentração do metal Zn retida nas frações solúvel e trocável dos solos, pois são os metais presos à essas frações que apresentam mobilidade no perfil solo-lodo, e estão disponíveis para a absorção pelas raízes das plantas. Os metais adsorvidos nas entre-camadas de argilas, precipitados com carbonatos, ligados a óxidos ou complexados pela matéria orgânica podem ser considerados menos biodisponíveis, dependendo da combinação das propriedades químicas e físicas do solo (SPOSITO *et al.* 1982).

A quantidade de lodo simulando o horizonte O foi calculado com base na razão descrita por Tsutiya (2000), utilizando assim a taxa de aplicação considerada típica para a recuperação de áreas degradadas: 112 toneladas secas/hectare.

Decidiu-se usar como percolante uma solução que fosse capaz de extrair metais da fração mais disponível do solo. Para isso foi escolhida uma solução de $BaCl_2$ (0,1 mol/L), comumente utilizada para retirar os metais da fração trocável dos solos nos ensaios de extração seqüencial, uma vez que estes metais constituem a parcela que está disponível a assimilação pela biota, juntamente com os metais ligados à fração solúvel. Neste trabalho a água não foi escolhida como percolante para extrair os metais presos à fração solúvel, pois em ensaios anteriores as concentrações dos metais presos a essa fração mostraram-se muito baixas. Como ambas as frações são consideradas biodisponíveis, foi mais interessante trabalhar com os metais presos à fração trocável, pois assim temos uma quantificação mais próxima do real, sem subestimar as concentrações biodisponíveis.

O ensaio foi montado de maneira que se tivesse um gradiente uniforme $i=10$ e as cargas hidráulicas se mantivessem constantes.

Foram realizados seis ensaios, sendo um com o perfil simulado com Latossolo e o outro com Chernossolo. Foram executadas réplicas nas duas simulações. As denominações dos sistemas ensaiados receberam as denominações LAT1, LAT2, LAT3, CH1, CH2 e CH3, respectivamente.

Após o ensaio, a fração líquida, representada pelos lixiviados, e a fração sólida, representada pelos solos, foram analisadas por meio de espectrometria de massa acoplada a plasma induzido de argônio (ICP-MS) e espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado (ICP-AES), conforme Embrapa

(1997), respectivamente, para verificar as concentrações de Zn presentes nos mesmos. *Montagem do ensaio*

O sistema do ensaio de coluna de lixiviação está representado na Figura 1. Junto a esse esquema, foi adaptado um cronômetro.



Figura 1. Sistema de reservatório do ensaio de coluna de lixiviação, composto de reservatório tanque, reservatório inferior, vazadouro, torneiras e cronômetro.

As colunas foram moldadas em tarugo de acrílico de 70mm de diâmetro e as ponteiras para a cravação no solo em tarugo de latão de 73mm de diâmetro. Os cilindros de acrílico confeccionados (compartimentos para o solo indeformado) têm 50mm de diâmetro interno e 50mm de altura, perfazendo um volume de 98,125 mm³. Nas partes superiores das colunas foram acoplados novos cilindros para a disposição do lodo de esgoto, do disco de pedra porosa e encaixe para as tampas, também de acrílico, com um engaste para as mangueiras. (Figura 2)

Os discos de pedra porosa foram fabricados em laboratório a partir de uma mistura de esferas de vidro de granulometria areia média e 5% do seu peso em araldite lento (2,5% da resina e 2,5% do endurecedor). A mistura foi disposta em moldes untados com vaselina e seu topo foi uniformizado com a utilização de régua sendo a face de exposição à luz invertida a cada 8 horas no intervalo de 24 horas como determinado por Stancati (1991).

Por fim, o percolado foi filtrado em membranas geotêxteis acopladas a funis, recolhido em becheres e/ou provetas graduadas e armazenado sob refrigeração até a posterior análise química (Figura 3).

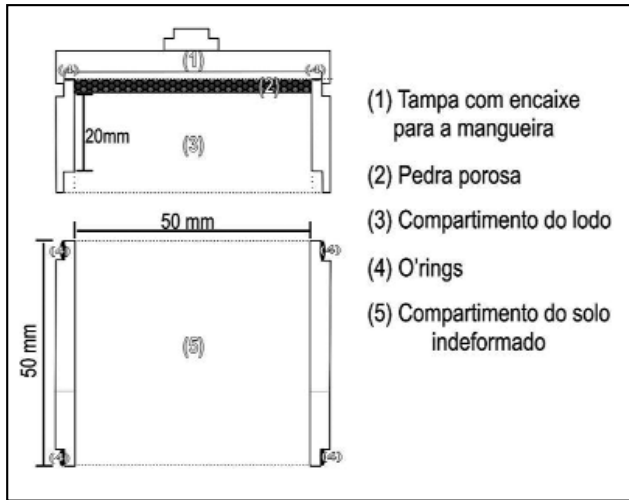


Figura 2. Esquema da coluna de lixiviação utilizada no ensaio (Alamino, 2010).



Figura 3. Sistema de filtração do percolado no ensaio de coluna de lixiviação.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ensaio Físicos

Granulometria e limites de Atterberg

A partir da Tabela 1, pode-se observar que o lodo de esgoto possui na sua composição predominância de material silto (65%), seguido da fração areia (30%); enquanto no Latossolo há uma predominância da fração argila (44%), seguida da fração areia (30%) e silte com 26%. Já no Chernossolo, a fração areia é predominante (41%) seguida pela fração silte (35%) e argila com 24%.

De acordo com a carta de plasticidade para classificação dos solos finos (silte+argila) segundo o SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos) os solos estudados encontram-se dentro do grupo das argilas muito plásticas (CH), com exceção ao lodo de esgoto, que foi classificado como não plástico (NP), vide Figura 4.

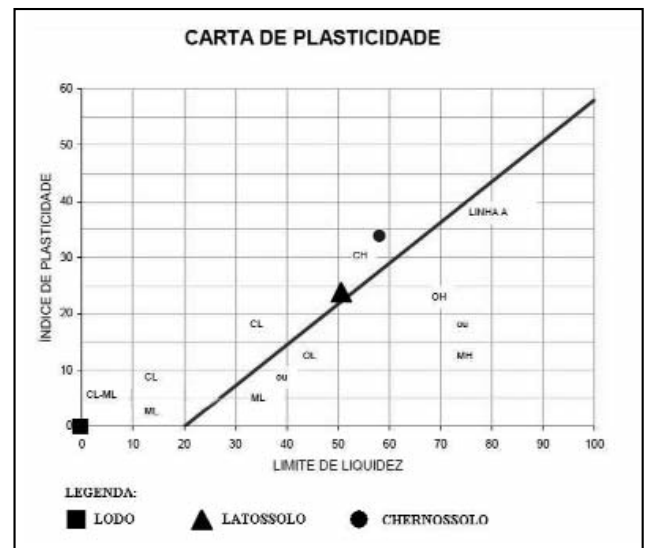


Figura 4. Carta de plasticidade para classificação dos solos finos, SUCS.

Tabela 1. Resultados das análises granulométricas e dos limites de Atterberg.

Amostra	Limites de Atterberg (%)			Granulometria (%)					Ped
	LL	LP	IP	Arg	Sil	Areia			
						F	M	G	
Lodo	--	--	NP	5	65	20	9	1	0
Latossolo	51,1	29,6	21,5	44	26	24	4	2	0
Chernossolo	58	24	34	24	35	33	8	0	0

Tabela 2. Resultados dos índices físicos.

Amostra	Umidade (%)	ρ_s g/cm ³	ρ_a g/cm ³	η_a (%)
Lodo	27,88	1,99	--	
Latossolo	2,90	2,66	1,52	42,31
Chernossolo	6,9	2,77	2,06	25,63

Massa específica e porosidade aparente

Observa-se que o Chernossolo possui massa específica dos sólidos (ρ_s) mais elevada que o Latossolo, que por sua vez é mais elevada que o lodo de esgoto (Tabela 2). Essa proporção se mantém para a análise de massa específica aparente (este ensaio não foi realizado no lodo de esgoto). Nota-se também uma elevada diferença entre os valores de porosidade entre os diferentes sistemas de solos, onde o Latossolo apresenta porosidade mais elevada em relação ao Chernossolo.

Ensaio Químico e Físico-Químico

Os dados apresentados na Tabela 3 indicam que as amostras têm um caráter ácido, destacando uma acidez maior por parte do Latossolo.

Os valores de ΔpH obtidos indicaram que as amostras têm predominância de cargas superficiais negativas, tendo preferência em adsorver maiores quantidades de cátions do que de ânions para a sua superfície.

Os resultados expostos na Tabela 4 mostram que para o Latossolo os cátions Mg^{+2} , Ca^{+2} , K^+ e Na^+ trocáveis apresentam valores muito baixos, determinando valores S e T baixos, o que indica uma intensa lixiviação destes elementos. O Latossolo é então classificado como de baixa atividade

(Valor T < 27 $cmol_c/dm^3$) com caráter distrófico (Valor V < 50%). Já o Chernossolo apresenta valores altos desses cátions, obtendo assim valores S e T altos, indicando que o sistema sofreu pouca lixiviação, sendo classificado como de alta atividade (Valor T > 27 $cmol_c/dm^3$) com caráter eutrófico (Valor V > 50%).

Os valores de carbono orgânico e de matéria orgânica para o lodo de esgoto são elevados, o que possivelmente influenciará de maneira significativa na elevação da CTC dos solos aonde este for adicionado.

O ataque sulfúrico e a análise química total foram realizados nas amostras de Latossolo e Chernossolo (Tabela 5). Com base nos resultados obtidos verifica-se que o Latossolo é mais lixiviado que o Chernossolo, evidenciado pelo mais baixo valor de Ki. (Pεσενδε & Σαντανα 1988).

A análise química total foi realizada com o intuito de não gerar falsas interpretações das concentrações dos elementos estudados nos ensaios de coluna e foi realizada de acordo com a Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL 2006). Observa-se na Tabela 6, que a concentração do Zn no lodo está respeitando o limite máximo especificado pela mesma. Porém, ao se comparar este resultado com o valor orientado para solos estipulado pela Cetesb (2005), nota-se que a concentração se encontra muito acima do limite estipulado.

Tabela 3. Valores de pH e complexo sortivo para o Latossolo e o Chernossolo.

Amostras	pH			CTC							100 Al ³⁺	
	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	Ca ²⁺			Valor			Valor T	Valor V	/ S+Al ³⁺
				+	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H ⁺			
	cmol_c / dm³											(%)
Latossolo	4,2	4,1	-0,1	0,2	0,02	0,03	0,2	0,2	1	2,3	9	0
Chernossolo	6,2	3,6	-2,6	40,5	0,03	1,44	42	1,4	4,8	48,3	87	3

Tabela 4. Resultado do potencial agrônomo do lodo de esgoto.

Caracterização do lodo quanto ao potencial agrônomo													
pH H ₂ O	Sólidos Totais %	Sólidos Voláteis %	C.O. g/kg	M.O. g/kg	N		N nítrico mg/kg	Ca g/kg	S mg/kg	P mg/kg	Mg mg/kg	K mg/kg	Na mg/kg
					Kj	amon							
7,3	37,4	48,3	337,2	581	23,4	1033	16	11,9	8,1	4,2	3,4	922	392

Obs: C.O. = carbono orgânico; M.O. = teor de matéria orgânica; NKj = Nitrogênio Kjeldahl (soma dos nitrogênios orgânico e amoniacal presentes em detritos de nitrogênio orgânico oriundos de atividades biológicas naturais); N amon = Nitrogênio amoniacal

Tabela 5. Resultados do ataque sulfúrico e análise química total dos solos.

Amostra	Ataque Sulfúrico			ki	kr	Análise Química Total					Traços
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃			Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	
Latossolo	23	21,5	1,9	1,83	1,73	26,4	61,3	0,9	7,8	0,2	Na, Mg, Ca, K, Cr, Mn, Ni, Nb, Y, Ce
Chernossolo	17,8	13,8	9,2	2,19	1,54	18,84	49,27	2,56	11,19	0,05	-

Tabela 6. Caracterização do lodo quanto à presença de substâncias inorgânicas.

	Substâncias Inorgânicas
	Zn (mg/kg)
Conc. - lodo ETIG	620
Conc. máx. permitida no lodo -base seca ⁽¹⁾	2800
Referência de valores orientados para solos ⁽²⁾	60

⁽¹⁾BRASIL 2006; ⁽²⁾Cetesb (2005)

Ensaio Mineralógico

A análise dos resultados mostra que a matéria mineral do lodo de esgoto é predominantemente caulínica, contendo proporções menores de illita, goethita seguida de vermiculita, o Latossolo é representado basicamente por caulinita seguido de gibbsita e goethita e o Chernossolo é representado predominantemente pela vermiculita, seguida da caulinita, interestratificado I – S e illita

Ensaio de coluna de lixiviação

Os dados referentes às quantificações dos elementos presentes no sistema solo-lodo estão apresentadas em tabelas comparativas, relacionando as quantidades presentes em ambas as fases com seus respectivos limites estipulados pelos órgãos competentes, no caso, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb).

Tabela 7. Mineralogia dos solos estudados por DRX e percentual de argilominerais.

Amostra	Mineralogia	(%)
Lodo de esgoto	Caulinita	91
	Illita	5
	Goethita	3
	Vermiculita	1
Latossolo	Caulinita	79
	Gibbsita	13
	Goethita	8
Chernossolo	Vermiculita	73
	Caulinita	21
	Interestratificado I – S	4
	Illita	2

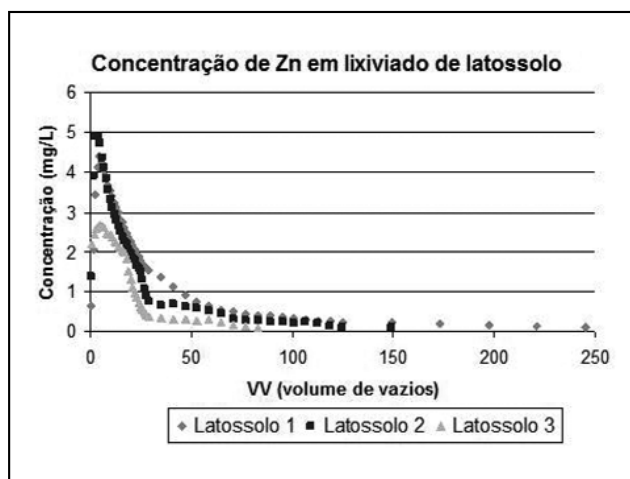


Figura 5. Concentrações de zinco ao longo do ensaio no sistema lodo-Latossolo.

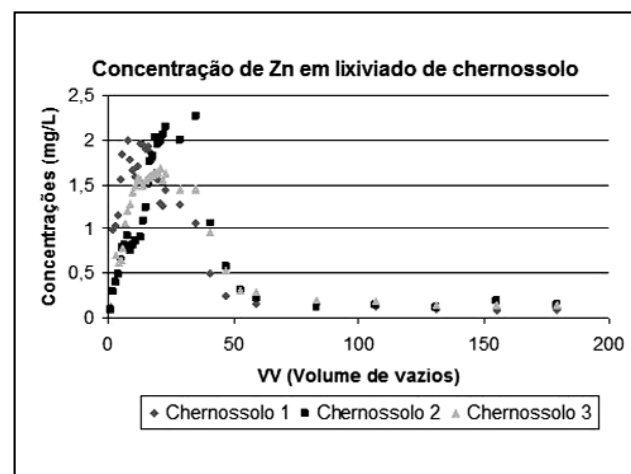


Figura 6. Concentrações de zinco ao longo do ensaio no sistema lodo-Chernossolo.

Tabela 8. Valores máximos permitidos para cada um dos usos considerados como preponderantes de acordo com o CONAMA (BRASIL 2008) para águas subterrâneas.

Usos Preponderantes da Água			
Consumo Humano	Dessedentação de animais	Irrigação	Recreação
5	24	2	5

Tabela 9. Dados das concentrações de Zn obtidas no lixiviado após ensaio.

Concentração de Zn nos lixiviados (mg/L)					
LAT 1	LAT 2	LAT 3	CH 1	CH 2	CH 3
4,38	4,92	2,66	1,99	2,27	1,69

Tabela 10. Dados comparativos das concentrações de Zn retido nos solos após ensaio, correlacionados com os valores orientadores para solos, segundo Cetesb 2005.

Valor orientado de Zn para solos (Cetesb)	Concentração de Zn retidos nos solos (mg/kg)					
(mg/kg)	LAT 1	LAT 2	LAT 3	CH 1	CH 2	CH 3
60	10,9	8,09	9,95	74,4	65,3	65,1

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos conclui-se que o Zn apesar de tornar-se disponível rapidamente, o que seria um problema para contenção de plumas de contaminação, apresenta concentrações abaixo dos limites estipulados pelo CONAMA (BRASIL 2008), na proporção utilizada neste ensaio, para as águas destinadas ao consumo humano, dessedentação de animais e recreação, contudo, consiste contaminação para águas destinadas à irrigação, vide Tabelas 8 e 9. Pode-se concluir também que parte deste metal fica retido nos solos, apresentando concentrações acima das orientadas pela Cetesb (2005) (Tabela 10), consistindo contaminação dos mesmos na proporção estudada.

A discrepância entre os valores das concentrações dos metais retidos nos diferentes solos pode ser explicada pela diferença mineralógica e propriedades físicas entre estes. O Chernossolo reteve uma concentração cerca de sete vezes maior dos metais, pois em sua composição estão presentes argilominerais 2:1, com alta capacidade de retenção de cátions. Assim sendo, esses argilominerais são responsáveis pela grande quantidade de metais adsorvidos.

Com esse estudo conclui-se que a aplicação de lodo de esgoto como regenerador de solos deve ser usado com controle, pois essa técnica pode contaminar o ecossistema.

TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990, NBR 6220, Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e massa específica aparente da parte sólida de Materiais Refratários Densos. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1984. Solo - Análise granulométrica. (NBR - 7181).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1984. Solo - Determinação do limite de liquidez. (NBR - 6459).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1984. Solo - Determinação do limite de plasticidade. (NBR - 7180).

- ALAMINO, R. C. J.
A utilização de lodo de esgoto como alternativa sustentável na recuperação de solos degradados: viabilidade, avaliação e biodisponibilidade de metais.
Tese (Doutorado). UFRJ. Departamento de Geologia. 2010.
- BRASIL. Conselho nacional do meio ambiente.
Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006.
Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 ago. 2006. Seção 1,
- BRASIL. Conselho nacional do meio ambiente.
Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008.
Publicada no DOU nº 66, de 7 de abril de 2008, Seção 1, páginas 64-68.
- CETESB. Companhia de tecnologia de saneamento ambiental.
Decisão de diretoria nº 195-2005;
E, de 23 de novembro de 2005.
- EMBRAPA-CNPS 1997.
Manual de métodos de análise de solo.
2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMBRAPA.
Manual de métodos de análise do solo.
Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- EPA.
Microwave assisted acid digestion - sludges, soils.
EPA report SW-846, method 3051, 1994.
- OLIVEIRA, F. C. ; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; C. H. ABREU JUNIOR
Movimentação de metais pesados em Latossolo adubado com composto de lixo urbano.
Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v. 37, n. 12, p. 1787-1793, dezembro de 2002.
- PIGOZZO, A. T. J.; GOBBI, M. A. ; SCAPIM, C. A.; LENZI, E., LUCAS JUNIOR, J.; C.C. BREDI
Disponibilidade de metais de transição no solo tratado com lodo de esgoto.
Acta Scientiarum. Agronomy Maringá, v. 26, n. 4, p. 443-451, 2004.
- POLIVANOV, H.; CASTRO, A. C. J.; ANTUNES, F. S. ; L. C. A. CAMARA
Estudo de um perfil podzólico de brunizem da zona oeste do estado do Rio de Janeiro.
Anuário do Instituto de Geociências, v.13, p.17-29. 1990.
- RESENDE, M. & D.P. SANTANA,
Uso das relações Ki e Kr na estimativa da mineralogia para classificação dos Latossolos.
In: Reunião de classificação, correlação de solos e interpretação de aptidão agrícola, 3., Rio de Janeiro, 1988. Anais. Rio de Janeiro, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1988. p.225-232 (Documentos, 12)
- SPOSITO, G. et al.
Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge: fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases.
Soil Science Society America Journal, v.46, p.260-264, 1982.
- STANCATI, G.
Estudo experimental do comportamento tensão-deformação de uma argila adensada unidirecionalmente.
Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 244 p. 1991.
- THEISEN, A. A. & M. E. HARWARD, 1962.
A paste method for preparation of slides for clay mineral identification by X-Ray diffraction.
Soil Science of American Proceedings, 26: 90-91.
- TSUTIYA, M. T.
Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos.
In: W. Bettiol & O. A. Camargo (Ed.). Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, v.1, 2000. p. 69 -105.



Geoinformática aplicada al análisis multitemporal del carcavamiento en el piedemonte sur de la sierra de San Luis

Ojeda, Guillermo

Recibido: 30 de octubre de 2009 • Aceptado: 06 de mayo de 2010

Resumen

En las áreas pedemontanas que rodean las zonas serranas de la provincia de San Luis, las cárcavas son las geoformas activas más destacadas debido a su dinámica y dimensiones. Desde el punto de vista ambiental constituyen un grave problema debido a los daños que ocasionan al ecosistema. A pesar de ello, poco se conoce aún acerca de los procesos morfodinámicos y morfoevolutivos, elementos indispensables para realizar tareas de mitigación y/o prevención. Una de las metodologías que resultan en la actualidad más interesantes para el estudio del comportamiento morfodinámico de una cárcava, es la utilización de imágenes obtenidas mediante Teledetección dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG). En particular, el uso de imágenes satelitales de alta resolución espacial, como las que están disponibles a través de Google Earth, permiten el mapeo detallado de las cárcavas. Por su parte, las herramientas de medición y análisis que brindan los SIG, permiten la obtención de datos cuantitativos en forma rápida y precisa. La aplicación de estas herramientas geoinformáticas en la cuenca del arroyo La Barranquita, ha permitido obtener mapas detallados sobre el desarrollo del carcavamiento desde el año 1968 a la actualidad. Como resultado del trabajo se puede destacar que solo un 10 % del carcavamiento se ha producido con posterioridad a 1968 y el mismo está localizado en dos sectores principales, donde las velocidades promedio de retroceso de la cabecera presentan máximos entre 13 y 34 m/año.

Palabras Clave: Geoinformática, erosión, carcavamiento, piedemonte, San Luis.

Abstract

In the piedmont areas surrounding the mountain regions of the province of San Luis, the gullies are the most prominent active landforms due to their dynamics and dimensions. From the environmental perspective is a serious problem due to the damage caused to the ecosystem. However, little is known yet about morphodynamic and morphoevolutive processes in order to carry out mitigation and/or prevention measures. One of the methodologies are now more interesting to study the morphodynamic behavior of a gully, is the use of remote sensing images within a Geographic Information Systems (GIS). In particular, the use of satellite images of high spatial resolution, such as those available through Google Earth, allows detailed and accurate mapping of the gullies. For its part, the measurement and analysis tools offered by GIS, allowing the collection of quantitative data quickly and accurately. The application of these geoinformatics tools in the Arroyo La Barranquita watershed, has yielded detailed maps of gully growing since 1968 to the present. As a result of the study can be noted that only 10% of gully growing has occurred since 1968 and this is located in two main areas, where speeds average on the header have peak between 13 and 34 m / year.

Keywords: Geoinformatics, erosion, gully, piedmont, San Luis.

1 Universidad Nacional de San Luis.

✉ E-mail: ojeda@unsl.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En las áreas pedemontanas que rodean las zonas serranas de la provincia de San Luis, las cárcavas son las geoformas activas más destacadas, tanto por su dinámica como por sus dimensiones. Desde el punto de vista ambiental, constituyen un problema de magnitud debido a los daños que ocasiona con la erosión de la capa fértil de suelo, la fragmentación de los campos y la colmatación sedimentaria de cuerpos de agua, entre otros aspectos. A pesar de ello, es poco lo que se conoce aún acerca de sus características morfogenéticas y morfodinámicas, elementos indispensables para abordar tareas de mitigación y/o prevención de daños.

Los escasos estudios específicos realizados hasta la fecha (Mármol 1978; Ojeda 2003, Ojeda 2005a y b), sumados a otros de carácter más general (Guñazú 1961; Ramonell y Latrubesse 1991), han dejado en evidencia dos aspectos principales en relación al proceso de carcavamiento: a) Se desarrolla por acción de la erosión retrocedente retomando la dirección de antiguos valles fluviales presentes por debajo de mantos eólicos cuaternarios y b) El proceso es fuertemente dependiente de la actividad antrópica.

A diferencia de lo que ha ocurrido con otros mecanismos de erosión hídrica como la "erosión laminar", sobre el cual se han desarrollado, y validado numerosos modelos matemáticos que permiten la predicción cuantitativa de pérdida de suelo, no

ha ocurrido lo mismo con el carcavamiento (ver Bocco 1990; Morgan 1995; Martínez-Casasnovas 2003; Poesen et al. 2003, entre otros). Dichos autores destacan el carácter espasmódico (en el tiempo y espacio) y las complejas relaciones existentes entre los procesos que ocurren en el canal de la cárcava, sus áreas laterales y las pendientes contribuyentes, como los principales impedimentos para el desarrollo de modelos que permitan predecir con certeza el comportamiento de una cárcava.

Tal como ha sido planteado en trabajos previos (Ojeda 2005ayb), una de las metodologías que resultan en la actualidad más interesantes para el estudio del comportamiento morfodinámico de una cárcava, corresponde a las mediciones indirectas que pueden ser efectuadas a partir del uso de herramientas geoinformáticas como las imágenes obtenidas por Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). En particular, el advenimiento en los últimos años de imágenes satelitales de alta resolución espacial, como las que están disponibles en Internet a través de *Google Earth* ©2008 (GE), posibilitan la realización de mapas detallados y precisos de las cárcavas.

El objetivo de esta contribución es comentar los aspectos metodológicos y dar a conocer los resultados obtenidos a través de un trabajo realizado en la cuenca del arroyo La Barranquita, en la provincia de San Luis, con el fin de analizar la dinámica del carcavamiento entre el año 1968 y la actualidad, en base a imágenes multitemporales y SIG.

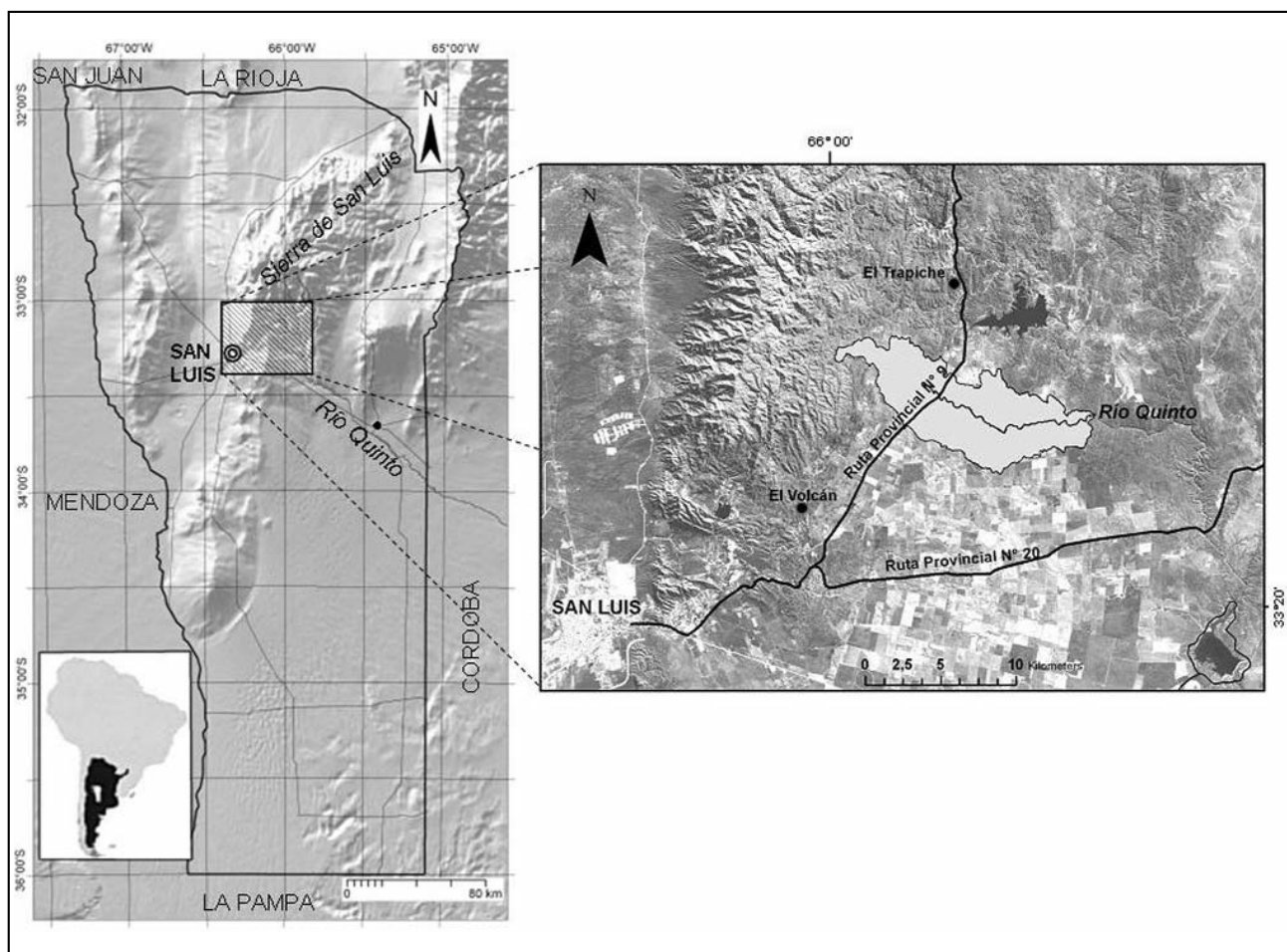


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El arroyo La Barranquita es un tributario del río Quinto localizado en la zona de contacto entre la Planicie Loessoide y la vertiente oriental de la sierra de San Luis. La cuenca de aporte es de 67,5 km² y tiene forma elongada en dirección aproximada este-oeste (Figura 1). En sus cabeceras las alturas máximas alcanzan los 1400 m s.n.m., mientras en su desembocadura sobre el río Quinto, disminuye hasta los 910 m s.n.m.

Las características climáticas marcadamente estacionales de la región dan lugar a la concentración de cerca del 80% de las lluvias entre los meses de noviembre y abril (época húmeda), originando un sistema de drenaje constituido mayoritariamente por cursos efímeros, con excepción de su colector principal. En relación al uso del suelo, cabe destacar que cerca del 90% de la superficie de la cuenca se encuentra bajo el desarrollo de actividades agrícolas, fundamentalmente cultivos de secano (principalmente maíz, trigo y soja).

RASGOS GEOMORFOLÓGICOS

La cuenca del A° La Barranquita se desarrolla en la zona de contacto entre la vertiente suroriental de la Sierra de San Luis y la unidad geomorfológica denominada "Planicie Loessoide" (González Díaz, 1981). La primera corresponde a la suave pendiente de basculamiento tectónico del bloque serrano (Costa y Cortés 1993), constituida principalmente por rocas ígneas y metamórficas de edad Precámbrico a Paleozoico Inf.

(Ortiz Suárez et al. 1992), mientras que la segunda, corresponde a una planicie ondulada a suavemente ondulada, originada a partir de la depositación de sedimentos aluvio-eólicos durante el Pleistoceno Superior-Holoceno (Latrubesse y Ramonell 1990).

Los mantos sedimentarios cuaternarios cubren rocas del basamento cristalino y sedimentitas de edad Cenozoica, con espesores que varían entre algunos centímetros hasta 10-12 metros, suavizando la topografía preexistente. La influencia que ejerce sobre el modelado superficial los materiales limo-arenosos que conforman la Planicie Loessoide y los rasgos de deformación frágil que afectan las rocas subyacentes, se pone de manifiesto a través de un sistema de drenaje de baja densidad con diseño predominantemente subdendrítico y sectores donde los valles presentan direcciones marcadamente rectilíneas (Figura 2).

El paisaje de la Planicie Loessoide queda así constituido por dos elementos principales correspondientes a las lomadas y las depresiones interlomadas. Estas últimas actúan como superficies concentradoras de la escorrentía fluvial incipiente y se describen aquí como "vaguadas", siguiendo la clasificación morfológica de Pedraza (1996). La combinación espacial de vaguadas y lomadas genera un relieve ondulado con un desnivel relativo promedio de 1 m a 5 m, aunque con máximos de hasta 11 m en las zonas de cabecera de la cuenca. La escorrentía concentrada en la zona de vaguadas da origen a cursos fluviales incipientes (surcos) que luego pueden evolucionar a cárcavas o arroyos (Figura 3).

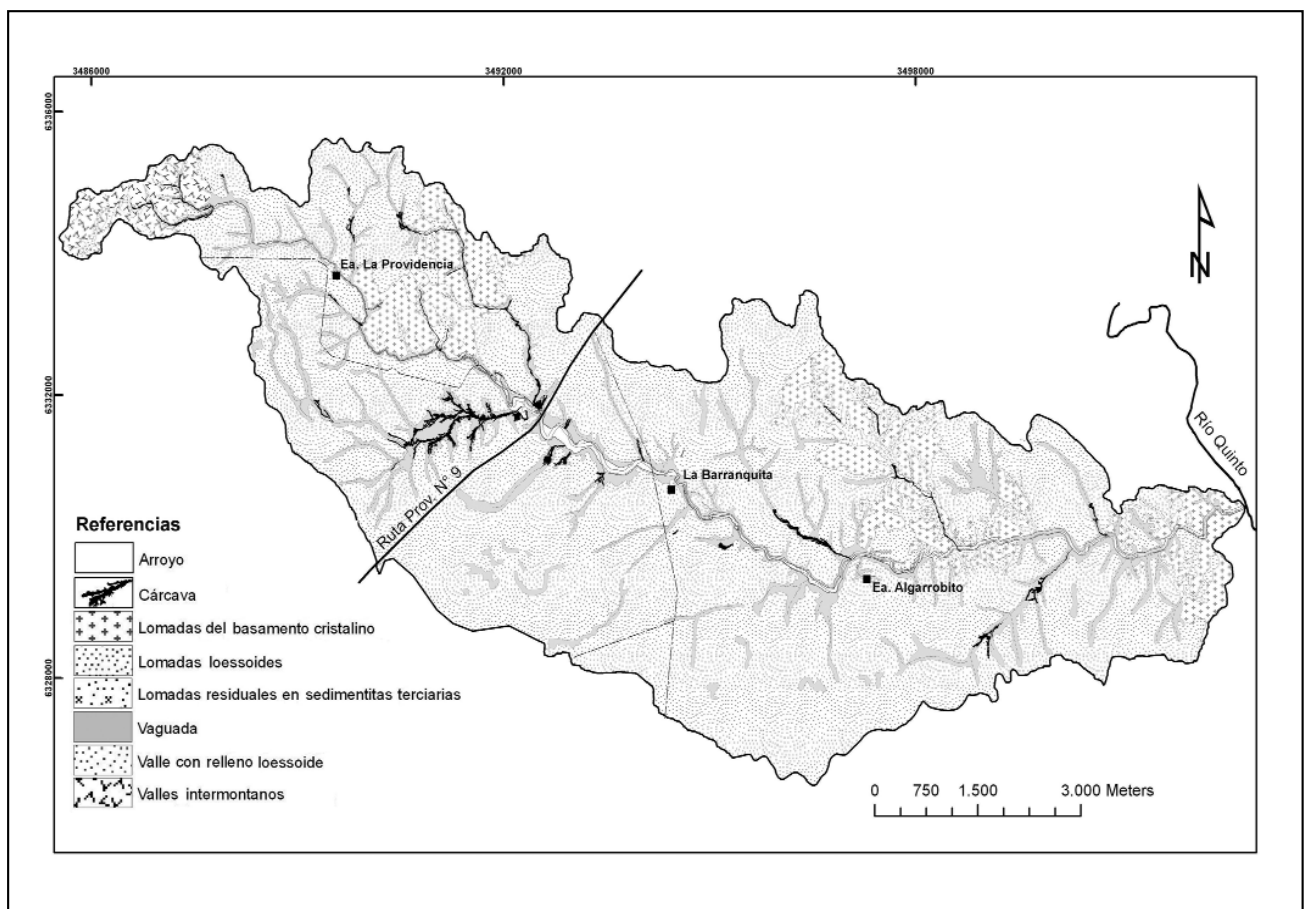


Figura 2. Mapa geomorfológico de la cuenca del A° La Barranquita.



Figura 3. Vista panorámica de la Planicie Loessoide en la cuenca del A° La Barranquita. En el sector central se observa una vaguada con el desarrollo de una cárcava.

En sus estadios iniciales, las cárcavas crecen principalmente en sentido longitudinal por acción de la erosión retrocedente en su cabecera. Este retroceso continúa hasta que la cuenca receptora, ubicada por encima de la zona de cabecera, disminuye lo suficiente como para no generar más flujos de carácter erosivos. A partir de ese momento, el trabajo geomorfológico principal corresponde a la acción de aplanamiento lateral y ensanchamiento en la base de la cárcava por socavación y desplome (Ojeda, 2005b).

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para el análisis de la dinámica del carcavamiento se comparó la variación de la situación espacial de las cárcavas entre el año 1968 y la actualidad utilizando imágenes aeroespaciales. Para determinar las condiciones generadas por la erosión en el año 1968 se digitalizaron mediante escáner fotografías aéreas pancromáticas a escala original 1:20.000 con una resolución de 600 dpi. Estos documentos fueron luego insertados en GE y ajustados espacialmente (georeferenciados) en pantalla, en base a la geometría de las imágenes de alta resolución provistas por dicho sistema.

Se utilizaron las herramientas de digitalización de polígonos que ofrece GE, cartografiándose en pantalla, los sistemas de cárcavas sobre la FA del año 1968. Esta información generó una primera capa de datos que fue almacenada en el formato nativo de GE (.KML) y luego importada en el SIG ArcGIS 9.3 como una capa vectorial (feature class) dentro de una geodatabase. Luego, mediante la misma metodología, se procedió al mapeo de las áreas de carcavamiento no registradas en las FA de 1968 y visibles en las imágenes satelitales de GE del año 2009, generando una nueva capa de polígonos

solo para las nuevas cárcavas detectadas. Desde el sitio <http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/index.html> se obtuvo un modelo digital de elevaciones (MDE) con píxeles de 90 metros, a partir del cual se generaron mediante las herramientas de análisis espacial de ArcGIS, un mapa de curvas de nivel y otro de pendientes en grados. Con las herramientas de selección, medición y cálculos provistos por el programa se obtuvieron finalmente los datos cuantitativos relativos a 31 cabeceras de cárcavas, los cuales se presentan en los resultados. Las mediciones realizadas corresponden a: longitud lineal de retroceso de cabeceras, expresadas en metros (m), superficie erosionada y superficie de la cuenca contribuyente, en kilómetros cuadrados (km²) y velocidades de retrocesos de cabeceras, en metros por año (m/año).

RESULTADOS

El estudio realizado permitió identificar tres sectores principales dentro de la cuenca donde la actividad erosiva ha tenido un mayor desarrollo. El más importante corresponde al sector ubicado al SO del puente sobre la ruta provincial N°9, donde un sistema de cárcavas afecta una superficie aproximada de 1,5 km² (Figura 4). En este sitio se pudieron medir retrocesos lineales de los sectores de cabecera variables entre 11 y 530 m. Del total de la superficie erosionada por carcavamiento (0,23 km²), el 90% ya había sido desarrollado para el año 1968.

No todas las cabeceras de cárcavas muestran cambios respecto a 1968, ni tampoco aquellas que fueron modificadas lo hicieron de igual manera. De acuerdo a los datos obtenidos a través de las mediciones realizadas (ver Tabla 1), las cabeceras de cárcavas identificadas con los números 7, 8, 19, 21 y 22, son las que han tenido un crecimiento más importante dentro de la cuenca.

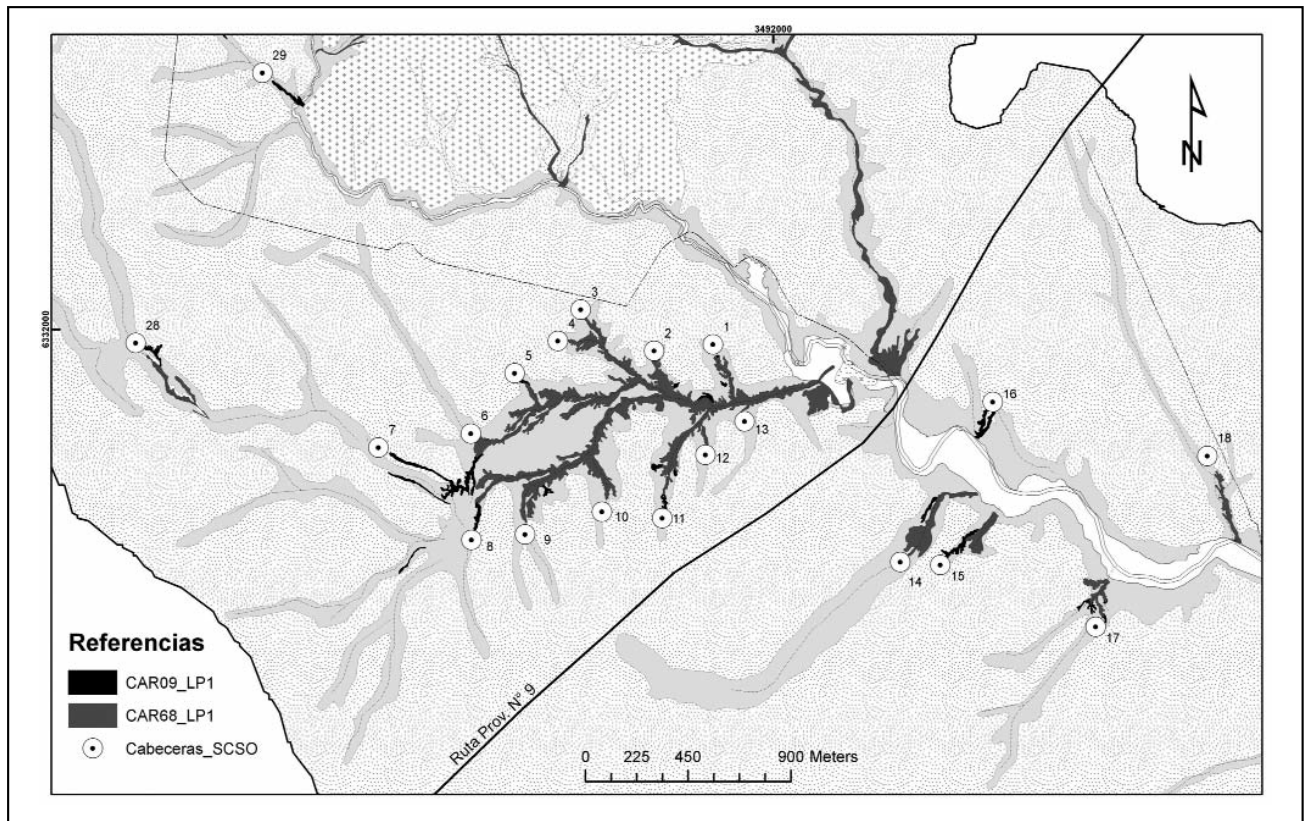


Figura 4. Sistema de cárcavas ubicado al SO del puente carretero sobre ruta provincial N° 9.

En términos generales los datos tabulados muestran una relación positiva entre la longitud de retroceso de cabecera y la superficie de la cuenca contribuyente. Por otra parte, aquellas que han experimentado retroceso de sus cabeceras a pesar de contar con una superficie drenada escasa (por ejemplo 1, 11 y 26), su mayor actividad parecería estar compensada por una mayor pendiente de acercamiento en la zona de cabecera. Otros datos en cambio muestran un comportamiento muy variable.

Los otros sitios de importancia se ubican el NO y SE de la Ea. Algarrobito (Ver Figura 2) donde se midieron los mayores retrocesos de cabeceras de toda la cuenca. Se destaca allí la cabecera 19 con 1360 m de retroceso, y las cabeceras 21 y 22, donde se obtuvieron valores de 284 m y 467 m respectivamente. En los tres casos mencionados el área de aporte ubicada por encima de la cabecera tiene superficies mayores a los 1,76 km², con un máximo en 4,26 km² para la cabecera 19.

Además de la actividad relacionada a la erosión retrocedente en las zonas de cabecera, no se observaron crecimientos laterales de las cárcavas por acción del aplanamiento lateral en las zonas más antiguas. Todo ello indica en conjunto condiciones generales de actividad morfodinámica reducida para la cuenca, la cual, en base a las observaciones de campo, parece que es notoriamente aumentada por las actividades de labranza para cultivos.

CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

La generación de capas vectoriales conteniendo los polígonos de la superficie ocupada por las cárcavas para las diferentes épocas analizadas, permitió detectar claramente tres sectores con mayor actividad erosiva: el primero de ellos ubicados al SO del puente carretero sobre la ruta provincial N°9,

y los otros dos al NO y SE del casco de la Ea. La Barranquita. En estos últimos sectores, los retrocesos de cabecera máximos determinados con la metodología aplicada cubrieron un rango de 467 m a 1360 m, los que, en función del periodo analizado, se pueden traducir en velocidades promedio máximas de retroceso de 11 m/año y 41 m/año respectivamente. Estos valores deben obviamente ser tomados solamente como indicativos teniendo en cuenta el carácter esporádico y aleatorio de los episodios donde se producen los cambios más importantes.

Las cabeceras con mayores valores de longitud de retroceso (7, 8, 19, 21, 22 y 27) muestran una relación positiva con el tamaño del área contribuyente, mientras que en otras (1, 11 y 26), la relación positiva parece estar asociada a mayores valores del ángulo de pendiente de la zona de acercamiento a la cabecera.

Del total de la superficie erosionada por carcavamiento (0,23 km²) en la cuenca, solo un 10% corresponde al periodo comprendido entre 1968 y la actualidad.

El uso de Google Earth para el mapeo de cárcavas mediante su digitalización en pantalla constituye una herramienta tecnológica de fácil acceso y manipulación, y a través del cual se puede realizar una tarea eficiente y precisa. Los resultados obtenidos muestran claramente que es posible lograr una cartografía de detalle, con precisiones comparables a los que se obtienen mediante productos como las fotografías aéreas tradicionales a escalas similares.

La utilización de un SIG para el tratamiento y análisis de los datos obtenidos mediante digitalización en pantalla, es un complemento esencial para la obtención de datos cuantitativos relevantes para el estudio de las variables del terreno que influyen en el proceso de carcavamiento.

Tabla 1. Datos de retroceso, área contribuyente y pendiente de las cabeceras principales.

Cabecera de cárcava	Longitud lineal de retroceso de cabecera (en m)	Superficie de la cuenca contribuyente (en km ²)	Pendiente del área de cabecera (en grados sexagesimales)	Unidad Geomorfológica
1	11	0,06	2° 04'	Vaguadas
2	0	0,09	2° 09'	Vaguadas
3	0	0,12	3° 29'	Vaguadas
4	0	0,04	5° 54'	Vaguadas
5	36	0,10	4° 19'	Vaguadas
6	0	0,37	1° 48'	Vaguadas
7	530	1,80	1° 43'	Vaguadas
8	142	1,58	1° 01'	Vaguadas
9	0	0,14	2° 09'	Vaguadas
10	0	0,07	2° 44'	Vaguadas
11	72	0,06	2° 02'	Vaguadas
12	0	0,04	1° 15'	Vaguadas
13	0	0,09	2° 02'	Vaguadas
14	0	1,04	0° 43'	Vaguadas
15	123	0,22	1° 00'	Vaguadas
16	135	0,16	1° 55'	Vaguadas
17	33	0,43	2° 03'	Vaguadas
18	0	0,90	1° 01'	Vaguadas
19	1360	4,26	1° 57'	Vaguadas
20	0	2,4	2° 10'	Valles c/r. loessoide
21	284	1,76	1° 16'	Vaguadas
22	467	2,96	1° 16'	Vaguadas
23	80	0,77	2° 47'	Vaguadas
24	0	0,45	3° 08'	Valles c/r. loessoide
25	0	0,14	3° 08'	Vaguadas
26	62	0,29	3° 25'	Valles c/r. loessoide
27	395	0,84	3° 16'	Vaguadas
28	0	0,40	2° 24'	Vaguadas
29	170	0,87	4° 23'	Vaguadas
30	0	0,44	3° 45'	Valles intermontanos
31	0	0,05	6° 23'	Valles intermontanos

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto de Investigación "Geología del Neógeno y Cuaternario de la Sierra de San Luis y cuencas periféricas" (PROICO 340203 CyT-UNSL) por el soporte económico para realizar el estudio.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BOCCO, G., 1990.

Gully erosion analysis using remote sensing and geographic information systems. A case study in central Mexico. *Tesis Doctoral. Universidad de Amsterdam. Holanda. 130 pág.*

COSTA, C. Y J. CORTÉS, 1993.

Tectónica extensional en el extremo sur de la sierra de San Luis. *12º Congreso Geológico Argentino Actas, 3:113-119.*

- GONZÁLEZ DÍAZ, E. F., 1981.
Geomorfología. En: M. Yrigoyen (Ed.). Geología y Recursos Naturales de la Provincia de San Luis.
Relatorio 8° Congreso Geológico Argentino: 193-236.
- GUINAZÚ, J., 1961.
Descripción geológica de la hoja 24 F (San Luis). Dirección Nacional de Geología y Minería.
Informe inédito, 126 p. Buenos Aires.
- LATRUBESSE, E. Y C. RAMONELL, 1990.
Unidades litoestratigráficas del Cuaternario en la Provincia de San Luis, Argentina.
11° Congreso Geológico Argentino Actas II: 109-112.
- MÁRMOL L., 1978.
Resultados de un trabajo de restauración hidrológico-forestal en la sierra de San Luis y posible aplicación en otras áreas del país.
Revista Forestal Argentina. T.18, N°4. Pág. 103-110.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. 2003.
A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion.
Catena, 50: 293-308.
- MORGAN R.P.C., 1995.
Soil Erosion and Conservation.
Longman Group, Essex, 298pp.
- PEDRAZA J., 1996.
Geomorfología, principios, métodos y aplicaciones.
Ed. Rueda. España. 414 pág.
- POESEN ET AL., 2003.
Gully erosion and environmental change: importance and research needs.
Catena 20 (2003) 91-133.
- OJEDA G., 2002.
Utilización de fotografías aéreas y SIG para el mapeo geomorfológico detallado.
Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y Medio Ambiente. N° 17. Pág 119-127. Buenos Aires.
- OJEDA G., 2003.
Geomorfología aplicada a la evaluación de la erosión hídrica. Cuenca del A° La Petra. Provincia de San Luis. Argentina.
Actas del II Congreso de Cuaternario y Geomorfología. Tucumán. Argentina. Pág. 323-332.
- OJEDA G., 2005A.
Teledetección Aplicada a la Evaluación de la Erosión en Cárcavas. Piedemonte Austral de la Sierra de San Luis. Argentina.
Actas del XVI Congreso Geológico Argentino. La Plata. Argentina.
- OJEDA G., 2005B.
Estudio Geológico-Geomorfológico y Evaluación de la erosión hídrica en el piedemonte austral de la sierra de San Luis".
Tesis Doctoral. Facultad: Cs. Fco., Mat. y Naturales. Universidad Nacional de San Luis. Inédita. 222 pág.
- ORTIZ SUÁREZ, A., C. PROZZI Y E. LLAMBIAS, 1992.
Geología de la parte Sur de La Sierra de San Luis, Argentina.
Revista de Estudios Geológicos 48:269-277. Madrid.
- RAMONELL, C. Y E. LATRUBESSE, 1991.
El loess de la Formación Barranquita: Comportamiento del sistema eólico pampeano en la provincia de San Luis, Argentina.
3° Reunión IGCP 281, Resúmenes: 69-81, Lima.



Modelación hidromecánica de pilas de lixiviación de minerales

Delahaye, Carlos H.

Recibido: 21 de octubre de 2009 • Aceptado: 26 de mayo de 2010

Resumen

En este trabajo se analizan aspectos hidromecánicos de las pilas de lixiviación de minerales que inciden directamente sobre su rendimiento y las condiciones de seguridad durante la construcción y operación. Se utiliza un modelo de flujo basado en el método de los elementos finitos dentro del marco de la mecánica de los suelos no saturados. Luego de una breve explicación del modelo utilizado y de la teoría implementada en él, se presentan los resultados del análisis hidromecánico bidimensional de una pila típica construida sobre plataforma. La geometría, condiciones de contorno y parámetros de los materiales se han obtenido de la bibliografía existente sobre pilas de lixiviación reales. Se han considerado los casos de pila homogénea y heterogénea, construidas en etapas y bajo diferentes condiciones de riego de la solución química.

El modelo 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, el estado tenso-deformacional y las condiciones de flujo, tanto en la fase de construcción como en la fase de operación.

Los casos resueltos permiten evaluar la incidencia de los aspectos hidromecánicos analizados sobre las condiciones de seguridad de la pila, entender y predecir el rendimiento en la operación, y mostrar la potencia de la metodología de análisis utilizada, así como las posibilidades del empleo de la misma en el diseño de ingeniería de estas estructuras mineras.

Palabras Clave: Pila de lixiviación, modelo hidromecánico, seguridad, ambiente.

Abstract

This paper analyzes the hydromechanical aspects of heap leaching affecting their performance directly and the required safety conditions during construction and operation stages. A flow model was used based on the finite elements method as regards non-saturated soil mechanics. After a brief explanation of such a method and its subsequence theory, bidimensional hydromechanical analysis results of a typical heap built on platform are displayed. Geometry, boundary conditions and material parameters have been obtained from the existing biography about real heap leaching. Homogeneous and heterogeneous heap cases built up in stages and under different conditions of the chemical solution irrigation were also taken into consideration. Such a model allows to know pores pressure evolution and dissipation inside the heap, pressure on the lining covering the base, the stress-strain state and flow conditions, not only in the construction phase but also in the operation one. Solved cases allow to evaluate the analyzed hydromechanical aspects incidence on heap security conditions, to understand and predict the operation performance and to show the capacity of the analyses methodology used and the possibilities of employing it in the engineering design of mining structures, as well.

Keywords: Heap leaching, hydromechanical model, safety, environment.

Instituto de Investigaciones Mineras,
Departamento de Ingeniería de Minas
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan
Av. Libertador 1109 - Oeste - 5400 - San Juan
✉ E-mail: delahaye@unsj.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En minería, el término "lixiviación en pilas" se define como un proceso hidrometalúrgico, el cual utiliza agua como medio de transporte y químicos específicos para separar los minerales valiosos y solubles en dichos líquidos de los minerales sin valor económico. Aún cuando los principios de lixiviación y los de extracción de oro mediante cianuración tienen una larga historia, la tecnología actual de lixiviación de metales se ha desarrollado ampliamente desde mediados de la década del 70, hasta llegar a ser hoy en día un método eficiente para extraer oro oxidado, minerales de plata y cobre.

El proceso de lixiviación en pilas permite utilizar yacimientos de baja ley siempre que la operación minera involucre una actividad a gran escala. La mena en bruto proveniente de la mina (run of mine), o bien fragmentada mediante trituración (y eventualmente molienda), es conducida al área de lixiviación y ubicada en capas, formando grandes pilas, las cuales son regadas superficialmente con soluciones químicas para extraer los minerales valiosos (Rennat et al., 1997).

Los trabajos de acondicionamiento del área donde se va a realizar la lixiviación del mineral deben estar dirigidos a evitar los impactos negativos sobre el medioambiente y al mismo tiempo lograr que el proceso sea eficiente. Estos trabajos comprenden una serie de estudios del sitio de ubicación del área de lixiviación, los cuales proveen de información valiosa para el diseño, operación y control de todo el proceso.

Los terrenos utilizados como área de lixiviación son generalmente extensos y llanos. Sobre esta área se construye la plataforma de lixiviación y por encima de ésta se coloca un revestimiento impermeable constituido generalmente por una geomembrana y capas de material, para aislar el terreno de fundación del proceso químico que se ejecutará por encima del mismo.

En la Figura 1 (Harper et al, 1987) se muestra una sección transversal típica de una pila de lixiviación construida sobre plataforma. En ella se han indicado las superficies de fallas típicas a considerar en los análisis de estabilidad de los taludes de la pila.

Por otro lado, el tamaño de las pilas de mineral ha crecido a medida que la tecnología del procesamiento del mineral mediante pilas de lixiviación mejoraba. Inicialmente, las pilas se construyeron sobre plataformas revestidas de arcilla, hormigón o asfalto, levemente inclinadas, en algunos casos reusables, con

alturas del terraplén comprendidas entre 5 y 15m. El mayor desarrollo tecnológico ha permitido construir pilas de mayor tamaño (superiores a 50m) y sobre plataformas más inclinadas, así como desarrollar el sistema de lixiviación en valle.

El concepto de pilas de lixiviación en valle implica la utilización de valles naturales, cerrados mediante una presa e impermeabilizados completamente con un sistema de revestimiento, lo cual permite disponer de un volumen importante de almacenamiento (superior a 100 millones de toneladas de mineral) con alturas (cresta-pie de presa) de hasta 300m. En la Figura 2 (Harper et al, 1987) se muestra una sección transversal típica de una pila de lixiviación en valle. En ella se han indicado las superficies de fallas a considerar en los análisis de estabilidad de los taludes de la pila.

El diseño de ingeniería de las pilas de lixiviación ha progresado en las últimas décadas en lo relativo a hidrogeología y geotecnia (Thiel et al, 2003), ya que anteriormente, en la mayoría de los casos se procedía en forma intuitiva. Factores derivados de las exigencias de seguridad y protección ambiental han contribuido notablemente a este progreso. En relación al primero, el diseño debe asegurar la estabilidad de la pila por el aumento del peso propio a medida que aumenta la altura de la pila, por efecto del riego con la solución lixivante y frente a la acción de agentes externos como sismo y agua de lluvia. En relación al segundo, debe garantizar que no habrá pérdidas de la solución lixivante de metales que podrían provocar efectos económicos adversos, así como efectos no deseables sobre el medio ambiente. De mayor importancia en este último caso, dada la necesidad de preservar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas durante el tiempo de operación de la pila y después de su abandono, así como la de la restauración de los terrenos.

ASPECTOS HIDROMECÁNICOS DE PILAS DE LIXIVIACIÓN

La práctica industrial de la lixiviación presenta diferentes sistemas de construcción y operación de las pilas. Cada instalación de lixiviación es única y el diseño de las pilas y plataformas de lixiviación obedece a factores técnicos y económicos. Estos factores incluyen fundamentalmente tipo y origen del mineral, metalurgia y lixiviación, características climáticas, topográficas, hidrogeológicas y geotécnicas del lugar (Ministerio de Energía y Minas, Perú, 1995).

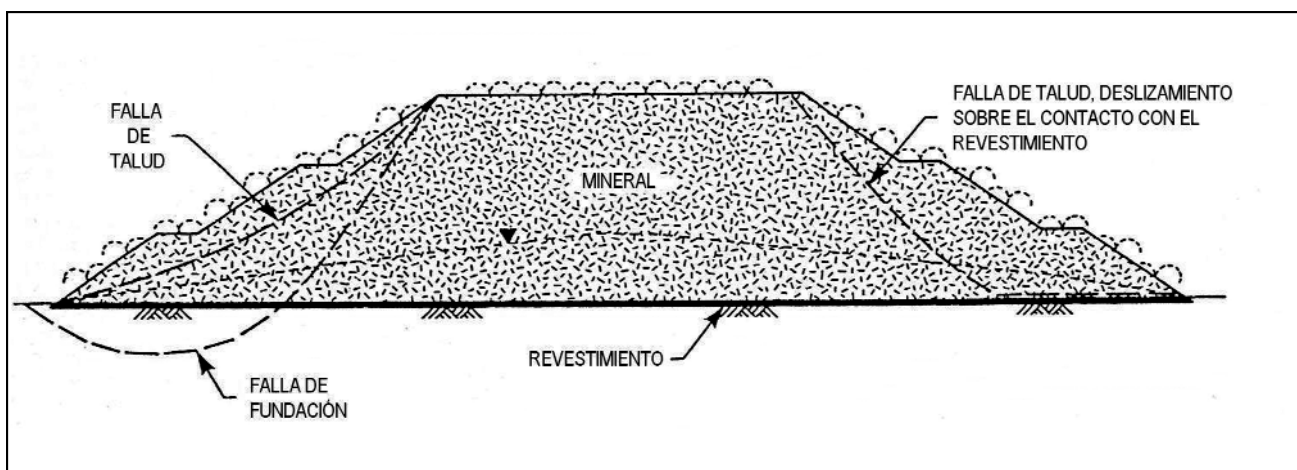


Figura 1. Pila de lixiviación sobre plataforma.

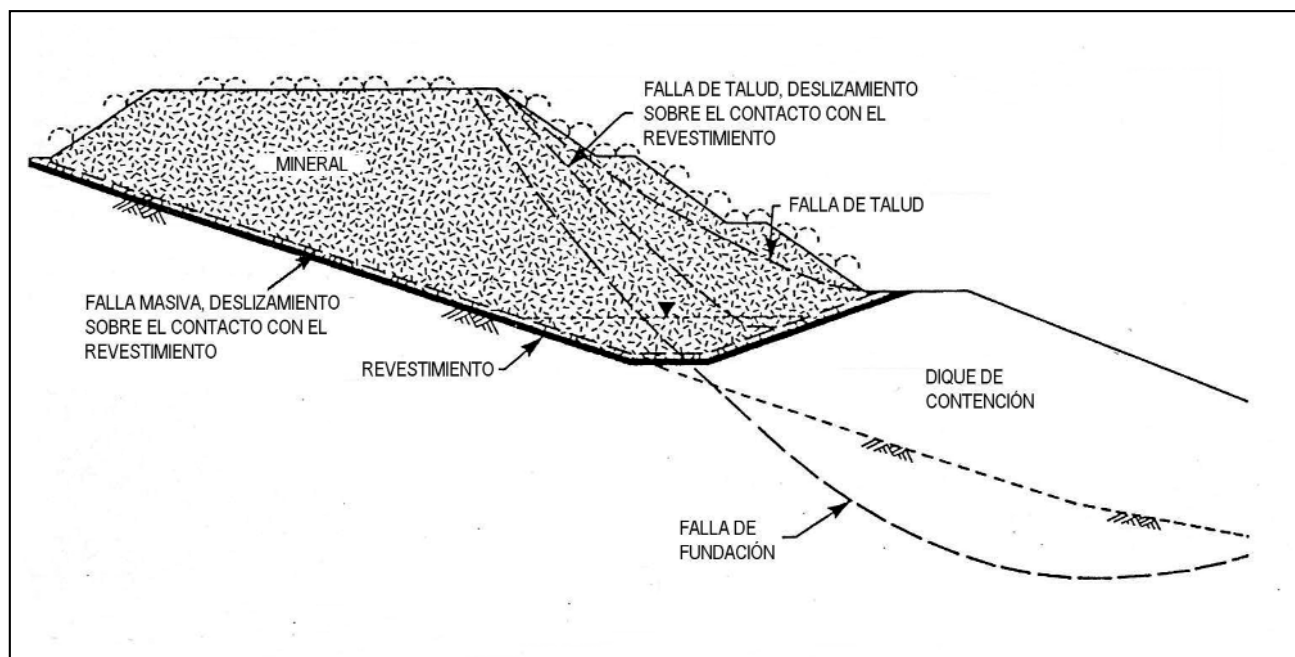


Figura 2. Pila de lixiviación en valle.

Desde un punto de vista geotécnico, las pilas son estructuras de gran magnitud, con un funcionamiento complejo y que, en muchos casos, involucran riesgos severos. Por su historia de formación, el material almacenado en las pilas de lixiviación tiene características singulares. Pero también son singulares las acciones que recibe el mineral a lo largo de la vida de la pila, tales como elevados niveles de tensión y los efectos químicos de la solución lixivante. Se ha observado en casos reales, que bajo estas acciones la granulometría y la estructura granular del material almacenado sufren alteraciones significativas lo largo del tiempo. Estos cambios pueden tener efectos negativos sobre la operabilidad y seguridad de la pila, como, por ejemplo, cuando en una zona de la pila la permeabilidad disminuye significativamente, haciendo que un volumen de material trabaje en condiciones saturadas.

Aspectos claves a considerar en el diseño y construcción de pilas de lixiviación son los siguientes:

- La calidad de la plataforma o base de apoyo que debe ser impermeable.
- Las facilidades de riego y recolección o drenaje de la solución lixivante.
- Las piletas de recolección de las soluciones lixiviantes ricas y pobres.
- La forma de apilamiento o deposición de la mena sobre la plataforma.
- La degradación del mineral apilado por la acción química y bacteriana.
- La estabilidad de la pila durante su construcción, operación, cierre y abandono.

La base de apoyo debe ser capaz de soportar las cargas aplicadas por las pilas, no sólo en términos de estabilidad, sino también en términos de asentamientos diferenciales, los cuales pueden afectar negativamente el drenaje de las pilas y dañar el revestimiento. En el caso de pilas de lixiviación en valle, o lugares con topografía de pendientes empinadas, se deberá considerar en el

diseño de las pilas la capacidad de los materiales de la base y de la interfase del revestimiento para resistir los deslizamientos.

La colocación del mineral en las pilas puede realizarse mediante diversos métodos, dependiendo principalmente de la naturaleza del mineral. Los métodos varían desde descarga y nivelación con una topadora, hasta la colocación mediante cargadores frontales y el apilamiento con cintas transportadoras. Los principales criterios al seleccionar un método de construcción de pilas consisten en limitar la estratificación, compactación y segregación de partículas, así como evitar daños en el revestimiento durante la construcción. En todos los casos, el diseño debe asegurar pilas estables y plataformas de lixiviación impermeables, ya que contendrán tanto el mineral sólido como el lixivado.

Los efectos de la degradación del mineral de la pila por la acción de la solución química durante la lixiviación de la mena, en algunos casos acompañada también por acción bacteriana, es una cuestión importante en todo proyecto de pilas de lixiviación (O'Kane *et al.*, 1999). Estos efectos pueden causar disminución de la resistencia al corte del mineral y a lo largo de la interfase con la geomembrana del revestimiento, cambios hacia una textura más fina en la distribución de tamaños de partículas, que conlleva a disminución de la permeabilidad del mineral, aumento del grado de saturación, pérdida de la capacidad filtrante y aumento de la migración de finos. Por lo tanto, la tasa de riego de la solución lixivante no será única durante toda la vida de la pila, debido a las condiciones de flujo no saturado y al cambio de las propiedades del mineral producido por la degradación.

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, ($\sigma' = \sigma - P_g \mathbf{m}$, σ = tensión total, \mathbf{mT} = 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:

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

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 P_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.

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_j el sistema de coordenadas y 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.

Constitutivas

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

$$\mathbf{v}_l = -(\mathbf{K}_l / \gamma_l)(\nabla P_l - \rho_l \mathbf{g}) \quad ; \quad \mathbf{v}_g = -(\mathbf{K}_g / \gamma_g)(\nabla P_g - \rho_g \mathbf{g}) \quad (4)$$

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_l 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. 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.

En este trabajo se han utilizado las siguientes expresiones para calcular las permeabilidades relativas al líquido y al gas:

$$k_{rl} = S_e^{1/2} \left(1 - \left(1 - S_e^{1/\lambda} \right)^\lambda \right)^2 \quad (\text{modelo de Van Genuchten, 1980}) \quad (5)$$

$$k_{rl} = A S_e^\beta \quad (\text{ley potencial generalizada}) \quad (6)$$

$$k_{rg} = A_g (1 - S_e)^{\beta_g} \quad (\text{ley potencial generalizada}) \quad (7)$$

donde λ , A , β , 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):

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} \left(1 + \left(\frac{s}{P_0} \right)^{1-\lambda} \right)^{-\lambda} \quad (\text{modelo de Van Genuchten, 1980}) \quad (8)$$

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:

$$d\sigma' = D d\varepsilon + h ds \tag{9}$$

Los coeficientes de la matriz D y h se definen a través del modelo constitutivo mecánico. Para la ley constitutiva elasto-plástica (Alonso et al, 1990; Gens, 1995) adoptada en el trabajo, la deformación volumétrica se define por $\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$. La superficie de fluencia generalizada depende de las tensiones, σ' , de la deformación volumétrica plástica, ε_v^p y de la succión, S $f = (\sigma', \varepsilon_v^p, s)$ que escrita en términos de invariantes resulta:

$$f = (p', J, \theta, \varepsilon_v^p, s) \tag{10}$$

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, $J^2 = (1/2) \text{traza}(s^2)$;

θ es el ángulo de Lode $\theta = -\frac{1}{3} \sin^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3} \det s}{2 J^3} \right)$ y $s = \sigma' - p' I$ s 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.

$$F = \frac{3J^2}{g_y^2} - L_y^2 (p' + p_s)(p_o - p') = 0 \tag{11}$$

donde g_y es una función del ángulo de Lode, M es un parámetro para la línea de estado crítico y

$$L_y = \frac{M}{g_y \left(\theta = -\pi/6 \right)}$$

La asunción básica es que la presión de preconsolidación, p_o , depende de la succión y de la temperatura:

$$p_o = p^c \left(\frac{p_o^*(T)}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(o) - k_{io}}{\lambda(s) - k_{io}}} \tag{12}$$

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, $\gamma(\theta)$ 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:

$$dp_o^* = \frac{1+e}{\lambda(o) - k_{io}} p_o^*(T) d\varepsilon_v^p \tag{13}$$

y el potencial plástico:

$$G = \frac{3J^2}{g_p^2} - \alpha L_p^2 (p' + p_s)(p_o - p') \tag{14}$$

donde $L_p = \frac{M}{g_p \left(\theta = -\pi/6 \right)}$.

Para un modelo plástico asociado, se adopta $\alpha=1$. Debido a la alta compactación del material de relleno, 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 con la tensión y la succión tienen que ser cuidadosamente tomados en cuenta. El modelo elástico resultante es como sigue:

$$d\varepsilon_v^e = \frac{k_i(s)}{1+e} \frac{dp'}{p'} + \frac{k_s(p',s)}{1+e} \frac{ds}{s+0.1} + (\alpha_o + 2\alpha_2 \Delta T) dT \tag{15}$$

donde,

$k_i(s) = k_{io} (1 + \alpha_i s)$, $k_s(p',s) = k_{so} (1 + \alpha_{sp} \ln p' / p_{ref}) \exp(\alpha_{ss} s)$. 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_{ref} es una tensión media de referencia. Las deformaciones elásticas desviadoras se obtienen a partir de un coeficiente de Poisson, ν , constante.

ANÁLISIS DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN SOBRE PLATAFORMA

Se analiza la construcción y operación de una pila de lixiviación sobre plataforma compuesta por ocho capas de 5m de altura de mineral, alcanzando una altura final de 40m sobre la plataforma. La plataforma está constituida por un revestimiento impermeable de 1m de espesor, el cual se compone por una capa de suelo de baja permeabilidad apoyada sobre el terreno de fundación y por una geomembrana apoyada sobre esta última. Sobre la geomembrana, previo a la capa de mineral, se coloca una capa de material "drenante" de granulometría controlada, destinada a alojar el sistema de recolección de la solución rica y a evitar daños al revestimiento. La fundación se considera compuesta por una capa de suelo de 5m de espesor que descansa sobre la roca. El nivel freático se ubica en la roca a 20m de profundidad respecto del nivel superior de la capa drenante.

El análisis es bidimensional (2D) y abarca el estado transitorio correspondiente a la construcción y regado con la solución lixivante de cada capa de mineral de la pila. En la simulación la fundación y la plataforma existen y la pila de lixiviación se construye en ocho etapas. Cada etapa incluye la construcción de una nueva capa de mineral y el riego con la solución lixivante. El tiempo de construcción de una capa es de 10 días y el tiempo de regado de 100 días respectivamente. En la Tabla 1 se han indicado los tiempos de construcción y de regado con la solución lixivante para cada etapa.

Tabla 1. Tiempo de construcción y de riego

Etapa	Espesor de Capa (m)	Construcción Tiempo (días)	Riego Tiempo (días)
1	5	1-10	11-110
2	5	111-120	121-220
3	5	221-230	231-330
4	5	331-340	341-440
5	5	441-450	451-550
6	5	551-560	561-660
7	5	661-670	671-770
8	5	771-780	781-880

El problema queda definido de la siguiente forma:

Geometría

La geometría general de la pila y la malla de elementos finitos se muestra en la Figura 3. La malla de elementos finitos total consta de 2295 nodos y 2152 elementos cuadrangulares lineales con cuatro puntos de integración.

En la Figura 4 se han representado los distintos materiales y las capas de mineral consideradas en el modelo de la pila.

Geometrías de las etapas de construcción y riego

En la Figura 5 se muestra la malla de elementos finitos correspondiente a las etapas de construcción inicial, 1, 3, 5 y 8 de la pila, con indicación del tiempo de construcción y riego para capa de mineral.

Condiciones de contorno

Mecánicas: desplazamiento en dirección $X=0$ en AC y BD, desplazamiento en dirección $Y=0$ en AB.

Hidráulicas: presión de agua en AB correspondiente al nivel freático (NF) ubicado a 20m de profundidad respecto del nivel de la capa drenante, el cual permanece constante durante la construcción y riego de la pila.

Condiciones iniciales

Se considera que en el inicio de la simulación ($t = 0$ días) existen el terreno de fundación (roca y suelo) y la plataforma (revestimiento y capa drenante), comenzando con la construcción y riego de las distintas capas de mineral de la pila.

Mecánicas: En la fundación y plataforma existente, los desplazamientos son nulos y las tensiones iniciales corresponden a los esfuerzos geostáticos con coeficiente de empuje lateral = 1. Para el mineral de la pila se asume una tensión inicial de 50 kPa.

Hidráulicas: La presión de agua en la fundación y plataforma es consistente con la posición del NF. El mineral de la pila se construye con una succión inicial en correspondencia con el grado de saturación inicial del mineral colocado en la pila.

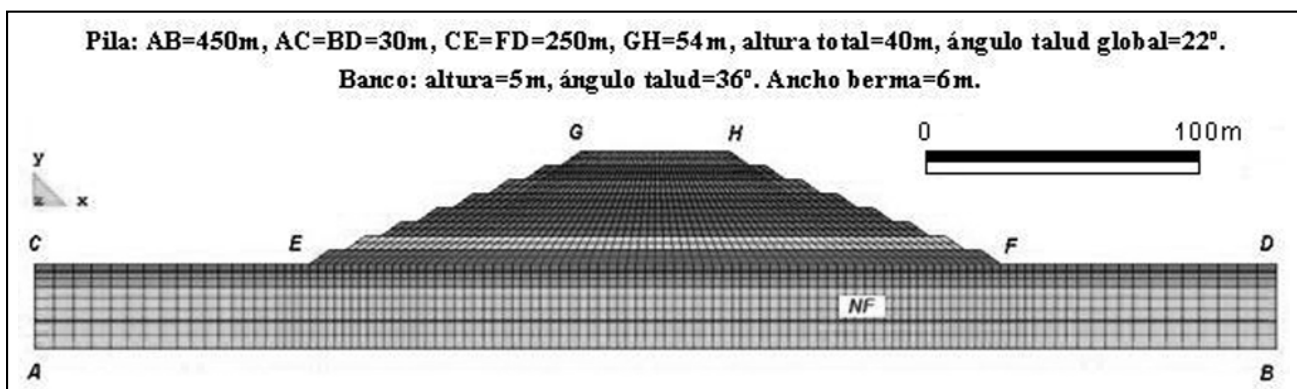


Figura 3. Geometría general y malla de elementos finitos

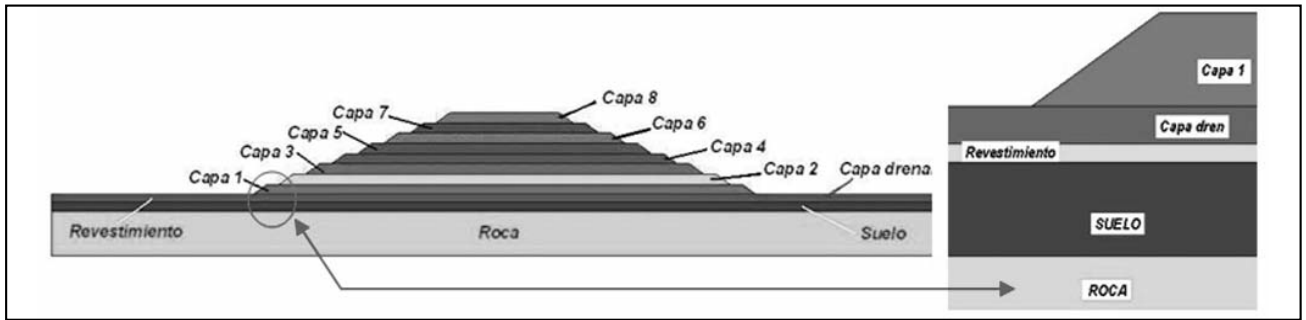


Figura 4. Materiales y capas de mineral de la pila sobre plataforma.

- | | |
|--|---|
| <p>a) Estado inicial: Fundación, Plataforma y Capa "drenante", $t = 0$ día.</p> <p>b) Etapa 1: Construcción capa 1, $t = 1-10$ días.
Riego capa 1, $t = 11-110$ días.</p> <p>c) Etapa 3: Construcción capa 3, $t = 221-230$ días.
Riego capa 3, $t = 231-330$ días.</p> | <p>d) Etapa 5: Construcción capa 5, $t = 441-450$ días.
Riego capa 5, $t = 451-550$ días.</p> <p>e) Etapa 8: Construcción capa 8, $t = 771-780$ días.
Riego capa 8, $t = 781-880$ días.</p> |
|--|---|

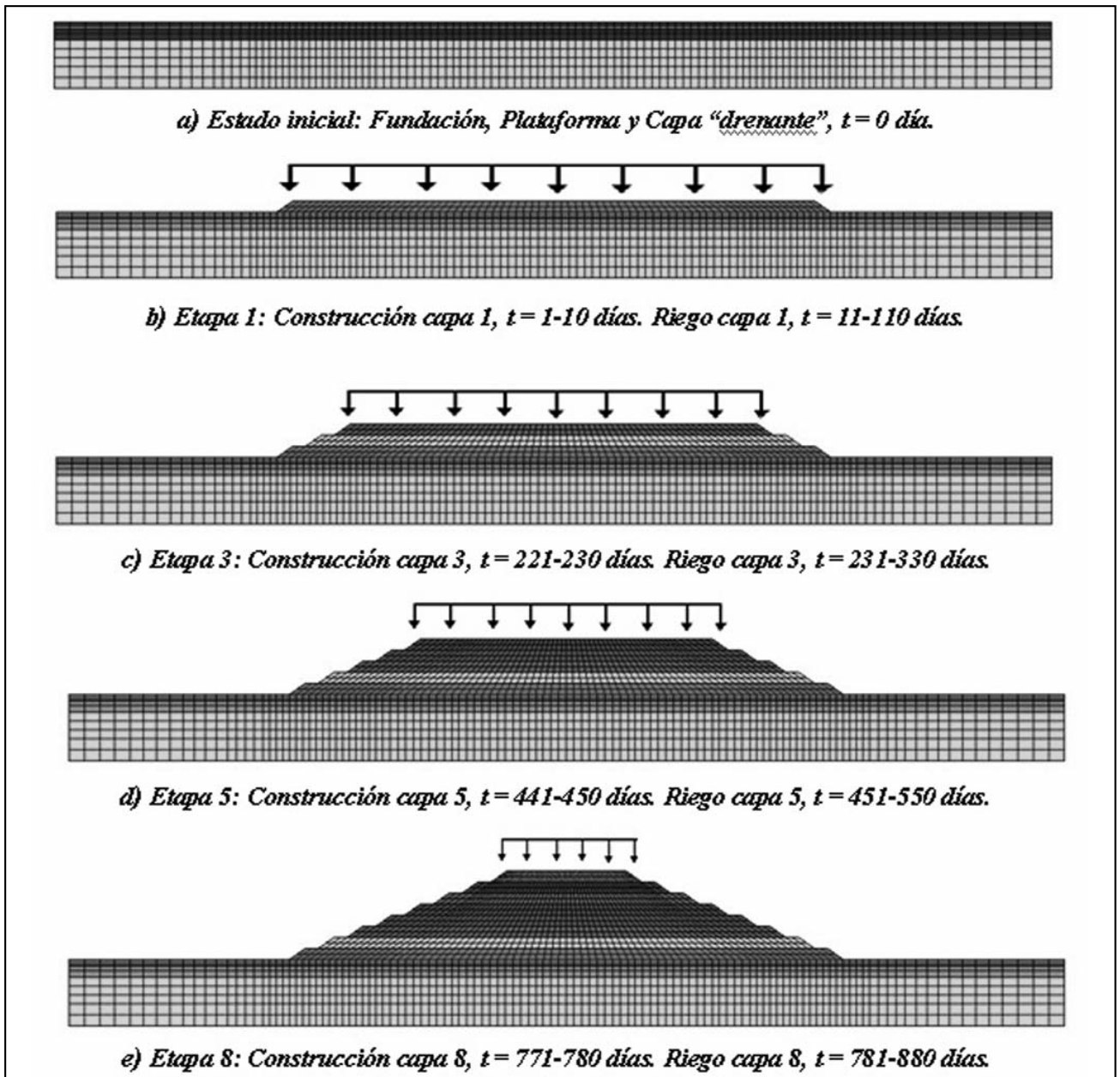


Figura 5. Malla de elementos finitos correspondiente a cada etapa de construcción y riego de la pila.

Propiedades de los materiales

Para caracterizar hidráulica y mecánicamente los materiales de la pila se ha recurrido a datos de materiales utilizados en ensayos de columnas de lixiviación para estudiar flujo a través de vías preferenciales (O'Kane, 2000; Delahaye y Alonso, 2002) inducido por segregación del material durante el transporte y colocación. El material utilizado en dichos ensayos fue preparado para ser representativo de un material aglomerado de pila. Se han caracterizado dos tipos de materiales, uno de textura gruesa y otro de textura fina. Los datos restantes se han obtenido de trabajos de investigación y de materiales utilizados en la construcción de pilas de lixiviación reales (Romero et al, 2002).

Para la fundación (roca y suelo) y la plataforma (revestimiento y capa drenante) se ha adoptado un modelo elástico lineal isotrópico definido por dos parámetros: E, módulo de Young, y ν , relación de Poisson. El mineral de la pila se ha modelado con la ley constitutiva elasto-plástica descrita en el apartado anterior. El conjunto completo de parámetros hidráulicos y mecánicos para los materiales de la fundación, plataforma y pila se han indicado en las Tablas 2 y 3, respectivamente. Las curvas de retención y de permeabilidades relativas se han representado en las Figuras 6 y 7.

Construcción de la pila

La construcción de la pila en etapas consta esencialmente de dos fases:

1) Construcción de la capa de mineral.

En el incremento de tiempo en que se construyen los elementos de una nueva capa la geometría de la presa cambia, aumentándose en los nodos y elementos construidos. Se asignan las condiciones iniciales y de contorno a estos elementos.

Se asume un tiempo de construcción de 10 días para cada capa (Tabla 1). La geometría incluyendo a la nueva capa aparece en el incremento de tiempo correspondiente a la mitad del período de construcción, es decir: Capa 1 al finalizar el día 5 (Figura 5 b), Capa 2 al finalizar el día 115, Capa 3 al finalizar el día 225 (Figura 5 c), Capa 4 al finalizar el día 335, Capa 5 al finalizar el día 445 (Figura 5 d), Capa 6 al finalizar el día 555, Capa 7 al finalizar el día 665 y Capa 8 al finalizar el día 775 (Figura 5 e).

La carga de los nuevos elementos provoca en el resto de la pila un incremento de tensiones y el cambio de presiones de agua y aire correspondiente. Se procede al cálculo de la consolidación para cada uno de los incrementos de tiempo siguientes hasta el tiempo correspondiente al comienzo del riego de la capa construida.

2) Riego de la capa de mineral.

Los tiempos de inicio y fin de riego de cada capa de mineral se han indicado en la Tabla 1. Durante el tiempo de regado se impone una tasa de flujo constante sobre la plataforma superior y los taludes laterales de la capa. El modelo evoluciona en forma acoplada durante el regado. El ingreso de la solución de riego al interior de la pila provoca cambios en las presiones de aire y de líquido, los cuales producen cambios de tensión y succión. Los cambios de tensión y succión provocan cambios de volumen del material y del grado de saturación, afectando la permeabilidad y por consiguiente los flujos en el interior de la pila, que a su vez afectan la distribución de presiones, y así siguiendo, el modelo evoluciona hacia el equilibrio hidromecánico flujo-deformación en forma acoplada.

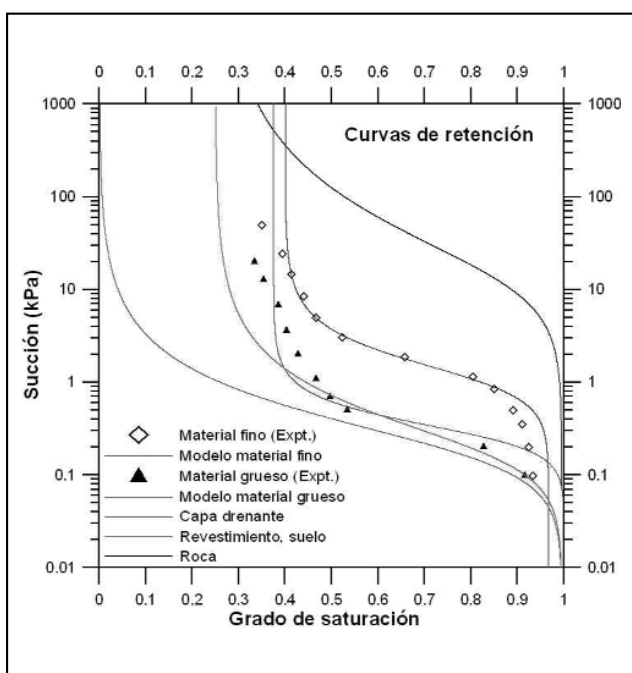


Figura 6. Curvas de retención.

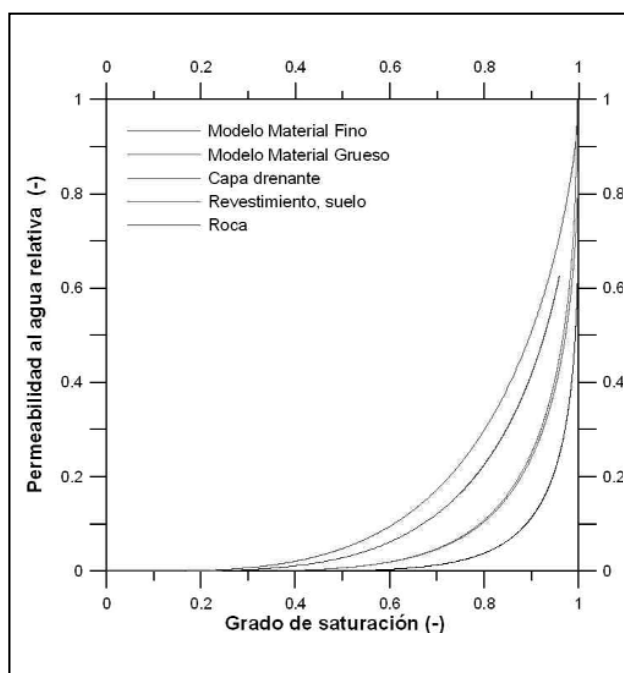


Figura 7. Permeabilidades relativas.

Tabla 2. Propiedades hidráulicas.

Propiedad	Pila		Dren	Revestimiento	Suelo	Roca
	Material Grueso	Material fino				
Permeabilidad Intrínseca, K_{ox} ; K_{oy} (m^2)	10^{-9} ; 10^{-9}	5×10^{-12} ; 5×10^{-12}	10^{-8} ; 10^{-8}	10^{-16} ; 10^{-16}	10^{-11} ; 10^{-11}	10^{-14} ; 10^{-14}
Porosidad ϕ (-)	0,32	0,32	0,33	0,30	0,015	
Curva de retención P_o (kPa) ; λ (ecuación 8)	$0,30$; $0,68$ $0,37$; $1,00$	$1,20$; $0,60$ $0,40$; $0,967$	$0,20$; $0,45$ $0,00$; $0,995$	$0,20$; $0,45$ $0,25$; $0,995$	$0,20$; $0,45$ $0,25$; $0,995$	$14,00$; $0,33$ $0,25$; $0,995$
Permeabilidad relativa al agua (ecuación 5)	$0,68$ $0,20$; $1,00$	$0,60$ $0,20$; $1,00$	$0,45$ $0,00$; $0,995$	$0,45$ $0,10$; $0,995$	$0,45$ $0,10$; $0,995$	$0,33$ $0,10$; $0,995$
Permeabilidad relativa al aire (ecuación 7)	10^2 ; $1,76$ $0,20$; $1,00$	10^2 ; $1,76$ $0,20$; $1,00$	10^2 ; $1,76$ $0,00$; $0,995$	10^2 ; $1,76$ $0,10$; $0,995$	10^2 ; $1,76$ $0,10$; $0,995$	10^2 ; $1,76$ $0,10$; $0,995$

Tabla 3. Propiedades mecánicas.

Propiedad	Pila		Dren	Revestimiento	Suelo	Roca
	Material Grueso	Material fino				
Elástico lineal	E (MPa) ; ν (-)	-----	300 ; $0,33$	3000 ; $0,33$	3000 ; $0,30$	35000 ; $0,25$
Modelo elasto-plástico (BBM)	Parámetros elásticos	k_{io} (-) ; k_{eo} (-) α_{ss} (-) ; α_i (-) α_{sp} (-) ; P_{ref} (MPa)	$0,015$; $0,005$ $-0,004$; $-0,002$ $-0,343$; $0,023$	$0,015$; $0,020$ $-0,004$; $-0,002$ $-0,343$; $0,023$	-----	-----
	Parámetros plásticos	λ (0) (-) ; r (-) β (MPa ⁻¹) ; k (-) P_c (MPa) ; M (-)	$0,049$; $0,97$ 7 ; $0,003$ $0,01$; $1,0915$	$0,049$; $0,97$ 7 ; $0,003$ $0,01$; $1,0915$	-----	-----
		α (-) P_0^* (MPa) ; P_{s0} (MPa)	$0,00732$ $1,4$; $0,1$	$0,00732$ $1,4$; $0,1$	-----	-----

RESULTADOS DEL CASO BASE

Se ha realizado la construcción y regado de la pila sobre plataforma para ambos tipos de mineral, material grueso y material fino, con los parámetros básicos indicados en las Tablas 2 y 3. El grado de saturación inicial del mineral al construir cada capa es del 55% en ambos casos. La tasa de riego de la solución lixiviante es de 5×10^{-3} kg/s/m² y se mantiene constante durante los 100 días de regado. Este caso tiene por objeto mostrar el efecto de la granulometría del mineral sobre el comportamiento hidráulico y mecánico de la pila durante la construcción y regado.

En las Figuras 8 y 9 se han representado los contornos de presión de líquido y del grado de saturación al finalizar el regado de la capa 6 para la pila construida con material grueso y fino respectivamente. Puede observarse el distinto comportamiento en ambos casos. En la Figura 10 se muestra la evolución del grado de saturación en los puntos medios de cada capa ubicados sobre el eje vertical de la pila. La pila de material grueso trabaja en condiciones drenadas mientras que la pila de material fino funciona prácticamente en condiciones saturadas. A pesar de que las condiciones de colocación sean las mismas para cada capa, el grado de saturación aumenta en la pila de material fino debido a la menor permeabilidad del material y hacia la base de la pila, como consecuencia del aumento de la carga debido al aumento de la altura de la pila. El contacto de la base de la pila con la capa drenante favorece las condiciones de drenaje en ambos casos. Además, se observa en ambos casos el incremento de presión de agua en la zona inferior de la pila debido al peso de las capas superiores, más significativo en la pila de material fino, con valores positivos sobre el revestimiento que pueden conducir a la inestabilidad.

En la Figura 11 se muestran los vectores de flujo de líquido y los contornos del módulo del vector flujo de líquido para la pila de material fino al finalizar el riego de la capa 8.

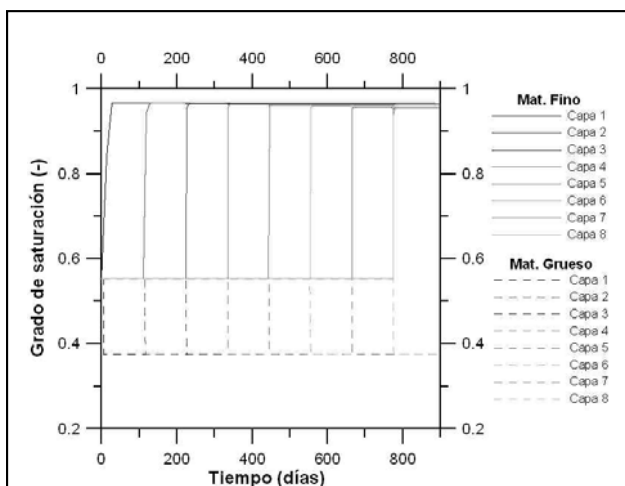


Figura 10. Evolución del grado de saturación en los puntos medios ubicados sobre el eje vertical de la pila, para material grueso y fino respectivamente.

Puede observarse el efecto producido por la capa drenante y el revestimiento. La capa drenante favorece el drenaje del líquido en la base de la pila y el revestimiento evita que la solución lixiviante penetre en el terreno de fundación.

En la Figura 12 se han representado la deformación y los contornos de desplazamiento en la pila de material grueso y fino al finalizar el riego de la capa 8. Puede observarse el comportamiento distinto en cada caso. La pila de material grueso sufre el mayor asentamiento en la zona central de la pila mientras que en la pila de material fino los mayores desplazamientos se ubican sobre los taludes, lo que podría conducir a deslizamientos de los taludes de la pila. Debido a la mayor rigidez de la fundación de la pila no se observan deformaciones a la escala de representación adoptada.

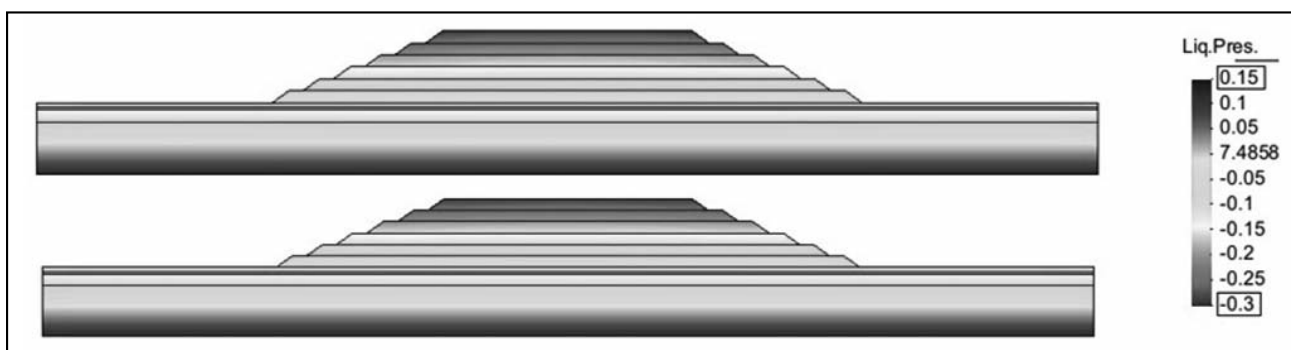


Figura 8. Etapa 6: material grueso (arriba), material fino (abajo). Presión de líquido al finalizar el riego de la capa 6 (fin etapa 6, t = 660 días).

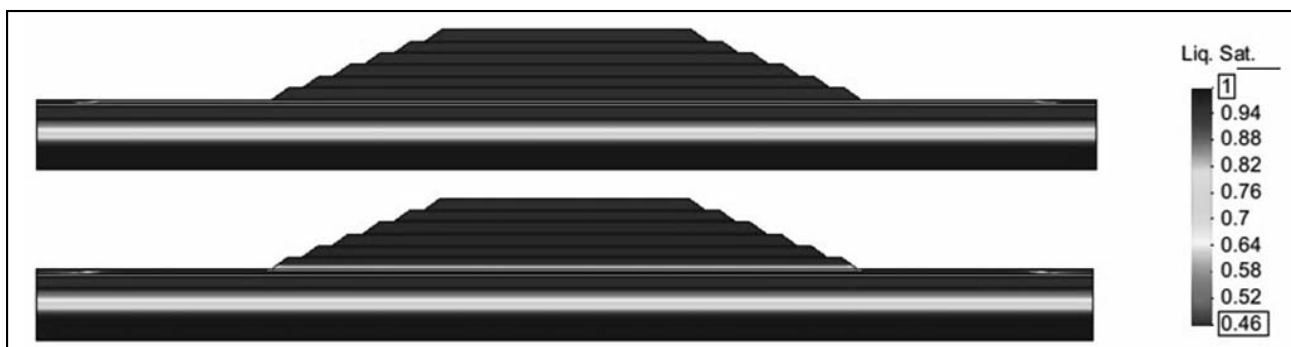


Figura 9. Etapa 6: material grueso (arriba), material fino (abajo). Grado de saturación al finalizar el riego de la capa 6 (fin etapa 6, t = 660 días).

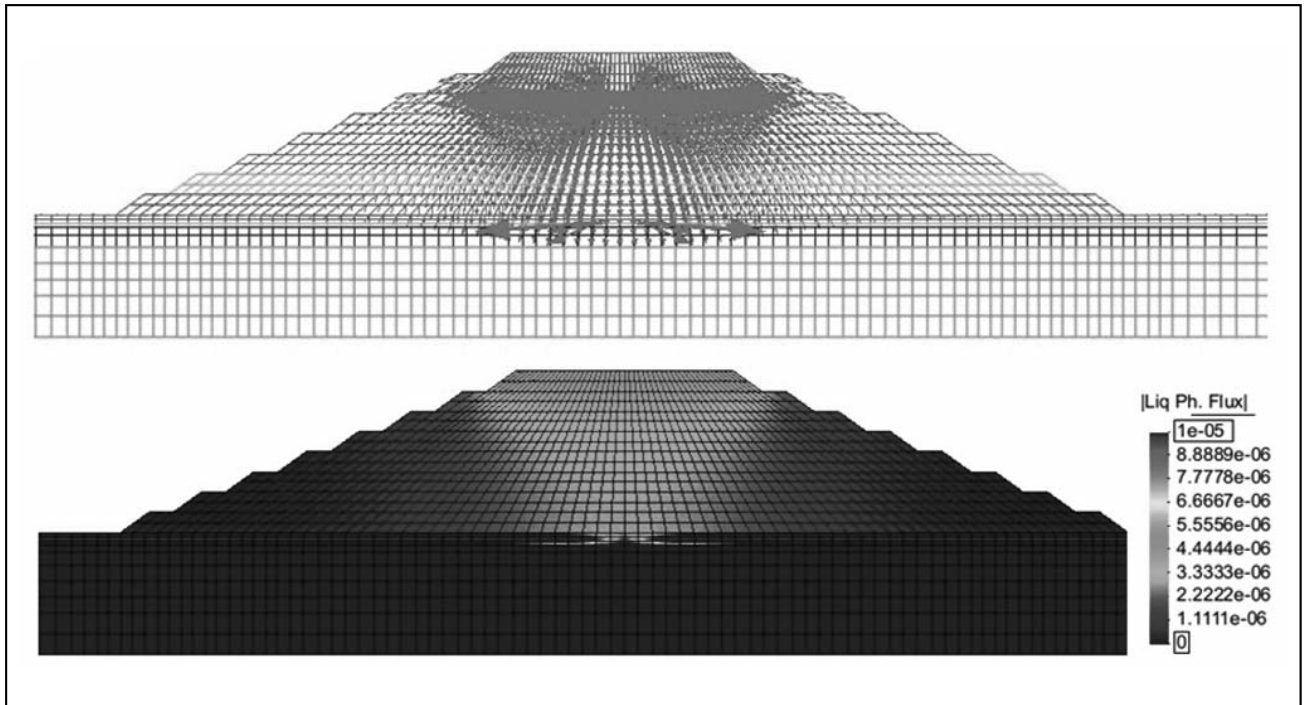


Figura 11. Etapa 8: material fino. Campo de flujos de líquido (arriba). Contornos de flujos de líquido (abajo). Fin del riego de la capa 8 (t = 880 días).

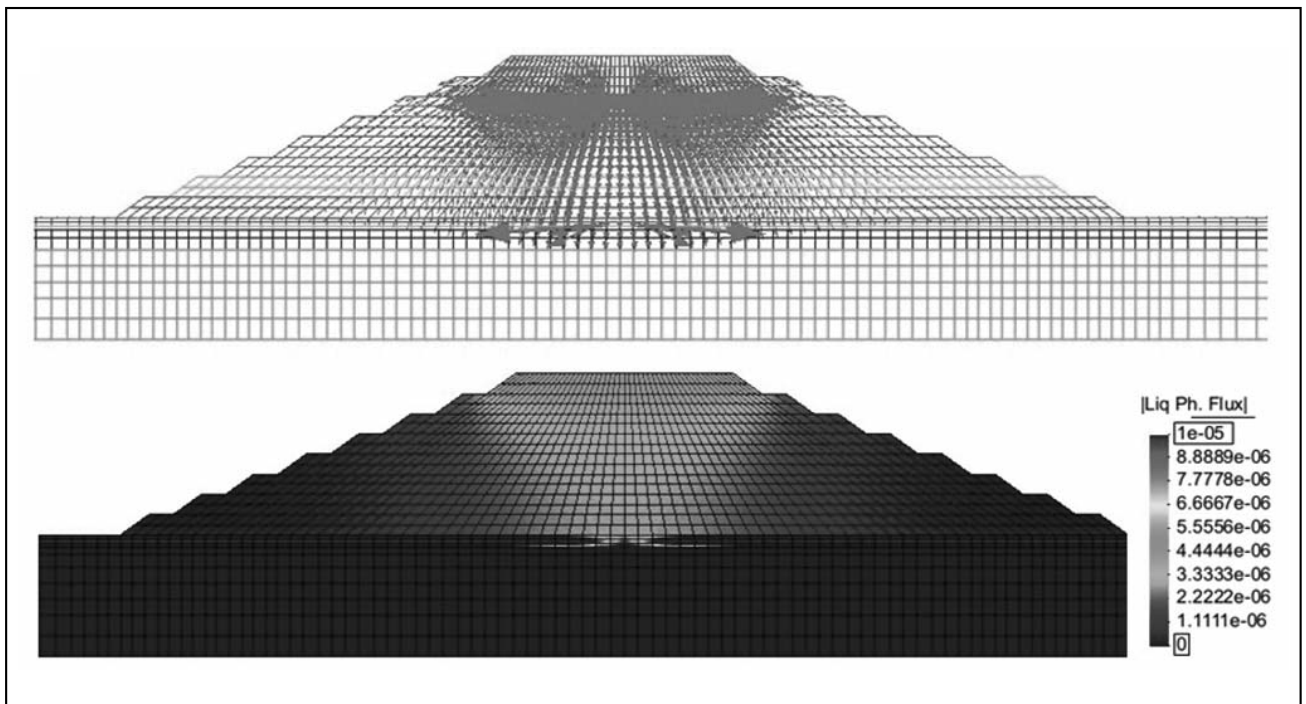


Figura 12. Etapa 8: material grueso (arriba), material fino (abajo). Desplazamientos y deformada al finalizar el riego de la capa 8 (t = 880 días).

En la Figura 13 se han representado el campo de tensiones principales y el campo de desplazamientos para la pila de material grueso al finalizar el riego de la capa 8. Puede observarse que las tensiones aumentan en función del peso del material ubicado por encima, en forma simétrica, de acuerdo con la simetría de la pila. No se observan tensiones de tracción que podrían conducir a la inestabilidad de la pila.

La Figura 14 muestra que la tensión media neta en puntos del eje vertical de la pila aumenta a medida que se construyen las distintas capas de mineral. El trabajo de la pila de material grueso en condiciones más secas respecto de la pila de material fino, que trabaja más húmeda (cercana a saturación) favorece el aumento de la tensión media neta lo cual favorece la estabilidad de la pila. En el material fino, la pila inicialmente se descarga hasta la construcción de la siguiente capa.

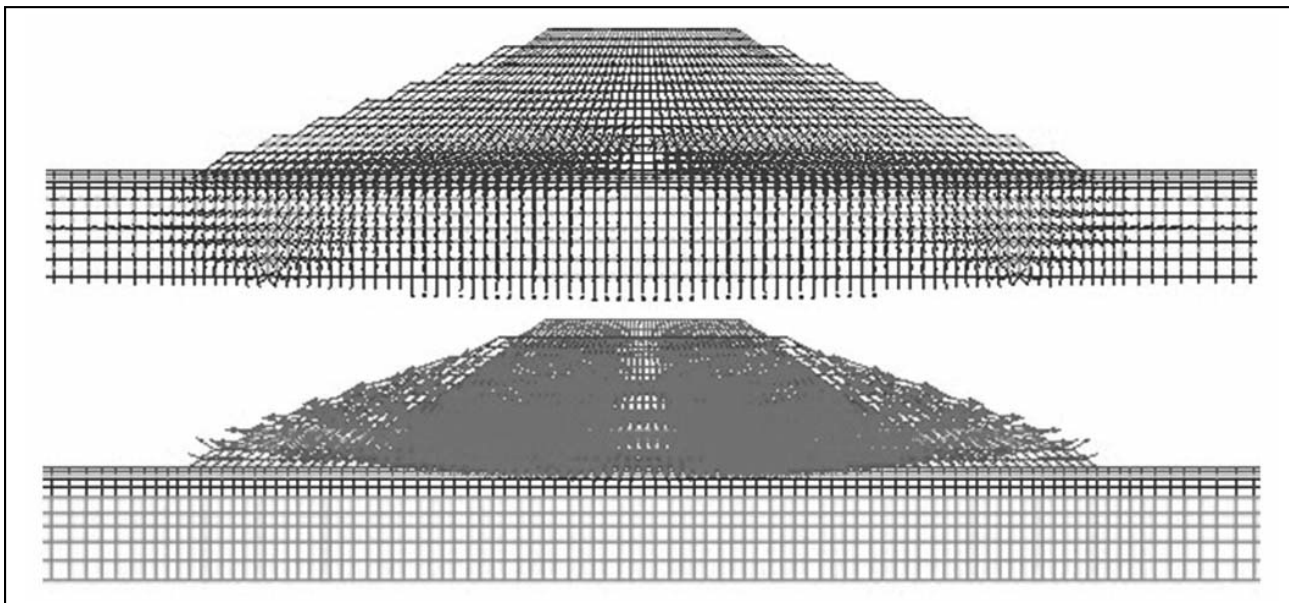


Figura 13. Etapa 8: material grueso. Campo de tensiones principales (arriba). Campo de desplazamientos (abajo). Fin del regado de la capa 8 (t = 880 días).

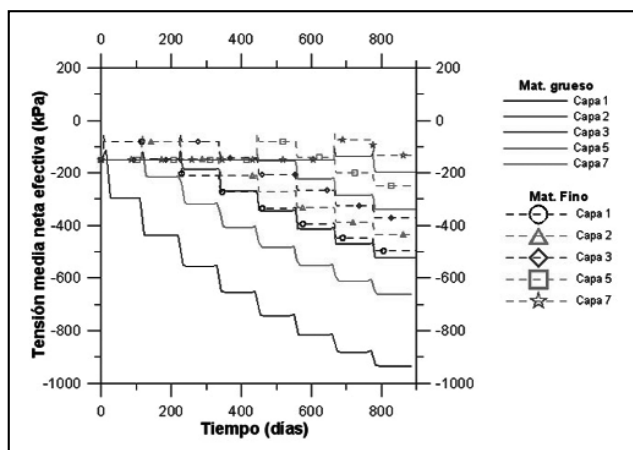


Figura 14. Evolución de la tensión media neta en los puntos medios ubicados sobre el eje vertical de la pila, para material grueso y fino respectivamente.

EFFECTO DE LA HETEROGENEIDAD DEL MINERAL DE LA PILA

Durante la construcción de la pila es inevitable el desarrollo de capas y regiones con zonas de material de estructura distinta dentro de la pila debido al proceso natural de segregación que se produce durante el volcado y acomodamiento del mineral sobre la plataforma de lixiviación.

El proceso de aglomeración del mineral reduce significativamente la segregación pero no la evita. Por lo tanto, el material de la pila resulta en general heterogéneo y el flujo de la solución lixivante avanzará hacia el interior de la pila a través de vías preferenciales de circulación, dejando áreas de la pila sin lixiviar. Estas vías preferenciales pueden formarse por la segregación del mineral pero también pueden formarse por las condiciones de riego de la solución. 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 flujo influyen significativamente sobre las trayectorias de flujo (O’Kane, 2000, Delahaye y Alonso, 2002).

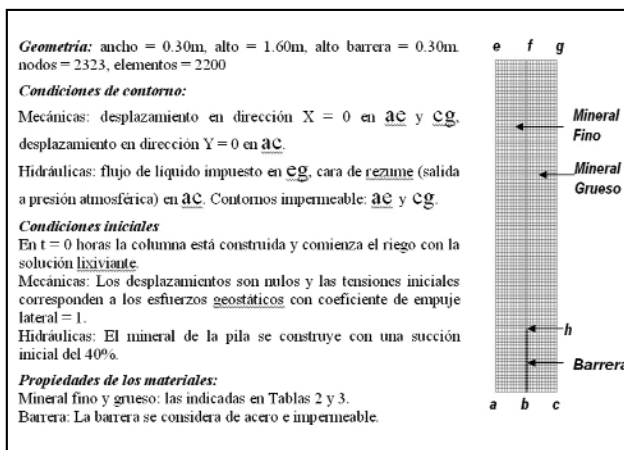


Figura 15. Modelo de columna de lixiviación.

En este apartado se explora el efecto de la tasa de riego sobre las condiciones de flujo en el interior de la pila. Para ello se considera una columna de lixiviación de mineral dividida en dos partes, la parte izquierda de la columna contiene mineral de granulometría fina y la parte derecha mineral de granulometría gruesa. Una barrera metálica existente en la parte inferior de la columna divide los flujos hacia el mineral fino y grueso respectivamente. La geometría general de la columna y la malla de elementos finitos se muestra en la Figura 15. La malla de elementos finitos consta de 2323 nodos y 2200 elementos cuadrangulares lineales con cuatro puntos de integración.

Se han considerado cuatro casos. En los casos 1 a 3 se ha impuesto una tasa de riego sobre el contorno superior de la columna, la cual se han mantenido constante durante toda la simulación hasta alcanzar condiciones estacionarias. En estos 3 casos, la tasa de riego es inferior al flujo máximo que puede infiltrar el mineral. El caso 4 corresponde a la condición de inundación del contorno superior, la cual representa un estado crítico, el caso en que la tasa de riego supera el flujo máximo que el mineral puede infiltrar. En la pila real, representa el caso en que una parte del riego infiltra y el resto se mueve por escorrentía superficial sobre por la plataforma de la pila y los taludes, poniendo en riesgo la estabilidad de la pila.

Tabla 4. Columna de lixiviación. Flujos de entrada y salida en estado estacionario.

Caso	Tasa kg/s/m ²	Flujos mat. fino (kg/s)		Flujos mat. grueso (kg/s)		
		m/s	Entrada	Salida	Entrada	Salida
1	2,94E-4	2,94E-7	4,35E-5	8,05E-5	4,35E-5	0,65E-5
2	1,40E-3	1,40E-6	0,21E-4	0,35E-3	0,21E-4	0,74E-4
3	1,73E-1	1,73E-4	0,026	0,030	0,026	0,049
4	Inundación		0,29E-3	0,29E-3	0,080	0,080

En la Figura 16, 17, 18 y 19 se han representado la evolución de los flujos de entrada y de salida para los casos 1 a 4 respectivamente. En la Tabla 4 se han indicado los flujos de entrada y de salida correspondiente al estado estacionario para los cuatro casos respectivamente.

Los resultados muestran un comportamiento distinto de la columna de lixiviación en función del valor de la tasa de riego. Tasas de flujo pequeñas (Casos 1 y 2) provocan que la infiltración se produzca principalmente por la parte de la columna con mineral de granulometría fina, tasas más altas (Casos 3 y 4) por la parte con mineral de granulometría gruesa. Esto ha sido

también observado en los trabajos de *O'kane (2000)* y *O'kane et al (1999)*.

Las implicancias desde el punto de vista de la operación de la pila son inmediatas, ya que los métodos actuales de transporte y colocación del mineral favorecen la segregación de partículas, y en consecuencia, el material que integra la pila resulta heterogéneo, con zonas, capas horizontales o inclinadas de distinta granulometría. Estas zonas de distinta granulometría favorecen que el flujo sea heterogéneo, desarrollándose a través de vías preferenciales, ya que la permeabilidad, curva de retención y las deformaciones volumétricas no resultan uniformes.

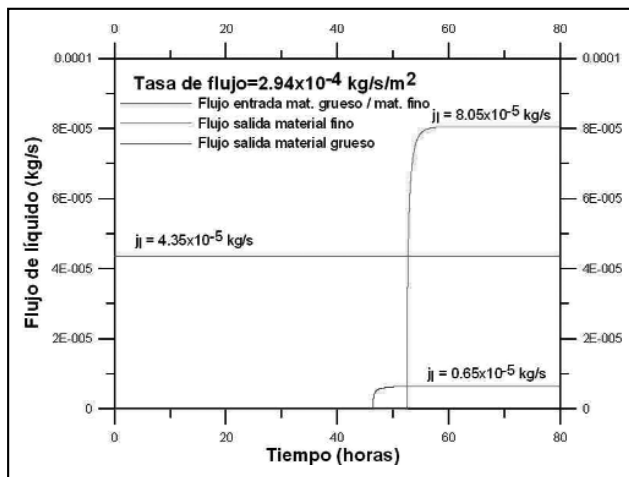


Figura 16. Caso 1: Tasa de riego = 2.94E-4 kg/s/m². Evolución de los flujos de entrada y de salida hasta estado estacionario.

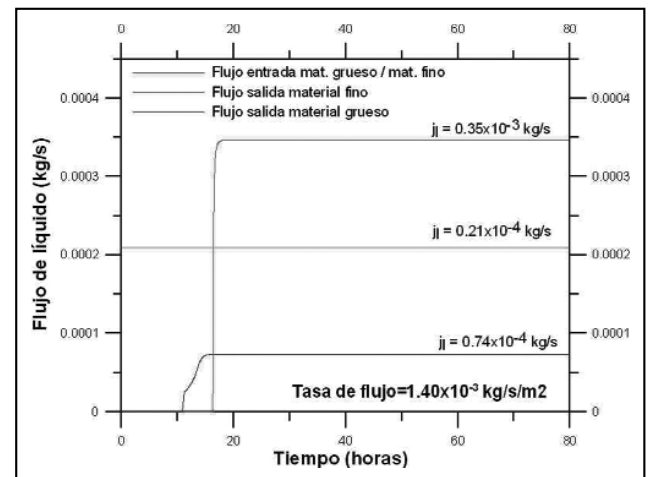


Figura 17. Caso 2: Tasa de riego = 1.40E-3 kg/s/m². Evolución de los flujos de entrada y de salida hasta estado estacionario.

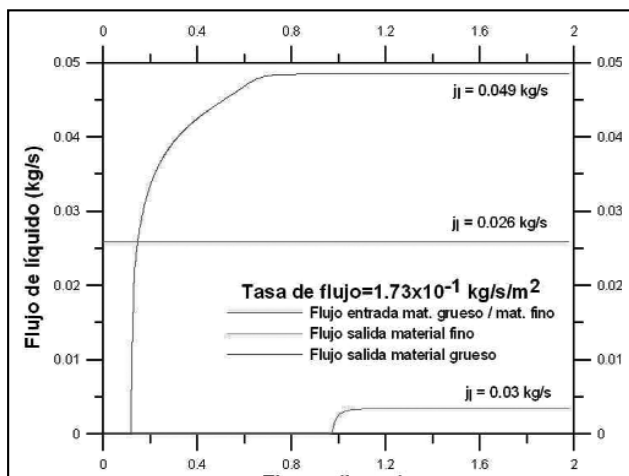


Figura 18. Caso 3: Tasa de riego = 1.73E-1 kg/s/m². Evolución de los flujos de entrada y de salida hasta estado estacionario.

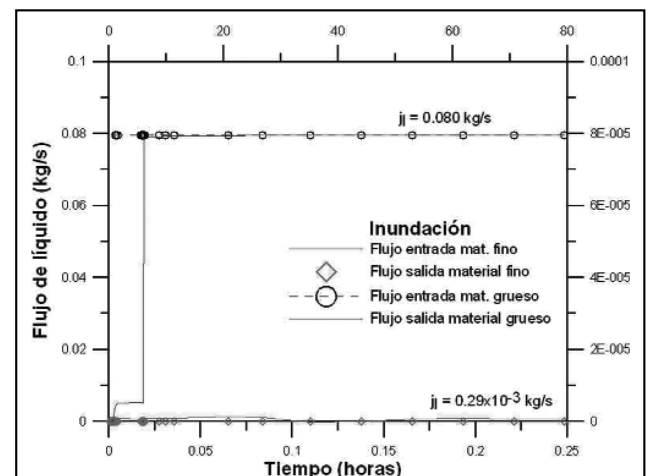


Figura 19. Caso 4: Inundación. Evolución de los flujos de entrada y de salida hasta estado estacionario.

La formación de vías preferenciales puede conducir a afloramientos de la solución química por la superficie del talud y por lo tanto provocar deslizamientos. Además, como el flujo de la solución a través de la pila es esencialmente no saturado, la circulación a través de vías preferenciales pone en riesgo la estabilidad de la pila, ya que en zonas de granulometría más fina el mineral puede alcanzar la saturación, con aumento de la presión de poros y por lo tanto disminución de las tensiones efectivas y de la resistencia al corte, lo que sumado a que el mineral presenta en general una estructura granular abierta, favoreciendo la ocurrencia de cambio bruscos de volumen ante solicitaciones sísmicas, puede conducir la pila hacia la condición de falla.

CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo la simulación de la construcción y riego con solución química de una pila de lixiviación sobre plataforma. Se ha utilizado un modelo bidimensional (2D), no confinado, que resuelve el estado transitorio y estacionario de la construcción y riego capa a capa de la pila. El método utilizado resuelve las ecuaciones de continuidad del flujo de aire y de agua y de equilibrio mecánico por el método de elementos finitos, en forma completamente acoplada, tomando en cuenta el comportamiento mecánico de los suelos no saturados.

La pila se ha construido en 8 etapas sucesivas, cada una de las cuales comprende la construcción de una capa y el regado de la misma con la solución lixivante. Para definir la geometría, condiciones de contorno e iniciales, y caracterizar hidráulica y mecánicamente los materiales de la pila, se ha recurrido a datos de trabajos de investigación y de la industria sobre pilas de lixiviación reales. Se han considerado dos tipos de mineral: mineral de granulometría gruesa y mineral de granulometría fina. El análisis ha permitido conocer el efecto de la granulometría del mineral sobre la evolución de las presiones de poros, del grado de saturación y de los flujos en el interior de la pila, así como el comportamiento tenso-deformacional a medida que se realiza la construcción y riego capa a capa.

El efecto de la heterogeneidad del mineral de la pila se ha analizado mediante la simulación de un ensayo de columna de lixiviación para distintas tasas de riego. La parte izquierda de la columna se ha representado por el mineral de granulometría fina mientras que la parte derecha por el mineral de granulometría gruesa. Los resultados muestran que la infiltración se produce en forma preferencial por el mineral de granulometría gruesa o fina en función de la tasa de riego aplicada.

Las conclusiones principales del análisis para las hipótesis adoptadas en el modelo indican:

- La pila construida con mineral de granulometría gruesa trabaja en condiciones drenadas mientras que la de granulometría fina lo hace prácticamente en condiciones saturadas.
- Aunque las condiciones de colocación del mineral sean las mismas para cada capa en ambos casos, en la pila de material de granulometría fina el grado de saturación aumenta hacia la base de la pila, debido a la menor permeabilidad del mineral y al incremento de la carga por el peso de las sucesivas capas.
- El contacto de la base de la pila con la capa drenante favorece las condiciones de drenaje en ambos casos. La presión de agua en la zona inferior de la pila aumenta debido al peso de las capas superiores, más significativo en la pila de material fino, con valores positivos sobre el revestimiento que pueden conducir a la inestabilidad.

- La capa drenante favorece el drenaje rápido del líquido en la base de la pila y el revestimiento evita que la solución lixivante penetre en el terreno de fundación.
- La pila de material grueso sufre un mayor asentamiento en la zona central de la pila mientras que en la pila de material fino las mayores deformaciones se ubican sobre los taludes, lo que podría conducir a deslizamientos de los taludes de la pila.
- Las tensiones aumentan en función del peso del material ubicado por encima, en forma simétrica, de acuerdo con la simetría de la pila. No se observan tensiones de tracción que podrían conducir a la inestabilidad de la presa.
- La tensión media neta en puntos del eje vertical de la pila aumenta a medida que se construyen capas de mineral. El trabajo de la pila de material grueso en condiciones más secas respecto de la pila de material fino, que trabaja más húmeda (cercana a saturación) favorece el aumento de la tensión media neta, lo cual favorece la estabilidad de la pila. En el material fino, la pila inicialmente se descarga hasta la construcción de la siguiente capa.

El efecto de la heterogeneidad del material que integra la pila tiene implicancias inmediatas sobre las condiciones de operación y de seguridad. Algunas conclusiones son:

- Tasas de riego más bajas inducen la infiltración de la solución por el mineral de granulometría fina, tasas más altas por el de granulometría gruesa.
- Desde el punto de vista de la operación ante un rendimiento bajo de la pila, el aumento de la tasa de riego con el objeto de lograr una mayor recuperación podría favorecer la formación de vías preferenciales de flujo por las zonas de la pila con mineral grueso, dejando sin riego o regando muy poco aquellas zonas de la pila con material de granulometría fina.
- Desde el punto de vista de la seguridad, el flujo de la solución química a través de vías preferenciales puede provocar efectos no deseados, como la formación de niveles freáticos colgados, de flujos emergentes por los taludes, de zonas con crecimiento rápido de la presión de poros, zonas con licuefacción por sollicitación sísmica y fenómenos de colapso. Todos estos fenómenos ponen en riesgo la estabilidad de la pila.

Los problemas resueltos muestran las ventajas del método utilizado, el cual se cree que representa mejor las condiciones reales, ya que en la pila se pueden representar regiones saturadas y no saturadas. El método resuelve automáticamente la importante cuestión de la posición de la línea de saturación, como una transición entre la zona saturada (presión de agua positiva) y la zona no saturada (presión de agua negativa), así como el incremento y disipación de las presiones de poro en la pila, dando respuesta a interrogantes sobre las condiciones de filtración y de estabilidad de pilas de lixiviación que son habituales en el diseño de ingeniería de estas obras, donde tanto la geometría, materiales y condiciones de contorno son complejas en la mayoría de los casos, y los métodos tradicionales no resultan adecuados para resolverlos.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Instituto de Investigaciones Mineras, al Departamento de Ingeniería de Minas y al CICITCA de la Universidad Nacional de San Juan, el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

TRABAJOS CITADOS EM 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.
- 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.
- DELAHAYE, C.H. Y E.E. ALONSO , 2002.
Soil heterogeneity and preferential paths for gas migration.
Engineering Geology, 64, 251-271.
- 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.
- HARPER, THOMAS G., LEACH, ANDREW J. AND ROBERT T. TAPE, 1987.
Slope Stability in Heap Leach Design.
Geotechnical Aspects of Heap Leach Design, AIME, Society of Mining Engineers, Inc., Ed. Dirk Van Zyl, Chapter 6, 33-38.
- LLORET, A. Y E. ALONSO., 1985.
State surface for partially saturated soils.
XI Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng., 3, 557-562.
- MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS, 1995.
Guía ambiental para Proyectos de Lixiviación en Pilas.
Dirección General de Asuntos Ambientales, Perú. BIB/ 2429/V10.
- 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.
Demonstration of the Application of 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 E. ALONSO., 1996.
Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media.
Engineering Computations, 13, 87-112.
- ROMERO, E., ALONSO, E. Y J. KNOBELSDORF., 2002.
Laboratory tests on compacted sand-bentonite buffer material for the GMT Emplacement Project.
Laboratorio de Geotecnia, Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- THIEL, R. AND M.E. SMITH, 2003.
State of the practice review of heap leach pad design issues.
Proc. 17th Annual GRI Conference Hot opics in Geosynthetics - IV. Las Vegas, NV, Dec, 15, 2003. Geosynthetics Institute, Folson, PA.
- 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.

INSTRUCCIONES PARA AUTORES

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

- La versión original deberá ser editada en **Microsoft Word**.
- Las contribuciones deben ser originales.
- Se recibirán trabajos en castellano, inglés o portugués.
- En la primera página se deberá indicar el título del trabajo y los datos de los autores y afiliaciones. En letra Times New Roman normal tamaño 10, centrado debajo del título principal. Los nombres de los autores se deben escribir en letra normal, las afiliaciones y correo electrónicos en letra cursiva. Se deberá identificar con un superíndice al autor que se deba dirigir la correspondencia.
- El título del artículo debe ser conciso, informativo e indicativo del contenido del mismo y escrito sin utilizar abreviaturas en letra Times New Roman punto 12, mayúscula, negrita y centrado, sin subrayar.
- Desde la segunda página comienza el desarrollo del trabajo. Se debe incorporar, en forma consecutiva, el Resumen de hasta 250 palabras; un Abstract, y opcionalmente se podrá incorporar otro en portugués, de hasta 200 palabras y las Palabras Clave en un número entre 3 y 5 y las correspondientes Keywords.
- Todo el texto deberá estar escrito en letra Times New Roman punto 12 a un espacio de interlínea, sin sangrías (ya sea mediante tabulador o espacios) y sin doble espacios entre párrafos. Se conservarán, no obstante, los destacados que el autor considere convenientes, así como los correspondientes a determinados términos científicos o expresiones latinas o extranjeras.

Deberá estar escrito en una sola columna. El 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.
- En el caso que el idioma del trabajo no sea español, la primera sección será el abstract, además de un resumen en el idioma en el que está escrito el trabajo. A continuación el resumen en español y tras ello el desarrollo.
- La extensión no deberá superar las 20 páginas.
- Es obligatorio el uso del sistema métrico decimal.
- Cuando una abreviatura aparezca en el texto por primera vez, deberá ser aclarada en forma completa entre paréntesis.
- No se aceptarán notas de pie de página. La información respectiva deberá incorporarse en el texto normal.
- Las expresiones matemáticas deben ser elaboradas con el procesador de texto y formar parte del mismo. Las ecuaciones deben estar centradas y deben estar separadas por una interlínea. Todas las ecuaciones deben estar numeradas consecutivamente, usando numerales en paréntesis alineados al margen derecho. La secuencia de paréntesis deberá ser la usual en Matemática:}}).
- Las fórmulas deben ser digitadas. Deje un espacio amplio alrededor de la fórmula.
- Los subíndices y superíndices deben ser claros.
- Las letras griegas y otras no latinas deben ser explicados en el margen, donde sean usados por primera vez. Tenga especial cuidado en diferenciar entre cero (0) y la letra "o", y entre uno (1) y la letra "l".
- Proporcione el significado de todos los símbolos inmediatamente después de la ecuación en la que son usados por primera vez.
- Para fracciones simples use el símbolo "/" en lugar de la línea horizontal; por ejemplo: Sy/Xm en lugar de $\frac{Sy}{Xm}$.
- Aquellas ecuaciones explícitamente referenciadas en el texto deben numerarse serialmente al lado derecho, entre paréntesis.
- En las fórmulas químicas deben especificarse la valencia de los iones como, por ejemplo, Ca^{2+} y CO_3^{-2} , no como Ca^{++} o CO_{-3} .
- Los números de isótopos deben anteceder a los símbolos, 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 exceptuará 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).
- Se incluirán como figuras todas las ilustraciones, mapas, fotografías, etc., presentes en el texto, las que llevarán numeración arábica correlativa por orden de aparición. Las mismas se ajustarán al tamaño de caja. En el texto se citarán como (Figura), o (Figuras) en plural.
- Se deberá indicar la posición de las figuras en el texto e incluirlas por separado a continuación del mismo. Se deberán limitar, como máximo, a una caja de 15 x 23 cm, debiendo tener en cuenta el espacio ocupado por el epígrafe. No se aceptarán plegables. Las figuras no se deben incluir como parte del archivo de texto. Se deben remitir en un archivo separado formato .tif, .jpg, .dwg o .eps.
- 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.
- Use la misma clase de letra en todas las ilustraciones y siga el estilo de la revista.
- En el caso que los autores incluyan mapas y/o gráficos que requieran ser plegables para el tamaño de la revista, los costos derivados de su impresión correrán por cuenta de él o los autores.
- Las tablas deben ser remitidas en páginas separadas, indicando su ubicación dentro del texto. Las tablas deberán ser numeradas de acuerdo a su secuencia en el texto, el cual debe incluir referencias a todas ellas.
- La información presentada en las tablas no debe aparecer repetida en las figuras.
- Cada tabla debe tener un título breve y explicativo, en la parte inferior.
- En el caso de mapas, los mismos incluirán las coordenadas geográficas, escala gráfica y norte. Deberán tener referencias adecuadas a los símbolos, rastras, etc. utilizados.
- Las fotografías, incluidas como figuras, deberán ser pancromáticas, de buena resolución y contraste debiendo ser enviadas como archivos .tif o .jpg. No se aceptarán fotografías en color. Las fotografías en color serán reproducidas en escala de grises salvo que el o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos. Los originales deben ser enviados

con la versión final del trabajo. Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente después de la misma. Se usará letra punto 12, a un interlineado. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos. Se recomienda que las leyendas sean cortas y concisas.

- Las referencias bibliográficas serán incluidas bajo el título de TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO. Las mismas deberán estar ordenadas alfabéticamente.
- Cuando el autor cite el trabajo de otro autor o reproduzca una figura, tabla o parte del texto de un libro o un artículo de revista, debe dejar en claro la correspondiente cita
- Aunque en general un autor puede reproducir tablas, fotografías u otras ilustraciones deberá obtener permiso del propietario de los derechos. Si el propietario de los derechos no es el autor del material citado o reproducido, se recomienda obtener también el permiso del autor.
- La cita de trabajos en el texto estará referida a la lista bibliográfica final, indicando apellido de los autores (en mayúsculas) y año de publicación entre paréntesis, por ejemplo: (Caminos 1975). En caso de ser más de tres autores se usará et al. (en itálica, no subrayado ni negrita). Cuando se cite más de un trabajo del mismo autor se separarán por una coma, por ejemplo: Caminos (1956, 1978). En las citas totalmente entre paréntesis no se usará coma para separar el autor del año

(Caminos 1956). En el caso de ubicar varios autores dentro del paréntesis se separarán entre ellos por un punto y coma. Si se citan varios trabajos del mismo autor y del mismo año se agregarán, a continuación del año, letras, de acuerdo al orden de aparición en el texto.

- Las citas bibliográficas estarán justificadas a la izquierda y la segunda línea tendrá una sangría especial francesa de 15 puntos ó 0,75 cm.
- Los artículos en publicaciones periódicas se citarán:
CARRANZA TORRES, C.M., 1991. Cálculo analítico de redes de filtración. Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería Volumen VI: 250-267.
- Los artículos en textos:
MATEOS RUIZ, R.M. y M. FERRER GIJÓN, 1994. Methodology for landslides hazard map 1:10,000 in the area of Monachil (Granada, Spain). En R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha (eds.) 7th International Congress International Association of Engineering Geology, Volume III: 2059-2064, Rotterdam.
- Los libros de textos:
DEARMAN, W.R., 1991. Engineering geological mapping. Butterworth-Heinemann Ltd, 387 pp. Oxford.

**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 1-6-2010):

Para Argentina: Gastos de envío incluidos.

- Compra de número vigente: **200** Pesos
- Compra de número atrasado: **160** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **80** Pesos por artículo

Para el exterior: Gastos de envío no incluidos.

- Compra de número vigente: **200** Pesos
- Compra de número atrasado: **50** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **25** Dólares por artículo

PRECIOS DE SUSCRIPCIÓN (Desde 1-6-2010):

Para Argentina: Gastos de envío incluidos.

- Suscripción anual: un número.
- Suscripción normal: **145** Pesos
- Suscripción Instituciones: **580** Pesos
- Compra de número atrasado: **160** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **60** Pesos por artículo

Para el exterior: Gastos de envío no incluidos.

- Suscripción anual: un número.
- Suscripción normal: **37** Dólares
- Suscripción Instituciones: **148** Dólares
- Compra de número atrasado: **40** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **25** Dólares por artículo **1**

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

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

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

Los Socios de ASAGAI reciben la revista sin cargo alguno.

CONFERENCIA SOBRE DESLIZAMIENTOS DE TERRENO Y PELIGROS ASOCIADOS

Córdoba, 25 al 27 de agosto de 2010

TEMAS

- ▲ Caídas de roca y suelo
- ▲ Deslizamientos
- ▲ Flujos
- ▲ Vuelcos
- ▲ Reptaciones
- ▲ Estudios de campo
- ▲ Monitoreo
- ▲ Peligros geológicos
- ▲ Aspectos ambientales e integración paisajística
- ▲ Proyectos de estabilización
- ▲ Obras de excavación y terraplenado
- ▲ Obras de estabilización de laderas y taludes

DIRECCIÓN ELECTRÓNICA DE CONTACTO

conferenciadeslizamientos@gmail.com

ORGANIZAN



ASOCIACION ARGENTINA
DE GEOLOGIA APLICADA
A LA INGENIERIA



Copyright
© Editorial ASAGAI. 2010
Printed in Argentina

Se terminó de imprimir en Mayo de 2010