

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



ASAGAI

ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Córdoba - Argentina

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Publicación Oficial de



Número 48 • 2022

ISSN 2422-5703 (En línea)

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



Editada en la Ciudad de Córdoba - Argentina

EDITOR JEFE

MSc Geólogo Norberto Jorge Bejerman

UCIS Consultores

editores@editoresasagai.org.ar

EDITORIA ASOCIADA

Dra. Marcela Perez

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Universidad Nacional del Litoral

Argentina

maperez@fich.unl.edu.ar

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Carlos Costa

Departamento de Geología

Universidad Nacional de San Luis

Argentina

costa@unsl.edu.ar

Lic. Luis Mario Giaconi

Cátedra de Geología Aplicada (FCNyM)

Universidad Nacional de La Plata

Argentina

lmgiaconi@gmail.com

Dr. Mauricio Giambastiani

Universidad Nacional de La Rioja

Argentina

mgiambastiani@unlar.edu.ar

Prof. Dr. Luis I. Gonzalez de Vallejo

Departamento de Geodinámica

Universidad Complutense de Madrid

España

vallejo@geo.ucm.es

Prof. Dr. Helder Iglésias Chaminé

Departamento de Engenharia Geotécnica

Politécnico do Porto

Portugal

hic@isep.ipp.pt

Dr. Clemente Irigaray Fernández

Departamento de Ingeniería Civil

Universidad de Granada

España

clemente@ugr.es

Prof. Dra. Malva Andrea Mancuso

Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental

Universidade Federal de Santa Maria

Brasil

malvamancuso@ufsm.br

Dra. Ofelia Tujchneider

Departamento de Hidrología y Ambiente

Universidad Nacional de El Litoral.

Santa Fe

Argentina

pichy@fich1.unl.edu.ar

Dr. Marcelo E. Zeballos

Área de Geotecnia

Departamento de Construcciones Civiles

Universidad Nacional de Córdoba

Argentina

marcelo.zeballos@unc.edu.ar

SECRETARIA

Dra. María Paula Bunicontró

IGEBA (CONICET-UBA)

Argentina

secretaria.editores@editoresasagai.org.ar

PRODUCCIÓN EDITORIAL

Encargada de Diseño

Paula Paredes

paulaparedes13@gmail.com

Webmaster

Guillermo Saint

saintdisegno@gmail.com

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

COMISIÓN DIRECTIVA 2022 - 2026

PRESIDENTE	<i>Norberto Jorge Bejerman</i>
VICEPRESIDENTE	<i>Rubén Alvaro López</i>
SECRETARIA	<i>María Paula Bunicontro</i>
TESORERO	<i>Fabio Sergio Luna</i>
VOCAL TITULAR	<i>María Victoria Altinier</i>
VOCAL TITULAR	<i>Silvia Edith Castro Godoy</i>
VOCAL TITULAR	<i>Claudina Di Martino</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Enzo Andrés Vergini</i>
REVISORA DE CUENTAS TITULAR	<i>María Beatriz Ponce</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>José Gabriel Salminci</i>
REVISORA DE CUENTAS SUPLENTE	<i>Cristina Dapeña</i>

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

INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Cuerpo Editorial		I
Comisión Directiva		II
Análisis de la variabilidad del colapso y su geología en un perfil de loess	<i>Rouzaut Sabrina - Clariá, Juan José - Curto, Joel</i>	1
Evaluación geotécnica preliminar de las unidades geológicas del frente costero portuario de Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina	<i>Di Martino, Claudina - Albouy, René - Aliotta, Salvador</i>	15
Técnicas geofísicas para a detecção de piping: uma revisão de literatura	<i>Santos, Cleber de Jesus - Picanço, Jefferson de Lima</i>	23
Utilización de un sistema de medición del riesgo de caída de rocas en fase operativa en el Camino de Altas Cumbres, Sierra Chica, Córdoba, Argentina	<i>Quintana Crespo, Enrique F. - Navarro, María Alejandra</i>	37
Directrices para autores		51

MISIÓN Y OBJETIVOS DE LA PUBLICACIÓN

Misión y objetivos de la publicación

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

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

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

Leyenda de protección de derechos de autor

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

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

Aims and objectives

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

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

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

Authors Copyrights

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

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



Análisis de la variabilidad del colapso y su geología en un perfil de loess

Collapse variability analysis and its geology in a loess profile

Rouzaut Sabrina¹ ✉ - Clariá, Juan José² - Curto, Joel¹

Recibido: 15 de septiembre de 2021 • Aceptado: 15 de febrero de 2022

Resumen

Las valiosas y numerosas pérdidas por daños sobre estructuras civiles que los loess cordobeses han producido como consecuencia de su susceptibilidad al colapso han motivado numerosas investigaciones en el medio local. Si bien los loess cordobeses presentan un origen, granulometría y mineralogía común a lo largo de todo el territorio de la provincia, existen notables diferencias en cuanto a su potencial de colapso consecuencia los distintos procesos geológicos bajo los cuales estuvieron sometidos. Con el objeto de vincular el comportamiento mecánico con la historia geológica, se estudió un perfil estratigráfico ubicado en la localidad de Corralito, que consiste en una secuencia de loess-paleosuelo que aflora en una cárcava de 14 m de profundidad. A tal fin, se tomaron 33 de muestras a lo largo de todo el perfil, compuesto por un horizonte superior antrópico, un horizonte orgánico, un manto de loess superior, y finalmente en profundidad los loess inferiores I, II y III, sobre las que se realizaron en laboratorio ensayos de doble edómetro. Los resultados mostraron que las muestras de los horizontes antropizados, orgánico y loess superior, correspondientes a loess primarios o bien con presencia de materia orgánica, resultan altamente colapsables. Sin embargo, las muestras de los loess inferiores I y III no resultan susceptibles al colapso por humedecimiento. La diferencia de comportamiento entre los diferentes estratos, es explicada en función de los procesos sufridos por los mismos a lo largo de su historia geológica. La estabilidad mecánica de los loess inferiores se atribuyó a que estos horizontes corresponden a un fragipán y a un posible horizonte cementado con carbonato de calcio respectivamente.

Palabras clave: loess, colapso, historia geológica, tosca, Corralito.

Abstract

The valuable and numerous damages on civil structures that loessial soils from the city of Cordoba have generated because of their collapse susceptibility have been extensively studied by many local researchers. Although every loess has similar origin, mineralogy and grain size distribution, not all loess became collapsible due to their different geological processes. In order

¹ Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.

✉ srouzaut@unc.edu.ar

² Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba

to quantify this mechanical instability phenomenon and link this behavior to the geological history of loessial soils, a stratigraphic profile located at Corralito, was studied. This lithologic profile consists of a loess-paleosol sequence that emerges in a 14 m deep naturally open trench, composed of an anthropic upper horizon, followed by an organic horizon, then a mantle of upper loess, and finally in depth, the lower loess I, II and III. Thirty-three undisturbed soil samples were taken along these 14 m profile and laboratory double oedometer tests were carried out. The test results showed that specimens from the anthropic, organic, and upper loess are highly collapsible. Nevertheless, the collapsibility coefficients measured on specimens from lower loess I and III, were close to one highlighting that there is no collapse susceptibility. The different mechanical behavior of the strata was explained based on the processes suffered throughout their geological history. The mechanical stability of the lower loess I and III was attributed to the fact that these horizons correspond to a fragipan and a possible possible horizon cemented with calcium carbonate, respectively.

Keywords: loess, collapse, geological history, toska, Corralito.

INTRODUCCIÓN

Los mantos loésicos de la llanura cordobesa, debido a su proceso de formación, ya sea depositación eólica o retransporte (Pye y Sherwin 1999, Argüello et al., 2012), presentan características particulares de comportamiento, siendo propensos a sufrir grandes cambios volumétricos en su estructura que producen el colapso del material, debido a incrementos aislados o combinados del contenido de humedad y estado tensional. Sin embargo, a pesar de su inestabilidad, estos materiales son comúnmente utilizados como material de fundación en diversas obras de ingeniería, por lo que el conocimiento de sus propiedades y en especial lo que respecta a su comportamiento tensión-deformación y susceptibilidad al colapso, tiene un enorme impacto económico en la infraestructura civil.

Se han propuesto una gran cantidad de métodos para cuantificar la susceptibilidad al colapso de los suelos. Rocca (1985) y Redolfi (1990) presentan una recopilación y descripción exhaustiva de los mismos. Entre los numerosos métodos existentes, el ensayo de doble edómetro es probablemente el más popular.

El grupo de investigadores del Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba es pionero en el estudio de los depósitos loésicos colapsables, el mismo ha dedicado a través de casi tres generaciones numerosas investigaciones a la temática desde fines de la década del '60 hasta el presente. Todo ello ha llevado a un gran avance en la implementación de metodologías para la caracterización de estos depósitos, criterios de diseño de fundaciones y modelos numéricos para la evaluación de su comportamiento tanto mecánico como hidráulico (Rinaldi et al., 1998; Zeballos et al., 2000; Clariá, 2003; Terzariol, 2009).

Si bien el origen de los sedimentos loésicos depositados a lo largo del territorio cordobés es similar, no ocurre lo mismo con su historia geológica, hecho que afecta al comportamiento mecánico. Por este motivo, los depósitos de loess se dividen en primarios y secundarios, de acuerdo a si han sufrido o no retransporte hídrico luego de su depósito (Rocca et al., 2007). Los loess primarios son aquellos depositados por el viento (*cordobense*, Frenguelli 1965) y los secundarios son loess que han sufrido alteraciones en su estructura original al ser retransportados (Fm. Pampeana) (Cantú y Blarasin, 1987; Piovano et al. 1992, Gaido et al., 2003). Si bien Santa Cruz (1978) la define como Fm Gral. Paz a todo el depósito de loess, numerosos autores resaltan diferencias en su comportamiento mecánico (Rocca et al., 2007; Francisca et al; Rinaldi et al., 2001). Los depósitos modernos son principalmente primarios, en el Sistema Unificado de

Clasificación de Suelos (ASTM D2487) corresponden a los grupos ML y CL - ML. Mientras que los más antiguos, son suelos arcillosos y limosos clasificados como CL a CH, ML y generalmente se corresponden con loess secundarios. Los comportamientos geotécnicos extremos van desde ser suelos altamente compresibles y colapsables frente al humedecimiento en el caso de los primarios, al de ser depósitos preconsolidados por desecación en el caso de los loess secundarios (Rocca et al., 2006) con comportamiento mecánico estable y de elevada rigidez. La composición química es también responsable de la mayor o menor estabilidad de la estructura de los loess. La presencia de carbonatos cálcicos, óxidos de hierro y sulfato de calcio, afectan al comportamiento ingenieril de estos depósitos. Los carbonatos primarios están constituidos por minerales carbonáticos de origen detrítico como la calcita. Los carbonatos secundarios muestran una variedad de formas que van desde grandes cristales, a microcristales, películas, costras y nódulos (Quintana Crespo, 2005).

La estructura de los depósitos de loess (>70% limo) es abierta, con macroporos y aglomeraciones de partículas. La fábrica del depósito se encuentra compuesta por una fracción granular de arenas finas (menor al 20% en peso), unida entre sí a través de materiales cementantes como sales solubles, puentes de arcilla con elevada succión mátrica, carbonatos y silicatos (Rinaldi et al., 2001).

El agua tiene un rol preponderante en la formación y comportamiento posterior del loess (Rinaldi et al., 1998). A medida que el contenido de humedad decrece, la concentración iónica en los fluidos de los poros se incrementa, el espesor de la doble capa disminuye y las fuerzas de atracción de van der Waals prevalecen sobre las fuerzas de repulsión de la doble capa. Cuando las fuerzas de atracción interpartículas dominan, las partículas arcillosas flocculan formando puentes de arcilla y contrafuertes en los contactos entre granos de arena y limo. Una mayor reducción del contenido de humedad, hace que los cationes hidratados de la doble capa se deshidraten y se vinculen iónicamente a las partículas arcillosas contiguas. Mientras tanto, la concentración de sales alcanza la saturación y precipitan como cristales que robustecen la estructura del suelo. El aumento contemporáneo de la succión aumenta también la resistencia, que es más efectiva entre partículas arcillosas en los puentes y contrafuertes, que en los meniscos entre partículas gruesas. El efecto combinado de estos procesos confiere al loess alta resistencia cohesiva que permite cortes verticales y la aptitud para soportar cargas importantes.

En contrapartida, el incremento del contenido de humedad revierte los procesos: las sales solubles se hidratan y debilitan, la concentración iónica en el fluido decrece, las fuerzas de repulsión se vuelven dominantes y las partículas arcillosas se dispersan, con la consiguiente disminución en la rigidez y la resistencia al corte. Asimismo, la succión disminuye gradualmente a medida que se incrementa el grado de saturación. Por estos motivos, la estructura se debilita y puede colapsar a veces sin alcanzar la saturación. Muy poca carga externa se requiere para alcanzar el colapso final, en ocasiones, con solo el propio peso de la masa del suelo es suficiente.

Vale destacar que los depósitos de loess no colapsan cuando son permeados por fluidos no polares. Esto señala la importancia de las arcillas y las sales de hidratación en el comportamiento metaestable (Francisca et al., 2015; Giomi, 2019).

A su vez, las grandes diferencias en compacidad, humedad y presencia de cementantes en los loess, hacen que la variabilidad espacial de las propiedades físicas y mecánicas de los mismos sea elevada (Francisca et al., 2008).

Por lo dicho, la resistencia, la rigidez y el grado de colapso están condicionados por el contenido de humedad del loess, la relación de vacíos, la fábrica, el tipo de fluido saturante, la cantidad de sales solubles, la cantidad de agentes cementantes no solubles, la profundidad, y el nivel de cargas externas.

Reginatto y Ferrero (1973) definieron el coeficiente de colapsabilidad como:

$$C = \frac{P_{fs} - P_o}{P_{fn} - P_o} \quad (1)$$

Siendo:

P_o : Presión vertical debido al peso propio del terreno.

P_{fn} : Presión de fluencia o colapso del suelo con contenido de humedad natural.

P_{fs} : Presión de fluencia o colapso para suelo saturado.

En la expresión (1) P_{fn} y P_{fs} son determinados a través del método del doble edómetro.

La relación entre las presiones de colapso a baja humedad y en estado saturado (P_{fn} y P_{fs}), que son propiedades del suelo, y el estado de tensiones *in-situ* (P_o), conducen a la división de tres tipos de suelos:

- Si $C < 0$ el suelo se denomina *verdaderamente colapsable* o *autocolapsable*, es decir al humedecerse la estructura colapsa aún sin la acción de cargas externas.
- Si $0 < C < 1$ el suelo es *potencialmente colapsable*, es decir al humedecerse sufre grandes deformaciones solo si actúa una carga exterior superior a P_{fs} .
- Finalmente, si $C=1$ el suelo no sufre alteraciones al humedecerse (no es colapsable).

El presente trabajo describe un estudio orientado a cuantificar la variación con la profundidad de la susceptibilidad al colapso por humedecimiento de un loess de la llanura pampeana cordobesa, a los fines de poder relacionar y explicar el comportamiento mecánico medido con los procesos sufridos por el suelo a lo largo de su historia geológica la cual abarca los últimos 115 mil años (Frechen et al., 2009).

A tal fin, a partir de resultados de ensayos de doble edómetro, se compara la colapsabilidad por humedecimiento (datos

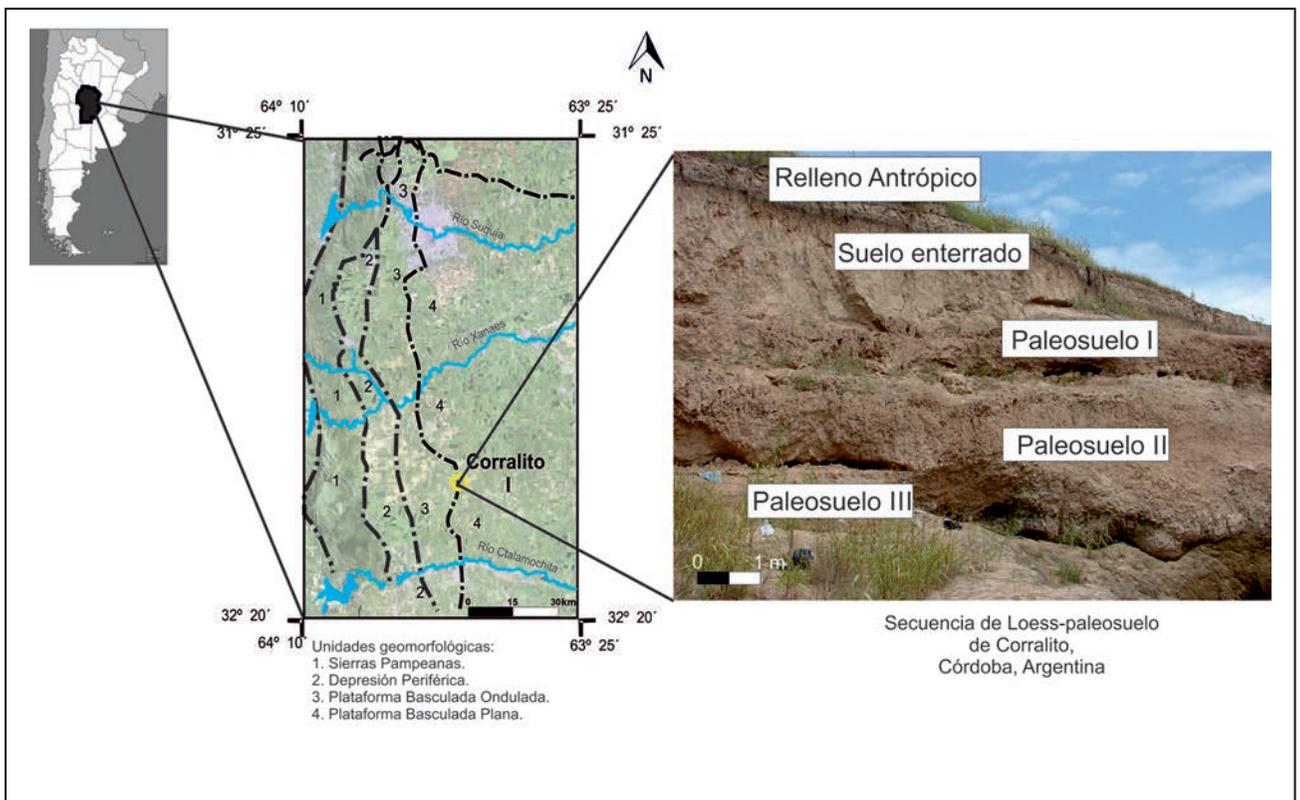


Figura 1. Ubicación geográfica del perfil de Corralito y el perfil litológico de la secuencia.

por los coeficientes de compresibilidad, coeficiente de colapsabilidad y presiones de fluencia a baja y elevada humedad) de mantos de loess con origen, granulometría y mineralogía similares, pero con diferentes historias geológicas, los cuales se ubican a diferentes profundidades en un perfil de 14 m ubicado en la localidad de Corralito (Provincia de Córdoba) tomado para estudio. La cárcava ubicada en Corralito seleccionada para la realización del presente trabajo, se caracteriza por presentar un perfil estratigráfico en el que cohabitan mantos de loess que han pasado por diferentes procesos.

ÁREA DE ESTUDIO

El perfil de Corralito adoptado para estudio, constituye una secuencia de loess- paleosuelo que se encuentra aflorando en una cárcava ubicada en el departamento Tercero Arriba de la provincia de Córdoba, 3 km al norte de la localidad homónima (Figura 1).

Geomorfológicamente, se encuentra ubicado en la Llanura Pampeana. En ella, se distinguen dos asociaciones, la Depresión Periférica y la Plataforma Basculada (*Capitanelli, 1979*). En esta última, se distinguen dos sub-asociaciones: la Plataforma Basculada Ondulada y la Plataforma Basculada Plana. El perfil bajo estudio, se encuentra en la Plataforma Basculada Ondulada la cual está conformada por lomas orientadas E-O, cuya morfología es regular, alargada y convexa, con un gradiente inferior al 1%. Las lomas poseen alturas que rondan los 10 m. Es común que presenten erosión en surcos, tanto rectilíneos como meandriiformes, y en casos extremos, cárcavas (*Sanabria y Argüello, 2003*).

La secuencia de loess-paleosuelo es de edad Pleistoceno tardío-Holoceno (*Frechen et al., 2009; Rouzaut y Orgeira, 2017*) y está constituido por loess típico y retransportado, con abundante CaCO_3 en la masa. Su textura es franca a franco-limosa (*Argüello et al., 2012; Rouzaut et al., 2015*) y mineralógicamente está conformado por cuarzo, feldespato, hornblenda, trazas de vidrio volcánico, illita, esmectita, e illita y esmectita interestratificada (*Rouzaut y Orgeira, 2017*).

Rouzaut y Orgeira (2017) definieron cinco unidades litológicas para el perfil de Corralito (Figura 2) cuyas características son similares en cuanto a granulometría y mineralogía. Cada una de estas unidades litológicas fue definida como un paleosuelo con su respectivo material parental (loess), por lo cual el perfil de Corralito está conformado (de base a techo), por tres paleosuelos con sus materiales parentales (loess), un suelo enterrado, y un relleno antrópico (Figura 1 y 2).

Los paleosuelos, son suelos que se formaron en paisaje del pasado, bajo condiciones climáticas diferentes a las actuales y conservan constituyentes y morfología ligadas a esas condiciones (*Porta et al., 2019*). La alternancia de una secuencia de loess-paleosuelos representa una variabilidad climática a lo largo de la historia geológica e indicaría una estabilización del paisaje y una mayor tasa de pedogénesis que de sedimentación (*Frechen et al., 2009*). El suelo enterrado, es un suelo que ha sido recubierto por sedimentos modernos (donde se pueden observar residuos tales como latas, restos de ladrillos, entre otros) de 50 cm de espesor (*Frechen et al., 2009*).

Los suelos y paleosuelos son resultado de la acción de factores formadores y de procesos pedogenéticos que dejan su impronta en él. Con lo cual, el estudio de esta secuencia de loess- paleosuelo es importante desde el punto de vista de la geología del Cuaternario, pues permite dilucidar cómo fue el clima en el pasado y por lo tanto inferir escenarios futuros

Los procesos pedogenéticos que le dieron origen, a los paleosuelos, son similares a lo largo de todo el perfil, lo cual evidencia cambios climáticos sutiles en la región durante los últimos 115 mil años (*Rouzaut y Orgeira, 2017, Campodonico et al., 2019, Rouzaut et al., 2021*) De acuerdo a los análisis geoquímicos realizados por *Campodonico et al. (2019)* y *Rouzaut et al., (2021)* no hay cambios significativos entre la composición y los índices de meteorización de los paleosuelos y los mantos de loess, indicando condiciones ligeramente más húmedas durante la formación de los paleosuelos.

En el perfil estudiado los procesos pedogenéticos que se infieren en el suelo enterrado y los tres paleosuelos son, a saber, según su orden de aparición: descarbonatación-carbonatación; melanización; eluviación-iluviación de arcillas y materia orgánica (*Rouzaut et al., 2015*).

La descarbonatación-carbonatación implica la solubilización de los carbonatos en las estaciones húmedas, para lo que se requiere su transformación en bicarbonatos (descarbonatación) y posterior precipitación (carbonatación). Ello se produce gracias al CO_2 y los ácidos orgánicos producidos por la actividad biológica por lo que su intensidad es máxima en los horizontes superficiales. El carbonato de calcio es removido de los horizontes superiores de suelo y precipita en los inferiores.

La eluviación- iluviación de arcillas y materia orgánica, es el movimiento vertical de estos materiales, en estado disperso en el perfil, movilizados por el agua de lluvia, y su posterior concentración iluvial de arcilla silicatada, hierro, aluminio, humus en los horizontes subsuperficiales (*Imbellone, et al., 2010*).

La melanización (del griego *mélas*-negro) son modificaciones de tipo químico y bioquímico del material del suelo que conducen al oscurecimiento por incorporación de compuestos orgánicos, provenientes de restos vegetales y en menor medida de restos animales (*Imbellone et al., 2010*).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron un total de tres campañas para muestrear el perfil de Corralito. Se recorrió el terreno para seleccionar los puntos estratégicos para la toma de muestras. Una vez distinguidos los sitios de muestreo, se limpió el perfil de todo material meteorizado (aproximadamente 30 cm del frente expuesto) y se tomaron ejemplares en función de las características sedimentológicas, de manera de tener representada la Fm. Pampeana (*Gaido et al., 2003*) y los depósitos *cordobenses* (*Frenguelli 1965*) (Figura 2). Se tomaron cinco muestras del horizonte antrópico, tres del horizonte orgánico, cinco a los 2 metros de profundidad del loess superior, que correspondería al *cordobense* según Montes (1955), y veinte ejemplares de la Fm. Pampeana, siete del Loess Inferior I, seis del Loess Inferior II y siete del Loess Inferior III, a profundidades de 4; 8 y 14 metros respectivamente (Figura 3).

Las muestras consistían en panes de suelo inalterado, de forma aproximadamente cúbica y en el orden de 30 cm de lado, que fueron obtenidos con pico y pala de manera artesanal y luego envueltos en film ajustado, y acondicionados de manera de mantener inalterada la estructura y humedad del sedimento hasta llegar al laboratorio.

De cada pan de suelo (33 en total) se tallaron dos probetas cilíndricas idénticas de 63,5 mm de diámetro y 32 mm de altura para ser sometidas a ensayos de compresión confinada en edómetro, una probeta en condición de humedad natural y la otra en condición saturado con agua de la canilla (método del

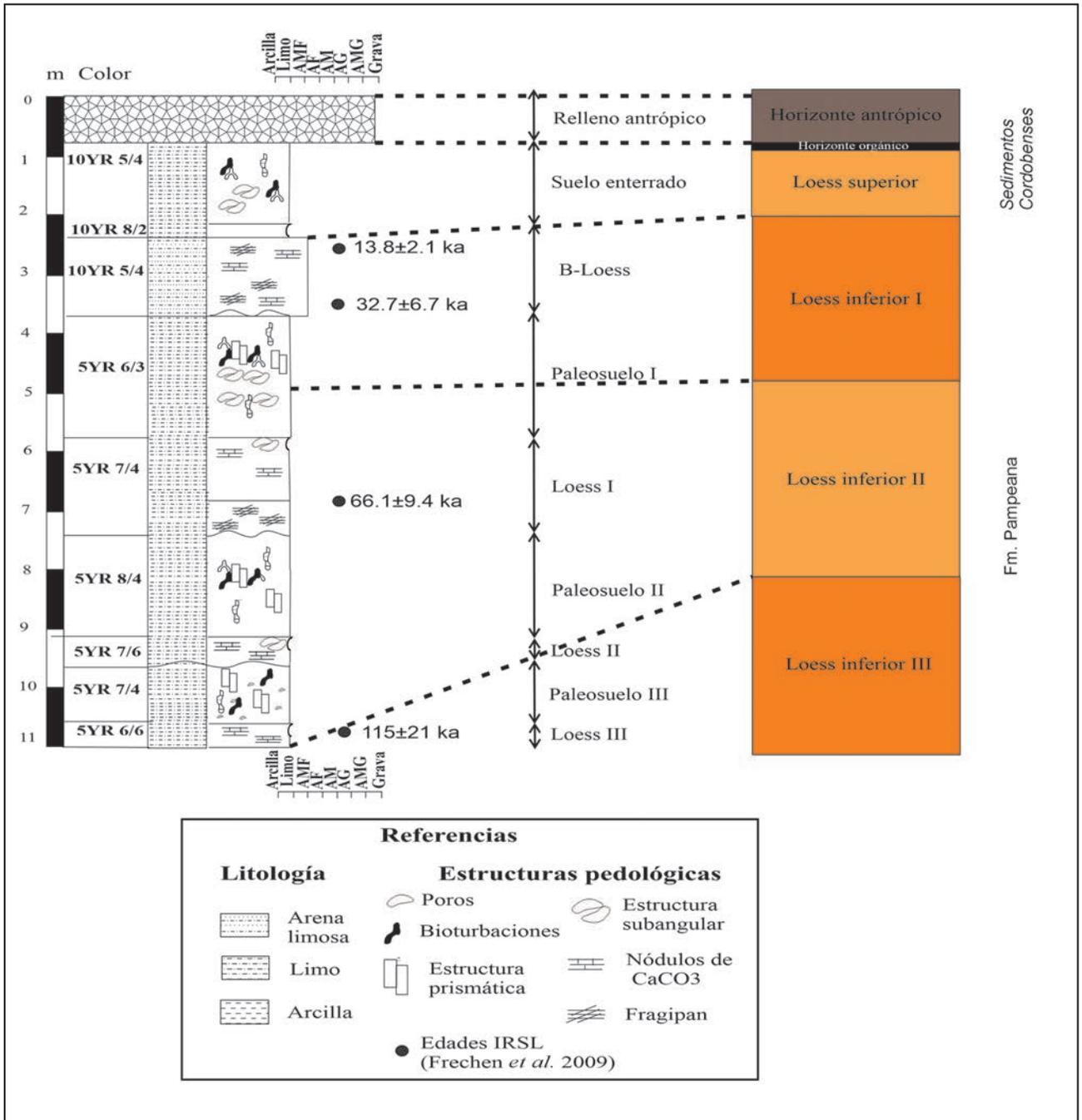


Figura 2. Correlación entre el perfil litológico (modificado de Rouzaut y Orgeira, 2017 y Rouzaut et al., 2021) a la izquierda y el perfil mecánico a la derecha.

doble edómetro). Los ensayos edométricos consistieron en la aplicación de seis saltos de carga y uno de descarga mediante el método de presiones controladas, alcanzando una presión vertical máxima del orden de 8 kg/cm². Cada salto de carga se mantuvo estable durante un tiempo de aproximadamente 30 minutos, el cual resultó suficiente para que las deformaciones se estabilizaran y se pudiera proceder al siguiente salto de carga.

De cada ensayo edométrico se determinaron los siguientes parámetros del suelo, tanto en condición de humedad natural como saturada:

- Índice de compresibilidad en el tramo virgen (C_c).
- Presión de fluencia (P_{fn} y P_{fs}).

- Coeficiente de colapsabilidad (C definido en la Ecuación 1)

Asimismo, durante el tallado de las probetas se determinó el peso unitario seco (γ_d) y contenido de humedad ($\omega\%$) de las mismas.

A modo ilustrativo, en la Figura 4 se presentan curvas de compresibilidad típicas obtenidas en un ensayo de doble edómetro. En la misma se indican el Índice de compresibilidad y la presión de fluencia o colapso.

Finalmente, todas las muestras fueron clasificadas como dentro del Sistema Unificado de Clasificación de suelos y se determinó en 5 de ellas el porcentaje de carbonato de calcio mediante el método de Bernard (calcimetría).



Figura 3. Perfil de Corralito. a) Vista panorámica de la cárcava. b) Horizontes antrópico, orgánico y loess superior (primeros 2 m). c) De base a techo: Loess Inferior II; Loess Inferior I; Loess Superior, Hz. Orgánico; Hz. Antrópico. d) Loess Inferior III (por debajo de los 11 m de profundidad).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados Experimentales

Los contenidos en peso de carbonato de calcio medidos en los diferentes estratos se ilustran en la Tabla 1 junto con los índices de plasticidad, porcentajes pasantes por el tamiz IRAM N° 200 (0,075 mm) y Clasificación dentro del Sistema Unificado de las mismas. Más detalles sobre estos horizontes pueden encontrarse en Rouzaut (2015). Se puede observar un ligero incremento en el porcentaje de carbonato de calcio con el aumento de la profundidad de la muestra, sin embargo, su clasificación no varía a lo largo del perfil y todas las muestras se clasifican como ML.

Por otro lado, los resultados obtenidos en los ensayos de doble edómetro permitieron caracterizar los coeficientes de compresibilidad, presión de fluencia, peso unitario seco, contenido de humedad y susceptibilidad al colapso de los diferentes horizontes del perfil seleccionado tanto para un estado de baja humedad (humedad natural) como de saturación.

A modo de ejemplo en la Figura 5 se presentan los valores de los índices de compresibilidad en el tramo virgen (C_c), coeficiente de colapsabilidad (C), y presiones de fluencia tanto para un estado de humedad natural (P_{fn}) como saturada (P_{fs}) del horizonte denominado "loess superior". También se ilustran los valores de los pesos unitarios secos (γ_d) y contenidos de hu-

medad natural ($\omega\%$) de las muestras de este manto. Este estrato se extiende desde la base del horizonte orgánico, a aproximadamente 1 m de profundidad, hasta cerca de 2,8 m. Presenta un color naranja mate (7.5 YR 7/4) y se trata de un material que aún conserva su estructura original generada al depositarse, por lo tanto, puede clasificarse como un loess primario.

En la Figura 5a se aprecia que para el loess superior los coeficientes de compresibilidad (C_c) obtenidos en las muestras ensayadas en condición de baja humedad (humedad natural) resultan considerablemente menores a aquellos obtenidos en condición saturada, poniendo de manifiesto el elevado potencial de colapso por humedecimiento de este suelo. El mismo comportamiento se evidencia al observar la Figura 5b, en la que la presión de fluencia obtenida en condición de humedad natural (P_{fn}) es notablemente mayor a la medida en condición saturada (P_{fs}).

Los valores del coeficiente de colapsabilidad (Figura 5c) resultan mayores a cero y menores a 1 ($0 < C < 1$) por lo que este manto puede clasificarse como potencialmente colapsable, es decir que al humedecerse se produce el colapso de la estructura interna, solamente si actúa una sobrecarga exterior, ya que la presión geoestática (peso propio) no resulta suficiente para disparar el fenómeno de colapso. Finalmente, en las Figuras 5d y 5e se aprecian los bajos valores de peso unitario seco (γ_d) y humedad natural ($\omega\%$), consecuencia de una estructura suelta y macroporosa y tendiente al colapso.

Tabla 1. Porcentaje de carbonato de calcio y las propiedades mecánicas de los diferentes estratos que componen el perfil de Corralito.

Horizontes	Porcentaje de carbonato de Calcio	I.P.*	%PT#200*	S.U.C.S.*
Antrópico	--	1,5	94	ML
Orgánico	0,08	2,5	95	ML
Loess Superior	0,2	2,0	93	ML
Loess Inferior I	2,8	NP	95	ML
Loess inferior II	3,18	1,0	92	ML
Loess inferior III	5,57	NP	90	ML

*S.U.C.S.: sistema unificado de clasificación de suelos; %PT#200: porcentaje pasante del Tamiz IRAM N° 200 (0.075 Mm); I.P.: índice de plasticidad

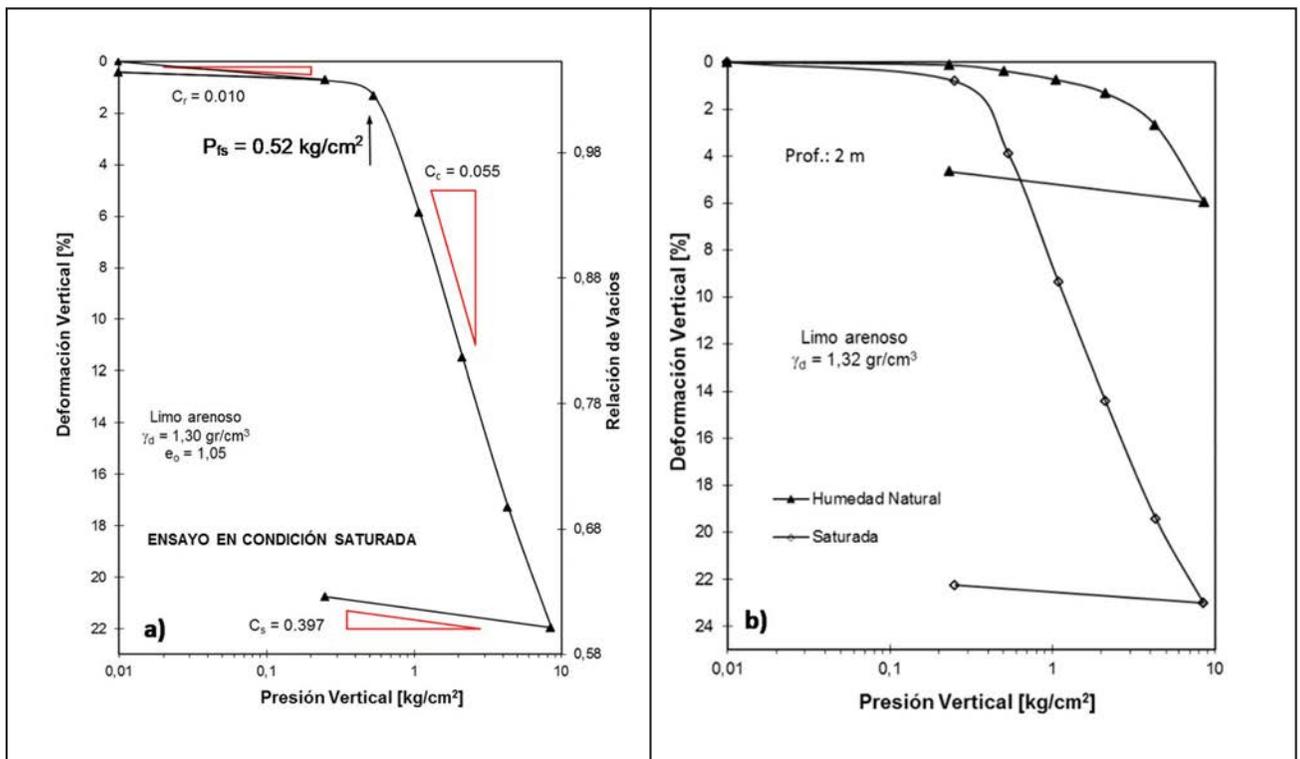


Figura 4. a) curva de compresibilidad obtenida en estado saturado para una muestra del horizonte de loess superior, se aprecian los índices de compresibilidad en los tramos de recarga (Cr), virgen (Cc) y descarga (Cs) y la presión de fluencia o colapso (P_{fs}). b) curvas de compresibilidad en estado de humedad natural y saturado evidenciando un comportamiento colapsable.

Comportamiento mecánico a lo largo de todo el perfil

Finalmente, del análisis de los datos obtenidos en los ensayos edométricos a lo largo de todo el perfil a modo de resumen se presentan en la Figura 6 la variación del coeficiente de compresibilidad (Cc) y del coeficiente de colapsabilidad (C) a lo largo de todo el perfil.

Puede notarse que el loess superior es el estrato que mayor susceptibilidad al colapso presenta en el perfil. El coeficiente de compresibilidad promedio en el tramo virgen (Cc) medido en condición de humedad natural es notablemente menor al medido en condición saturada. Igualmente, el coeficiente de colapsabilidad promedio para este manto resulta próximo a cero evidenciando un elevado potencial de colapso por humedecimiento.

Como puede apreciarse en la Figura 6, este comportamiento varía sustancialmente a lo largo del perfil. En el horizonte de Loess Inferior II, se sigue apreciando un comportamiento colapsable, aunque en mucho menor grado que el del loess superior. Sin embargo, los Loess Inferiores I y III, resultan mucho más rígidos y prácticamente sin susceptibilidad al colapso, fundamentalmente en el Loess Inferior III en donde se observa que los índices de compresibilidad (Cc) en estado natural y saturado resultan prácticamente iguales entre sí. De igual manera, el coeficiente de colapsabilidad (C) de este manto más profundo resulta igual a la unidad, lo que pone en evidencia que, si bien se trata de un loess con mineralogía y granulometría muy similar a la de los horizontes superiores, su comportamiento mecánico es notablemente diferente, sin mostrar susceptibilidad al colapso por humedecimiento.

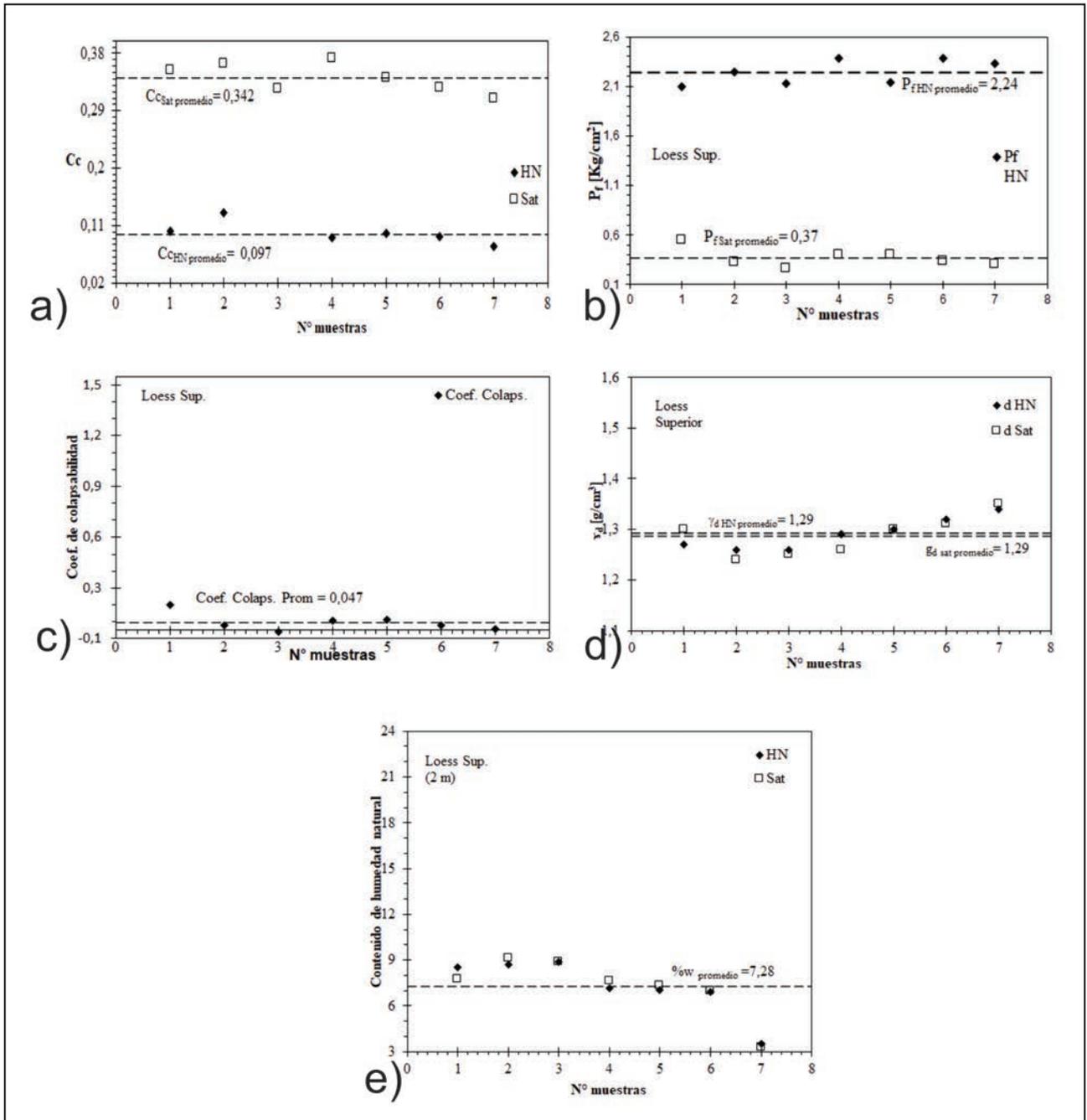


Figura 5. Resumen de resultados de ensayos de doble edómetro obtenidos en muestras del horizonte de loess superior. a) Coeficientes de compresibilidad en condición de humedad natural (C_c HN) y saturada (C_c Sat); b) Presiones de fluencia (P_{fn} y P_{fs}); c) Coeficientes de Colapsabilidad; d) Pesos unitarios secos (γ_d); e) Contenidos de humedad natural.

Relación entre los parámetros mecánicos y la historia geológica

En la Figura 2 se presenta la correlación entre el perfil litológico (*modificado de Rouzaud y Orgeira, 2017 Rouzaud et al., 2021*) y el perfil mecánico de Corralito. Del análisis de los resultados de los ensayos mecánicos (edómetros) y químicos (contenido de carbonatos) sobre los diferentes horizontes del perfil y su comparación con su historia geológica se puede plantear la siguiente discusión.

Horizonte Antrópico

De acuerdo a la Figura 2 este horizonte se correlaciona con su homónimo en el perfil estratigráfico. Según su comportamiento mecánico se lo clasifica como un horizonte potencialmente colapsable. En este horizonte la estructura interna se encuentra modificada y alterada por la acción del hombre. En ella se han encontrado restos de ladrillos, vidrio, latas (*Frechen et al., 2009*). Por otro lado, constituye el suelo que se encuentra actualmente cultivado, lo cual permite que el suelo a través de la vegetación incorpora materia orgánica (proceso de melanización) que al descomponerse deja espacios vacíos que favorecen el colapso.

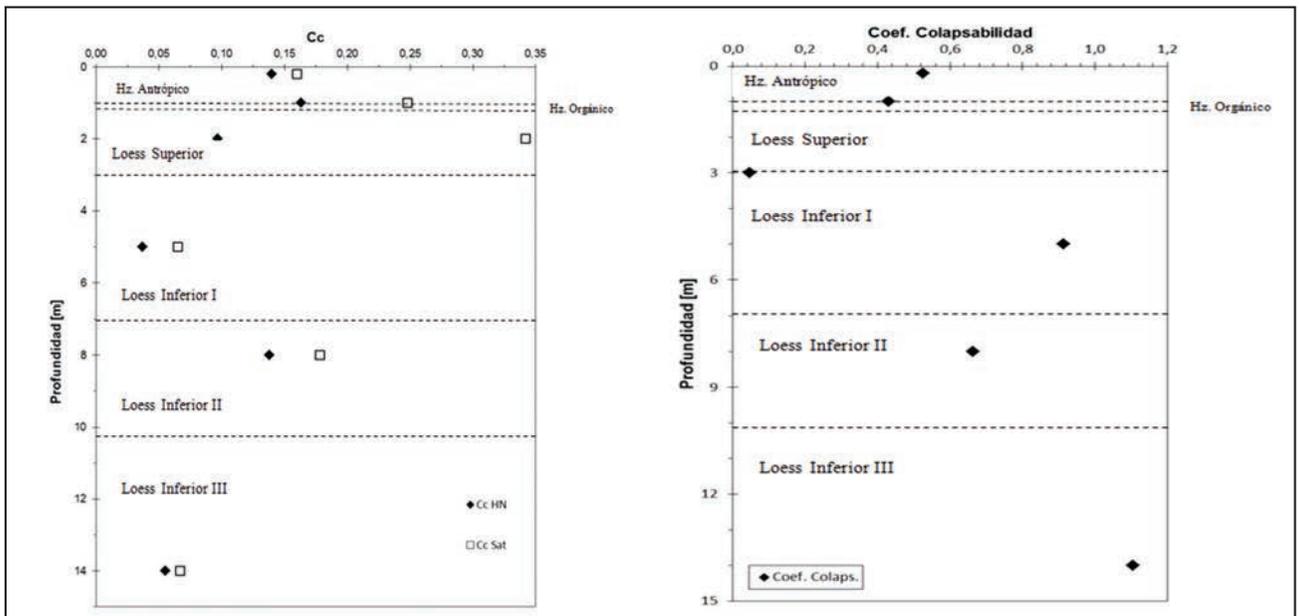


Figura 6. Variación con la profundidad de: a) los coeficientes de compresibilidad en el tramo virgen promedio y b) coeficientes de colapsabilidad promedio, para las muestras ensayadas a lo largo del perfil de Corralito en condición de humedad natural y saturada.

Horizonte Orgánico

Desde el punto de vista mecánico se observó que el horizonte orgánico resulta potencialmente colapsable. Se trata de un manto rico en materia orgánica (1,7%) (Rouzaut et al., 2015) que quedó enterrado por el material antrópico. Nuevamente la presencia de materia orgánica, aportada por procesos de melanización, juega un papel fundamental en la compresibilidad, ya que al descomponerse genera espacios vacíos favoreciendo el colapso.

Loess Superior

El Loess Superior del perfil mecánico se correlaciona con el loess que constituye el material parental del suelo enterrado del perfil estratigráfico. El suelo enterrado, el loess, y el relleno antrópico representan los sedimentos *cordobenses* (Frenguelli 1965) (Figuras 2 y 3). Observando los coeficientes de compresibilidad y de colapsabilidad de la Figura 6, se concluye que desde el punto de vista mecánico esta capa se comporta como un material potencialmente colapsable.

De acuerdo a los análisis granulométricos realizados por Argüello et al. (2012), este material constituye un loess típico lo que significa que es un material que fue depositado por el viento, sin ningún tipo de retransporte. De acuerdo a Rocca et al. (2006) son los denominados loess primarios, con alta probabilidad de colapso.

Loess Inferior I

El Loess Inferior I del perfil mecánico se correlaciona con el Paleosuelo I y su material parental del perfil estratigráfico y representa, en parte, a la Fm. Pampeana (Gaido et al., 2003) (Figuras 2 y 3). El comportamiento mecánico de este horizonte en los ensayos de compresión confinada nos muestra que se trata de una capa relativamente rígida cuyas deformaciones no superan el 10 % para presiones elevadas (del orden de los 8 kg/cm²) incluso en estado de humedad elevada. En la Figura 6

los coeficientes de compresibilidad (Cc) en estado de baja y elevada humedad resultan bajos y similares, y el coeficiente de colapsabilidad (C) es próximo a uno. Por lo tanto, se lo clasifica como un material de bajo a nulo potencial de colapso.

Desde el punto de vista geológico, los procesos pedogenéticos que actuaron en el desarrollo del mencionado paleosuelo son descarbonatación-carbonatación, argiluviación y cementación. El comportamiento mecánico de esta capa, responde a las características geológicas de los fragipanes (panes de arcilla), y corresponde a horizontes iluviales, ricos en arcillas silicatadas posteriormente cementados con óxidos de hierro (USDA Soil Survey Staff - Claves para la Taxonomía de Suelos, 2014).

La palabra "fragipán" que proviene de "*fragilis*" (quebradizo), hace referencia a panes endurecidos con arcilla con baja conductividad hidráulica y cuyas propiedades físicas y químicas difieren de los horizontes que se encuentran inmediatamente por encima. Para su formación deben cumplir ciertas características del material originario (loess), como ser texturas francas (20 - 50% de arena, 30 - 70% de limo y 7 - 30% de arcilla), bajo contenido de materia orgánica (menor al 1 %), y presencia de agentes ligantes (puentes de arcilla y carbonato de calcio). La profundidad debe ser tal como para que la presión de tapada pueda generar una compresión apreciable (mayor a 1 m) pero a la vez permitir que llegue una cantidad suficiente de agua (Imbellone et al., 2010; Smalley y Marković, 2014). Los horizontes genéticos en los cuales encontramos los fragipanes son los horizontes subsuperficiales iluviales enriquecidos por arcilla traslocada, por lo cual el proceso pedológico inicial es la argiluviación.

En nuestro caso, el fragipán formado en el Loess inferior I, cumple con los requisitos mencionados arriba: la media granulométrica es limo medio (70%), arcilla (10%) y arena (20%) (Rouzaut y Orgeira, 2017), y para su origen se acepta la hipótesis del colapso de sedimentos por su propio peso, también denominada hidroconsolidación. Como ya se ha mencionado, los sedimentos

más colapsables son los sedimentos eólicos los cuales tienen características comunes con el material de los fragipanes, por lo tanto, podría asignárseles ese origen.

En nuestro caso, la condición inicial del sedimento referida a la posibilidad del autocolapso sería adecuada al igual que el humedecimiento, ya sea por cambio climático, evolución topográfica, o combinación de factores. El colapso sería un proceso post-depositacional al que continuarán procesos pedogenéticos que forman los puentes arcillosos.

Loess Inferior II

El Loess Inferior II, constituye el material parental sobre el que se desarrolla el paleosuelo II que también pertenecería a la Fm. Pampeana, resulta más comprensible que el horizonte similar en granulometría, génesis y mineralogía inmediatamente superior (Loess Inferior I) y a su vez es susceptible al colapso por humedecimiento (ver Cc y C en Figura 6).

Este comportamiento se estima es consecuencia de que el fragipán que se encuentra por encima funciona como acuitardo, es decir como una barrera de menor permeabilidad que impide que el agua de lluvia percole. Al haber sufrido humedecimiento controlado a lo largo de su historia, se trata de un suelo que ha desarrollado escaso colapso en su estructura interna. No solo la compresibilidad e inestabilidad frente al humedecimiento de este manto son mayores a las del fragipán superior, sino que su relación de vacíos también es mayor.

Loess Inferior III

Este estrato, corresponde al material parental sobre el cual se desarrolló el paleosuelo III, mostró un comportamiento rígido (valores pequeños y similares para alta y baja humedad de Cc en la Figura 6) y estable frente al humedecimiento o no colapsable (C próximo a uno en la Figura 6).

La rigidez y potencial de colapso nulo se atribuyen a los siguientes motivos:

- Estructura compacta por el peso de la columna sedimentaria lo cual se evidenció en los valores de peso unitario medidos en las probetas sometidas a compresión confinada.
- No se infirieron paleosuelos por lo que se supone que los procesos pedogenéticos que actuaron fueron la des-carbonatación-carbonatación.
- Se midieron porcentajes de carbonato de calcio superiores al 5 % en su masa (ver Tabla 1), por lo cual, si bien este valor es insuficiente para clasificarlo desde el punto de vista geológico como "calcrete" (se necesita 15% o más), se trata de un suelo calcáreo que puede ser identificado como una "tosca".

El origen del carbonato de calcio en el loess puede ser primario y provenir de la meteorización de la calcita, dolomita y/o de los feldespatos potásicos, todos minerales presentes en el sedimento eólico, o bien secundario, producto del movimiento vertical y/o horizontal del carbonato de calcio en horizontes próximos como consecuencia de la fluctuación de la freática.

En cuanto a la génesis de la tosca, hay dos hipótesis. Una hipótesis pedológica, que sostiene que la acumulación de CaCO_3 es producto de la redistribución del mencionado elemento en el perfil del suelo como resultado de los procesos de des-carbonatación-carbonatación (Schiavo et al., 2015). Y, por otro lado, una hipótesis sedimentaria, que sostiene que el enriquecimiento en esta sal es resultado de la fluctuación de las aguas vadasas o

freáticas saturadas en carbonato de calcio. En ambos casos, estas acumulaciones son características de zonas con déficit de humedad estacional.

En el perfil estudiado, se supone que la "tosca" tiene un origen pedogenético (Schiavo et al., 2015), ya que de acuerdo a estudios previos (Rouzaut y Orgeira 2017, Campodónico et al., 2020) no hay evidencia de presencia del nivel freático en el perfil durante los últimos 115 mil años (Frechen et al., 2009). En cuanto al origen del carbonato de calcio, se infiere que es primario, de acuerdo a las investigaciones realizadas por Zárate (2003) y Gili et al. (2017) con algunos aportes locales provenientes de las Sierras Pampeanas (Argüello et al., 2012), el loess proviene de rocas volcánicas ricas en calcita y dolomita. Por otro lado, se cree que posee aportes secundarios provenientes de los afloramientos de calizas de San Agustín al Oeste como resultado del movimiento lateral de aguas subsuperficiales. Por el momento, y de acuerdo a las observaciones realizadas en campo, se asume que el origen del carbonato de calcio es una combinación de material heredado (primario) y secundario (proveniente de los afloramientos). Sin embargo, para poder dilucidar con mayor certeza el origen del CaCO_3 deberían realizarse análisis micro-morfológicos y químicos para determinar su proveniencia.

Discusión

De acuerdo a los resultados expuestos, queda demostrada la estrecha relación que existe entre la historia geológica del depósito y su comportamiento mecánico. Si bien en todo el afloramiento estudiado el origen, granulometría y mineralogía de los suelos es similar, la historia geológica ha variado con la profundidad, lo cual es claramente evidenciado en el comportamiento mecánico y estabilidad frente al humedecimiento.

Los estudios realizados por Rouzaut et al. (2012), Rouzaut y Orgeira (2017), Campodónico et al. (2019) y Rouzaut et al., (2021) demuestran que hubo cambios climáticos sutiles, durante los últimos 115 mil años, no obstante, hubo contraste estacional (una estación húmeda y una estación seca marcada), lo cual permitió la traslocación de arcillas a lo largo del perfil con la presencia de horizontes subsuperficiales ricos en arcillas, distribuidos en toda la profundidad. Por otro lado, para el desarrollo de un suelo, se asume que el paisaje fue geomorfológicamente estable. Teniendo en cuenta estas premisas, puede reconstruirse la siguiente evolución geológica del perfil (de base a techo).

En primer lugar, se deposita el Loess inferior III, loess pulverulento, al cual se suceden períodos estacionales de humedad y sequía que permiten que por evaporación se formen las toscas. Esta formación se supone que también fue enriquecida en CaCO_3 por el aporte de aguas abundantes en esta sal provenientes de los afloramientos de calizas ubicadas al oeste. Este material constituiría el material parental sobre el cual se desarrollaría el paleosuelo III.

A continuación, se deposita el Loess inferior II, que se corresponde con el loess II, material parental sobre el cual sigue un período de biostasia o pedogénesis que permitió el desarrollo del paleosuelo II.

Finalmente, y siguiendo el mismo razonamiento, se deposita el Loess inferior I, que se correlaciona con el loess I sobre el cual se desarrolla el paleosuelo I y por encima de este el Loess Superior. Este ciclo de biostasia y rexiostasia se repite hasta llegar al relleno antrópico, el cual por poseer gran cantidad de materia orgánica (debido a que es el actual piso de arado) se comporta como un

suelo altamente colapsable, cuyo uso es despreciable desde el punto de vista ingenieril.

El comportamiento mecánico del perfil y la formación del fragipán en el Loess inferior I responde a un proceso pos-depositacional. Producto del peso de la columna sedimentaria, más las características texturales del loess anteriormente mencionada, sumado a lluvias estivales se produjo el colapso del horizonte iluvial del paleosuelo I y se formó el fragipán (Loess Inferior I). Este fragipán es el que luego funciona como acuitardo y evita que el Loess Superior II se humedezca y colapse, por este motivo cuenta con una alta relación de vacíos.

CONSIDERACIONES FINALES

Se desarrolló un estudio experimental sobre la compresibilidad y susceptibilidad al colapso por humedecimiento de un afloramiento de 14 m de profundidad ubicado en la localidad de Corralito (Provincia de Córdoba) compuesto por limos arenos arcillosos de tipo loésico. Del estudio realizado, se pueden remarcar las siguientes conclusiones.

Si bien los depósitos de loess presentes a lo largo de toda la secuencia estudiada presentan un origen, granulometría y mineralogía similares, su comportamiento mecánico resulta disperso, lo cual se vincula estrechamente a la historia geológica sufrida por los horizontes ubicados a diferentes profundidades.

A medida que los depósitos son más antiguos, fueron afectados por numerosos factores y procesos sobre todo cementaciones evidenciados por la mayor concentración de carbonatos de calcio o la sobreconsolidación por desecación lo cual, disminuye la susceptibilidad al colapso.

El horizonte antrópico, horizonte orgánico y loess superior (primeros tres metros del perfil) fueron clasificados como materiales potencialmente colapsables. El horizonte antrópico y el horizonte orgánico son ricos en materia orgánica, la cual al descomponerse deja espacios vacíos que benefician el colapso.

El loess superior, es un loess típico o primario y pertenece a los sedimentos *cordobenses*. Al tratarse de un sedimento eólico,

las características de su depósito generan una estructura porosa y suelta, lo cual favorece el colapso.

El loess inferior I no registra cambios importantes en su estructura interna ante un aumento en el contenido de humedad o un cambio en el estado tensional, es decir que desde el punto de vista mecánico se trata de un loess no colapsable. Esto se supone que se debe al grado de cementación con óxidos de Fe de sus partículas, ya que este horizonte, se corresponde con un fragipán, es decir un antiguo horizonte iluvial que colapsó.

El loess inferior III ubicado entre los 9-12 m de profundidad, pertenecería a la Fm. Pampeana y posee un mayor grado de compactación a causa de la sobreconsolidación que lo afectó a lo largo de su historia geológica. Este material tampoco registra cambios en su estructura si se modifican los factores extrínsecos como el contenido de humedad. Desde el punto de vista geológico este material se trataría de una tosca, debido a la cementación ya sea por redistribución o flujo de aguas ricas en CaCO_3 , y también a la sobreconsolidación producto del peso de la columna sedimentaria. Desde el punto de vista mecánico es un material no colapsable y de baja compresibilidad.

Sin embargo, entre los dos horizontes mencionados, a los 8 m de profundidad, se presenta el loess inferior II con un comportamiento mecánico diferente. En este manto se registran deformaciones un tanto mayores en su estructura con respecto a los horizontes sub y suprayacentes. El material fue clasificado como "potencialmente colapsable". Este comportamiento se explica porque el fragipán que se encuentra por encima funcionó como acuitardo impidiendo el humedecimiento del loess subyacente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT) de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo económico brindado a través del subsidio al proyecto Consolidar (33620180100574CB) y al Laboratorio de Geotecnia por el espacio y equipamiento. Por otro lado, se agradece a los evaluadores cuyas observaciones y comentarios mejoraron la calidad del presente trabajo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ARGÜELLO, G. L.; DOHRMANN, R. Y MANSILLA, L. (2012).
Capítulo I Loess of Córdoba (Argentine) Central Plain, present state of knowledge and new results of research, New York
En Rossi y Miranda (eds.) Educational, Geographical and Cultural Issues, 1-49.
- CAMPODÓNICO, V.; ROUZAUT, S.; PASQUINI, A. (2019).
Geochemistry of a Late Quaternary loess- paleosol sequence in central Argentina: Implications for weathering, sedimentary recycling and provenance.
Geoderma, 351, pp. 235-249. Elsevier. ISSN: 0016-7061.
- CANTÚ, M. P. Y BLARASÍN, M.T., 1987.
Geología del Pleistoceno Superior-Holoceno del Arroyo Las Lajas - km 630, Dpto. Río Cuarto, Prov. de Córdoba.
X Congreso Geológico Argentino, Actas 1:337-340, San Miguel de Tucumán.
- CAPITANELLI, R. (1979).
Geomorfología. Geografía Física de la Provincia de Córdoba, Buenos Aires Editorial Boldt:
En Vázquez, J., Miatello, R. y Roqué, M. (eds.), 1979, pp. 213-294.
- CLARÍA, J. J. (2003).
"Caracterización y Comportamiento del Módulo de Elasticidad Dinámico del Loess en Estado Natural y Compactado".
Tesis Doctoral presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

- FRANCISCA, F. M.; ROCCA, R. J.; DAHBAR, P. Y VERRA, M. (2008).
Variabilidad de las propiedades geotécnicas de los limos loésicos de Córdoba.
XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG 2008), San Juan, Argentina.
- FRANCISCA, F. M.; MONTORO, M. A.; REDOLFI, E. R.; PESCA PINTO, G. Y CAPDEVILA, L. A. (2015).
"Behavior of collapsible loess saturated with NAPL in confined compression test".
Proceedings of the XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, Argentina.
- FRECHEN, M.; SEIFERT, B.; SANABRIA, J. A. Y ARGÜELLO, G. L. (2009).
Chronology of Late Pleistocene Pampa loess from the Córdoba area in Argentina.
Journal of Quaternary Science review, 24: pp. 761-772.
- FRENGUELLI, J. (1965). GAEA 2, 117 (1957); J. POLANSKI, GEOL. SOC. ANMER. SPEC. PAP, 84, 453.
- GAIDO, M. F., M. SAPP, R.C. MIRÓ, G. SACCHI, 2010.
Proyecto: Circuitos de interpretación geológica en áreas protegidas de la Municipalidad de Córdoba. Sitio de Interés Geológico Reserva Natural Urbana Gral. San Martín.
Informe, Cartelería y Folleto. SEGEMAR - Municipalidad de Córdoba. Argentina.
- GILL, S.; GAIERO, D. M.; GOLDSTEIN, S. L.; CHEMALE, F.; JWEDA, J.; KAPLAN, M. R.; BECCHIO, R. A. Y KOESTER, E. (2017).
Cambios glaciales / interglaciales de la circulación del viento del hemisferio sur desde la geoquímica del polvo sudamericano,
la Tierra y Planetary Science Letters, doi: 10.1016 / j.epsl.2017.04.007.
- GIOMI I. (2019).
Comportamiento Edométrico de los Loess de Córdoba Inundados con Agua e Hidrocarburo.
Tesis de Maestría presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- IMBELLONE, P.; GIMÉNEZ, J. Y PANIGATTI, J. (2010).
Suelos de la región Pampeana: Procesos de formación.
INTA (ed.), Buenos Aires, 320 p..
- MONTES, A. (1955).
El Holoceno en relación con nuestra Prehistoria.
Comunicaciones del Museo de Mineralogía y Geología, FCEfyN, UNC, 25, pp. 1 - 28.
- PIOVANO, E., MANZUR, A., PASQUINI, A. 1992.
Análisis paleoambiental de las formaciones aflorantes al oeste de la Ciudad de Córdoba (Cretácico y Cuaternario).
IV Reunión Argentina de Sedimentología, Actas III:105-111. La Plata.
- PORTA, J.; POCH, R. M. Y LÓPEZ-ACEVEDO, M. (2019).
Edafología: uso y protección de suelos.
Mundi-Prensa Libros.
- Pye K, Sherwin W (1999)
Loess.
In: Goudie A, Livingstone I, Stokes S (eds) Aeolian environments sediments and landforms. Wiley, Chichester, pp 213-240.
- QUINTANA CRESPO, E. (2005).
Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos.
Tesis Doctoral presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- REDOLFI, E. R. (1990).
Comportamiento de Pilotes en Suelos Colapsibles.
Tesis Doctoral presentada en la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- REGINATTO, A. Y FERRERO, J. C. (1973).
Collapse potencial of Soils and Soil - Water Chemistry.
Proceedings of the VIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol. 2, pp. 177 - 183.
- RINALDI, V. A.; SANTAMARINA, J. C. Y REDOLFI E. R. (1998).
Characterization of collapsible soils with combined geophysical and penetration testing.
Proceedings of the International Conference on Geotechnical Site Characterization (ISC 98) Atlanta, Vol. 1, pp. 581 - 588.
- RINALDI, V. A.; CLARIÁ, J. J. Y SANTAMARINA, J. C. (2001).
The Small-Strain Shear Modulus (Gmax) of Argentinean Loess.
XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Estambul, Turquía, Vol 1, pp. 495 - 499.

- ROCCA, R. J.
Review of Properties of Loess Soils. CE 299 Report,
Tesis de Maestría presentada en la Universidad de California, Berkeley, Estados Unidos.
- ROCCA, R. J.; REDOLFI, E. R. Y TERZARIOL, R. E. (2006).
Características Geotécnicas de los Loess de Argentina.
Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6 (2), 149–166.
- ROUZAUT, S. (2015).
Estudio geológico y de magnetismo ambiental de secuencias sedimentarias asignadas al Cuaternario tardío, expuestos en la Llanura Pampeana, Córdoba (R. Argentina), Implicancias paleoclimáticas.
Tesis Doctoral presentada en la F.C.E.F. y N. de la U.N.C., Córdoba, Argentina.
- ROUZAUT, S.; ORGEIRA, M. J.; VÁSQUEZ, C.; ARGÜELLO G. L. Y SANABRIA, J. (2012).
Magnetic properties in a loess-paleosol sequence of Córdoba, Argentina.
Revista de la Sociedad Geológica de España, 25, (1-2), 2012 55-63. ISSN: 2255-1379.
- ROUZAUT, S., ORGEIRA, M. J., VÁSQUEZ, C., AYALA, R., ARGÜELLO, G. L., TAUBER, A., ... & SANABRIA, J. (2015).
Rock magnetism in two loess-paleosol sequences in Córdoba, Argentina.
Environmental Earth Sciences, 73 (10), 6323-6339.
- ROUZAUT, S. Y ORGEIRA, M. J. (2017).
Influence of volcanic glass on the magnetic signal of different paleosols in Córdoba, Argentina;
Springer; Studia Geophysica Et Geodaetica; 61; 2; pp. 361-384.
- ROUZAUT, S., CAMPODONICO, V. A., & PASQUINI, A. I. (2021).
Weathering and paleoprecipitation indices in a Late Pleistocene-Holocene loess-paleosol sequence in central Argentina.
Environmental Earth Sciences, 80(1), 1-11.
- SANABRIA, J. A. Y ARGÜELLO, G. (2003).
Aspectos geomorfológicos y estratigráficos en la génesis y evolución de la Depresión Periférica, Córdoba.
II Congreso Argentino del Cuaternario y Geomorfología. Actas: 177-184, Tucumán.
- SANTA CRUZ, J. N. (1978).
Aspectos sedimentológicos de las formaciones aflorantes al este de la Sierra Chica, provincia de Córdoba, República Argentina.
Rev. Asoc. Geol. Argent, 23, 232-244.
- SCHIAVO, H.; BECKER, A.; GRUMELLI, M. Y CANTÚ, M. (2015).
Calcretas del Suroeste de Córdoba.
Suelos con acumulaciones calcáreas y yesíferas de Argentina, 1ra Edición, Ed. Imbellone Perla Editorial Facultad de Agronomía.
- SMALLEY, I. J. Y MARKOVIĆ, S. B. (2014).
Loessification and hydroconsolidation: There is a connection.
Catena, 117, pp. 94-99.
- SOIL SURVEY STAFF. CLAVES PARA LA TAXONOMÍA DE SUELOS (2014).
Traducción de la 12 edición 2010 de: Keys to Soil Taxonomy.
U.S. Department of Agriculture, 331 p.
- TERZARIOL, R. E. (2009).
40 años de Estudio de los Suelos Loésicos en Córdoba, Argentina. Desafíos y Avances de la Geotecnia Joven en Sudamérica,
Memorias de la III Conferencia Sudamericana de Ingenieros Geotécnicos Jóvenes, Córdoba, Argentina, pp. 323-337.
- ZÁRATE, M. A. (2003).
Loess of southern South America.
Quaternary Science Reviews, 22, pp. 1987-2006.
- ZEBALLOS, M. E.; TERZARIOL, R. E.; REDOLFI, E. R. Y ROCCA, R. J. (2000).
Infiltración en Suelos Loésicos de la Provincia de Córdoba.
Memorias del XV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG), Buenos Aires, Argentina, Vol 1., pp. 599 - 606.



Evaluación geotécnica preliminar de las unidades geológicas del frente costero portuario de Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

Preliminary geotechnical evaluation of the geological units of the Bahía Blanca port area, Buenos Aires, Argentina

Di Martino, Claudina ^{1,2,3} ✉ - Albouy, René ^{1,2} - Aliotta, Salvador ^{1,4}

Recibido: 13 de enero de 2022 • Aceptado: 25 de mayo de 2022

Resumen

Bahía Blanca está ubicada en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y es el centro urbano con mayor desarrollo del suroeste bonaerense. Cuenta con un puerto de aguas profundas, posibilitando el flujo comercial nacional e internacional. Actualmente una de las problemáticas más recurrentes es la expansión de las ciudades sin pautas de ordenamiento territorial, evidenciada en el área de estudio por la ocupación de espacios sobre materiales expansivos, reactivos a cambios de humedad del suelo y consecuentes fallas en fundaciones, daños estructurales y pérdidas económicas.

El área de estudio comprende el frente costero de la ciudad de Bahía Blanca y su proyección hacia el interior del estuario, extendiéndose desde el puerto de Ingeniero White hasta la localidad Daniel Cerri. El objetivo del estudio es una evaluación preliminar a nivel genérico y cualitativo de las características geológicas y geotécnicas y la relación entre ellas. Se reconocen unidades geológicas aflorantes y del subsuelo y se las califica según la respuesta geotécnica de los materiales, basada en información existente. Se identifican y caracterizan los sedimentos que constituyen el apoyo de las obras y se definen parámetros y características que influyen en su respuesta geotécnica y posible inestabilidad de las construcciones.

Esta investigación propone formular lineamientos que impulsen un ordenamiento territorial racional, acorde con las características geológicas y geomecánicas del terreno, determinando sus posibles usos. Los resultados serán aplicados a mitigar o evitar riesgos geológicos y contribuir con el desarrollo sustentable de un área en expansión comercial y económica, que promueve el emplazamiento de infraestructura industrial, portuaria y urbana.

Palabras clave: complejo portuario, desarrollo urbano, geomecánica del suelo.

1 Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur.
Av. Alem 1253 - Cuerpo B¹. Piso 2º (8000) Bahía Blanca.

✉ claudina.dimartino@uns.edu.ar

2 CGAMA-CIC-UNS. San Juan 670 (8000) Bahía Blanca

3 UTN.FRBB. 11 de abril 461, (8000) Bahía Blanca.

4 Instituto Argentino de Oceanografía (CONICET-UNS), Bahía Blanca. Camino La Carrindanga km 7 (8000) Bahía Blanca.

Abstract

Bahía Blanca is located in the province of Buenos Aires (Argentina) and is the urban center with the greatest development in the southwest of Buenos Aires. It has a deep water port, enabling national and international commercial flow. Currently one of the most recurrent problems is the expansion of cities without land use guidelines, evidenced in the study area by the occupation of spaces on expansive materials, reactive to changes in soil moisture and consequent failures in foundations, structural damage and economic losses.

The study area includes the waterfront of the city of Bahía Blanca and its projection towards the interior of the estuary, extending from the port of Ingeniero White to the locality of Daniel Cerri. The objective of the study is a preliminary evaluation at a generic and qualitative level of the geological and geotechnical characteristics and the relationship between them. Outcropping and subsoil geological units are recognized and qualified according to the geotechnical response of the materials, based on existing information. The sediments that constitute the support of the works are identified and characterized and parameters and characteristics that influence their geotechnical response and possible instability of the constructions are defined.

This research proposes to formulate guidelines that promote a rational territorial ordering, in accordance with the geological and geomechanical characteristics of the land, determining its possible uses. The results will be applied to mitigate or avoid geological risks and contribute to the sustainable development of an area in commercial and economic expansion, which promotes the location of industrial, port and urban infrastructure.

Keywords: port complex, soil geomechanics, urban development.

INTRODUCCIÓN

Bahía Blanca es ciudad cabecera del Partido homónimo y cuenta con un puerto de aguas profundas, que hace posible el lazo comercial nacional e internacional, destacándose entre los más importantes de América Latina. Presenta en la actualidad un gran potencial de expansión en cuanto a infraestructura urbana, industrial, portuaria y obras civiles complementarias.

En el área de Bahía Blanca y sus alrededores, la expansión se ha llevado a cabo mayoritariamente sin pautas de ordenamiento territorial, en cuanto a la ocupación de espacios o sectores bajo la amenaza de riesgos geológicos como inundaciones y/o presencia de suelos colapsables y expansibles. Esto ha traído aparejadas consecuencias como fallas en las fundaciones de varias viviendas y daños en obras de infraestructura, (Caló *et al.*, 2000) por lo que la presencia de distintos tipos de suelos y sus características asociadas, sustentan la necesidad de realizar estudios previos al emplazamiento de obras ingenieriles, incluyendo la caracterización geotécnica de los sectores de posibles asentamientos futuros.

Esta investigación tiene como objetivo exponer la problemática geológico ingenieril resultante de la expansión urbana e industrial en el sector costero de la ciudad de Bahía Blanca y puerto de ingeniero White e identificar las causas. Se proyecta estudiar los aspectos considerados básicos para establecer pautas claras de ordenamiento territorial. En la actualidad, el crecimiento urbano y la ocupación del suelo para distintas actividades, a menudo ocurren sobre terrenos inestables, condiciones geológicas adversas o bajo amenaza de riesgos geológicos.

Este trabajo pretende ser un aporte a la óptima interacción entre el emplazamiento de obras ingenieriles y el medio geológico en el que se desarrollan y avanzan y evitar de esta manera, daños o perjuicios para el hombre y el medio ambiente. Se pretende brindar una herramienta para colaborar con el desarrollo sustentable y con el sostenimiento del equilibrio medioambiental sometido a las consecuencias del progreso.

Se presentan las características físicas, ingenieriles y ambientales del área de estudio, haciendo hincapié en la expansión urbana e industrial y los posibles problemas constructivos por las características del terreno. Se establecen las bases para elaborar pautas de planificación territorial para el área industrial y urbana para contribuir con el desarrollo racional y sustentable que se pretende llevar a cabo.

Se realiza una evaluación de las características geológicas y geotécnicas del área e identificación de las problemáticas para el desarrollo de obras ingenieriles. La interpretación del vínculo entre las problemáticas y las características del terreno permitirá identificar soluciones adecuadas y establecer lineamientos o bases para un óptimo ordenamiento territorial.

PROBLEMÁTICA Y METODOLOGÍA

Algunas características como granulometría, mineralogía, disposición de los materiales, contenido de humedad, permeabilidad, plasticidad, posición del nivel freático, transmisividad de la zona saturada y velocidad y conductividad del agua subterránea, condicionan parámetros geotécnicos como: resistencia, compacidad, capacidad soporte, hinchamiento y expansividad, que son en definitiva los que establecen la respuesta del terreno ante cualquier tipo de obra ingenieril. Una de las principales consecuencias en el área son asientos diferenciales y daños a las estructuras.

Como ejemplos se pueden citar que el porcentaje de humedad en el suelo está estrechamente ligado a la plasticidad, que junto con la granulometría determinan el grado de compactación del mismo y su capacidad portante. La permeabilidad está relacionada con el tamaño medio de grano y la transmisividad y estos parámetros condicionan el movimiento del agua en el suelo y subsuelo. La variación de humedad en el suelo provoca eventos de expansión y contracción del terreno en el área de estudio, y el tamaño de grano fino, que caracteriza el área de estudio favorece el ascenso de agua por capilaridad, humectando el suelo por encima del nivel freático.

En este trabajo se realiza una caracterización de los aspectos geológicos e hidrogeológicos de interés a su objetivo. Estas características pueden asociarse con propiedades geotécnicas específicas. Existen tablas realizadas por diversos autores (*González De Vallejo, 2004*) donde se describen parámetros geológicos y los parámetros geotécnicos asociados.

Además de su génesis y edad, los aspectos geológicos e hidrogeológicos van a condicionar el comportamiento ingenieril de los materiales, lo que va a permitir estudiar distintas respuestas geotécnicas del terreno, por lo que es necesario hacer una evaluación de los mismos. Dentro de las principales características para describir estas zonas se tendrán en cuenta la litología, la estratigrafía, la geomorfología, y los aspectos hidrogeológicos afines. En esto radica la importancia de hacer una revisión de las mismas, con el fin de inferir a qué características geotécnicas están asociadas, con miras a evaluar las condiciones del terreno y acompañar el proyecto de futuras obras civiles y establecer pautas de ordenamiento territorial

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Bahía Blanca es cabecera del partido y se encuentra ubicada geográficamente al sudoeste de la provincia de Buenos Aires, siendo sus coordenadas $38^{\circ} 44'$ latitud sur y $62^{\circ} 16'$ longitud oeste. El distrito de Bahía Blanca, está integrado por las localidades de Cabildo, General Daniel Cerri e Ingeniero White y limita con las jurisdicciones de Villarino, Tornquist, Coronel Pringles y Coronel Rosales, siendo su superficie de 2.300 km^2 .

El área de estudio de este trabajo comprende el frente costero de la ciudad de Bahía Blanca y su proyección hacia el interior del estuario. Limita al sur con el canal Principal, y se

extiende desde el puerto de Ingeniero White hasta la localidad de General Daniel Cerri, incluyendo sectores sobre los que potencialmente podría expandirse, tanto la urbanización como la zona portuaria e industrial. Figura 1.

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

El estuario de Bahía Blanca constituye un sistema mesomareal, caracterizado por una onda de marea de amplitud media de 3m, de carácter semidiurna. Posee un canal principal, de una longitud aproximada de 60 km que se comporta como acceso a los puertos de Ingeniero White, Puerto Galván y Puerto Belgrano (*Gigante et al., 2008*). Desde el punto de vista geomorfológico, el mismo autor atribuye la morfología actual del ambiente costero-marino a los procesos de erosión y sedimentación ocurridos durante el Cuaternario. Hace mención a la presencia de paleocanales en el subsuelo marino como una evidencia significativa para vincular los cambios del nivel del mar con la evolución costera de la zona. La geomorfología del área se caracteriza por una densa red de canales de marea, que generalmente tienen un diseño meandriforme, además de un gran número de islas de escasa altitud y amplias llanuras de marea limo arcillo arenosas. En la costa Norte del estuario desembocan pequeños cursos fluviales correspondientes a las cuencas de los ríos Sauce Grande y Sauce Chico, y de los arroyos Napostá y Saladillo de García.

Desde el punto de vista hidrológico el estuario constituye el nivel base final o de descarga de las aguas superficiales y subterráneas del área de estudio. La dinámica de las mareas y los factores meteorológicos dominan el movimiento del agua dentro del estuario, y determinan las oscilaciones del nivel de base del sistema hidrológico provocando las variaciones temporarias en cuanto los volúmenes de la descarga (*Carrica et al., 2003*).



Figura 1. Ubicación del área de estudio. Zona costera entre el Puerto de Ingeniero White y Daniel Cerri. Partido de Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires, República Argentina. Fuente Google Earth.

La historia geológica del área ha sido estudiada por diversos autores, y está dominada por los procesos transgresivo-regresivos cuaternarios que actuaron sobre la costa de Bahía Blanca (*Aliotta y Farinati 1990, Aliotta et al. 1991, 1996b*) modificando las condiciones hidrológicas, morfológicas y sedimentarias de los antiguos ambientes fluviales. Además existen registros de perforaciones, análisis de perfiles y registros sísmicos que evidencian antiguos eventos fluvio-marinos previos a la transgresión holocena (*Aliotta et al. 1996a y b, 2002, 2004, Spagnuolo 2005, Giagante et al. 2005, Briceño et al. 2005*).

El subsuelo del área de estudio está constituido por los denominados "sedimentos pampeanos" (*Fidalgo et al., 1975*) del Plioceno medio a superior y amplia distribución regional y espesor considerable. Corresponden a sedimentos loésicos compuestos principalmente por limos arenosos, pardo-rojizos y arena compacta cementados con carbonato de calcio. Hacia el Norte, afloran aproximadamente a los 5 msnm y a menudo se encuentran cubiertos por sedimentos eólicos y suelos de poco espesor. Hacia el Sur y por debajo del nivel del mar subyacen a la Formación Maldonado (*Fidalgo, 1983*), compuesta por arcillas limosas de origen marino, correspondientes a la ingresión marina pospleistocena. Esta Formación Maldonado se encuentra acotada al área costera, aflorante y en algunos casos cubierta por un delgado suelo vegetal. Hacia el norte se acuña sobre los sedimentos pampeanos aflorantes, mientras que hacia el sur continúa por debajo del nivel del mar alcanzado, en el área de estudio, espesores máximos de hasta 15 metros (*Carrica et al., 2003*). La base de la formación está compuesta por arena de tamaño de grano medio a fino, gris oscura, con restos de conchillas, que pasa gradualmente hacia el techo a limos arenosos y limos arcillosos o arcillas limosas, grises, muy plásticas, con abundantes conchillas y a una arcilla gris verdosa oscura, plástica, muy expandible, con una mineralogía típica de una asociación montmorillonita-illita (*Fidalgo, 1983*) sobre la cual se apoya el material de relleno del área.

En el sector estudiado, el suelo natural, de escaso desarrollo y mal drenado, presenta una textura limo-arcillosa, muy plástica, con concreciones de carbonato de calcio, restos de materia orgánica y raíces y en los que se observan eflorescencias salinas. En amplios sectores ha sido cubierto o reemplazado por rellenos antrópicos, compactados que varían de 1 a 4 metros de espesor, sobre los que se asientan las plantas industriales y las vías de comunicación.

En el área de estudio, *Aliotta et al., (1991)* resume la secuencia sedimentaria compuesta por materiales que abarcan desde el Terciario al Reciente en el subsuelo del Canal Principal, en cercanías al Puerto de Ingeniero White.

En el área de Bahía Blanca, sobre el paquete sedimentario que compone la Cuenca del Colorado, yace la Formación Chasicó, de edad Mioceno inferior Plioceno (*Fidalgo et al. 1978; Fidalgo et al. 1985*), correspondiente a un ambiente continental, principalmente fluvial (*Zambrano, 1972*). En el área de estudio, *Aliotta et al., (1991)*, ha detectado la presencia de estas sedimentitas terciarias entre los 10 y 20 m bajo el nivel medio del mar (nmm).

Estas sedimentitas junto con las de la Formación Pampeana (Pleistoceno) conforman el basamento sobre el cual se apoyan en discordancia los materiales sueltos a débilmente compactados del Cuaternario Tardío. El mismo autor, menciona que por encima de la Formación Chasicó, se presenta un estrato arenoso, apoyado en discordancia, que sufre un acuñamiento hacia el oeste sobre el sustrato Plio-Pleistoceno y corresponde a un ambiente mixto fluvio-marino, con un predominio fluvial.

Las sedimentitas infrayacentes fueron erosionadas por esta dinámica fluvial incorporando a sus sedimentos rodados y fragmentos rocosos del sustrato compactado. Hacia arriba, aproximadamente a los 15 m de profundidad se encuentra un lente de arena sensiblemente más gruesa que la infrayacente. A estos sedimentos fluviales se los asocia con una antigua desembocadura, probablemente perteneciente al curso de lo que es actualmente al Arroyo Napostá Grande. Este paleoambiente sedimentario se habría desarrollado previamente a la última gran transgresión post-glacial, cuando el nivel del mar se encontraba muy por debajo del actual. La ingresión holocena comienza aproximadamente entre los 7000 y 7500 años AP, (*Clark y Bloon, 1979; Suguio y Martin, 1980*). En el área de estudio, existen dataciones isotópicas de la malacofauna en depósitos marinos costeros (*Gonzales et al., 1983; Farinati, 1985; Aliotta y Farinati, 1990*) que confirman que la ingresión postglaciaria se produce en el Holoceno medio-tardío (después de los 7500 años AP.).

En el área de estudio, las facies marinas holocenas comienzan con una arena fina a mediana, y abundantes fragmentos de valvas de moluscos. Se apoyan en discordancia, hacia el oeste sobre los sedimentos fluviales, en tanto que hacia el este suprayacen la plataforma de abrasión pleistocena. El inicio de ingresión marina, representada por un sedimento arenoso, tiene una distribución regional en casi la totalidad de la zona costera del estuario. Hacia el NE del Puerto de Ingeniero White este tipo de material se apoya en discordancia erosiva sobre un sustrato muy compacto, limo arenoso, rico en carbonato de calcio (*Aliotta y Farinati, 1990*) correspondientes a los sedimentos pampeanos o Formación Pampeana.

Sobre la línea litoral holocena se desarrolló una extensa llanura de marea, constituida por sedimentos limo arcillo arenosos característicos del ambiente costero. En la parte superior de los testigos obtenidos (*Aliotta, 1991*) en el área se observa estratificación laminar atribuida a la alternancia en la depositación de estos tipos de materiales (*Reineck y Wunderlich, 1968*). *Aliotta et al., (1990)* completan la historia geológica del estuario con la progradación de la llanura de marea y el progresivo descenso del nivel del mar dando lugar al desarrollo de la extensa llanura costera que caracteriza a toda la zona interna del estuario. En la actualidad el ambiente de sedimentación es similar al del Holoceno Tardío, al igual que su mineralogía, observándose una continuidad entre los sedimentos finos que constituyen la actual llanura de marea con aquellos depositados durante el período transgresivo-regresivo post-glaciario, diferenciándose solo en algunos casos el grado de compactación y densidad del depósito en función de la edad de ambos sedimentos.

HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

Desde el punto de vista hidrogeológico se distinguen dos secciones principales: Sección Pampeana y Sección Pospampeana (*Carrica et al., (2003)*). La primera corresponde a sedimentos loésicos del pampeano que se extiende en toda la región y están ubicados en la costa a una profundidad aproximada de 15 metros y pasan de forma gradual a las formaciones miocénicas subyacentes. Estos sedimentos se comportan como un único sistema más o menos homogéneo de transmisión de agua. La transmisividad promedio es del orden de los $150 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ para los primeros 100 metros de espesor, con conductividades hidráulicas que varían entre $0,3$ y $3 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ y coeficientes de almacenamiento de $0,12$ a $0,05$ (*Carrica, 1998*). Los valores de permeabilidad son más altos que los esperables por su granometría y grado de cementación debido a la permeabilidad secundaria por macroporos, microfisuras, canalículos, etc.

La Sección hidrogeológica Pospampeana está formada por los sedimentos de la Formación Maldonado y los suelos actuales que cubren la sección anterior con un espesor de hasta 12 metros. La base está compuesta por un nivel arenoso de escaso espesor y buena permeabilidad, mientras que hacia el techo baja significativamente debido a la disminución de la granometría del sedimento y la presencia de arcillas. Su transmisividad es del orden de los $50 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ y posee porosidades efectivas del 10 % en la sección inferior disminuyendo hacia la superficie al 4 % y permeabilidades de entre 0,1 y $1,5 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. Se puede indicar una variación desde bajas permeabilidades en los materiales arcillosos superiores hasta valores medios en los niveles basales más arenosos (Bonorino y Sala, 1983). A pesar de las variaciones litológicas en los parámetros hidráulicos, se comporta como un sistema continuo de transmisión de agua.

Los niveles freáticos están a poca o nula profundidad. Las arcillas en la porción superior de la sección Pospampeana facilitan el ascenso capilar del agua hacia la superficie y los sectores bajos topográficamente se comportan como áreas de descarga local del acuífero. Por otro lado, en el período húmedo (otoño e invierno) estos sectores permanecen anegados, mientras que durante el verano el nivel freático desciende por la alta evapotranspiración, lo que provoca un desecamiento del suelo evidenciado por la presencia de típicas efluorescencias salinas.

En cuanto a la hidrodinámica subterránea, Carrica et al. (2003) hacen un análisis de las modificaciones espaciales y temporales de la superficie piezométrica en el sector industrial de la región costera de Bahía Blanca, utilizando como metodología la comparación de las isopiezas relevadas en el sector en diferentes períodos, lo que permitió analizar la evolución de la morfología de la capa freática a través del tiempo. Concluye que estas alteraciones se deben a acciones antrópicas como rellenos artificiales, impermeabilizaciones y zanjas de drenaje, que han modificado el flujo subterráneo que naturalmente tenía una muy lenta circulación general en dirección a su nivel de descarga natural en

el mar. Una de las consecuencias que puede observarse en la actualidad es un aumento la velocidad del flujo subterráneo hacia las zanjas de drenaje. En efecto, con la finalidad de drenar el agua superficial en el área se ha emplazado una serie de zanjas o canales sin una distribución definida. Debido a la poca profundidad a la que se encuentra la zona saturada, estos “drenes” intersecaron la superficie freática y actúan como niveles de descarga locales del agua subterránea.

Si bien naturalmente la superficie freática tiende a copiar el perfil topográfico, en este caso de una suave pendiente, y por lo tanto un bajo gradiente hidráulico, las modificaciones introducidas por el hombre la ha transformado en una capa radial con presencia localizada de domos de flujo divergente, que se corresponden con zonas de recarga natural o inducida por riego y vaguadas, con líneas de flujo convergente, en las zonas con predominio de la descarga. En concordancia con la lenta dinámica del sistema, el agua subterránea de la capa freática del lugar corresponde a una salmuera con conductividades eléctricas entre 47.600 y $108.100 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, fuertemente clorurada sódica (Bonorino y Sala, 1983; Sala, et. al., 1985; Carrica, 1998).

RESPUESTA GEOTÉCNICA DE LOS MATERIALES

A partir de las principales características descriptas en el área, condicionantes de la respuesta de los materiales, se reconocen y diferencian cuatro tipos de comportamiento geotécnico diferente que se indican en la Tabla 1 y esquematizan en la Figura 2. El Tipo I correspondiente al basamento, el Tipo II correspondiente a la base arenosa de la Fm Maldonado, el Tipo III correspondiente a su parte superior limo arcillosa de la misma y un Tipo IV, actual, en la que se incluyen las principales modificaciones antrópicas. La compactación es decreciente a partir del Tipo I al IV. Se debe considerar que por la geomorfología del área, particularmente en el ambiente mixto fluvio-marino, puede haber variaciones locales.

Tabla 1. Tipificación en función de la respuesta geotécnica de los materiales

	Características generales	Composición litológica	Espesor	Aptitud para emplazamiento de fundaciones	Zonas en función de la saturación
Tipo IV	Material de relleno antrópico.	Arenas, limos y fragmentos de tosca compactados.	Aflorantes (1 a 4m).	Las áreas compactadas son aptas para fundaciones. En sectores se conservan las características naturales representadas por afloramientos de limos arcillosos que requieren cimentación apropiada.	Zona no saturada. Red de flujo subterráneo natural modificada por la construcción de zanjas de drenaje que cortan la superficie freática.
Tipo III	Limos y arcillas.	Arcillas plásticas y muy expansibles (montmorillonita-illita).	Fm. Maldonado: hasta 15m bajo el nivel del mar y acuñada hacia el continente en dirección Norte sobre la Zona I	No apta para pilotaje. Riesgo de expansión y contracción y daño en las estructuras.	Zonas no saturada y saturada
Tipo II	Arena con restos de conchillas de tamaño de grano medio a fino, gris oscura	Sedimentos sueltos a débilmente compactados.		No apta para pilotaje.	Zona saturada
Tipo I	Sedimentos loésicos	Sedimentos compactados y cementados.	Fm Pampiano Desde los 10-20 m bajo nmm.	Apta para pilotaje	Zona saturada

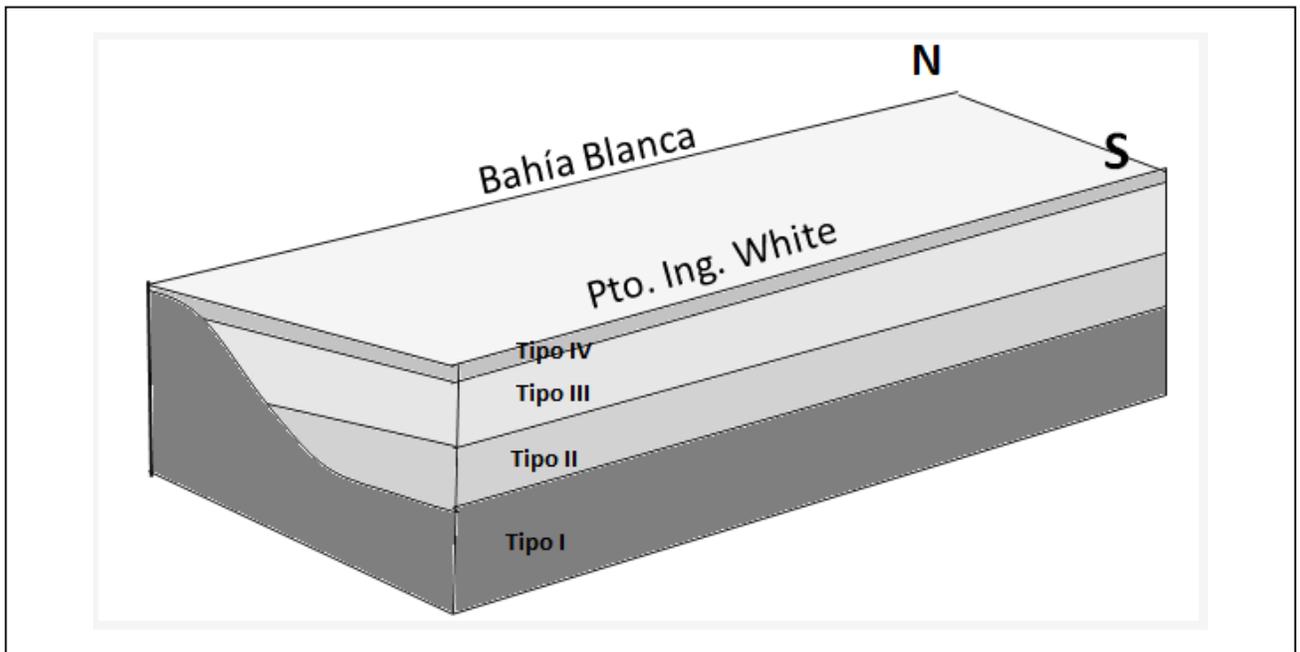


Figura 2. Modelo esquemático de la tipificación geotécnica propuesta y su vinculación con la secuencia estratigráfica costera (ver Tabla 1).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el área del estudio se verifican variaciones significativas en los perfiles sedimentarios y en sus características litológicas e hidráulicas que condicionan su respuesta mecánica o geotécnica. Las variaciones litológicas-granulométricas y del contenido de humedad de los materiales, determinan la compacidad y resistencia del terreno, por lo que resulta indispensable reconocer el perfil descripto en el área para planificar fundaciones o estructuras adecuadas en cuanto a estabilidad y resistencia.

La variación en el contenido de humedad de los materiales del suelo y subsuelo, por lluvia y oscilaciones del nivel freático, produce contracción y expansión en el terreno e hinchamiento, y modificaciones en la resistencia del mismo, que afectan las obras que se emplazan, en un área en constante avance y progreso industrial. La composición mineralógica de las arcillas, es uno de los puntos más relevantes del medio físico en el área de estudio, ya que provoca contracción y expansión del terreno por variaciones de humedad. Esta consideración es de particular importancia teniendo en cuenta que el nivel freático se encuentra a escasa profundidad, lo que podría afectar la estabilidad de las cimentaciones, dando origen a asentamientos diferenciales de las estructuras.

Si bien la ocurrencia de los eventos de fallas en las estructuras documentados en el área se atribuyen a causas naturales (oscilaciones del nivel freático), se asume que la acción antrópica podría también traer aparejadas las mismas consecuencias a

nivel local, por lo que es importante, debido a la sensibilidad del sistema, la evaluación de las condiciones hidrodinámicas naturales del área y realizar estudios a escala adecuada de detalle. Así, se deben tener en cuenta, un planeamiento del territorio, que incluya cimentaciones o fundaciones que constituyan un sistema de apoyo estable a las estructuras y un ordenamiento territorial acorde a las características geotécnicas del área. Para cimentaciones profundas el sustrato inferior descripto (sedimentos pampeanos) que se localiza entre 10-20 m b.n.m. constituye por sus características geotécnicas el mejor material de apoyo.

En el caso de construir nuevos drenes para evacuar el agua superficial en época de lluvia, se debe tener en cuenta la dinámica hidrológica subterránea, para evaluar posibles impactos y analizar las consecuencias, considerando que el agua en el suelo y subsuelo es condicionante de la respuesta mecánica de los materiales. La circulación natural lenta del agua subterránea en el área implica mayor tiempo de contacto con los sedimentos y esto influye en su salinización, condición que debe contemplarse en función del poder de afectación de las aguas salinas a los materiales ingenieriles.

El grado de compactación y densidad de los materiales varían según su edad por lo que hay que tener en cuenta su posición en la columna estratigráfica. La resistencia del suelo como su capacidad portante, calculadas para una unidad estratigráfica con condiciones homogéneas, podrán extrapolarse a los materiales con similares características.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ALIOTTA, S., G.O. LIZASOAIN, Y W. LIZASOAIN, 1991.

Sedimentología y paleoambientes cuaternarios en el sector interno del estuario de Bahía Blanca, Argentina.

Revista Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Autónoma de México. 18(1): 99-107

ALIOTTA, S. Y E. FARINATI, 1990.

Strati-graphy of Holocene sand-shell ridges in the Bahía Blanca Estuary, Argentina.

Marine Geology 94: 353-360. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(90\)90064-Q](https://doi.org/10.1016/0025-3227(90)90064-Q).

- ALIOTTA, S., G.O. LIZASOAIN, Y W. LIZASOAIN, 1996A.
Facies fluvio-estuarina en el subsuelo del canal de acceso al Puerto de Ingeniero White, Bahía Blanca.
Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología 3(2): 43-53.
- ALIOTTA, S., G.O. LIZASOAIN, W. LIZASOAIN, Y S.S. GINSBERG, 1996B.
Late Quaternary Sedimentary Sequence in the Bahía Blanca Estuary, Argentina.
Journal of Coastal Research 12(4): 875-882. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(90\)90064-Q](https://doi.org/10.1016/0025-3227(90)90064-Q).
- ALIOTTA, S., G.O. LIZASOAIN, Y S.S. GINSBERG, 2002.
Hallazgo de acumulaciones de gas con sísmica de alta resolución en sedimentos del Estuario de Bahía Blanca, Argentina.
15º Congreso Geológico Argentino, Actas: 315-318, El Calafate.
- ALIOTTA, S., G.O. LIZASOAIN, Y S.S. GINSBERG, 2004.
Dinámica sedimentaria y evolución morfológica de un profundo canal del estuario de Bahía Blanca.
Revista de la Asociación Geológica Argentina 59(1): 14-28
- BRICEÑO, W., S. ALIOTTA, Y E. FARINATI, 2005.
Sedimentos gasíferos en el subsuelo de los puertos de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires.
16º Congreso Geológico Argentino, Actas 5: 283-288, La Plata.
- BONORINO A. G. Y J. M. SALA, 1983.
Capítulo: Geohidrología. Comisión Estudio de Suelos White-Cerri. MOP de la Provincia de Buenos Aires.
Informe Final. La Plata.
- CALO J., FERNANDEZ E., MARCOS A., ALDACOUR H. (2000)
Mapas temáticos de la ciudad de Bahía Blanca y problemas edilicios asociados.
Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. No 15: 30-40.
- CARRICA J., E. R ALBOUY Y A. G. BONORINO, 2003.
Modificaciones Hidrodinámicas en el Acuífero Costero del Área Industrial De Bahía Blanca.
- CLARK, J.A. Y A. L. BLOOM. 1978.
Hydro-Isostasy and Holocene emergence of South America.
International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary. Brasil. 1979. 61-76.
- FARINATI, E.,
Radiocarbon datigs of Holocene marine deposits, Bahía Blanca area, Buenos Aires Province, Argentina. 1985.
Quaternary of South America and Antarctic Peninsula, Rotterdam. 197-206.
- GIAGANTE, D., S. ALIOTTA, Y S. S. GINSBERG, 2005.
Evidencia sísmica de paleocanales en el subsuelo del estuario de Bahía Blanca, Argentina.
16º Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 809-816, La Plata
- GIAGANTE, D.A., S. ALIOTTA, Y S. S. GINSBERG, 2008.
Análisis Sismoestratigráfico de Paleocanales en el subsuelo marino del estuario de Bahía Blanca.
Revista Asociación Geológica Argentina 63 (1) 65,75.
- GONZÁLES, M.A., H. PANARELLO, H. MARINO Y S. VALENCIO, 1983.
Niveles marinos del Holoceno en el Estuario de Bahía Blanca (Argentina). Isótopos estables y microfósiles calcáreos como indicadores paleoambientales.
Simp. Ose. niv. Mar durante el último hemicycle desglacial en Argentina. Mar del Plata. Actas:48-68.
- SPAGNUOLO, J.O. 2005.
Evolución geológica de la región costera-marina de Punta Alta, provincia de Buenos Aires.
Tesis Doctoral Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, inédito, 269 p., Bahía Blanca
- REINCK, H.E Y F. WUNDERLICH, 1968.
Classification and origin of flaser and lenticular bedding.
Sedimentology, vol. 11, issue 1-2, pp. 99-104.



Técnicas geofísicas para a detecção de piping: uma revisão de literatura

Técnicas geofísicas para la detección de sufusión: revisión de la literatura

Santos, Cleber de Jesus ¹ ✉ - Picanço, Jefferson de Lima ²

Recibido: 10 de enero de 2022 • Aceptado: 30 de mayo de 2022

Resumo

A ocorrência de tragédias por rompimento de reservatórios e barragens tem suscitado debates sobre a busca por mecanismos de monitoramento mais seguros e de detecção antecipada. Nessa perspectiva a geotecnia tem explorado progressivamente métodos alternativos no sentido de ampliar o entendimento acerca da ocorrência de danos em barragens. A geofísica desponta como uma metodologia alternativa na superação destes desafios, dada a sua praticidade na obtenção dos dados, capacidade de resolução, relação custo/benefício, para além de utilizarem métodos não invasivos. Assim, o objetivo da pesquisa consiste em apresentar as potencialidades da metodologia geofísica na avaliação de problemas geotécnicos associados a erosões internas, especialmente no caso de piping em barragens. Para tal, foi realizada uma revisão de literatura acerca das metodologias geofísicas que obtiveram êxito na identificação de piping na estrutura de barragens ao longo dos anos. Além disso, serão apresentados os aspectos teóricos relativos a cada método, bem como as vantagens e desvantagens na detecção de piping. Considerando a constatada versatilidade dos métodos geofísicos apresentados, acredita-se que o incremento de informações de geofísica, no monitoramento geotécnico, pode contribuir de forma decisiva na detecção antecipada dos pipings.

Palavras-chave: barragem, geofísica, piping.

Abstract

The occurrence of tragedies by rupture of reservoirs and dams has prompted debates about the search for safer monitoring mechanisms and early detection. From this perspective, geotechnical engineering has progressively explored alternative methods to broaden the understanding of the occurrence of damage in dams. Geophysics emerges as an alternative methodology in overcoming these challenges, given its practicality in obtaining data, resolution capacity, and cost/benefit ratio, and above all by to using non-invasive methods. Thus, this research aims to present the potential of geophysical methodology in the evaluation of geotechnical problems associated with internal erosion, namely and piping in dams. To this end, a literature review was conducted about

1. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Instituto de Geociências, Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Campinas, Brasil

✉ cleber.geofisico@gmail.com

2. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Instituto de Geociências, Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Campinas, Brasil

the geophysical methodologies that have successfully identified piping in dam structures over the years. In addition, the theoretical aspects concerning each method will be presented, as well as the advantages and disadvantages in piping detection. Considering the versatility of the geophysical methods presented, it is believed that the increment of geophysical information in geotechnical monitoring can contribute decisively to the early detection of piping.

Keywords: dam, geophysics, piping.

INTRODUÇÃO

A análise técnica de reservatórios e barragens consiste em um ramo da geotecnia que tem evoluído consideravelmente nos últimos anos (Zhu, 2018). O surgimento de novas tecnologias na área tem possibilitado avaliações estruturais cada vez mais seguras, que auxiliam na tomada de decisão para intervenções antecipadas (Zhu et al., 2019), e, por conseguinte, evitam tragédias de grandes proporções, a exemplo das ocorridas recentemente no Brasil (Luo et al., 2019).

A necessidade de aprimoramentos nas avaliações geotécnicas tem impulsionado a busca por informações adicionais através de métodos mais sensíveis, práticos e versáteis. Embora o desenvolvimento de instrumentos tenha permitido avanços em muitos aspectos da Geotecnia de barragens, em alguns casos específicos a instrumentação disponível não apresenta capacidade de imageamento adequada para o problema, como no caso dos *pipings* (Camarero et al., 2019).

Nesse contexto, os métodos de exploração geofísica destacam-se como uma ferramenta de grande importância para análise da integridade da estrutura de barragem (Cardarelli et al., 2014). A possibilidade de investigar as estruturas espacialmente e em profundidade através de varreduras contínuas e sem a necessidade de perfurar ou coletar amostras tem popularizado o seu uso ao longo de décadas (Camarero et al., 2019). Uma ferramenta que

atende as necessidades dos problemas geotécnicos em barragens, como é o caso dos *pipings*. Os quais requerem avaliações rápidas, precisas e relativamente econômicas.

Barragens são estruturas construídas para acumular substâncias fluidas (água, rejeito de mineração). Quanto à finalidade, podem ser classificadas como barragem de regularização, quando destinadas ao controle de déficit hídrico; ou barragens de rejeito, as quais se destinam ao acúmulo de rejeitos de mineração (Foster et al. 1998; Brasil, 2002). Quanto à sua constituição, as barragens podem ser de terra, quando constituídas por material de solo homogêneo - possuindo grandes volumes e larguras - ou de enrocamento, que consiste em um maciço de fragmentos de rocha e terra com um elevado grau de estanqueidade (Fontenelle et al., 2017).

Ao longo dos anos, os reservatórios e barragens de terra podem sofrer processos de fluidificação em seu talude de montante. A evolução deste processo provoca o carreamento de partículas de terra, formando uma erosão interna tubular regressiva de montante para jusante, mais conhecida como *piping* (Figura 1) (Foster e Fell, 1999; Brasil, 2002). Um dano que, ao ser mal administrado, causa o comprometimento da estrutura da barragem e até mesmo rompimentos de grandes dimensões, ocasionando impactos negativos ao meio ambiente e às populações adjacentes (Bovi et al., 2020).

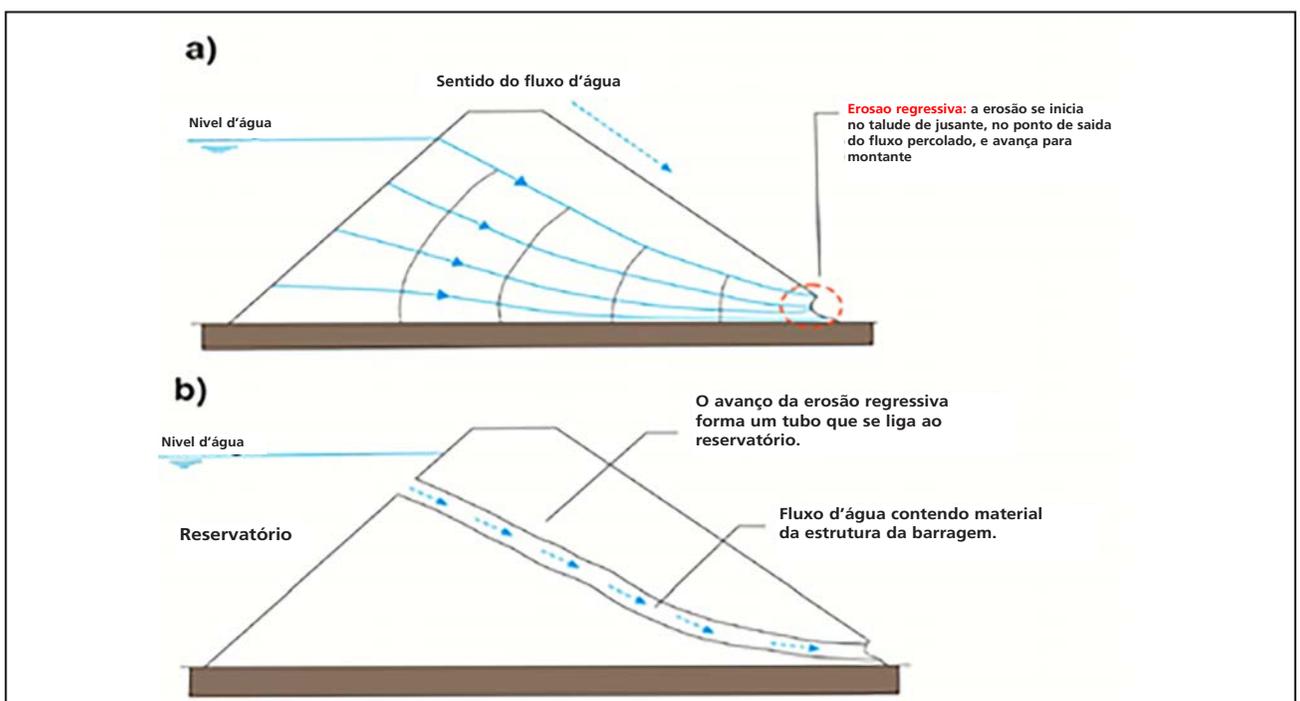


Figura 1. a) Esquema representativo do avanço de uma erosão regressiva. b) Problema do piping completamente estabelecido na barragem. Adaptado de Perini (2009).

Diversas ocorrências do fenômeno de *piping* têm ocorrido pelo mundo, em sua maioria associadas a barragens de terra (Richards e Reddy, 2007). Casos históricos como na barragem de Teton nos EUA em 1976 (Bolton Seed e Duncan, 1987), Panshet na Índia em 1961; Embalse Aromos no Chile em 1984; Gouhou na China em 1993 (Ladeira, 2007) vêm ao longo dos anos se reproduzindo, a exemplo dos casos brasileiros de rompimento das barragens de Fundão (Mariana) e Córrego do Feijão (Brumadinho). Ocorrências que evidenciam o quanto a problemática necessita de atenção por parte dos órgãos governamentais, bem como pela comunidade científica.

Considerando a problemática em questão, temos que a metodologia geofísica tem um potencial decisivo para colaborar na caracterização de estruturas da barragem, pela possibilidade de detecção prévia de infiltrações, erosões internas e *piping*. No presente trabalho serão apresentadas as metodologias geofísicas mais utilizadas, a saber - Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT), Potencial Espontâneo (SP), Ground Penetrating Radar (GPR), Tomografia de Sísmica de Refração ou Reflexão (SRT), Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW); Método Gravimétrico; Resistividade Capacitivamente Acoplada (CCR).

O propósito do trabalho é apresentar os principais métodos geofísicos que oferecem resultados satisfatórios na avaliação e monitoramento da integridade de construções como reservatórios e barragens. O trabalho visa detalhar os princípios físicos, as técnicas de campo, as informações obtidas, as vantagens e desvantagens de cada metodologia, bem como os benefícios obtidos ao aplicar simultaneamente determinadas metodologias geofísicas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Revisão Sistemática de Literatura

A pesquisa ocorreu através de uma revisão sistemática de literatura sobre o uso de técnicas geofísicas para a detecção de danos em barragens, com destaque para os *piping*. A presente revisão de literatura foi realizada por meio da plataforma Web Of Science, ambiente no qual foram coletados os principais artigos científicos na temática supracitada. Na figura 2 temos as etapas realizadas para a revisão sistemática de literatura.

Um dos primeiros estudos associados ao uso de métodos geofísicos em análise de reservatórios e barragens é atribuído a *Ogilvy et al. (1969)*. Cabe destaque também os estudos realizados

na década de 80 (Dutta, 1984; Henriet et al., 1983; Schimschal, 1981). Em Schimschal (1981) o reconhecimento geológico-estrutural da barragem foi investigado através de perfilação geofísica de poços e sondagem elétrica vertical para delimitar áreas de perda potencial de água por infiltração. Já Dutta (1984) fez uso da sísmica de refração voltado para a mesma finalidade. Henriet et al. (1983) utilizou a distribuição da velocidade sísmica para detectar a posição exata de um antigo duto de gás subterrâneo no local proposto para a barragem.

Até então, o uso de métodos geofísicos em projetos geotécnicos esteve atrelado à etapa preliminar de construção da barragem, oferecendo contribuições valiosas na fase de inspeção sobre as condições de estanqueidade do terreno na área onde seria construída a barragem; colaborando no detalhamento da caracterização geológica; e também avaliando a influência de estruturas preexistentes na segurança das futuras instalações da barragem.

No transcorrer dos anos a geofísica passou também a ser amplamente utilizada na investigação de problemas associados à integridade de taludes em barragens. Nesta perspectiva, o método de eletrorresistividade passou a ser amplamente utilizado, sobretudo para avaliar infiltrações no corpo da barragem (Cardarelli et al., 2014; Johansson e Dahlin, 1996; Panthulu et al., 2001), cabendo destaque às considerações associadas à necessidade de repetir medidas em um intervalo de tempo como forma de aprimorar o diagnóstico (Johansson e Dahlin, 1996). Cho e Yeom (2007) obtiveram sucesso na identificação de pontos característicos de infiltração através de imagens obtidas com a Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT) em uma barragem localizada na área central da península Coreana. Mais recentemente Camarero et al., (2019) utilizou ERT em duas barragens localizadas no Estado de São Paulo, conseguindo delimitar domínios de percolação de água com relativa facilidade. Destaque também para os estudos como Sjö Dahl et al. (2005) e Sjö Dahl et al. (2008), ambos na Suécia, os quais apresentaram bons resultados na avaliação de áreas indicativas de erosões internas em barragens através de medidas de resistividade elétrica em 2D.

Nas publicações mais recentes percebe-se uma tendência de uso dos métodos geofísicos de forma conjunta, ou seja, na combinação de técnicas. O esforço de tal combinação possibilita analisar de forma comparativa assim como complementar as informações adquiridas com as diferentes técnicas e, consequentemente, permite o aprimoramento da capacidade de interpretação

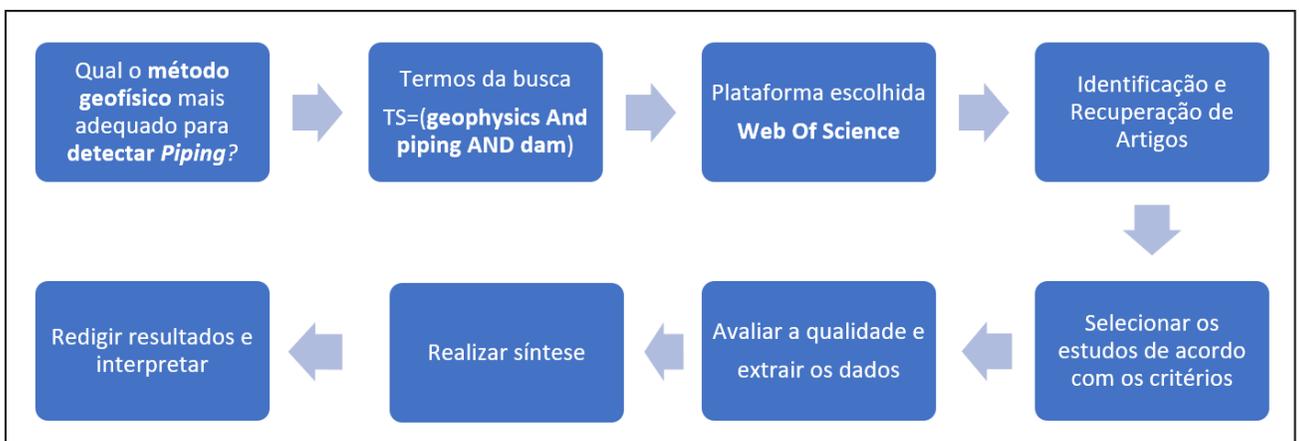


Figura 2. Fluxograma básico das etapas desenvolvidas para a revisão sistemática de literatura.

dos resultados. *Rahimi et al. (2019)* aplicaram Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW) e Resistividade Capacitivamente Acoplada (CCR) em um dique natural, localizado no canal de um rio, para identificar os materiais geológicos presentes e avaliar o grau de coesão. A combinação dos métodos foi decisiva para alcançar os objetivos do estudo, sendo que o MASW tem a capacidade de discriminar os materiais geológicos em profundidade, justamente a limitação do CCR que, em contrapartida, foi capaz de delimitar solos ricos em argila a pequena profundidade.

Cardarelli et al., (2014) utilizou ERT, Tomografia de Sísmica de Refração (SRT) e Potencial Espontâneo (SP) na área central da Itália para localizar *piping* em ambientes naturais, em um contexto geológico complexo. O uso conjunto dos métodos produziu resultados satisfatórios, constatação essa que evidencia as amplas hipóteses de obter sucesso na detecção de *piping* em ambientes construídos, como é o caso das barragens. Em *Martínez-Moreno et al. (2015)* foi descrita a aplicação ERT e a microgravidade para identificar pontos de vazamento em uma barragem em Granada, sul da Espanha. O método ERT permitiu detectar pontos de baixa resistividade, porém, ainda assim, havia incertezas quanto à possibilidade de serem correspondentes às infiltrações, ambiguidades associadas ao princípio da não-unicidade da solução na inversão dos dados que, por sua vez, são inerentes aos métodos geofísicos.

Sentenac et al. (2018) aplicou método eletromagnético – Sliagram, ERT e SP para monitorar uma barragem na República Tcheca, sendo que as três metodologias apresentaram resultados compatíveis indicando anomalia de resistividade na parte mediana da barragem, indiciando erosões internas em seu estágio inicial. Foram realizadas outras medições na condição de reservatório vazio, procedimento que permitiu avaliar a flutuação da curva de infiltração no corpo da barragem.

Pesquisas têm sido realizadas, também, no sentido de correlacionar dados de geofísica com informações de geotecnia (*Antoine et al., 2015*). *Oh e Sun (2008)* associaram dados de resistividade com sondagens SPT para avaliar a segurança de uma barragem. Do mesmo modo, *Bièvre et al. (2017)* obtiveram resultados satisfatórios associando ERT, SRT e dados de perfilagem de poço. Estudo no qual a sísmica não apresentou uma resposta em virtude da geometria e das pequenas dimensões do dique.

Recentemente, *Kim et al. (2019)* e *Masi et al. (2020)* desenvolveram dois estudos nos quais procuraram avaliar a evolução da erosão interna em um ambiente controlado. Para o efeito, foi projetado um equipamento para teste em laboratório no qual a erosão interna pode ser avaliada por meio da ERT por lapsos de tempo, ou variação ao longo do tempo.

No que diz respeito ao método de Potencial Espontâneo (SP), destacam-se os trabalhos de (*Netto et al., 2018*), que apresenta a aplicação do referido método no contexto de duas barragens de terra (Ipeúna e Cordeirópolis). Através das imagens de potencial espontâneo adquiridas em 2D, foi possível identificar domínios característicos de infiltração na barragem. Ainda que sendo realizado sem o auxílio de outras técnicas, o método SP identificou anomalias com relativa facilidade. O que confirma a aplicabilidade direta do método como um dos principais em situações de monitoramento em barragens. A aplicação direta do método SP em situações de *piping* se justifica na capacidade do mesmo em detectar fluxo de fluido em subsuperfície (*Cardarelli et al., 2014; Gallas, 2005; Netto et al., 2018; Wang et al., 2018*).

Embora se considere o método da Microgravidade como uma ferramenta com potencialidades na análise de infiltrações

na estrutura da barragem, constatou-se que são escassas as publicações voltadas para a temática e que, nas publicações existentes, o uso do método está restrito à condição de ferramenta auxiliar, a exemplo de *Ezersky et al. (2006)* onde foi feita uma análise conjunta de sondagem elétrica vertical (SEV), Ground Penetrating Radar (GPR) e microgravimetria para detectar infiltrações em Israel. *Muguio et al., (2017)* tem realizado monitoramentos em barragens de concretos através de investigações gravimétricas convencionais, visando monitorar o estado de conservação das estruturas.

Já a metodologia de GPR tem sido amplamente utilizada em ambientes de barragem. A praticidade no levantamento dos dados tem contribuído para a difusão desta ferramenta. Estudos como *Pueyo Anchuela et al. (2018)* são representativos em relação ao uso de GPR em diversos compartimentos da barragem para monitorar deteriorações na estrutura e processos de infiltração. *Xu et al. (2010)* aplicou o GPR em diques e barragens no sul da China, conseguindo detectar estruturas de cavidades.

A partir da revisão da literatura percebe-se que o uso da geofísica tem sido feito de forma diferente ao longo dos anos, seja em termos de finalidade, ou mesmo em relação aos procedimentos metodológicos utilizados. No período compreendido entre as décadas de 60 e de 80, a geofísica serviu como ferramenta auxiliar na etapa preliminar da construção das barragens, principalmente na detecção de estruturas no solo, para a verificação de áreas seguras à implantação de barragens. Neste período cabe destacar o frequente uso dos Métodos Sísmicos (refração e reflexão), para além do uso de Perfilagem Geofísica de Poços.

Nas duas décadas seguintes a geofísica passou a ser utilizada também com maior frequência com a finalidade de investigar a integridade de taludes com destaque para o uso de métodos de eletrorresistividade. Em diversas publicações pudemos observar o uso do método de eletrorresistividade através das mais variadas técnicas, a saber - tomografia de resistividade elétrica, sondagem elétrica vertical, potencial espontâneo. Neste período também percebemos o uso menos frequente dos métodos eletromagnéticos (radar de penetração no solo - GPR), além de microgravimetria.

Nos últimos 20 anos o uso da geofísica foi ampliado ainda mais, devido ao aprimoramento das técnicas, bem como à evolução na capacidade de processamento dos dados. Neste período temos também uma tendência de aplicação das técnicas geofísicas de forma combinada. O uso de duas ou mais técnicas em conjunto tem sido uma estratégia metodológica frequente e tem resolvido diversos problemas de ambiguidade no dado geofísico, proporcionado interpretações mais amplas e seguras. A seguir temos um quadro síntese associado ao uso de métodos geofísicos em estudos de barragem (Figura 3).

TÉCNICAS DE EXPLORAÇÃO GEOFÍSICA

Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT)

O método da eletrorresistividade (ERT) baseia-se na medida da diferença de potencial (ddp) entre dois eletrodos (M e N), regularmente espaçados, para identificar parâmetros físicos como resistividade elétrica, potencial espontâneo e polarização induzida dos diferentes materiais em superfície. Isto ocorre devido à injeção de corrente elétrica contínua ou de frequência muito baixa na crosta através de dois eletrodos (A e B) (Figura 4). Os princípios físicos do método estão fundamentados na teoria da eletricidade e do eletromagnetismo (*Kirsch e Yaramanci, 2006; Loke, 2016*).

Período	Aplicação	Principais Técnicas	Publicações em Destaque
Décadas 60 – 80	Etapa preliminar de construção da barragem	Sísmica (Refracção e Reflexão); Perfilagem Geofísica de Poços	Ogilvy <i>et al.</i> (1969); Schimschal, (1981); Henrie, <i>et al.</i> , (1983); Dutta, (1984)
Décadas 90 – 00	Investigações associadas à integridade de taludes em barragens.	Eletrorresistividade* (ERT, SEV, SP) SEV, GPR e microgravimetria	Johansson & Dahlin (1996); Cho e Yeom (2007); Panthulu <i>et al.</i> (2001); Ezersky <i>et al.</i> (2006)
Décadas 2010 - atual	Uso dos métodos geofísicos de forma conjunta, combinação de técnicas	ERT; Sísmica (SRT); SP Sliagram, ERT e SP MASW e CCR	Cardarelli <i>et al.</i> (2014) Sentenac <i>et al.</i> (2018) Rahimi <i>et al.</i> (2018); Shin <i>et al.</i> (2019); Lee <i>et al.</i> (2020).

Figura 3. Quadro síntese sobre tendências de uso da geofísica em barragens ao longo do tempo.

Na aquisição das medidas também se estabelece o arranjo experimental adequado aos objetivos estabelecidos. O procedimento de coleta dos dados será realizado segundo o arranjo Dipolo-Dipolo. A escolha desse tipo de arranjo se deve à possibilidade de realizar leituras tanto lateralmente quanto em profundidade, opção útil por oferecer praticidade e dinamismo na coleta de dados (Braga, 2016), para além de ser um dos métodos de arranjo que melhor identifica variações laterais de resistividade.

A tomografia consiste em um tipo de caminhamento elétrico automatizado no qual obtém-se um número de medição consideravelmente maior que um caminhamento convencional. A execução deste tipo de caminhamento requer equipamentos de alta tecnologia com os quais é possível realizar medições de forma automatizada. Em virtude do processamento de um grande volume de dados, a tomografia oferece imagens com alta resolução.

No arranjo Dipolo-Dipolo a investigação ocorre ao longo de linhas numa direção fixa, onde os eletrodos de corrente (AB) e de potenciais (MN) possuem espaçamento constante (Figura 4). Cada distância (R) entre os centros dos pares de eletrodos (AB e MN) corresponde a uma profundidade de investigação. Por fim, as medidas são realizadas aumentando a distância (R) proporcionalmente no sentido do caminhamento para fazer a varredura da resistividade e da polarização induzida do solo (Figura 4).

A aplicação da Tomografia de Resistividade Elétrica no contexto dos problemas geotécnicos, como os *pipings*, tem o propósito de identificar aspectos hidrogeológicos dos materiais em subsuperfície através da produção de uma imagem elétrica bidimensional. Através desta podemos obter informações sobre saturação, possíveis fraturamentos ou cavidades, condutividade hidráulica.

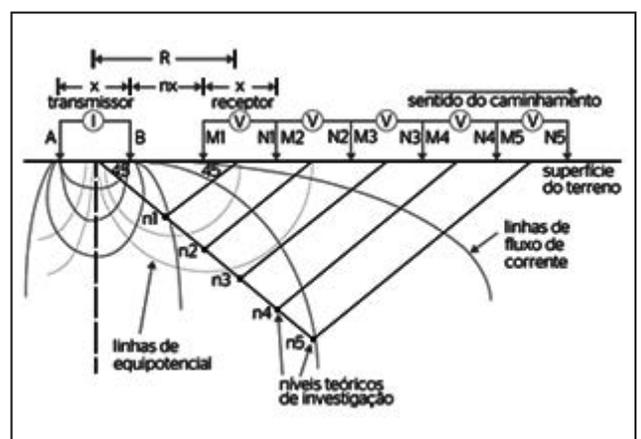


Figura 4. Esquema ilustrativo do arranjo Dipolo-Dipolo.

Potencial Espontâneo (SP)

Uma das mais antigas metodologias geofísicas (Medeiros e Lima, 1999), o método de potencial espontâneo (SP), consiste na medida da diferença de potencial (ddp) natural promovida pela presença de determinados contextos geológicos em subsuperfície. Essas medidas são obtidas a partir da introdução de dois elétrodos regularmente espaçados no terreno (Gallas, 2005).

A origem do potencial espontâneo está associada a fenômenos eletroquímicos, termo-elétricos e eletro-cinéticos, sendo a percolação de água o agente principal na geração de SP (Gallas, 2005). No contexto da aplicação geotécnica direcionada a ocorrência de *piping*, as anomalias de potencial espontâneo estão relacionadas ao fenômeno eletro-cinético. A explicação sobre a origem de SP a partir do referido fenômeno está relacionada ao conceito de Potencial de fluxo.

O Potencial de fluxo ocorre devido à presença e fluxo do fluido pelo corpo da barragem conhecido como eletro-cinese (Figura 5b). Esse fenômeno está associado à formação de uma dupla camada de cargas elétricas entre as paredes dos poros, ou entre as paredes dos condutos de erosão por *piping*, conhecida como dupla camada de Helmholtz (Medeiros e Lima, 1999). Essa dupla camada elétrica se forma por não haver um balanceamento elétrico entre a parte seca, contendo cargas negativas e o fluido em movimento, contendo cargas positivas. O fluido em movimento gera uma corrente elétrica que, por sua vez, faz surgir uma diferença de potencial (Figura 5) (Gallas, 2005).

A aquisição de dados SP é relativamente simples e tem um baixo custo envolvido. A técnica dos potenciais, ou de base fixa, é a mais utilizada em coleta de dados. Consiste na medida sucessiva de ddp ao longo de uma linha com o uso de um milivoltímetro conectado a dois elétrodos de medida regularmente espaçados, sendo um fixo, e um móvel posicionado em pontos preestabelecidos ao longo da malha de levantamento (Figura 5).

Cabe destacar também os cuidados necessários para se evitar fontes de ruídos. Ruídos que podem ser originados de fontes naturais ou mesmo artificiais como topografia, atividade antrópica, correntes telúricas e a polarização de elétrodo. Após a etapa de processamento são gerados os perfis de SP, com os quais, na maioria das vezes, é possível realizar interpretações de caráter qualitativo. A interpretação quantitativa, por vezes, torna-se inviável devido a ruídos ou mesmo pela insuficiente quantidade de dados.

Ground Penetrating Radar (GPR)

No estudo de geotecnia de barragens, no qual há a necessidade de realizar investigações de pouca profundidade da subsuperfície com alta resolução, a técnica GPR adquire grande relevância. O GPR (Ground Penetrating Radar) é uma técnica baseada na propagação e reflexão de ondas eletromagnéticas de rádio em frequências muito altas (normalmente entre 10 e 1000 MHz). Esta técnica é utilizada para localizar estruturas e feições geológicas rasas em subsuperfície (Davis e Annan, 1989).

A citada técnica permite a discriminação detalhada das camadas de solo com alta precisão. Considerando investigações de feições geológicas rasas em terrenos predominantemente arenosos, o levantamento GPR possui resultados satisfatórios, sobretudo quando realizado através do arranjo em Perfilagem de Reflexão - forma de coleta dos dados na qual o transmissor e a antena são mantidos a uma pequena separação fixa (Porsani, 1999).

Na aquisição dos dados, a fonte geradora produz pulsos de curta duração e alta voltagem, que é aplicado pela antena transmissora. A antena transmissora emite a onda eletromagnética para o subsolo e parte da onda é refletida na ocorrência de contraste de propriedades físicas (Figura 6). A antena receptora detecta este sinal refletido, que é amostrado, digitalizado e armazenado. O sinal detectado é gravado como a amplitude do sinal em função do seu tempo de percurso, que é o tempo que a onda eletromagnética leva desde a saída da antena transmissora até ser detectada na antena receptora. O dado gravado é posteriormente processado e visualizado na unidade central de processamento (Reynolds, 2011).

As linhas de GPR adquiridas em campo (radargramas) são posteriormente processadas através de softwares específicos como forma de corrigir o posicionamento dos refletores no tempo e no espaço, bem como para eliminar ruídos e melhorar a resolução das seções de radargrama. Após o processamento ocorrerá a interpretação dos dados, etapa na qual haverá a identificação dos radarfácies e inferências quanto a possíveis correlações com aspectos geológicos, estruturais e hidrológicos.

As metodologias supracitadas oferecem contribuições importantes para o presente trabalho sobretudo quando utilizadas em conjunto com outras técnicas, como é o caso dos Métodos Elétricos. Cabe destacar também o benefício quanto à relação custo/benefício, e a praticidade durante a coleta dos dados, pois com elas é possível fazer a leitura do solo de forma contínua em um tempo relativamente reduzido.

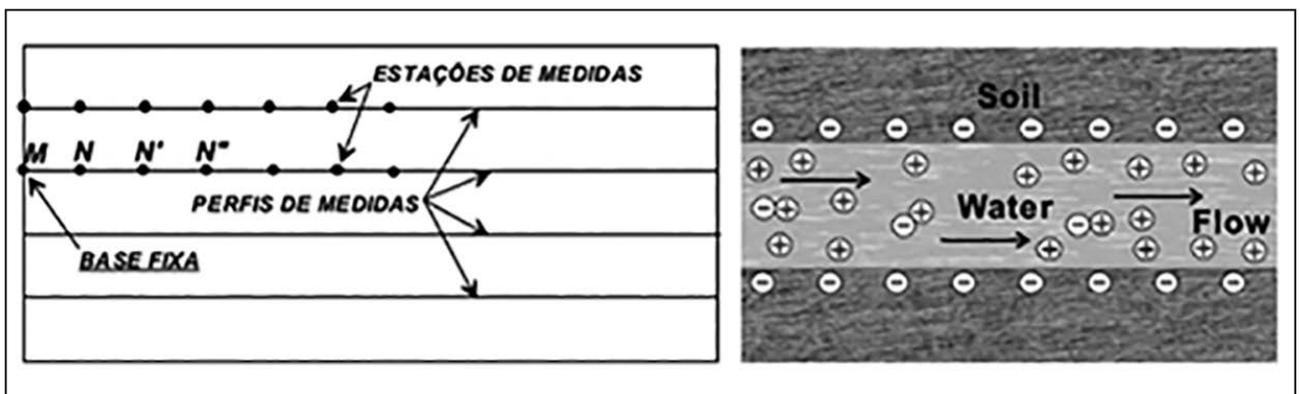


Figura 5. a) Esquema de campo da Técnica dos Potenciais. b) Contexto típico de potencial espontâneo.

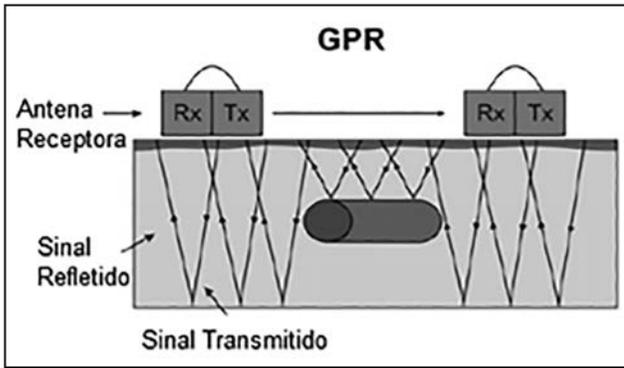


Figura 6. Esquema representativo do levantamento de GPR (Ground Penetrating Radar).

Tomografia de Sísmica de Refração (SRT)

A refração consiste no fenômeno associado à mudança de direção e velocidade de uma onda quando passa de um meio menos denso para um meio mais denso. Sísmica de refração consiste no método de investigação das propriedades físicas do meio geológico através da medida, processamento e interpretação do tempo de chegada da onda sísmica refratada em subsuperfície (Cardarelli, 2002).

Para que a refração ocorra, é necessário que a velocidade da onda sísmica, na camada 2, seja maior que a velocidade da camada 1 (Figura 7 a). A sísmica de refração utiliza os tempos de trânsito das primeiras chegadas nos receptores posicionados a partir de uma certa distância crítica da fonte de energia. Essa pode ser observada através do gráfico (Figura 7 b) que relaciona a distância offset (fonte - receptor) com o tempo de percurso da onda, no qual percebe-se que após o $X_{\text{crítico}}$ a onda refratada

passa à frente da onda direta que viaja com velocidade do meio V_1 .

Para a aquisição dos dados é necessário estabelecer um planejamento no qual deve-se atentar para i) dimensionar o alvo ou região a ser investigada; ii) observar a profundidade de investigação requerida, sendo que a capacidade do método é estimada em $1/5$ do comprimento da linha de investigação; iii) estimar a quantidade adequada de canais para garantir uma boa resolução horizontal (Cardarelli, 2002). O arranjo de campo mais comum em sísmica de refração é localizar os offsets de tiro em uma linha paralela ao posicionamento dos geofones e garantir que a fonte seja disposta a uma distância aproximada de metade do intervalo entre os geofones (Figura 8).

Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW)

A análise multicanal de ondas de superfície consiste em um método de investigação da subsuperfície baseada na análise espectral de ondas de superfície com baixas frequências (1 - 30Hz) e possui profundidade de investigação em torno de 30m (Park et al., 2007); estas ondas propagam-se ao longo de uma superfície livre ou ao longo de uma interface entre dois meios de natureza diferentes. Existem três tipos de ondas de superfície, a saber: Ondas Rayleigh, Love e Stonely, sendo que as ondas comumente utilizadas são as ondas Rayleigh devido à facilidade no processo de geração de ondas e aquisição de dados (Eikmeier, 2014).

O arranjo de aquisição dos dados MASW se destaca pela simplicidade. Nele temos a fonte e os geofones dispostos linearmente, sendo que o espaçamento pode ser constante ou não (Figura 9). A profundidade de investigação alcançada depende fundamentalmente da frequência gerada pela fonte sísmica, sendo que fontes de frequências mais baixas tendem a alcançar profundidades mais baixas (Eikmeier, 2014).

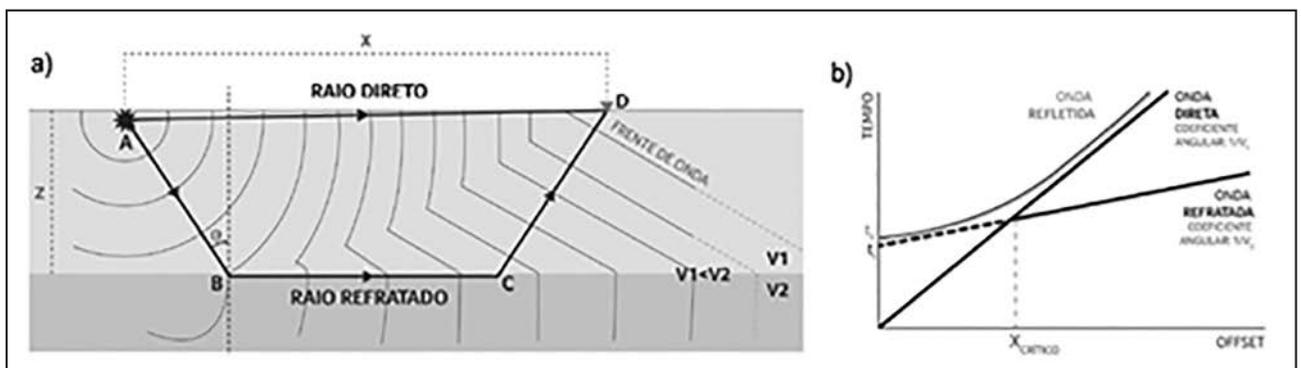


Figura 7. a) Esquema representativo do fenômeno da sísmica de refração considerando um modelo de duas camadas. b) Gráfico que relaciona o tempo de percurso das ondas sísmicas com a distância da fonte ao receptor.

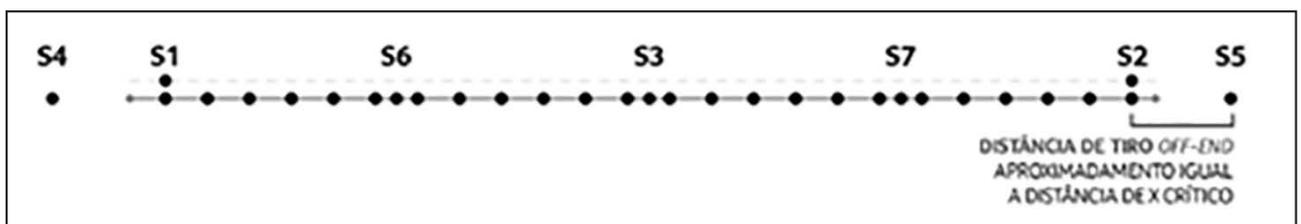


Figura 8. Arranjo comumente aplicado em sísmica de refração.

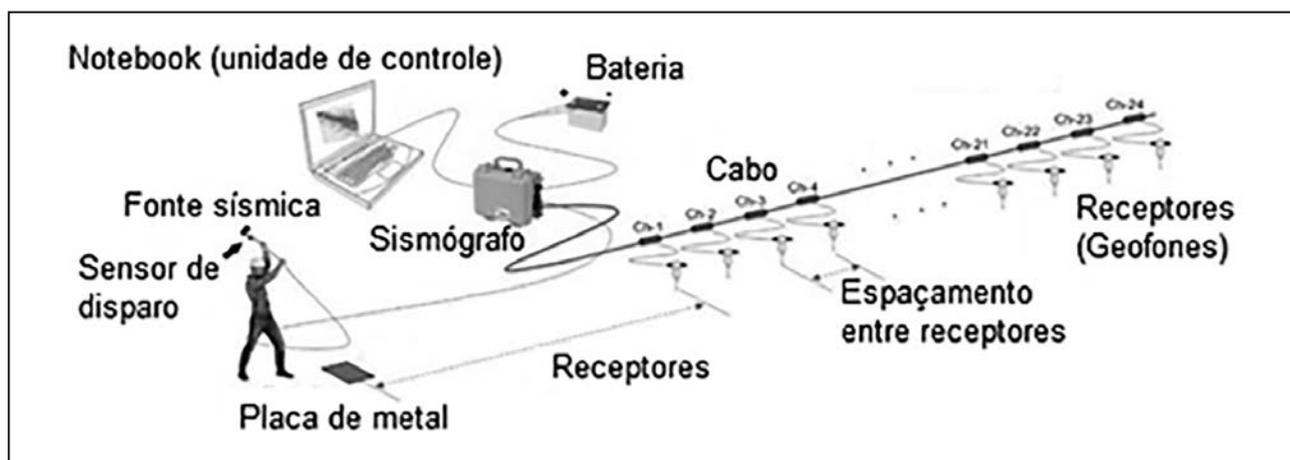


Figura 9. Esquema representativo do levantamento de MASW.

A partir da aquisição dos dados segue a etapa do seu processamento, na qual se obtém um modelo unidimensional da distribuição da velocidade ao longo do perfil analisado para cada ensaio realizado. A construção do modelo bidimensional pode ser realizada mediante várias sondagens ao longo de uma linha, seguido da integração dos resultados para gerar uma seção de velocidade.

No contexto geotécnico dos *pipings* o uso do método MASW isoladamente apresenta a desvantagem de não oferecer uma resolução capaz de delimitar o problema de forma eficaz.

Método Gravimétrico

O método gravimétrico é um método de potencial natural que faz a investigação das camadas geológicas em subsuperfície baseada na variação do campo gravitacional medido na superfície (Silva Junior et al., 2006). Os princípios do método estão fundamentados na Lei da Gravitação Universal, sendo que as anomalias gravimétricas estão associadas ao contraste de densidade aparente existente entre um corpo de rocha e sua vizinhança (Figura 10) (Kearey et al., 2009).

Em um contexto geológico local, como, por exemplo, de avaliações em estruturas resultantes de processos erosivos em barragens é necessário o uso da microgravidade. A técnica de microgravidade realiza medidas de variações do campo gravitacional terrestre em escala de detalhe, ou seja, com curtos intervalos de amostragem, para delimitar anomalias ao longo da barragem.

A coleta de dados é realizada através de estações dispostas espacialmente ao longo da área a ser investigada. Faz-se necessário o uso de uma estação base para a detecção dos valores absolutos de gravidade local para uma possível comparação com os resultados do levantamento (Kearey et al., 2009). A distribuição das estações na área investigada deve estar relacionada com a localização do possível alvo, sendo que a densidade das estações deve ser maior onde o campo de gravidade muda mais rapidamente.

Esta ferramenta possibilita investigar estruturas de barragens danificadas por erosões internas como, por exemplo, *piping*. As cavidades originadas desses danos causam pequenas anomalias de microgravidade (Butler, 1984). Cabe destacar como desvantagem a constante presença de ruídos que, por vezes, interfere na identificação das reduzidas amplitudes oriundas do problema em questão. O correto procedimento de aquisição e processamento colaboram decisivamente para a superação desta desvantagem.

Método de Resistividade Capacitivamente Acoplada (CCR)

A resistividade capacitivamente acoplada (ou, Capacitively Coupled Resistivity - CCR) consiste em um método geolétrico relativamente novo que se baseia na leitura da resistividade dos corpos em subsuperfície. O diferencial em relação aos métodos de eletrorresistividade tradicional está no uso da tecnologia de aquisição dos dados (Coker, 2018).

A aquisição dos dados ocorre por meio de uma corrente alternada de baixa frequência (16kHz) que provoca um fluxo de corrente através do acoplamento eletromagnético indutivo (Geometrics, 2021). Dessa forma não há a necessidade do uso de elétrodos e cabos, o que reduz consideravelmente o tempo de execução e a quantidade de mão de obra necessária para a aquisição.

O método permite uma configuração de transmissor e receptor através do arranjo de dipolo-dipolo, sendo que, durante o levantamento o conjunto de instrumentos é deslocado na direção da linha estabelecida por apenas uma pessoa ou por um automóvel (Figura 11) (Coker, 2018).

A desvantagem em relação aos métodos tradicionais de eletrorresistividade está em sua profundidade de investigação. Como a frequência de injeção da corrente elétrica gerada é relativamente alta a penetração dessa corrente será menor do que nos métodos tradicionais de resistividade.

CONCLUSÕES

Diante do que foi apresentado, compreendemos as potencialidades da geofísica na avaliação geotécnica de barragens, seja na identificação de problemas na estrutura - por exemplo, erosões internas -, seja no monitoramento, de forma a intervir antecipadamente na ocorrência destes problemas. Nesse sentido, a avaliação geofísica apresenta bons resultados quando a escolha dos métodos é compatível com o problema geológico em questão. A capacidade de resolução e a profundidade de investigação dos métodos utilizados nos estudos apresentados, permitiu identificar com precisão anomalias características de erosões internas e fluxo de fluido no corpo das barragens investigadas.

A partir dos estudos apresentados, percebemos que a aplicação de diferentes metodologias geofísica melhora o entendimento sobre os materiais em subsuperfície. A análise do mesmo problema

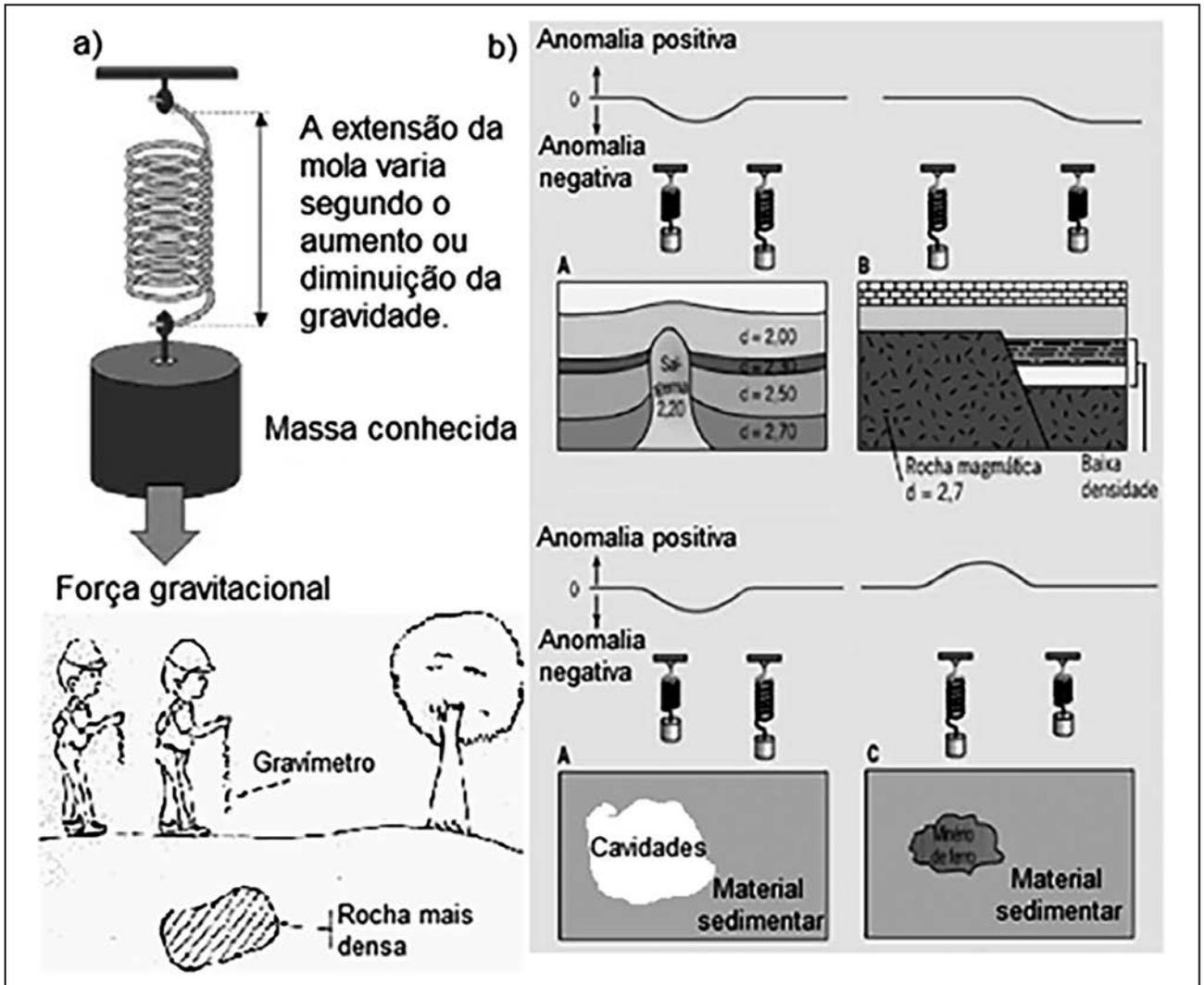


Figura 10. a) Esquema simplificado de funcionamento de um gravímetro. b) Anomalias de gravidade em diferentes contextos geológicos.

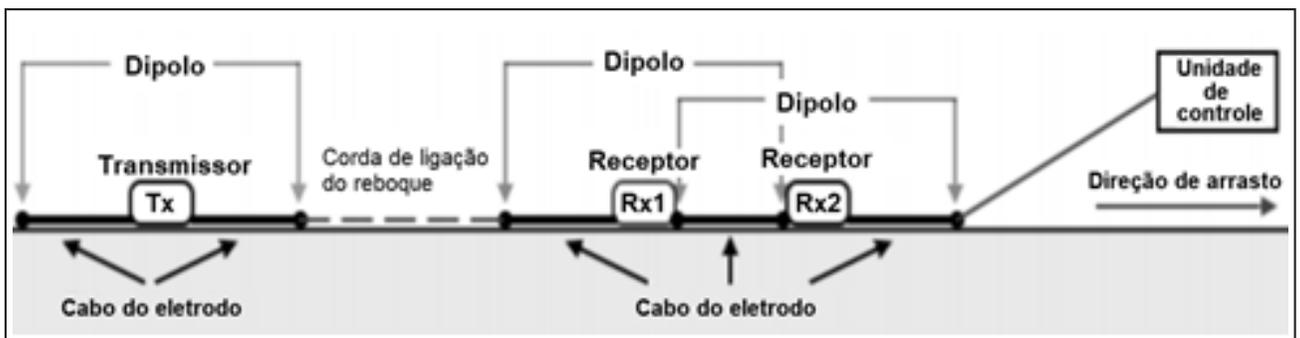


Figura 11. Esquema de um arranjo dipolo-dipolo no método CCR.

sobre ótica de metodologias que utilizam parâmetros físicos diferentes possibilita uma interpretação geológico-estrutural mais robusta, evitando possíveis ambiguidades.

O método de Potencial Espontâneo (SP) tem sido bastante utilizado em estudos envolvendo barragens. Os resultados adquiridos nas pesquisas citadas apresentam uma boa resposta na

avaliação estrutural em barragens, sobretudo na identificação de erosões internas e rotas de *piping*. Este método permite uma avaliação qualitativa e quantitativa (em alguns casos), tanto lateralmente quanto em profundidade. Cabe destacar que o método apresentou limitação no que se refere à profundidade de investigação.

A Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT) permite obter um panorama dos valores de resistividade predominantes nos domínios de interesse ao longo da barragem. O método se mostrou eficiente na caracterização hidrogeológica da área em estudo por distinguir com segurança as feições anômalas de resistividade, típicas de saturação. Em boa parte das pesquisas a ERT apresentou uma correspondência satisfatória com outras metodologias.

Em relação aos métodos sísmicos cabe destaque a Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW), um método que tem sido utilizado de forma complementar em estudos envolvendo integridade de barragens. Nesses estudos a técnica possibilitou classificar os estratos em profundidade, inclusive com sensibilidade capaz de fazer distinção entre solos adjacentes com maior rigidez e solos com menor rigidez. O método se mostrou útil também na detecção de tubos de drenagem, linhas de esgoto cruzado e um dique em subsuperfície.

O método Resistividade Capacitivamente Acoplada (CCR) tem obtido sucesso em problemas envolvendo *piping*. Uma vez que as barragens de aterro possuem uma geologia conhecida, as erosões internas e o *piping* surgem na imagem como anomalias de condutividade. Os estudos constataram também que o CCR apresenta bons resultados quando o grau de saturação do solo é alto e a profundidade de interesse é rasa. Por essa razão o método CCR tem sido utilizado em conjunto com outros métodos, a exemplo do MASW.

As publicações analisadas, com utilização conjunta de vários métodos, foram desenvolvidas na última década e a partir delas depreendemos que existe uma tendência evidente na área

de geotecnia de barragens em fazer uso de métodos geofísicos. O aprimoramento das práticas de campo e as facilidades de acesso aos softwares de processamento, aliado à favorável relação custo/benefício tem motivado o uso desses métodos, sobretudo em ambientes corporativos.

Para além da praticidade associada à coleta dos dados, temos que a geofísica apresenta um repertório diversificado de metodologias, analisando a problemática dos *pipings* a partir da distribuição de diversas propriedades físicas e possibilitando correlações que, por sua vez, tornam o diagnóstico cada vez mais confiável.

Em suma, entendemos que os desafios para o uso dos métodos geofísicos em problemas específicos da geotecnia, como o *piping*, são: i) Compreender os princípios físicos de funcionamento do aparelho; ii) Compreender o contexto geológico no qual está inserido o problema; iii) Utilizar metodologias que permitam delimitar o problema através dos contrastes de propriedade física que sejam sensíveis ao problema em questão; iv) Combinar adequadamente as metodologias, atentando-se para o critério de validação e complementaridade das informações obtidas, para além da natureza do problema.

A geofísica consiste na principal metodologia de uso alternativo em geotecnia para a caracterização de materiais geológicos, tendo aplicação em diversas circunstâncias como, por exemplo, em estudos preliminares para implantação de barragens, em monitoramentos ou mesmo em análises técnicas periódicas. Caso a técnica seja bem aplicada será uma vantagem para a construção e a exploração de barragens, evitando problemas de grandes proporções.

TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

- ANTOINE, R., FAUCHARD, C., FARGIER, Y., & DURAND, E. (2015). Detection of Leakage Areas in an Earth Embankment from GPR Measurements and Permeability Logging. *International Journal of Geophysics*, 2015, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2015/610172>
- BIÈVRE, G., LACROIX, P., OXARANGO, L., GOUTALAND, D., MONNOT, G., & FARGIER, Y. (2017). Integration of geotechnical and geophysical techniques for the characterization of a small earth-filled canal dyke and the localization of water leakage. *Journal of Applied Geophysics*, 139, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.02.002>
- BOLTON SEED, H., & DUNCAN, J. M. (1987). The failure of Teton Dam. *Engineering Geology*, 24(1-4), 173-205. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(87\)90060-3](https://doi.org/10.1016/0013-7952(87)90060-3)
- BOVI, R. C., MOREIRA, C. A., ROSOLEN, V. S., ROSA, F. T. G., FURLAN, L. M., & HELENE, L. P. I. (2020). Piping process: Genesis and network characterization through a pedological and geophysical approach. *Geoderma*, 361, 114101. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114101>
- BRAGA, A. C. O. (2016). Geofísica Aplicada: métodos geoeletrico em hidrologia. São Paulo: Editora Oficina de Textos.
- BRASIL. (2002). Manual de segurança e inspeção de barragens. Ministério da Integração Nacional.
- BUTLER, D. K. (1984). Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities. *Geophysics*, 49(7), 1084-1096. <https://doi.org/10.1190/1.1441723>
- CAMARERO, P. L., MOREIRA, C. A., & PEREIRA, H. G. (2019). Analysis of the Physical Integrity of Earth Dams from Electrical Resistivity Tomography (ERT) in Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 176(12), 5363-5375. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02271-8>

- CARDARELLI, E. (2002).
Ray tracing in elliptical anisotropic media using the linear traveltime interpolation (LTI) method applied to traveltime seismic tomography.
Geophysical Prospecting, 50(1), 55-72. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2002.00297.x>
- CARDARELLI, E., CERCATO, M., DE DONNO, G., & DI FILIPPO, G. (2014).
Detection and imaging of piping sinkholes by integrated geophysical methods.
Near Surface Geophysics, 12(3), 439-450. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013051>
- CHO, I.-K., & YEOM, J.-Y. (2007).
Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam.
Geophysics, 72(2), G31-G38. <https://doi.org/10.1190/1.2435200>
- COKER, F. (2018).
Geophysical Assessment of Subsurface Soil Conditions Using Capacitively Coupled Resistivity.
Master of Science in Civil Engineering. University of Oklahoma.
- DAVIS, J. L., & ANNAN, A. P. (1989).
Ground Penetrating Radar For High Resolution Mapping Of Soil And Rock Stratigraphy.
Geophysical Prospecting, 37(5), 531-551. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>
- DUTTA, N. P. (1984).
Seismic refraction method to study the foundation rock of a dam.
Geophysical Prospecting, 32(6), 1103-1110. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1984.tb00757.x>
- EIKMEIER, C. (2014).
Emprego do método MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) em área urbana: um estudo na cidade de São Paulo.
Simpósio de Iniciação Científica Do IAG-USP, 132. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29710.36161>
- EZERSKY, M., BRUNER, I., KEYDAR, S., TRACHTMAN, P., & RYBAKOV, M. (2006).
Integrated study of the sinkhole development site on the Western shores of the Dead Sea using geophysical methods.
Near Surface Geophysics, 4(5), 335-343. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2006007>
- FONTENELLE, M., ALEXANDRE, M., & YAGO, M. (2017).
Avaliações de risco em barragens: estudo de caso da barragem Malcozinhado no nordeste brasileiro.
Revista Eletrônica de Engenharia Civil, 14(1), 22.
- FOSTER, M., FELL, R., & SPANNAGLE, M. (1998)
Analysis of embankment dam incidents.
UNICIV Report N° R-374 - UNSW, Sydney, Austrália.
- FOSTER, M. & FELL, R. (1999)
A framework for estimating the probability of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods.
UNICIV Report No R-377, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales. ISBN 85841 344 2, Sydney, Austrália.
- GALLAS, J. D. F. (2005).
O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais.
Revista Brasileira de Geofísica, 23(2), 133-144. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000200003>
- GEOMETRICS. (2021).
OhmMapper Capacitively Coupled Resistivity System.
Alphageofísica. <http://www.geometrics.com/OhmMapper/ohmmmap.html>
- HENRIET, P., SCHITTEKAT, J., & HELDENS, P. (1983).
Borehole Seismic Profiling and Tube Wave Applications in a Dam Site Investigation.
Geophysical Prospecting, 31(1), 72-86. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01042.x>
- JOHANSSON, S., & DAHLIN, T. (1996).
Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements.
European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 1(3), 229-247.
- KEAREY, P., BROOKS, M., & HILL, I. (2009).
Geofísica de exploração. (3°).
Oficina de Textos.
- KIM, H.-J., PARK, J.-M., & SHIN, J.-H. (2019).
Flow behaviour and piping potential at the soil-structure interface.
Géotechnique, 69(1), 79-84. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.T.020>
- KIRSCH, R., & YARAMANCI, U. (2006).
Geophysical characterisation of aquifers.
In Groundwater geophysics: A tool for hydrogeology (pp. 439-457). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-29387-6_15

- LADEIRA, J.E.R. (2007)
Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: o caso UHE-São Simão.
Dissertação (mestrado) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- LEE, B.; OH, S.; YI, M. (2020)
Mapping of leakage paths in damaged embankment using modified resistivity array method,
Engineering Geology, Volume 266, 105469, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105469>.
- LOKE, M. (2016).
Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys.
Geotomo Software Company.
- LUO, D., GOODIN, D. G., & CALDAS, M. M. (2019).
Spatial-Temporal Analysis of Land Cover Change at the Bento Rodrigues Dam Disaster Area Using Machine Learning Techniques.
Remote Sensing, 11(21), 2548. <https://doi.org/10.3390/rs11212548>
- MARTÍNEZ-MORENO, F. J., GALINDO-ZALDÍVAR, J., PEDRERA, A., GONZÁLEZ-CASTILLO, L., RUANO, P., CALAFORRA, J. M., & GUIRADO, E. (2015).
Detecting gypsum caves with microgravity and ERT under soil water content variations (Sorbas, SE Spain).
Engineering Geology, 193, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.011>
- MASI, M., FERDOS, F., LOSITO, G., & SOLARI, L. (2020).
Monitoring of internal erosion processes by time-lapse electrical resistivity tomography.
Journal of Hydrology, 589, 125340. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125340>
- MEDEIROS, W. E., & LIMA, O. A. L. (1999).
Origem do potencial elétrico espontâneo em rochas cristalinas fraturadas e sua utilização na locação de poços.
Revista Brasileira de Geofísica, 17(2-3), 113-115. <https://doi.org/10.1590/s0102-261x1999000200001>
- MUGUIO, M., FAGGION, P., VEIGA, L., NADAL, C., CRUZ, W., SOARES, M., & FIGUEIRA, I. (2017).
Avaliação Da Anomalia Da Gravidade Na Região Do Barramento Da Usina Hidrelétrica De Mauá.
Boletim Paranaense de Geociências, 73(1), 55-62. <https://doi.org/10.5380/geo.v73i1.49105>
- NETTO, L. G., FILHO, W. M., PAES, R. A. S., & COURA, M. M. (2018).
Análise de Fluxo No Interior de Barragens de Terra A Partir do Método do Potencial Espontâneo (SP).
16º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 1-7.
- Ogilvy, A. A., Ayed, M. A., & Bogoslovsky, V. A. (1969).
Geophysical Studies Of Water Leakages From Reservoirs.
Geophysical Prospecting, 17(1), 36-62. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1969.tb02071.x>
- OH, S., & SUN, C.-G. (2008).
Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam.
Environmental Geology, 54(1), 31-42. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0790-y>
- PANTHULU, T. V., KRISHNAIAH, C., & SHIRKE, J. M. (2001).
Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods.
Engineering Geology, 59(3-4), 281-295. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00082-X)
- PARK, C. B., MILLER, R. D., XIA, J., & IVANOV, J. (2007).
Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods.
The Leading Edge, 26(1), 60-64. <https://doi.org/10.1190/1.2431832>
- PERINI, D. S. (2019)
Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra.
Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.
- PORSANI, J. L. (1999).
Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP.
Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- PUEYO ANCHUELA, Ó., FRONGIA, P., DI GREGORIO, F., CASAS SAINZ, A. M., & POCOVÍ JUAN, A. (2018).
Internal characterization of embankment dams using ground penetrating radar (GPR) and thermographic analysis: A case study of the Medau Zirimilis Dam (Sardinia, Italy).
Engineering Geology, 237, 129-139. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.02.015>
- RAHIMI, S., MOODY, T., WOOD, C., KOUCHAKI, B. M., BARRY, M., TRAN, K., & KING, C. (2019).
Mapping Subsurface Conditions and Detecting Seepage Channels for an Embankment Dam Using Geophysical Methods: A Case Study of the Kinion Lake Dam.
Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 24(3), 373-386. <https://doi.org/10.2113/JEEG24.3.373>

- REYNOLDS, J. (2011).
An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.
Wiley BlackWell.
- RICHARDS, K. S., & REDDY, K. R. (2007).
Critical appraisal of piping phenomena in earth dams.
Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66(4), 381-402. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0095-0>
- SCHIMSCHAL, U. (1981).
The relationship of geophysical measurements to hydraulic conductivity at the brantley damsite, New Mexico.
Geoexploration, 19(2), 115-125. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(81\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0016-7142(81)90024-7)
- SENTENAC, P., BENES, V., & KEENAN, H. (2018).
Reservoir assessment using non-invasive geophysical techniques.
Environmental Earth Sciences, 77(7), 293. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7463-x>
- SHIN, S.; PARK, S.; KIM, J. (2019)
Time-lapse electrical resistivity tomography characterization for piping detection in earthen dam model of a sandbox,
Journal of Applied Geophysics, V. 170, 103834, ISSN 0926-9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103834>.
- SJÖDAHL, P., DAHLIN, T., & JOHANSSON, S. (2005).
Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden.
Environmental Geology, 49(2), 267-273. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0084-1>
- SJÖDAHL, P., DAHLIN, T., JOHANSSON, S., & LOKE, M. H. (2008).
Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam.
Journal of Applied Geophysics, 65(3-4), 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.07.003>
- WANG, F., OKEKE, A. C.-U., KOGURE, T., SAKAI, T., & HAYASHI, H. (2018).
Assessing the internal structure of landslide dams subject to possible piping erosion by means of microtremor chain array and self-potential surveys.
Engineering Geology, 234, 11-26. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.12.023>
- XU, X., ZENG, Q., LI, D., WU, J., WU, X., & SHEN, J. (2010).
GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams.
Engineering Geology, 111(1-4), 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.001>
- ZHU, W., JIA, S., DEVINENI, N., LV, A., & LALL, U. (2019).
Evaluating China's Water Security for Food Production: The Role of Rainfall and Irrigation.
Geophysical Research Letters, 46(20), 11155-11166. <https://doi.org/10.1029/2019GL083226>



Utilización de un sistema de medición del riesgo de caída de rocas en fase operativa en el Camino de Altas Cumbres, Sierra Chica, Córdoba, Argentina

Use of rock fall hazard measurement systems in the operational phase of the Altas Cumbres Road, Sierra Chica, Cordoba, Argentina

Quintana Crespo, Enrique F. ¹ ✉ - Navarro, María Alejandra ²

Recibido: 12 de diciembre de 2021 • Aceptado: 09 de junio de 2022

Resumen

El presente trabajo muestra las conclusiones de la segunda etapa de un proyecto de investigación desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba, cuyo objetivo consiste en la aplicación de modelos geotécnicos para el análisis de riesgo de caída de rocas en obras viales de montaña.

La primera parte del proyecto se dedicó al establecimiento de una “línea base” en la RP34 – Camino de Altas Cumbres – sector de cruce del cordón de Sierra Chica, en la Provincia de Córdoba, mediante el Sistema de Calificación de Riesgo de Caída de Rocas modificado (RHRS - Rockfall Hazard Rating System) realizada al tiempo cero, es decir a escasos meses de la liberación al tránsito, y permitió contar con la información básica de la situación de los taludes.

A poco más de un año de operación del camino, se han registrado caídas de rocas en diversos taludes que determinaron un nuevo esquema de riesgo y permitieron observar el funcionamiento del sistema implementado.

Los resultados obtenidos permitieron detectar aquellas variables que sufrieron modificaciones y afectaron los índices de riesgo y separarlas de otras cuyos cambios o incrementos se mantuvieron bajo un umbral que no causó modificaciones en la categoría del riesgo.

De ese modo se definieron las variables que considera el sistema que deben ser monitoreadas en detalle en cada talud para determinar acciones a implementar que eviten el aumento en la categoría y en consecuencia el valor de riesgo.

Palabras clave: Caída de rocas, Estabilidad, Macizos Rocosos, Riesgo.

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

✉ equintcr@yahoo.com

2. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Córdoba. Córdoba, Argentina.

Abstract

This paper shows the conclusions of the second stage of a research project developed in the Faculty of Engineering of the Catholic University of Córdoba, whose objective is the application of geotechnical models for the analysis of risk of falling rocks in mountains routes.

The first part of the project was dedicated to the establishment of a "baseline" in the RP34 – Camino de Altas Cumbres – at Sierra Chica, Córdoba, through the modified Rockfall Risk Rating System. (RHRS - Rockfall Hazard Rating System) carried out at time zero, that is, a few months after release to traffic, and allowed for basic information on the situation of the slopes.

After more than a year the road has been in operation, rock falls have been recorded on various slopes that determined a new risk scheme and allowed the functioning of the implemented system to be observed.

The results obtained made it possible to detect those variables that underwent changes and affected the risk indices, and to separate them from others whose changes or increases remained below a threshold that did not cause changes in the risk category.

In this way, the variables considered by the system that must be monitored in detail on each slope were defined to determine actions to be implemented to avoid an increase in the category and, consequently, the risk value.

Keywords: Risk, Rockfall, Rock Mass, Stability.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo reúne las conclusiones de la segunda etapa de un proyecto de investigación desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba titulado: “Aplicación de modelos geotécnicos para el análisis de riesgo en taludes rocosos para obra viales”.

La primera etapa del proyecto consistió en la obtención de una “línea base” de riesgo de caída de rocas en la Ruta Provincial 34 (Camino de las Altas Cumbres), (Figura 1) en un tramo de 16,6 km de longitud, que comunica al camino de cintura C45, a la altura de la localidad de Falda del Cañete, con las rutas 14 y E96, en el Valle de Punilla, (Quintana Crespo y Navarro, 2020).

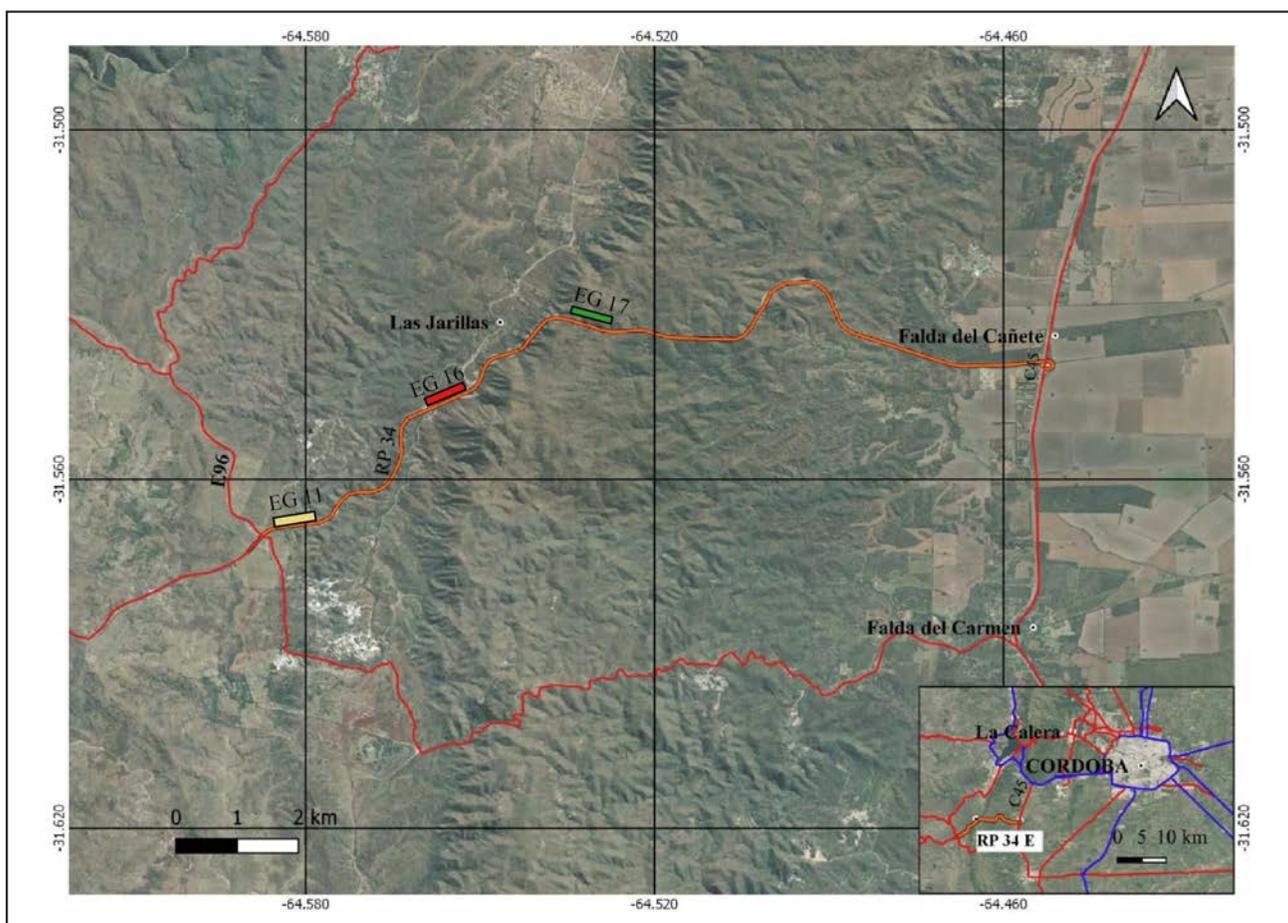


Figura 1. Ubicación del tramo en estudio (RP34 Este: Intersección C45 - Intersección E96) y taludes referidos en el trabajo (EG 11, EG 16 y EG 17). Sobre imagen de Google Earth.

Para ello, se realizó un relevamiento geológico-geotécnico en el momento de la puesta en servicio de la obra, con el fin de determinar la estabilidad resultante de los taludes generados, y se calificaron los macizos rocosos mediante la aplicación del criterio de *Hoek y Brown (1980)*. Previamente se había efectuado la clasificación de los macizos rocosos y la determinación de unidades de mapeo de ingeniería geológica (*Quintana Crespo y Soffietti, 2020*).

El método utilizado tomó como base el “Rockfall Hazard Rating System (RHRS)”, desarrollado por *Pierson et al. (1990)* en el Departamento de Transporte de Oregón (ODOT) y patrocinado por la FHWA (Federal Highway Administration), con una de las modificaciones propuestas por *Budetta (2004)*: la introducción del “Slope Mass Rating” de *Romana (1991)* como método de caracterización de la estabilidad de los taludes rocosos.

En la actualidad los relevamientos de caídas de rocas, así como los deterioros en calzada, pueden ser realizados mediante imágenes de dron, con gran rapidez, facilidad y excelente calidad de imágenes, con lo cual es posible brindarle a la administración de las redes viales, tanto provinciales como nacionales, una actualización de la base de datos original en momentos críticos, tales como la época de lluvia, actividad sísmica, etc. Estas bases de datos deben encontrarse georreferenciadas y formando parte de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para poder recibir los datos y actualizarse automáticamente. Los casos de estudio de *Singh et al. (2018)* son importantes referencias sobre aplicaciones

geotécnicas de SIG, en integración de datos; visualización y análisis; planeamiento y resumen de actividades en sitios específicos; y presentación de datos. *Ansari et al. (2016)* desarrollaron a partir del RHRS, un sistema propio para las redes de caminos de India, con bases de datos raster y vectoriales incorporados en un ambiente SIG. Por su parte *Bouali et al. (2017)* explicitan las múltiples ventajas de la utilización de sensores remotos para la aplicación del RHRS.

A fin de conocer las variaciones ocurridas en la estabilidad de los taludes rocosos de la RP 34, que fueran relevados con motivo del establecimiento de la “línea base”, se llevó a cabo una nueva inspección a 18 meses de la primera, en la que se obtuvieron nuevamente los datos necesarios para la utilización del método RHRS original de *Pierson*: altura de taludes, eficiencia de la cuneta, distancia visual de decisión, ancho de calzada y cuneta; caracterización geológica, tamaño de bloques y/o volumen de desprendimientos, antecedentes de caídas de rocas, condiciones climáticas y aguas subterráneas. También se consideraron las modificaciones propuestas por *Budetta (2004)*: la clasificación geológica basada en el Slope Mass Rating (SMR) de *Romana (1991)*; la estimación cuantitativa de la eficiencia de las cunetas mediante la carta de *Ritchie (1963)*, con actualizaciones de *Fookes y Sweeny (1976)*, y *Whiteside (1986)*.

La Tabla 1 resume las nueve categorías y los puntajes correspondientes, de acuerdo al criterio de clasificación establecido por *Budetta (2004)*.

Tabla 1. Planilla Resumen del Método RHRS modificado.

Categoría	Criterio de Calificación por Puntaje			
	Puntos 3	Puntos 9	Puntos 27	Puntos 81
Altura del Talud	7,5m	15m	22,5m	> 30m
Eficiencia de la Cuneta	Buena: diseñada según modelo de Ritchie (carta de diseño y barreras)	Moderada: diseñada según modelo de Ritchie (carta de diseño)	Limitada: diseño equivocado	Nula
Riesgo medio por vehículo (% del tiempo)	25%	50%	75%	100%
Distancia Visual de Decisión (% del valor de diseño)	Adecuada (100%)	Moderada (80%)	Limitada (60%)	Muy Limitada (40%)
Ancho de Camino	21,5 m	15,5 m	9,50 m	3,5 m
Slope Mass Rating SMR	80	40	27	20
Tamaño de Bloque	0.3 m	0.6 m	0.9 m	1.20 m
Volumen de Bloques	0,026 m ³	0,21 m ³	0,73 m ³	1,74 m ³
Volumen de derrumbe x evento	2,3 m ³	4,6 m ³	6,9 m ³	9,2 m ³
Lluvias anuales y períodos de heladas	H =300 mm Sin heladas	H =600 mm ó Cortos períodos de heladas	H = 900 mm ó Largos períodos de heladas	H = 1200 mm ó Largos períodos de heladas
Antecedentes de caídas de rocas	1 cada 10 años	3 por año	6 por año	9 por año

LINEA BASE DE RIESGO DE CAÍDA DE ROCAS

Los resultados correspondientes a las investigaciones para la obtención de una “línea base” de riesgo de caída de rocas, se expusieron detalladamente en *Quintana Crespo y Navarro (2020)*, y se resumen a continuación:

El tramo analizado de la RP34 E fue inaugurado a fines del año 2019. Cuenta con 16,6 km de longitud total y 26 taludes

rocosos que fueron divididos en 52 secciones homogéneas, cuyas longitudes totalizan 5.169 metros.

La “línea base” para el análisis de riesgo de caída de bloques se determinó en 18 taludes. Los valores RHRS alcanzados son bajos, variando entre un mínimo de 69 y un máximo de 225. (Tabla 2). Por tratarse de un estudio a tiempo cero, no se suma puntaje por la categoría de Frecuencia de Caída de rocas.

Tabla 2: Valores de puntajes obtenidos mediante el método RHRS modificado

Talud	Sección	Tipo Geotécnico	RHRS
12	S1	5.2.2 Gneis masivo	93
	S2-S3-S5	5.2.2 Gneis masivo	147
	S4	5.2.3 Pegmatitas	141
13	S1-S2	5.2.2 Gneis masivo	147
14	S1	5.2.1 Gneis esquistoso	93
	S2	5.2.2 Gneis masivo	93
15	S1-S2	4.2.1 Cataclasitas	153
16	S1	4.2.1 Cataclasitas	225
17	S1-S3	4.1.1 Metatexitas	93
	S2	4.1.1 Metatexitas	111
18	S1-S3	4.1.1 Metatexitas	93
	S2	4.1.1 Metatexitas	87
19	S1-S2-S3-S4-S5-S6	4.1.1 Metatexitas	87
	S7	4.1.1 Metatexitas	93
20	S1-S2-S5-S6	5.2.1 Gneis esquistoso	93
	S3-S4	5.2.2 Gneis masivo	87
21	S1	5.2.2 Gneis masivo	69
	S2-S3-S4-S5	5.2.2 Gneis masivo	141
22	S1-S3-S4-S5-S6	3.2.2 Gneis masivo	84
	S2	3.2.2. Falla	171
23	S1	3.2.2 Gneis masivo	69
	S2-S3-S4-S5-S6-S7-S8	3.2.1 Gneis esquistoso	87
24	S2	3.2.1 Gneis esquistoso	141
	S1	3.2.2 Gneis masivo	94
25	S1	3.2.1 Gneis esquistoso	147
	S2	3.2.2 Gneis masivo	93
26	S1	3.2.1 Gneis esquistoso	100
	S2	3.2.1 Gneis esquistoso	93
30	S1-S2	3.2.1 Gneis esquistoso	69
	S3	3.2.2 Gneis masivo	69
31	S1	3.2.1 Gneis esquistoso	69
	S2	3.2.2 Gneis masivo	69
32	S1	3.2.1 Gneis esquistoso	111

Con las puntuaciones obtenidas “a tiempo cero”, se generó una capa de información, dentro del sistema Qgis.

Se delimitaron las zonas que deben ser regularmente monitoreadas (representadas en color rojo): el TG 4.2.1 (cataclasitas) en los taludes 15 y 16, que presentan los valores de puntuación más elevados (153 - 225 puntos); la zona de falla del talud 22 (171 puntos); los TG 5.2.2 (gneises masivos) en los taludes 12, 13 (147 p.) y TG 3.2.2 en los taludes 21 y 24 (141 p.); y el TG 3.2.1 (gneis esquistoso) en el talud 25 (147p.).

En las zonas representadas en color amarillo pálido, (entre 121 y 173 puntos) con condiciones de estabilidad buena, la conservación de rutina debe incluir la limpieza de bermas, mantenimiento de cunetas de guardia, y eventualmente tareas de despedrado en algunos puntos críticos.

En cuanto a las zonas representadas en verde presentan una situación inicial de las características geométricas y geológicas de los taludes, que permite prever un comportamiento estable en el mediano y largo plazo. (Figura 2).

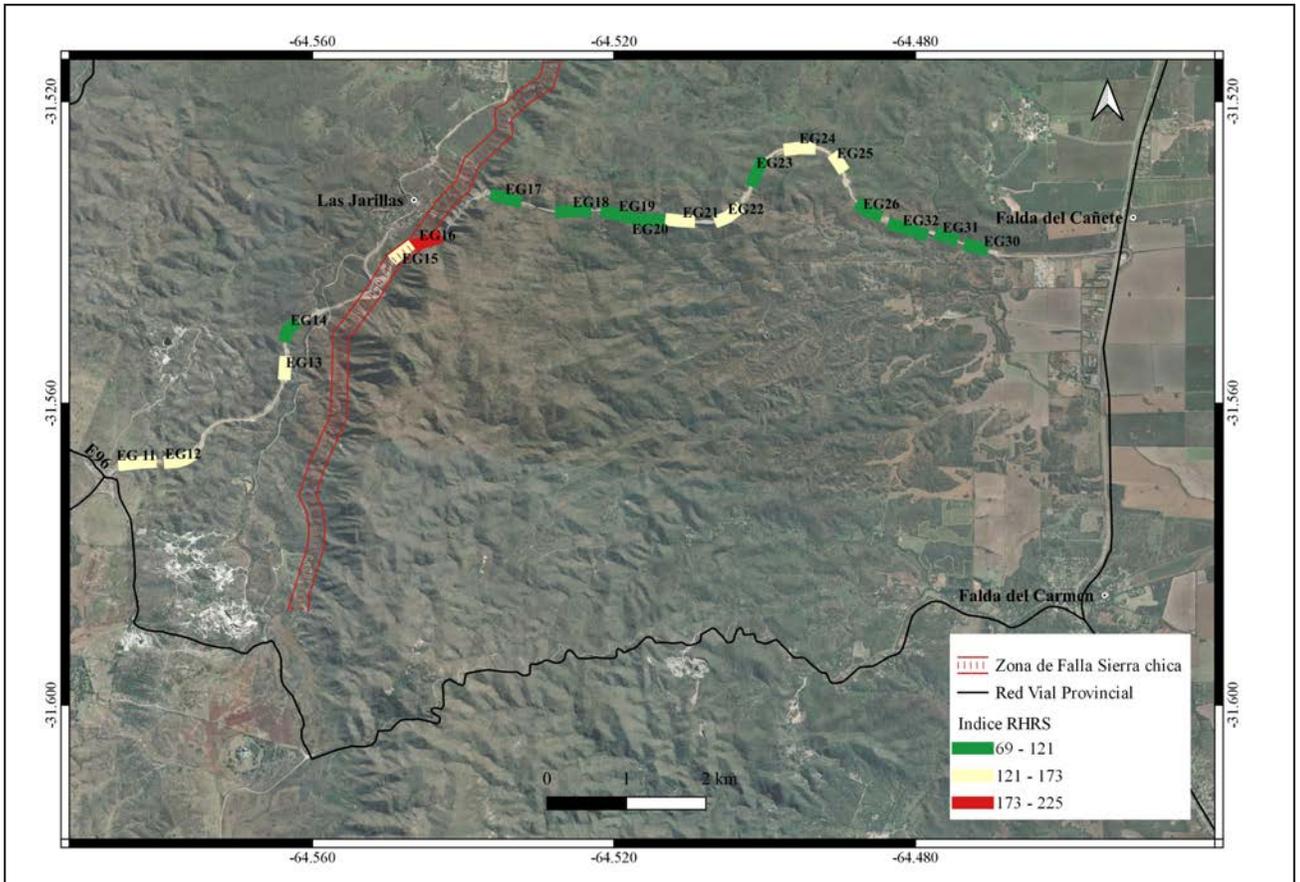


Figura 2. Taludes analizados para línea base de riesgo de caída de rocas. Método RHRS modificado.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ÍNDICE RHRS EN TIEMPO CERO Y EN ETAPA OPERATIVA

Después de un año y seis meses de la definición de la “línea base de riesgo de caída de rocas” en la Ruta Provincial 34 Este (Octubre/2019) se detectaron desprendimientos en 3 taludes: EG11, EG16 y el EG17. A fin de actualizar las bases de datos correspondientes al sistema de medición de riesgo de caída de rocas implementado en la RP 34 Este, se tuvieron en cuenta aquellas variables que sufrieron modificaciones como consecuencia directa de los desprendimientos; y aquellas otras en las que el estudio específico efectuado en los taludes fallados produjo resultados diferentes a los del análisis general del tramo para la obtención de la “línea base”.

El talud EG11 se encuentra conformado por marmoles calcínicos y dolomíticos, que forman parte del basamento cristalino. No fue analizado originalmente debido a su baja altura y a su ubicación alejada del camino, no obstante, con la producción del derrumbe y la consecuente obstaculización del

drenaje al pie del talud, puede generarse el humedecimiento del mismo y el descalce de las partes superiores. (Figura 3).

El talud EG17 fue estudiado en tres sectores: S1 de 100 mts. de longitud, S2 de 27 mts. y S3 de 118 mts., y se obtuvieron valores del índice RHRS modificado, igual a 93, 111 y 93 puntos respectivamente. Los factores que cambian en el caso de la sección S2 es el Riesgo promedio por vehículo (AVR) y el SMR, que toman los siguientes valores: AVR- S1 y S3 = 9 y S2 = 3; esto es debido a que las longitudes de las secciones cambian, siendo muy inferior la correspondiente a la S2; y en cuanto al SMR, presenta un puntaje de 3 para las secciones S1 y S3; y 27 para S2.

En los sectores S1 y S2 se produjeron dos desprendimientos importantes, relacionados con familias de discontinuidades que generan cuñas inestables. En la Figura 4 se puede observar los desprendimientos sobre la ortofotografía obtenida con un dron DJI - Spark 4, desde una altura de vuelo de 50 metros.

A partir de la ortofotografía se obtuvieron las curvas de nivel y el modelo de elevación digital, (Figura 5) a fin de poder establecer la geometría de las zonas deslizadas.



Figura 3. Zona de derrumbe en talud EG11.

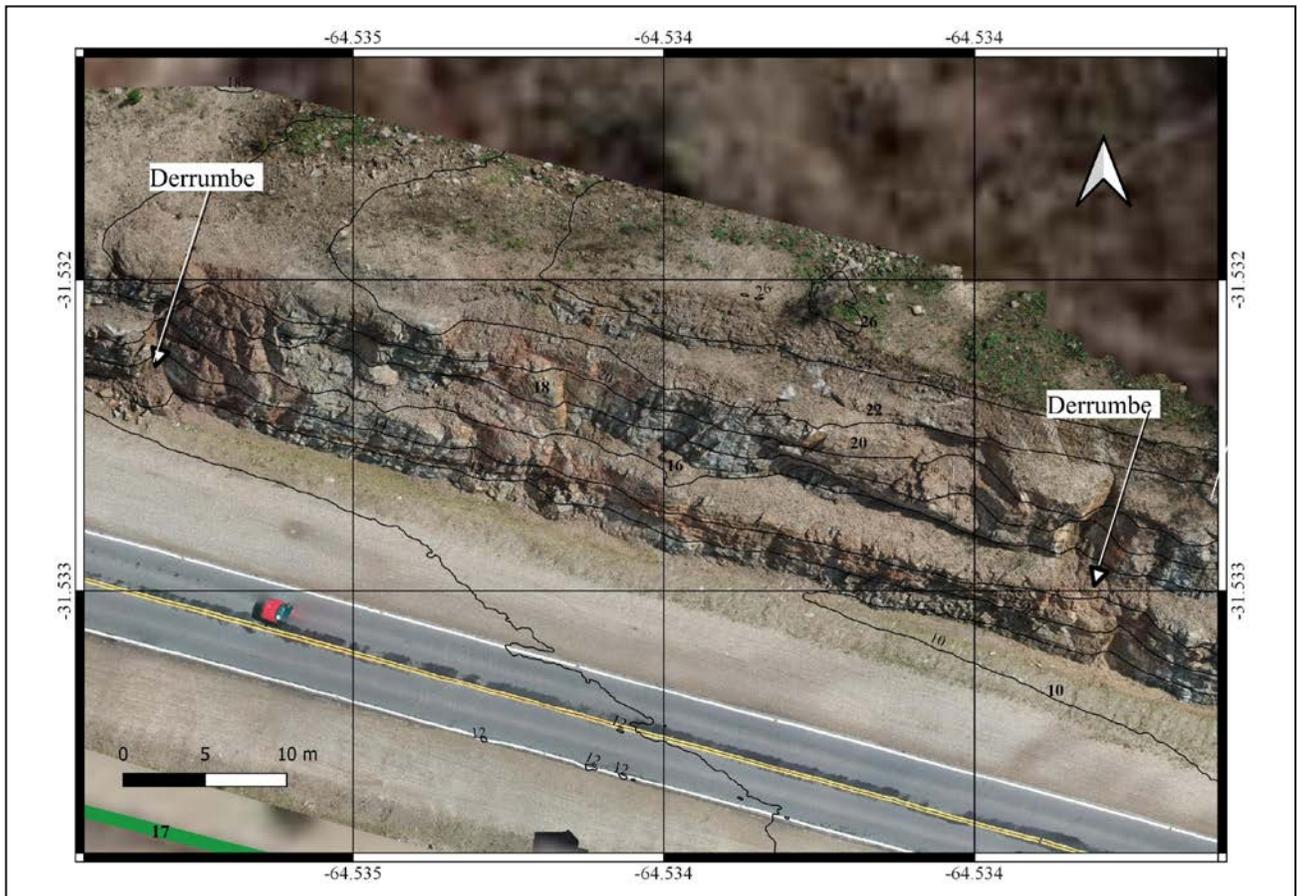


Figura 4. Derrumbes en EG17. Sector S1 y S2.

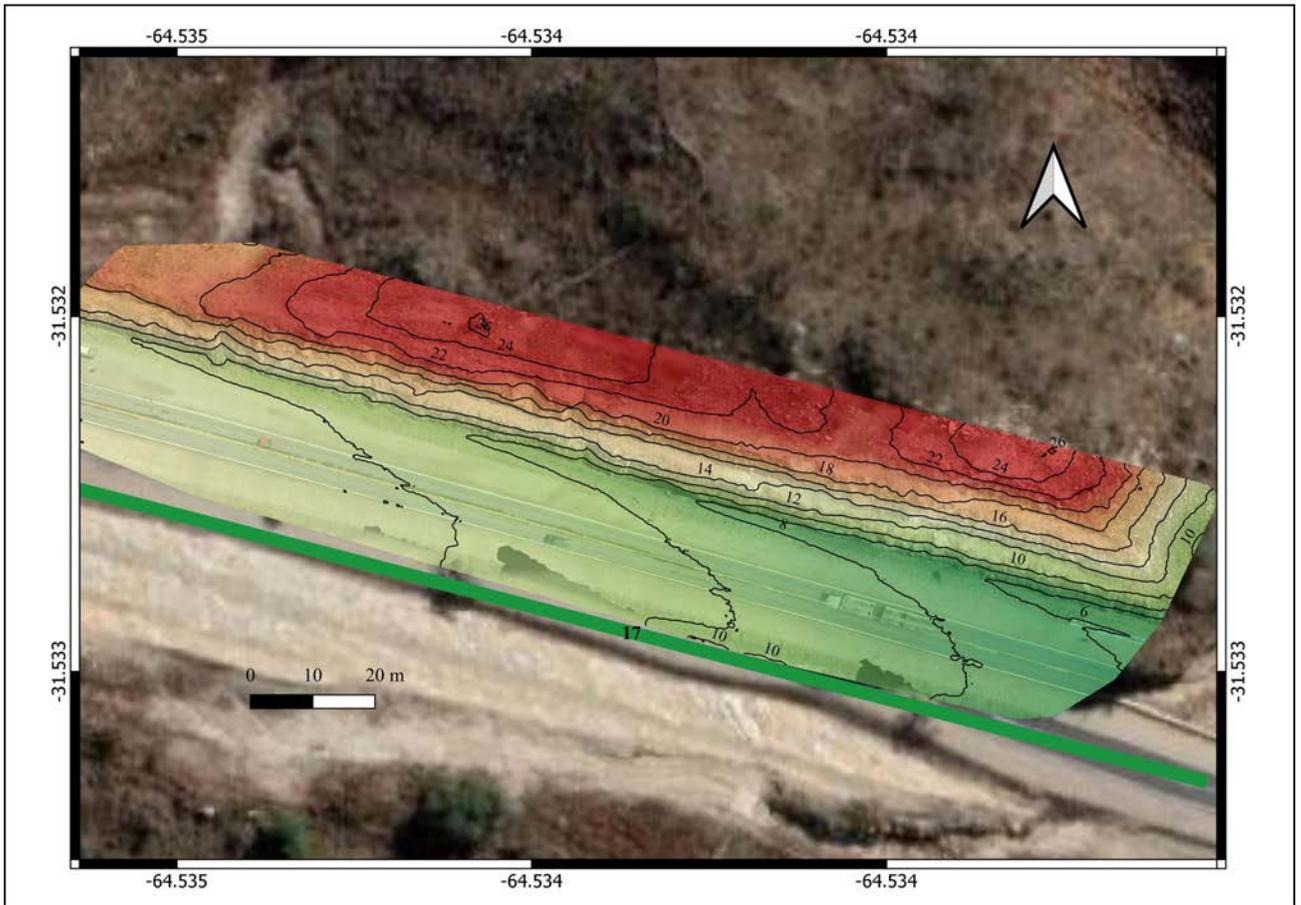


Figura 5. Modelo Digital de Elevación de EG17. Sector S1 y S2.

El perfil transversal del talud original se muestra en la Figura 6, donde puede observarse un banco inferior de 6 m. de alto excavado con pendiente 2V:1H, la primera berma, y el banco superior excavado con pendiente 1V: 1H, por ser el más afectado por la meteorización superficial.

Las Tablas 3 y 4 corresponden al análisis del talud EG17, en las secciones S1 y S2, en el momento de obtención de la línea base y en el relevamiento realizado después de 18 meses de operación de la vía.

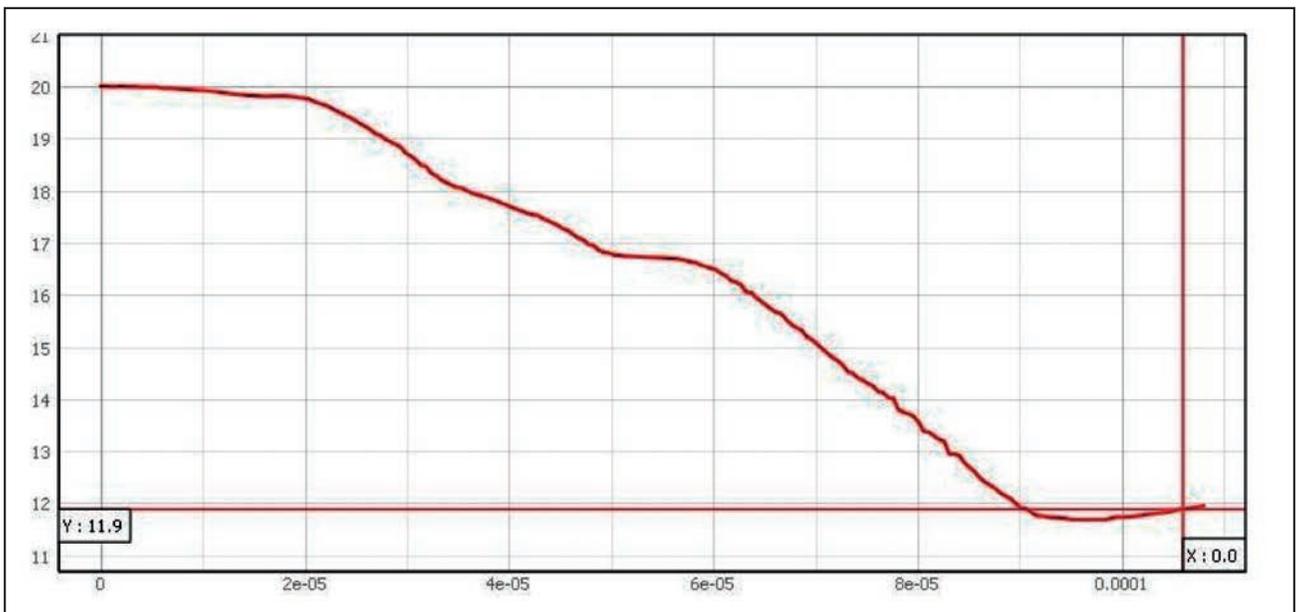


Figura 6. Perfil transversal del talud EG 17, previo al derrumbe.

El primer aspecto a tener en cuenta -por la gran modificación que sufre- es la condición de la cuneta: el estado actual del derrumbe abarca todo el ancho de la cuneta limitando el libre escurrimiento de agua y provocando acumulación de ésta dentro del talud. Esto podría provocar nuevos derrumbes y permitir

nuevamente la posibilidad de caídas de rocas sobre la calzada. Como consecuencia se produce un aumento del valor de la categoría con respecto al estado inicial que pasa de Buena a Ineficiente, elevando su puntaje de 3 a 81 para ambas secciones. (Figura 7).



Figura 7. Talud EG17. (31°31'56" - 64°32'02") Desmoronamiento de bloques y obstrucción de cuneta. Vista hacia el Oeste.

Tabla 3. Análisis del talud EG17 - Sección 1 mediante el método RHRS modificado.

Categoría	Unidad	Valor	Función	Rating	
				Tiempo Cero	A 18 meses
Altura del Talud	H(m)	24	$3^{(H/7,5)}$	33,63	
Eficiencia de la cuneta	Buena	1	3	3	3
	Ineficiente			81	81
Riesgo medio por vehículo (RMV)	RMV km/h (%)	11,3	$3^{(RMV/25)}$	6,24	9
	TMDA (vpd)		6000		
	Vehículos por hora (vph)		250		
	Longitud de zona (m)		27		
	Velocidad Diseño (km/hr)		60		
Distancia de Visibilidad	%Da	87,7	$3^{((120-\%Da)/20)}$	5,89	3
	Distancia requerida (m)		171,0		
	Distancia disponible (m)		150,0		
Ancho de calzada	Lc (m)	12,3	$3^{((27,5-Lc)/6)}$	16,17	9
	Calzada (m)		7,3		
	Banquina (m)		5,0		
Tamaño de bloque	Db (m)	0,56	$3^{(Db/0,3)}$	7,76	9
		1,50			81
Volumen del Bloque	m ³	0,2			
		6,7			27
Condición climática	h(mm)	700	$3^{(h/300)}$	12,98	27
	f	0,00027	$3^{(1+(0,334*f))}$	3,00	
Frecuencia caída de bloques	1. Algunos	1/ (365*10)			3
	2. Ocasionales	3/365			9
Slope Mass Rating	SMR	73	$3^{(80/SMR)}$	3,33	3
		32			9
				93	282

Tabla 4. Análisis del talud EG17 - Sección 2 mediante el método RHRS modificado.

Categoría	Unidad	Valor	Función	Rating	
				Tiempo Cero	A 18 meses
Altura del Talud	H(m)	24	$3^{(H/7,5)}$	33,63	27
Eficiencia de la cuneta	Buena	1	3	3	3
	Ineficiente			81	81
Riesgo medio por vehículo (RMV)	RMV km/h (%)	11,3	$3^{(RMV/25)}$	6,24	3
	TMDA (vpd)		6000		
	Vehículos por hora (vph)		250		
	Longitud de zona (m)		27		
	Velocidad Diseño (km/hr)		60		
Distancia de Visibilidad	%Da	87,7	$3^{((120-\%Da)/20)}$	5,89	3
	Distancia requerida (m)		171,0		
	Distancia disponible (m)		150,0		
Ancho de calzada	Lc (m)	12,3	$3^{(27,5-Lc)/6}$	16,17	9
	Calzada (m)		7,3		
	Banquina (m)		5,0		
Tamaño de bloque	Db (m)	0,56	$3^{(Db/0,3)}$	7,76	9
		1,50			81
Volumen del Bloque	m ³	0,2			
		6,7			27
Condición climática	h(mm)	700	$3^{(h/300)}$	12,98	27
	f	0,00027	$3^{(1+(0,334*f))}$	3,00	
Frecuencia caída de bloques	Algunos	1/ (365*10)			3
	Ocasionales	3/365			9
Slope Mass Rating	SMR	25	$3^{(80/SMR)}$	3,33	27
	20				27
				111	294

En cuanto al tamaño medio de los bloques derrumbados, originalmente considerado para toda la sección igual a 0,56 m, pasa puntualmente para la zona de derrumbe ilustrada en la Figura 3, a 1,50 m; y se estima un volumen del derrumbe igual a 6,7 m³. Debido al tamaño de bloque el puntaje pasa de 9 a 81, a lo que se debe agregar el puntaje debido al volumen del derrumbe que es igual a 27 puntos, para ambas secciones.

Para la frecuencia de caída de bloques en el momento de la confección de la "línea base" de riesgo de derrumbes, se consideró una puntuación mínima de 3 puntos, correspondiente a un derrumbe cada 10 años, por carecerse de antecedentes. Con la ocurrencia de los dos desprendimientos en el EG 17, la puntuación corresponde a la categoría de "Ocasionales", con frecuencia de 3 por año: 9 puntos, para ambas secciones.

La variable SMR, fue calculada para la ejecución de la línea base mediante el método de Hoek y Brown con el valor de GSI promedio resultando igual a 73 (3 puntos RHRS) para la Sección 1 y 25 para la Sección 2 (27 puntos). Para la situación actual que contempla los derrumbes, el cálculo fue realizado en base al GSI mínimo y se actualizaron los valores de F1, F2, F3 y F4, obteniéndose los valores de SMR=32 (que implican 9 puntos para el RHRS) para la S1 y SMR = 20 (27 puntos) para la S2.

De esta forma los puntajes iniciales del talud 17, secciones 1 y 2, que eran de 93 y 111 puntos respectivamente, se incrementan en función del derrumbe ocurrido a 282 y 294 puntos respectivamente.

La limpieza y desobstrucción de la cuneta en el talud 17, permitiría revertir la condición de drenaje de la misma, llevándola

a la situación inicial, lo que produciría una disminución de 78 puntos en el RHRS. No obstante, debe tenerse en cuenta que la eliminación del material del derrumbe produce también el descalce de pie del talud. Ello implica que conjuntamente se tienen que plantear alternativas de estabilización, tales como el enmallado de la zona derrumbada para restablecer la estabilidad de la pared rocosa.

En cuanto al talud EG16, han ocurrido una serie de derrumbes ocasionados principalmente por la caída de agua por la cara del talud, debido a la obstrucción de las cunetas de guarda. Este talud fue construido sobre cataclasitas correspondientes a la falla de Sierra Chica y tiene una antigüedad de aproximadamente seis años, ya que fue construido en una etapa previa a la paralización que sufrió la construcción de la obra durante tres años. Ese período de tiempo fue utilizado para la observación del talud, que se mantuvo estable en forma global, con caída de pequeños bloques sobre las cunetas de guarda. La obstrucción de las cunetas generó concentración del flujo en determinados lugares del talud que hoy registran derrumbes.

Para el análisis correspondiente a la "línea base" se obtuvo una puntuación mediante el RHRS igual a 225 puntos. (Tabla 5).

El talud correspondiente al EG16 tiene una altura de 50 mts., con 6 bancos de 8 mts. y bermas de 2,50 mts., de ancho. Los primeros 5 bancos fueron excavados con pendiente 2V:1H y el superior en transición hacia la ladera con pendiente 1V:1H.

En la Figuras 8 y 9 se puede observar el desprendimiento principal que abarca dos bancos y se sitúa sobre la segunda berma.

Tabla 5. Análisis del talud EG16 mediante el método RHRS modificado.

Categoría	Unidad	Valor	Función	Rating	
				Tiempo Cero	A 18 meses
Altura del Talud	H(m)	50	$3^{(H/7,5)}$	1516	81
Eficiencia de la cuneta	Buena	1	3	3	
	Moderada		0	9	9
Riesgo medio por vehículo (RMV)	RMV km/h (%)	11,3	$3^{(RMV/25)}$	38,9	81
	TMDA (vpd)		6000		
	Vehículos por hora (vph)		250		
	Longitud de zona (m)		27		
	Velocidad Diseño (km/hr)		60		
Distancia de Visibilidad	% Da	87,7	$3^{((120-%Da)/20)}$	3	3
	Distancia requerida		171,0		
	Distancia disponible		150,0		
Ancho de calzada	Lc (m)	12,3	$3^{((27,5-Lc)/6)}$	16,17	9
	Calzada (m)		7,3		
	Banquina (m)		5,0		
Tamaño de bloque	Db (m)	0,56	$3^{(Db/0,3)}$	7,76	9
Volumen del Bloque	m ³	0,2			
Condición climática	h(mm)	700	$3^{(h/300)}$	12,98	27
	f	0,00027	$3^{(1+(0,334*f))}$		
Frecuencia caída de bloques	1. Algunos	1/ (365*10)		3	3
	2. Ocasionales	3/365			9
Slope Mass Rating	SMR	40	$3^{(80/SMR)}$	9	9
				225	231



Figura 8. Ubicación del desprendimiento principal en talud EG16.

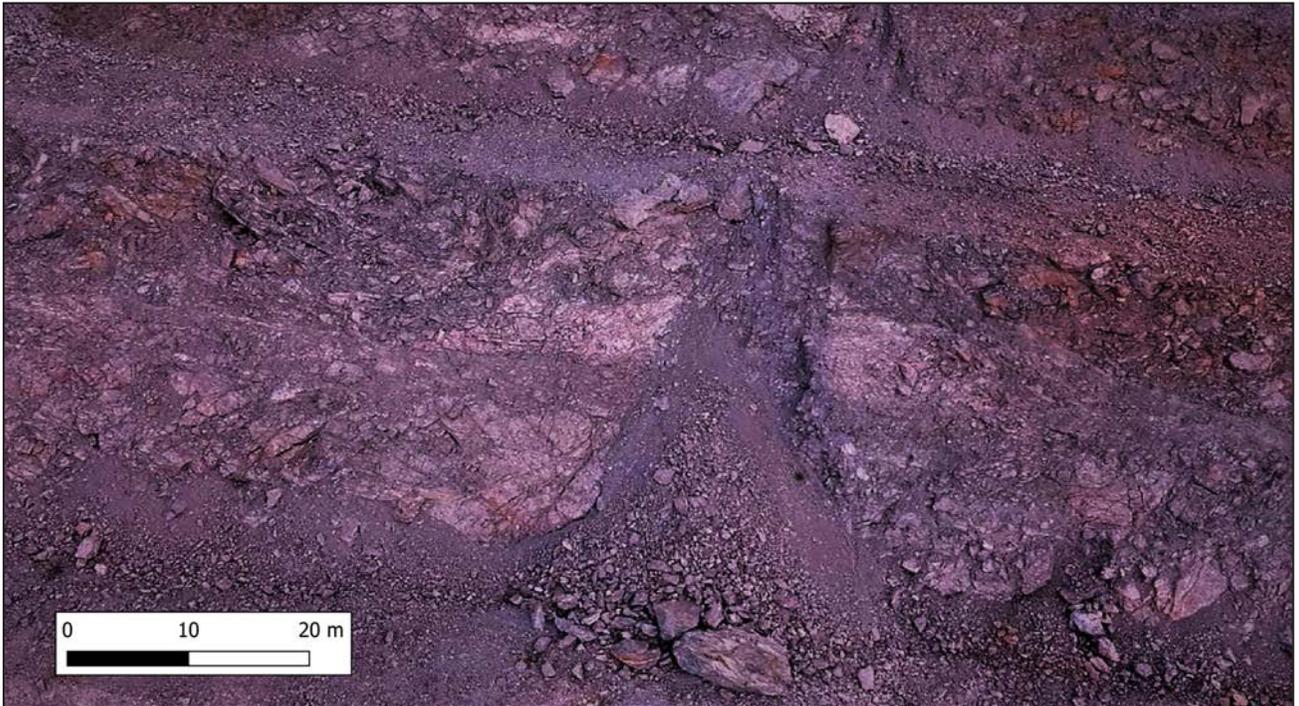


Figura 9. Detalle del desprendimiento en talud EG16. (31°32'19" - 64°32'40")

Para el análisis de los desprendimientos se realizó un vuelo con un dron Spark 4 - DJI, desde una altura de vuelo de 50 metros, obteniéndose el modelo digital de elevación con las

curvas de nivel y el perfil transversal en la zona del derrumbe principal. (Figura 10).

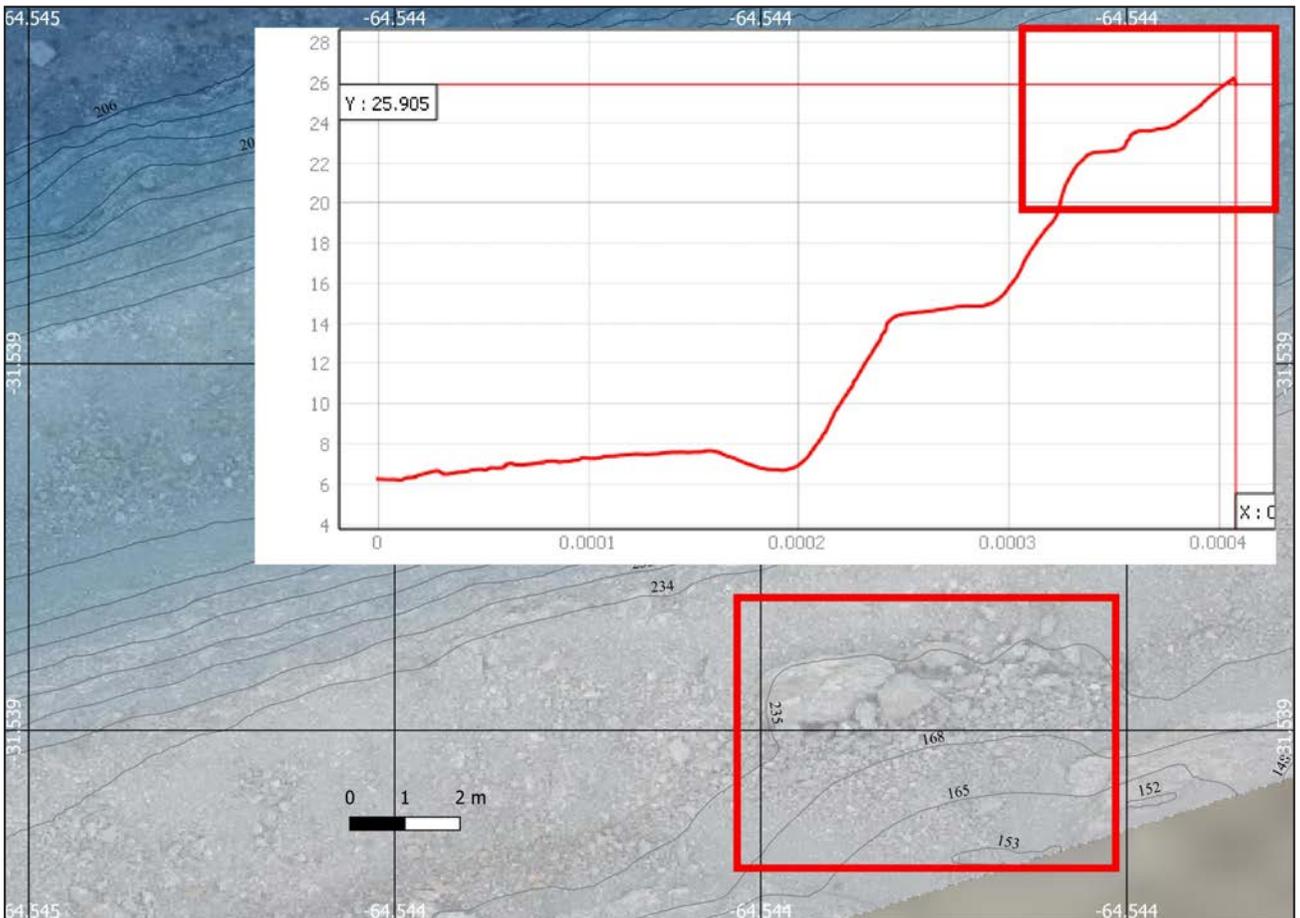


Figura 10. Perfil transversal del EG16 en zona de derrumbe.

Los rectángulos en rojo marcan la zona del derrumbe y la acumulación del material en zona de berma, con la correspondiente obstaculización de la cuneta de guarda.

Las modificaciones en el análisis de caída de rocas para el escenario actual: con derrumbes; implica cambios solamente en la variable: Frecuencia de caída de rocas, que en forma similar al EG 17, pasaría de 3 a 9 puntos, por la existencia de dos zonas de derrumbes, llevando la puntuación RHRS a 231; pero la forma de reflejar las condiciones de estabilidad y el riesgo de caída de bloques requiere de un estudio sectorizado, tanto en progresiva como en altura.

Las variables que fueron analizadas con mayor detalle en ambos taludes, pero que no registraron cambios que pudieran alterar la puntuación de RHRS, fueron:

RMV (Riesgo Medio por Vehículo): con posterioridad a los eventos de caídas de rocas, la Dirección Provincial de Vialidad realizó un censo de tránsito (en agosto de 2021) para estimar el TMDA que resultó ser igual a 4.970 vpd, muy cercano a los 6.000 vpd estimados para la ejecución de la “línea base”, por lo que el valor de la categoría se mantuvo en 9. En cuanto a la velocidad de los vehículos, que también es tenida en cuenta para la determinación del RMV, el método adopta la velocidad máxima señalizada en el tramo igual a 80 y 60 km/h según las zonas. Al momento del censo de tránsito se registraron las velocidades de flujo libre de los vehículos que transitan por la ruta obteniéndose como percentil 85, un valor de 103 km/h teniendo en cuenta ambos sentidos de circulación. Esto implicaría una disminución del RMV, ya que a mayor velocidad disminuye el tiempo en que los vehículos permanecen en la zona de riesgo. Estos ligeros cambios de TMDA y RMV no afectan a la categorización del tramo se mantiene igual a la determinada para el análisis de la línea base. (Figura 11).

DVD (Distancia de Visibilidad): El cambio registrado en la velocidad de circulación al momento del censo de tránsito (103 km/h), no influye en los taludes 17 y 16, ya que se encuentran en zonas de viaductos, con velocidades máximas permitidas de 60 km/h. En cuanto a la disminución de visibilidad por el crecimiento de la vegetación en banquinas, no se presentaron cambios en los sectores correspondientes a los taludes que presentaron derrumbes.

Condición Climática: la base de datos pública del Sistema de Gestión Clima - del Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba, brinda valores horarios de precipitación de los que se puede obtener un promedio de los registros acumulados entre las estaciones de Alta Gracia y Los Chorrillos para el año 2021, registrándose valores inferiores a los utilizados en la determinación de la “línea base” pero que tampoco generan cambios de categoría.

CONCLUSIONES

Los relevamientos realizados para la aplicación del sistema RHRS, con posterioridad a la ejecución de la “línea base”, mediante tecnologías tales como las fotografías de dron, y modelos digitales de elevación son de rápida y fácil ejecución.

En las dos secciones del talud EG17, donde ocurrieron derrumbes se incrementó el índice RHRS en alrededor de un 200%.

En el talud EG16 el incremento del índice RHRS fue solo del 3% debido a que los derrumbes ocurrieron sobre bermas en altura y el análisis se encuentra efectuado a nivel de piso.

La obstrucción de cuneta y los cambios en las condiciones de drenaje -y consecuentemente de humedad del macizo rocoso- en la zona del derrumbe constituyen el factor de mayor sensibilidad para la determinación del índice RHRS.

Se registraron cambios importantes en el tamaño de bloque obtenido mediante el análisis de la zona de derrumbe, en relación al análisis regionalizado utilizado para la obtención de la “línea base”.

La historia y antecedentes de derrumbes en taludes rocosos, son datos muy valiosos para el establecimiento de una serie temporal de eventos; y el conocimiento de su magnitud y frecuencia, permiten la calibración de sistemas de monitoreo y alarma en lugares y épocas del año determinados.

La incorporación de esa información en un SIG permite la actualización y generación de informes sobre riesgo de derrumbes y caídas de rocas en caminos de montaña.

Todos estos elementos terminan aportando para la toma rápida de decisiones sobre medidas de mitigación y/o remediación que garanticen la transitabilidad en condiciones seguras de la vía.



Figura 11. Medición del TMDA y Velocidad de los vehículos con equipo de la Dirección Provincial de Vialidad. Ubicación: (31°31'44.03" - 64°30'2.17") Orientación fotográfica hacia el Oeste.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba por la aprobación del proyecto de investigación en el marco del cual se realizó este trabajo, a la Universidad

Nacional de Córdoba que facilitó la licencia para el software utilizado, y a la Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba que permitió la publicación de datos técnicos.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AASHTO. 2011.
A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.
Tomo 1. Anexo 3. Distancia Visual de Detención.
- ANSARI M., AHMAD M., SINGH R., Y SINGH T. (2016).
Rockfall Hazard Rating System along SH-72: a case study of Poladpur–Mahabaleshwar road (Western India), Maharashtra, India,
Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7:2, 649-666, DOI: 10.1080/19475705.2014.1003416
- BOUALI E.H., VITTON S., BROOKS C.,
Rockfall Hazard Rating System: Benefits of Utilizing Remote Sensing.
Environmental and Engineering Geoscience. 2017. DOI: 10.2113/gseegeosci.23.3.165
- BUDETTA P. 2004.
The modified Rockfall Hazard Rating System. Assessment of rockfall risk along roads.
Natural Hazards and Earth System Sciences 4: 71-81
- FOOKES, P., AND SWEENEY, M. 1976.
Stabilisation and control of local rockfalls and degrading of slopes.
Quarterly Journal of Engineering Geology, 9(1): 37-55. doi:10.1144/GSL.QJEG.
- HOEK, E. AND BROWN, E.T. 1980.
Empirical strength criterion for rock masses.
J. Geotech. Engng Div., ASCE 106 (GT9), 1013-1035.
- PIERSON, L. A., DAVIS, S. A., AND VAN VICKLE, R. 1990.
Rockfall Hazard Rating System - Implementation Manual,
Federal Highway Administration (FHWA), Report FHWA-OR-EG-90-01, FHWA, U.S. Dep. of Transport.
- QUINTANA CRESPO, E., & SOFFIETTI, F. P. (2020).
Una Zonificación Geotécnica Aplicada a Taludes Rocosos en el Cordón de Sierra Chica, Provincia de Córdoba, Argentina.
Revista De La Facultad De Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 7(2), 27-43. Recuperado a partir de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFyN/article/view/29363>
- QUINTANA CRESPO, E., Y NAVARRO M.A. (2020).
“Línea Base para Riesgo de Caída de Rocas en un Camino de Montaña en Sierra Chica, Provincia de Córdoba, Argentina”.
Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente - ASAGAI. N° 45 - ISSN 2422 - 5703 (En línea).
- RITCHIE, A. M. 1963.
Evaluation of rockfall and its control,
U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, and the Washington State Highway Commission.
- ROMANA, M. 1991.
SMR Classification,
Proc. 7th Int. Congr. on Rock Mech., Balkema, Rotterdam, 955-960.
- SINGH A., NOOR S. CHITRA R., GUPTA M., (2018)
Applications of GIS in Geotechnical Engineering: Some Case Studies.
International Journal of Scientific Engineering and Science Volume 2, Issue 3, pp. 34-38, 2018. ISSN (Online): 2456-7361
- WHITESIDE, P., (1986)
Discussion on rockfall protection measures,
Conf. on Rock Eng. and excavation in an Urban Env., Institution of Mining and Metallurgy, Hong Kong, 490-498.

DIRECTRICES PARA AUTORES/AS

La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente publica Artículos Originales, Artículos Invitados, Notas técnicas, Reseñas de Libros, Discusiones Técnicas breves de artículos y comunicaciones publicadas en la Revista.

En atención al procedimiento de arbitraje, se solicita a los autores seguir estrictamente las siguientes instrucciones para la confección del manuscrito:

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

1. DE CARÁCTER GENERAL

- Las contribuciones deben ser originales. Se debe garantizar que éstas no hayan sido enviadas a otra revista en simultáneo y que no hayan sido publicadas con anterioridad, de forma total o parcial.
- Se debe garantizar que el artículo no será publicado en otras publicaciones en cualquier idioma sin el consentimiento de los propietarios de los *derechos de autor (copyright)*, que los derechos de terceros (*terceras partes*) no serán violados y que la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería (ASAGAI) no será considerada legalmente responsable si existe algún reclamo de indemnización.
- Se admitirán trabajos escritos en español, portugués o inglés.
- Todos los envíos serán evaluados preliminarmente por el Editor Jefe y la Editora Asociada. Con posterioridad serán enviados a revisión por pares en carácter ciego.
- Toda nueva presentación debe ser acompañada de una nota al Editor de la Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente en la cual debe constar el título del trabajo y los autores, expresando que el mismo es original, que no ha sido enviado ni se enviará a ninguna otra revista durante el proceso editorial. Se debe aclarar aquí cualquier conflicto de interés o personal.
- Los artículos que no cumplan las normas editoriales serán devueltos sin arbitrar.
- La revista no cobra por el envío de artículos. En el caso que el número de autores no socios de ASAGAI supere el 50% de la totalidad de estos se deberá proceder al pago, en concepto de derecho de publicación, de AR\$ 2000.
- Puede consultar el enfoque y alcance de la Revista, así como el resto de sus políticas en <https://www.editoriasasagai.org.ar/ojs/index.php/rgaia/about>

2. SOBRE EL FORMATO Y LA EXTENSIÓN DEL TEXTO

- Los **artículos originales** deberán tener una extensión que no supere las 20 (veinte) páginas y deberá ajustarse a las normas establecidas.
- En las **notas técnicas**, la extensión total del manuscrito no debe superar las 3 (tres) páginas, debe incluir Resumen, *Abstract*, Palabras claves, *Keywords*, hasta 2 (dos) figuras y una tabla.
- En el caso de **Artículos Invitados** la extensión podrá ser superior a 20 páginas, siempre que el interés del contenido lo justifique y previo acuerdo con el Editor de la Revista y el Comité Editorial.
- El resto de las situaciones mencionadas (**Discusiones Técnicas** y **Reseñas de Libros**) deberán tener hasta una página de extensión.
- El título del manuscrito debe ser conciso, informativo e indicativo del contenido y escrito sin utilizar abreviaturas.
- El texto debe prepararse en el procesador de texto Microsoft Word® (.doc o .docx).

- El tamaño de la hoja es A4 (210 x 297 mm).
- Los márgenes para utilizar son de 20 mm (izquierdo, derecho, superior e inferior).
- En la primera página se deberá incluir el título del artículo. Para ello utilizar fuente Times New Roman, tamaño 12, mayúscula, negrita y centrado, sin subrayar.
- Si el trabajo está escrito en español, el título se debe expresar en español y en inglés. Si el trabajo está escrito en portugués, también se debe incluir el título en inglés. Si el trabajo está escrito en inglés se debe incluir, además, el título en español. Se deberán seguir las especificaciones mencionadas en el ítem anterior. El espaciado entre ambos títulos será de 12 puntos.
- Debajo del título, en texto centrado, con fuente Times New Roman tamaño 10, se incluyen los datos de los autores y afiliaciones. Los nombres de los autores se deben escribir en letra normal, las afiliaciones y direcciones de correo electrónico en letra cursiva. Se deberá identificar con un superíndice al autor que se deba dirigir la correspondencia.
- A partir de la segunda página comienza el desarrollo del trabajo. En primer lugar, se debe incorporar el resumen, resumen, abstract, de acuerdo con el idioma del manuscrito. Todo el texto deberá estar escrito con fuente Times New Roman, tamaño 12, a interlineado sencillo, con sangría de un centímetro y con espacio simple entre párrafos. Se conservarán los tipos de letra destacados que el autor considere convenientes, así como los correspondientes a determinados símbolos y términos científicos o expresiones latinas o extranjeras.
- En el caso que el idioma del trabajo sea español, se debe incorporar, en forma consecutiva, el "Resumen", de hasta 250 palabras, las "Palabras claves" en un número entre 3 y 5. A continuación, el correspondiente "*Abstract*" y, seguidamente, las correspondientes "*Keywords*". Luego se continúa con el desarrollo del artículo.
- En el caso de que el idioma del trabajo sea portugués, la primera sección será el "*Resumo*" de hasta 250 palabras, seguido de las "*Palavras chave*" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "*Abstract*" y las correspondientes "*Keywords*" en inglés. Luego se continúa con el desarrollo del artículo.
- En el caso de que el idioma del trabajo sea inglés, la primera sección será el "*Abstract*" de hasta 250 palabras, seguido de las "*Keywords*" en un número entre 3 y 5, el correspondiente "Resumen" y las correspondientes "*Palabras clave*" en español. Luego se continúa con el desarrollo del artículo.
- Las palabras claves (o *keywords*) se utilizarán, también, a los fines de la indexación. Pueden incluir frases cortas. Deben estar ordenadas alfabéticamente y se recomienda no repetir palabras incluidas en el título.
- Se debe usar justificación completa en el cuerpo del texto.
- Es obligatorio el uso del sistema métrico decimal.
- Cuando una abreviatura, o un acrónimo, aparezca en el texto por primera vez, su significado deberá ser aclarado en forma completa entre paréntesis.
- No se aceptarán notas de pie de página.
- Las expresiones matemáticas deben ser elaboradas con el procesador de texto y formar parte de este. Las ecuaciones deben estar centradas y separadas por una línea. Todas las ecuaciones deben estar numeradas consecutivamente, usando números entre paréntesis alineados al margen derecho. La secuencia de paréntesis deberá ser la usual en Matemática:)).
- Los subíndices y superíndices deben ser legibles.
- Tener especial cuidado en diferenciar entre cero (0) y la letra "o", y entre uno (1) y la letra "l".

- Proporcionar el significado de todos los símbolos inmediatamente después de la ecuación en la que son usados por primera vez.
- Para fracciones simples usar el símbolo "/" en lugar de la línea horizontal; por ejemplo: Sy/Xm.
- En las fórmulas químicas deben especificarse la valencia de los iones como, por ejemplo, Ca^{2+} y CO_3^{2-} , no como Ca^{++} o CO^{-3} .
- Los números de isótopos deben indicarse mediante un superíndice antecediendo a los símbolos químicos, por ejemplo: ^{18}O
- Se debe evitar la escritura repetida de fórmulas químicas en el texto. En lugar de ello se debe dar el nombre completo del compuesto. Se exceptuarán aquellos casos de nombres muy largos y frecuentes, o de compuestos que son descritos como el producto final de una determinación gravimétrica (ejemplo: fosfato como P_2O_5).

3. SOBRE EL FORMATO DE FIGURAS Y TABLAS

Se incluirán como figuras todas las ilustraciones, mapas, fotografías, gráficos, etc., citadas en el texto. Éstas deberán llevar numeración arábiga correlativa por orden de aparición y se ajustarán al tamaño de la caja (170 x 257 mm). Su tamaño original debe permitir una reducción del 50%, sin pérdida de calidad.

- Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente debajo de la misma, que no se debe incluir en el cuerpo de la figura. Se usará fuente Times New Roman tamaño 12, a interlineado sencillo. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por un punto, en la forma Figura n. donde n es el número de orden que corresponda. Se recomienda preparar leyendas cortas y concisas.
- Las figuras serán citadas en el texto como (Figura n), siendo n el número de orden que corresponda, sea directamente como Figura 1, o bien entre paréntesis como (Figura 1). El tamaño debe considerar el espacio ocupado por el epígrafe. Se las deberá enviar como archivos individuales en uno de los formatos aceptables (.tif, .jpg, .pdf, .png o .eps) con una definición igual o mayor a 300 dpi. En el caso de una figura compuesta por varias imágenes, las mismas deberán estar debidamente identificadas con una letra en la esquina inferior derecha de la misma.
- Las fotografías (y figuras en formato raster con tono continuo) deben poseer contraste, ser claras y con una luz adecuada. Deben ser enviadas como archivos .tif, .jpg o pdf., con una definición igual o mayor a 300 dpi. Cuando en las fotografías no existan elementos que permitan su dimensionamiento (escala, cinta métrica, martillo geológico, brújula, vehículo, etc.) deberán incluir escala, vertical y horizontal en caso de ser distintas.
- Las figuras delineadas o dibujos deben ser claros y poseer contraste.
- Las figuras de tipo mapa deben estar orientadas, incluir escala gráfica e indicación de la localización geográfica (coordenadas UTM o Lat/Long). Deberán tener las referencias adecuadas correspondientes a los símbolos, rastras, etc. utilizados.
- A los fines de la elaboración de las figuras tipo mapa, se sugiere que la simbología se adapte a:
 - https://ngmdb.usgs.gov/fgdc_gds/geosymstd/fgdc-geosym-all.pdf
 - <http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/docs/ModeloMAGNA.pdf>
 - <https://doi.org/10.1080/02626666209493264>.
- Los gráficos deben poseer ejes de coordenadas correctamente rotulados y con indicación de la unidad de medida correspondiente, en el caso que corresponda.

- Las tablas se deben remitir como archivo de texto (formato Word) y no como imagen. Se deben incluir en archivos separados. Serán citadas en el texto iniciando con mayúscula en citas directas, o indirectas entre paréntesis, es decir como Tabla 1, o bien (Tabla 1).
- La información presentada en las tablas no debe aparecer repetida en las figuras.
- Cada tabla debe llevar, del mismo modo que las figuras, una leyenda breve y explicativa, en la parte inferior. La tabla y el número se deben indicar como Tabla n donde n es el número de orden que corresponda.

4. SOBRE LAS REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y LAS CITAS DE TRABAJOS

- No se admite la reproducción de figuras o tablas originales de otros artículos o capítulos de libros si no se dispone de la autorización expresa de quién detente los derechos, es decir de la editorial responsable de la publicación correspondiente o bien del autor/es. La reproducción autorizada de tablas, fotografías u otras ilustraciones procedentes de otros trabajos deberá incorporar en el epígrafe la cita del trabajo original de donde fue obtenido. Con respecto a las figuras, en el caso de que la misma se reelabore, o de una tabla, que sea editada, se deberá indicar "modificada a partir de..." seguido de la cita del artículo original.
- A los autores que deseen incluir figuras, tablas o secciones completas de texto que ya han sido publicados en otras publicaciones, se les requiere obtener el permiso del/de los propietario/s del copyright y que incluyan evidencias de que dicho permiso ha sido concedido al presentar sus artículos. Todo ello sin perjuicio de que otras inclusiones de párrafos, definiciones, conceptos o clasificaciones provenientes de otros autores puedan ser aceptadas con la cita expresa de la referencia correspondiente. Cualquier material recibido sin esa documentación será considerado como originado por los autores, quienes, por lo tanto, deberán asumir la responsabilidad legal correspondiente.
- Las referencias bibliográficas serán incluidas bajo el título de TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO. La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente adhiere a las normas internacionales de citación bibliográfica de la **American Psychological Association (APA)**. Las normas se encuentran disponibles en <http://normasapa.net/2017-edicion-6/>.
- La cita de trabajos en el texto estará referida a la lista bibliográfica final, indicando apellido de los autores y año de publicación entre paréntesis, por ejemplo: (Caminos, 1975). En caso de ser más de dos autores se usará et al. (en itálica, sin subrayado ni negrita). Cuando se cite más de un trabajo del mismo autor se separarán por una coma, por ejemplo: Caminos (1956, 1978). En el caso de ubicar varios autores dentro del paréntesis se separarán entre ellos por un punto y coma. Si se citan varios trabajos del mismo autor y del mismo año se agregarán, a continuación del año, letras, de acuerdo con el orden de aparición en el texto.
- En el caso de citar un párrafo o frase de otro trabajo, éste deberá aparecer entre comillas y cursiva, acompañada de la correspondiente cita. Por ejemplo, ...según Casio et al., (1980), "*la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma*" o bien directamente "la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma" (Casio et al., 1980).
- La lista de referencias deberá estar ordenada alfabéticamente, con las citas bibliográficas justificadas a la izquierda. Las citas correspondientes incluirán a la totalidad de los autores.
- Se citarán empleando texto en cursiva el título de la revista o actas de congreso o reunión científica del artículo citado, o el título del libro citado, según:

- Publicaciones periódicas formato impreso: Apellido, A.A., Apellido, B.B. y Apellido, C.C. (Año). Título del artículo. *Nombre de la revista*, volumen (número): pp-pp.
- Publicaciones periódicas con DOI: Apellido, A.A., Apellido, B.B. y Apellido, C.C. (Año). Título del artículo. *Nombre de la revista*, volumen (número), pp-pp. doi: xx
- Publicaciones en actas de congresos: Apellido, A.A., Apellido, B.B. y Apellido, C.C. (Año). Título del artículo. *Nombre del congreso o reunión científica*, volumen, pp-pp.
- Libro: Apellido, A.A. (Año). *Título*. Ciudad, País: Editorial.
- Libro con editor: Apellido, A.A. (Ed.). (Año). *Título*. Ciudad, País: Editorial.
- Capítulo de libro: únicamente en los casos de libros donde cada capítulo tenga un autor diferente y un editor: Apellido, A.A., y Apellido, B.B. (Año). Título del capítulo. En A.A. Apellido. (Ed.), *Título del libro* (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Ejemplos de citas:

- Palenzuela, J.A., Marsella, M., Nardinocchi, C., Pérez, J.L., Fernández, T., Chacón, J. & Irigaray, C. (2015). Landslide detection and inventory by integrating LiDAR data in a GIS environment. *Landslides*, 12(6):1035-1050.
- Casio, M.; Marcinus, F.; Salina, R y Hubbard, R.T. (1980). La caída del imperio romano. *Revista de Occidente*, Vol. 180: 224-234.
- Carranza Torres, C.M. (1991). Cálculo analítico de redes de filtración. *Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería*, vol. VI, 250-267.
- Dearman, W.R. (1991). *Engineering geological mapping*. Oxford, Inglaterra: Butterworth-Heinemann Ltd.
- Mateos Ruiz, R.M. y M. Ferrer Gijón. (1994). Methodology for landslides hazard map 1:10,000 in the area of Monachil (Granada, Spain). En R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha (Eds.), *7th International Congress International Association of Engineering Geology*, (vol III: 2059-2064). Rotterdam, Holanda: Balkema.
- Las citas correspondientes de páginas Web se efectuarán de acuerdo con el siguiente modelo: Barker, A. and Jones, C. (2007). Reassessing the direction of postgraduate environmental assessment education: the Manchester experience 1996–present. En T. B. Fischer et al. (Eds.) *Environmental Assessment Lecturer's Handbook* (pp. 29-38). Disponible en <http://www.penta-eu.net>, último acceso 28 de Junio de 2010.
- Artículos con DOI: Slifka MK, Whitton JL (2000) Clinical implications of dysregulated cytokine production. *J Mol Med*. <https://doi.org/10.1007/s001090000086>

INFORMACIÓN SOBRE EL PROCESO EDITORIAL

Envíos

El único medio de presentación de manuscritos es a través de la página web <http://www.editoresasagai.org.ar/lojs/index.php/rgaia>, mediante la cual el autor deberá proceder a registrarse.

Al finalizar el envío Ud. recibirá una confirmación, por medio de un correo electrónico, con un número de referencia. Le solicitamos tenga a bien guardar dicho número, así como el nombre de usuario y contraseña por Ud. elegidos al momento de la registración. A aquellos autores que ya cuenten con un usuario, obtenido durante una presentación o arbitraje

previo, se les solicita no iniciar un nuevo registro, sino utilizar la función de recuperación de contraseña disponible en el portal, si fuera necesario.

Se sugiere consultar la **lista de comprobación de envíos y otras políticas de la revista** en <https://www.editoresasagai.org.ar/lojs/index.php/rgaia/about/submissions>

El texto, las figuras y los epígrafes, realizados según las instrucciones, deberán ser subidas como archivos complementarios por separado. Tanto durante la etapa de la evaluación como de la edición se irán solicitando modificaciones al archivo principal, como a las figuras que acompañan el envío. Se las deberá cargar reemplazando las originales y no como nuevos archivos, con las modificaciones requeridas.

Los trabajos enviados a los autores para corrección y devueltos después de cuatro meses, serán tratados como artículos nuevos.

Exclusión de Revisores

Los autores pueden solicitar la exclusión de evaluadores cuando remiten sus manuscritos, indicando los motivos de dicho requerimiento. Los Editores tienen la potestad de tomar una decisión al respecto.

Confidencialidad

Toda comunicación de los autores con la Editorial se considerará confidencial e incluye, exclusivamente, el contacto entre los autores con Editor Jefe, Editora Asociada y Secretaria del Comité Editorial.

Sobre el Arbitraje

De considerarse pertinente su publicación, la evaluación por pares es efectuada mediante el envío del manuscrito original a dos evaluadores 100% externos a la entidad editora y en modalidad ciego.

En el caso de disparidad de opiniones, se remite a un tercer evaluador externo.

La decisión final relativa a la publicación de los artículos y reseñas se toma en función de los dictámenes de los evaluadores externos, para lo cual se requieren dos recomendaciones favorables para la publicación.

Los Editores se reservan la posibilidad de tomar la decisión final en el caso que la tercera evaluación no establezca si el artículo debe ser aceptado, o no, para su publicación.

Los posibles dictámenes son: aceptado, aceptado con cambios menores, aceptado con cambios mayores, y no aceptado.

Aviso de Derechos de Autor/a

Los autores conservan los derechos de autor y garantizan a la revista el derecho de ser la primera publicación del trabajo licenciado según una licencia de atribución <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

La Revista permite a los autores mantener el derecho patrimonial sobre su obra sin restricciones. Los autores se reservan el permiso de publicar y/o almacenar la versión aceptada de su artículo en cualquier tipo de repositorio o colección con la condición de citar explícita y adecuadamente, cada vez que sea utilizado, la fuente original de primera publicación (Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente).

Originalidad y Plagio

Los autores deberán asegurar que el trabajo presentado es un manuscrito completamente **original e inédito**, que no se encuentra **ni publicado ni presentado previamente en cualquier otro soporte**, y si los autores han utilizado el trabajo y/o palabras de otros, que éstos han sido apropiadamente

citados o acotados. Únicamente se aceptará material publicado parcialmente con anterioridad (por ejemplo, en Actas de Congresos) si se hace constar la causa de tal duplicación y se explicita la fuente original del artículo en el nuevo manuscrito.

Los autores firmantes del trabajo deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión.

Si se sospecha que un artículo es sustancialmente copia de otro trabajo, por favor indicarlo al Editor de la Revista de

Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, citando el trabajo previo con el mayor detalle posible.

La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente utilizará un sistema de detección de plagio denominado *Plagium* (www.plagium.com) para la verificación de textos breves de hasta 5.000 caracteres de forma rápida y libre. Además, los manuscritos podrán ser verificados manualmente y contrastados con otras publicaciones si se sospecha de su originalidad. Cuando se detecte un plagio o autoplagio total o parcialmente (sin la citación correspondiente), el texto no se incorporará al proceso editorial y se le notificará al autor.

Copyright
© Editorial ASAGAI. 2022
Editada en Argentina

Se terminó de editar en Junio de 2022



ASAGAI
ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Análisis de la variabilidad del colapso y su geología en un perfil de loess

Rouzaut, Sabrina - Clariá, Juan José - Curto, Joel

Evaluación geotécnica preliminar de las unidades geológicas del frente costero portuario de Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

Di Martino, Claudina - Albouy, René - Aliotta, Salvador

Técnicas geofísicas para a detecção de piping: uma revisão de literatura

Santos, Cleber de Jesus - Picanço, Jefferson de Lima

Utilización de un sistema de medición del riesgo de caída de rocas en fase operativa en el Camino de Altas Cumbres, Sierra Chica, Córdoba, Argentina

Quintana Crespo, Enrique F. - Navarro, María Alejandra

Portada: Reserva Faunística Punta Bermeja - Provincia de Río Negro. *Fotografía: Gerardo Barion*

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

