



Mapa estratigráfico con fines geotécnicos de la ciudad de Córdoba

Stratigraphic map for geotechnical purposes of Córdoba city

Clariá, Juan José ¹ ✉ - Rouzaut, Sabrina ² - Ares, Mauricio ² - Eveling, Pablo ²

Recibido: 08 de abril de 2021 • Aceptado: 14 de mayo de 2021

Resumen

Los datos aportados por los mapas geotécnicos permiten optimizar la planificación y uso del territorio con fines de creación y mantenimiento de infraestructura civil. La información provista por dichos mapas permite tanto la evaluación del comportamiento de las construcciones, como la predicción y previsión de posibles inconvenientes de carácter geológico y / o geotécnico. Este trabajo presenta un Mapa Geotécnico de la ciudad de Córdoba construido a partir de la carga de aproximadamente 900 perforaciones exploratorias realizadas por los autores, y tomando como base el mapa desarrollado por Rocca et al., (1995), el cual fue elaborado a partir de un análisis geológico y geomorfológico de la ciudad. El mapa confeccionado aquí, amplía el área abarcada por la Carta de Rocca et al (1995) y se orienta a la definición de la profundidad de fundación más que a la predicción de asentamientos por colapso. Se ilustran datos litológicos y resistencia a la penetración en el ensayo de hincas dinámicas con cono Súper Pesado (DPSH, Dynamic Probing Super Heavy). Se presenta un mapa de profundidad de rechazo en la hincas DPSH. El análisis geoestadístico predictivo y la interpolación de los datos de las perforaciones necesarios para la confección del mapa se realizaron en un Sistema de Información Geográfica. Los resultados de la interpolación hecha por el software se muestran en una interfaz gráfica a color en 2D y 3D de muy simple lectura e interpretación.

Palabras clave: mapa geotécnico, Córdoba, GIS, estratigrafía, suelos.

Abstract

The data provided by geotechnical maps allow to optimize the planning and usage of the territory for civil infrastructure construction and maintenance. The information supplied by these maps, permit the evaluation of structures behavior, as well as the prediction and prevention of possible geological and / or geotechnical problems. This work presents a Geotechnical Map of the city of Córdoba built from the load of approximately 900 exploratory drillings made by the authors, and based on the map previously developed by Rocca et al., (1995), which was constructed from a geological and geomorphological analysis of the city. The map assembled here, expands the area covered by Rocca et al., (1995), and is

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

✉ jclaria@unc.edu.ar.

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

oriented to the definition of the foundation depth rather than to the prediction of settlements by collapse. Lithological data and penetration resistance of the Dynamic Probing Super Heavy Cone Test (DPSH) are illustrated. A map of rebound depth of the DPSH test is presented. Predictive geostatistical analysis and interpolation of drillhole data were performed on a Geographic Information System. The results of the software interpolation are showed in a 2D and 3D color graphic interface of very simple and fast reading and comprehension.

Keywords: *geotechnical map, Córdoba, GIS, stratigraphy, soils.*

INTRODUCCIÓN

La planificación y ejecución de obras de ingeniería requieren tener una base geológico-geotécnica sólida para evaluar futuros problemas de esta índole. Los mapas geotécnicos aportan información valiosa con fines de planificación y uso del territorio (González de Vallejo et al., 2002).

La ciudad de Córdoba ya cuenta con antecedentes de mapas geotécnicos, entre los que se destacan los de Bondenbender (1890), Reginatto (1970), Rocca et al., (1995) y Rocca y Quintana Crespo (1999). El mapa de Bondenbender (1890) se centralizó en las márgenes del río Suquía, área en la que resultaba factible el empleo de fundaciones directas sobre suelos aluviales. Luego, con el crecimiento de la ciudad las construcciones avanzaron fuera del valle del río y comenzaron a ocupar terrenos en los que predominaban los loess con características colapsables (Moll y Rocca, 1991; Rinaldi et al., 2007; Francisca et al., 2008). Reginatto (1970) publicó por primera vez un mapa geotécnico de la ciudad de Córdoba con el objetivo de ser utilizado por los ingenieros a la hora de definir los eventuales inconvenientes en la fundación de sus construcciones. Por otro lado, Rocca et al., (1995) y Rocca y Quintana Crespo (1999) presentaron un mapa que completó y extendió el desarrollado por Reginatto (1970) en el que se distinguen una serie de perfiles modales de cada unidad de Tipo geotécnico. El mapa de Rocca está orientado fundamentalmente a la predicción de asentamientos en estructuras civiles generados por el fenómeno de colapso frente al humedecimiento que sufren los limos de tipo loésico tan abundantes en la ciudad de Córdoba. Frente a la ampliación y la creciente urbanización de la ciudad de Córdoba, Rocca y Quintana Crespo (1999), Rocca (2006) y Rocca et al., (2013) presentaron actualizaciones de su mapa con análisis geoestadísticos que estiman asentamientos potenciales máximos en las nuevas zonas anexadas al ejido urbano. Dado que los sectores anexados no estaban mapeados, las estimaciones de asentamientos se basaron en el empleo de información en parte subjetiva y en la experiencia de los especialistas (Rocca et al., 2013).

Desde las primeras publicaciones de los mapas de Bondenbender (1890), Reginatto (1970), Rocca et al., (1995) y Rocca y Quintana Crespo (1999) hasta hoy, la urbanización de la ciudad de Córdoba ha crecido considerablemente. Entre 2001 y 2010 se crearon 231 nuevas urbanizaciones, lo que representa casi 50.000 nuevos inmuebles y 17,3 millones de metros cuadrados edificados (Diario La Voz del interior, 2012). Estas nuevas urbanizaciones se distribuyen principalmente en la zona sur, oeste, y noroeste de la ciudad. Esta creciente demanda de viviendas e infraestructura, combinado con el loess altamente colapsable, la forma plano-cóncava del ejido urbano, y sumado a los problemas de anegamiento que tiene la ciudad (Quintana Salvat et al., 2001), torna vital tener conocimiento del subsuelo para la correcta planificación y ejecución de obras civiles. Es por ello

que el presente trabajo tiene como objetivo caracterizar y mapear geotécnicamente los suelos de la ciudad de Córdoba a partir de los datos de aproximadamente 600 estudios de suelos (más de 900 perforaciones), tomando como base las Cartas geotécnicas de la ciudad de Córdoba elaboradas por Reginatto (1970) y Rocca et al., (1995). Por otro lado, se busca relacionar las características y propiedades geotécnicas con la geología y geomorfología de la ciudad. El mapeo está orientado fundamentalmente a la descripción de secuencias sedimentológicas tipo en los diferentes sectores de la ciudad, así como a la definición de estratos recomendados para el apoyo de las fundaciones de obras de infraestructura de porte medio.

GEOMORFOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA GENERAL DE LA CIUDAD DE CÓRDOBA

Geomorfología

Las características de los suelos de la ciudad se encuentran estrechamente vinculados con las formas y topografía del terreno. Desde un punto de vista geomorfológico, el ejido urbano de la ciudad de Córdoba y zona metropolitana se encuentra ubicado en el piedemonte oriental de la Sierra Chica y en la Llanura Pampeana que se desarrolla inmediatamente al este de la misma. La ciudad de Córdoba se emplaza en una rampa tectónica reactivada, de perfil asimétrico, con su flanco occidental conformado por un escarpe de falla, abrupto y un flanco oriental tendido, que fue cubierto por un manto de loess que suavizó el relieve hasta perderse en la llanura. El sector proximal está conformado por un glacis de acumulación que apenas se observa ya que el manto loésico lo tapa. Por otro lado, de manera sincrónica, el río Suquía ha desarrollado su abanico de depósitos aluviales, que se extienden a lo largo y ancho de la ciudad, sumado a paleocauces anastomosados que ponen de manifiesto los diferentes emplazamientos desde comienzos del Cuaternario (Quintana Salvat et al., 2001). Esto permite diferenciar cuatro niveles de terrazas asimétricas: a) las más antiguas se elevan 40 a 42 m sobre el nivel del río, b) las intermedias 10 a 12 m, c) las más recientes 3 a 4 m, y finalmente, c) a nivel de cauce existente, los depósitos actuales y primera terraza (Frenguelli, 1957). Otro agente modelador en la ciudad de Córdoba es el Arroyo La Cañada, que nace en la vertiente oriental de la Sierra Chica, y desagua en el río Suquía en el centro de la ciudad. El Arroyo La Cañada, causó innumerables problemas de inundación y anegamientos a lo largo de la historia hasta que en 1939 se realizaron las primeras obras de canalización que definieron la actual fisonomía por el centro de la ciudad (Fogliá, 1989).

Secuencia estratigráfica

La secuencia estratigráfica típica y dominante de la ciudad de Córdoba está constituida (de base a techo) por basamento metamórfico (cuya profundidad se estima entre los 200 a 300 m por ejemplo en el Barrio de Alta Córdoba), sobre el cuál se

han depositado sedimentos provenientes de las Sierras Chicas y sedimentos fluviales producto de las crecidas históricas del Río Suquía (previo a la construcción del Dique San Roque que actualmente regula su caudal) y el Arroyo la Cañada. Estos depósitos corresponden a la Formación Río Primero de edad aproximada 1,8 - 1,0 Ma (*Santa Cruz, 1972*) y representan los niveles aterrazados del río. Sin embargo, desde el punto de vista geotécnico el sedimento más problemático es el manto de loess que se encuentra a nivel superficial y cubre gran parte de la ciudad a ambos márgenes del Río Suquía. El manto de loess presenta espesores muy variables, del orden de tan solo 5 m en el sector oeste - noroeste (inmediaciones de los Campos del 3er Cuerpo del Ejército, Avda. Ejército Argentino), rondando los 25 m en el extremo sur del ejido municipal, y alcanzando profundidades de más de 80 m en el extremo norte como por ejemplo en Barrio Guiñazú (*Quintana Salvat et al., 2001*).

La principal característica geotécnica de los loess cordobeses es la colapsabilidad, es decir su capacidad de sufrir grandes asentamientos en forma brusca frente a humedecimientos o cambios tensionales (*Rocca, 2006* y *Rinaldi et al., 2007*), lo cual permite clasificarlos como suelos metaestables (*Aitchinson, 1973*). Esta inestabilidad es motivo de numerosos daños y pérdidas en la infraestructura civil. De acuerdo a observaciones realizadas por *Sanabria y Argüello (2003)*, el manto de loess, denominado Fm. General Paz (*Santa Cruz, 1972*), está constituido por dos pulsos. Por un lado, el loess más profundo que corresponde a la Fm. Pampeana (*Cantú, 1992*). Este manto está caracterizado por sedimentos loésicos, loessoides y fluvio-eólicos, con presencia de fragipanes (*Sanabria y Argüello, 2003*). Desde un punto de vista mecánico la Fm. Pampeana, corresponde a loess removilizado que ha sufrido preconsolidación por desecación y por lo tanto no resultan susceptibles a sufrir colapso (*Rocca, 2006*). Por otro lado, el loess superior, que se encuentra a profundidades de hasta aproximadamente 10 m, corresponde a la Fm. Cordobense,

conformada por limos de color pardo a pardo rojizo, de origen eólico y generalmente edafizados a nivel superficial (*Frenguelli, 1957*). El comportamiento de estos loess superficiales es altamente colapsable (*Rocca, 2006*).

Desde el punto de vista mineralógico, en el loess se presentan como minerales mayoritarios el cuarzo, el feldespato, la calcita y vidrio volcánico y a su vez aparecen como trazas, minerales tales como la muscovita, illita y clorita (*Rocca, 2006* y *Argüello et al., 2012*).

MATERIALES Y MÉTODOS

Como punto de partida se construyó una base de datos a partir de 600 informes geotécnicos (alrededor de 900 perforaciones). Asimismo, para la construcción del mapa se emplearon imágenes satelitales de *Google Earth Pro* con 1 m de resolución y SRTM de 30 m de resolución, trabajando con el sistema de referencia Datum WGS84 con una escala aproximada de 1:100.000. El mapeo digital de las unidades geotécnicas se realizó usando softwares de uso gratuito tales como SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses*), *Qgis* y *Rockworks*. Los diferentes mapas de profundidades y las secciones transversales, fueron realizados a partir del modelo de bloques sólidos previamente generado en *Rockworks*. Los perfiles tipo de cada unidad geotécnica se graficaron empleando herramientas de diseño gráfico. Finalmente, con estas herramientas e información, se procedió a desarrollar un modelo geomorfológico y geotécnico de la ciudad de Córdoba y alrededores, a partir del cual se construyó el mapa geotécnico. Este proceso se ejecutó respetando los lineamientos fundamentales previamente empleados por *Reginatto (1970)* y *Rocca et al., (1995)*. El modelo desarrollado divide a la ciudad en unidades de Tipo Geotécnico siguiendo criterios de uniformidad litológica-mecánicas. En la Figura 1 se presenta un esquema de la metodología empleada para la confección del mapa.

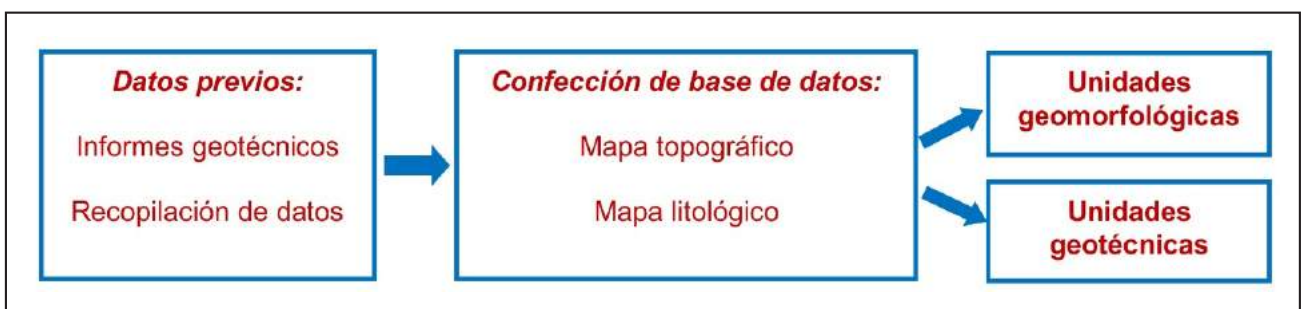


Figura 1. Metodología empleada para la confección del mapa geotécnico de la ciudad de Córdoba y alrededores.

RESULTADOS

Zonificación Geotécnica

Dado que el comportamiento mecánico de los suelos y rocas se encuentra estrechamente relacionado con el paisaje geomorfológico, siguiendo los criterios mencionados, se zonificó al ejido urbano y alrededores de la ciudad de Córdoba de la manera ilustrada en la Figura 2. Las divisiones geomorfológicas fueron tomadas de *Quintana Salvat et al., (2001)*.

La ciudad de Córdoba quedó dividida en cinco unidades de mapeo las cuales se enumeran en la Tabla 1. Las principales características geotécnicas de los diferentes sectores geomorfológicos,

así como los aspectos más sobresalientes del comportamiento mecánico de los perfiles tipo se resumen en "Fichas Técnicas". Estas fichas técnicas se presentan en las Figuras 3 a 11.

En la zonificación se unieron algunas unidades geomorfológicas para facilitar la lectura del mapa, sin embargo, en las fichas técnicas se encuentran desglosadas. Por ejemplo, en la zonificación geotécnica, la segunda y tercera terraza del Río Suquía conforman una misma unidad geomorfológica, sin embargo, en las fichas técnicas se presenta un perfil característico para cada una de las terrazas.

Tabla 1. Zonificación geotécnica de la ciudad de Córdoba, unidades de mapeo.

Zona geomorfológica	Perfil tipo
I. Planicie aluvial Río Suquia	Depósitos actuales y primer Terraza
II. Terrazas intermedias	a) Segunda y Tercera Terraza b) Cuarta Terraza
III. Terrazas del Arroyo La Cañada	
IV. Planicie loésica	a) Con freática b) Sin freática
V. Piedemonte Sierras Chicas.	a) Piedemonte proximal b) ¿Formación Villa Belgrano?

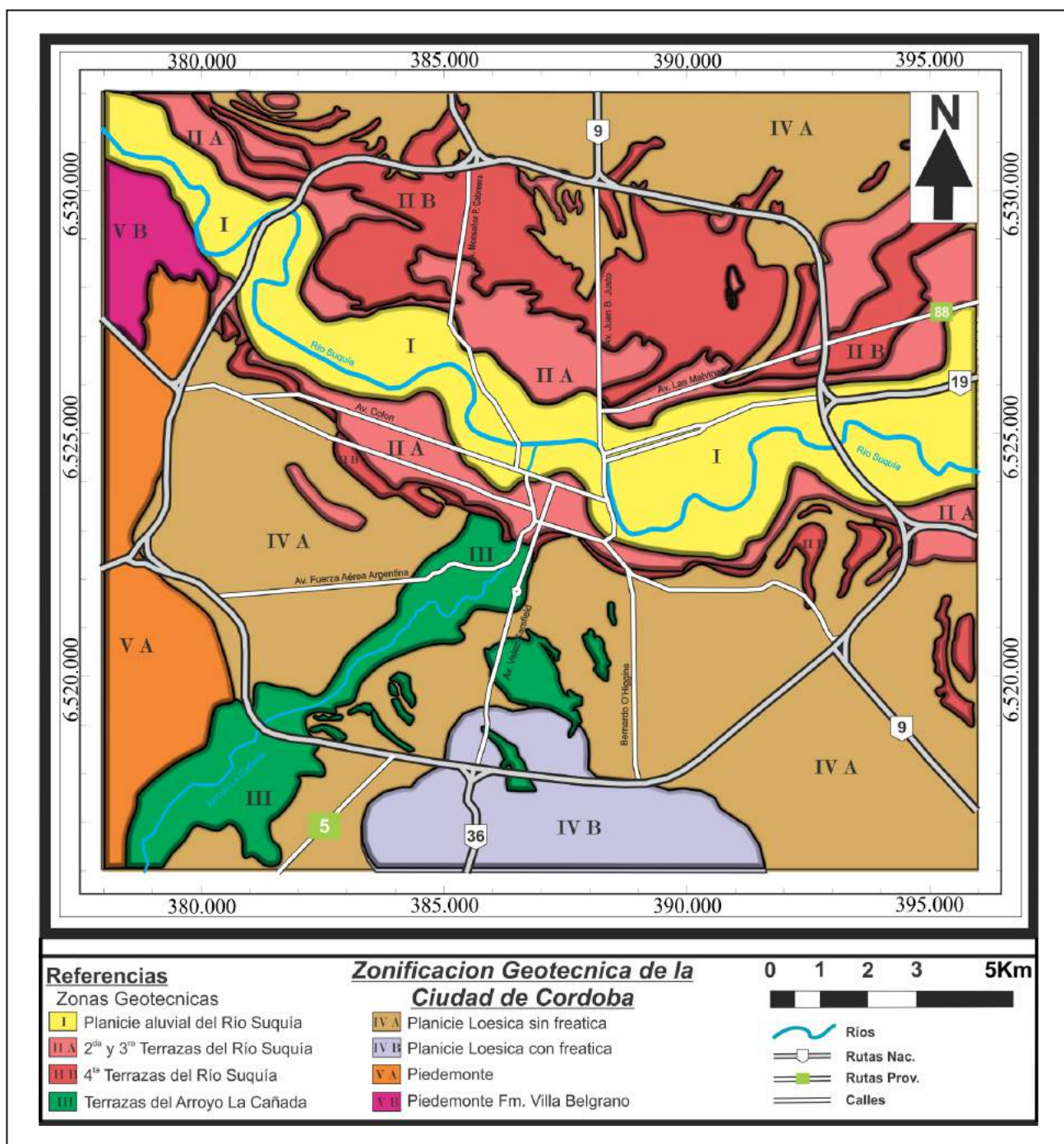


Figura 2. Zonificación geotécnica de la ciudad de Córdoba.

Aspectos fundamentales de cada zona

Planicie aluvial Río Suquía y 1er terraza

Corresponde al cauce actual del río Suquía. El río Suquía o Primero es un río de carácter antecedente, el cual al salir del piedemonte forma un gran abanico aluvial. La planicie aluvial actual, está compuesta por arenas gruesas a finas, cuya gradación depende de la competencia y capacidad que tuvo el río a lo largo de las fluctuaciones estacionales típicas del clima dentro de su historia geológica.

El perfil tipo de la zona es (de base a techo): SP - ML o ML / CL. Está constituido por alternancia de arenas de diferente granulometría y capas de finos como limos y arcillas. La profundidad y la intercalación de cada uno de estos materiales están sujetas a la dinámica fluvial a lo largo de la ciudad. Este perfil se encuentra representado principalmente en el barrio Centro y todos los barrios que se encuentren en la ribera del río (Figura 3).

Terrazas intermedias

Segunda y tercera terraza

A medida que nos alejamos del cauce actual del río tenemos las distintas terrazas. Éstas corresponden a geoformas que se encuentran a niveles topográficos más elevados que el cauce contemporáneo y que se suavizan hacia el este producto de la erosión ocasionada por el lavado de los sectores superiores. Debido a esto, la alternancia de los materiales, como las profundidades pueden variar ligeramente.

La segunda terraza se encuentra a aproximadamente 4 a 5 m de profundidad con respecto a la superficie actual del terreno. Corresponde a la secuencia (de base a techo): SP - SM - ML o ML / CL y se encuentra en barrios como Alberdi, Providencia, San Martín (Figura 4).

La tercera terraza se encuentra a los 6 - 8 metros aproximados de profundidad, el perfil tipo es (de base a techo): SP - SM - ML o ML / CL. El perfil se conforma por arenas en general pobremente graduadas en profundidad, luego arenas limosas, y finalmente la cubierta loésica que reviste a toda la ciudad de Córdoba. Este perfil caracteriza a barrios como Alta Córdoba (Figura 5).

Cuarta terraza

La cuarta terraza se encuentra a aproximadamente 12 metros de profundidad con respecto a la superficie del terreno natural actual. El perfil tipo está compuesto por (de base a techo): SP - SM - ML o ML / CL. Esta terraza se encuentra mayormente desarrollada en el sector norte de la ciudad (Figura 6) como ser barrios Poeta Lugones y Marqués de Sobremonte.

Terrazas Arroyo La Cañada

Estos depósitos se encuentran en el sector sur - suroeste del Arroyo La Cañada, principalmente en barrios como La Cascada.

El perfil se encuentra representado por una alternancia (de base a techo) de arenas limosas, arenas pobremente graduadas y limos. En este sector, se entremezclan depósitos de piedemonte (las arenas pobremente gradadas) con arenas limosas pertenecientes al arroyo, recubiertos por mantos loésicos (Figura 7).

Planicie loésica

Sin freática

Corresponde a la fracción sureste, algo al suroeste, y al norte de la ciudad de Córdoba, sectores actualmente en pleno

desarrollo urbanístico. Es el sitio elegido en las últimas dos décadas por numerosos desarrollistas para construir *countries* y barrios cerrados.

El perfil tipo es ML o bien ML / CL. Si bien, la profundidad estudiada en el presente trabajo llega hasta los 14 m, perforaciones no incluidas aquí indican que la litología loésica se mantiene sin cambios a profundidades mayores (Figura 8).

Con freática

Ubicada hacia el sur del anillo de Circunvalación, entre las avenidas Armada Argentina y 11 de Setiembre. Esta zona se caracteriza por tener presencia de nivel freático a profundidades variables entre los 2 y 13 m con respecto a la superficie actual del terreno. La presencia de la primera napa a escasa profundidad es consecuencia, en parte de la elevada y descontrolada urbanización combinada con la carencia de obras de cloacas, como así también al drenaje proveniente de las Sierras de Malagueño y Los Cerrillos, por lo que de acuerdo a análisis de DEM (modelo de elevación digital) (Quintana Salvat et al., 2001) y trazado de cuencas de drenaje, este sector pertenecería a la cuenca del Río Xanaes.

El perfil tipo se caracteriza por tener 14 m de loess (ML o bien ML / CL) con presencia del nivel freático a profundidades variables entre los 2 y 13 m (Figura 9). Si bien la profundidad estudiada aquí llega hasta los 14 m, datos de perforaciones no incluidas en el presente trabajo indican profundidades mayores manteniendo la presencia de limos loésicos.

Piedemonte Sierras Chicas

Piedemonte proximal

Si nos desplazamos hacia el oeste, y saliendo del ejido urbano de la ciudad de Córdoba, los suelos en el piedemonte presentan una gran variabilidad espacial y gran heterogeneidad litológica, con lo cual los perfiles tipo aquí presentados pueden encontrarse en áreas puntuales y localizadas, pudiendo hallarse fuera de las mismas columnas sedimentarias levemente diferentes a las descritas a continuación.

Los suelos encontrados en el piedemonte de las Sierras Chicas se encuentran bien representados en localidades como Villa Allende y Mendiolaza, entre otras. Básicamente están conformados en su base por basamento metamórfico altamente meteorizado, o bien gravas pobremente seleccionadas (GP), o en ocasiones arenas mal graduadas y cementadas en una matriz calcárea. Suprayaciendo a estos materiales suele encontrarse un manto de limos arenosos de tipo loésico, cuyos espesores pueden variar desde los 50 cm hasta 5 a 6 metros (Figura 10).

¿Formación Villa Belgrano?

Constituye todo el sector noroeste de la ciudad, en el límite del ejido urbano. Está representado por el perfil (de base a techo) GP - SW - SM - cubierta loésica (ML o ML / CL). En zonas puntuales puede hallarse el nivel freático, cuya profundidad resulta variable según la estación del año. Este perfil, se caracteriza por encontrar en numerosos sectores a aproximadamente los 2 a 4 m de profundidad un suelo (o roca débil) color rojizo con elevada resistencia mecánica y capacidad portante, que correspondería a la Fm. Villa Belgrano (Santa Cruz, 1972). Vale aclarar que para corroborar de manera fehaciente si efectivamente se trata de la Fm. Villa Belgrano debería realizarse un estudio más exhaustivo que incluya análisis microscópicos y dataciones. Este perfil se puede encontrar en barrios como Villa Warcalde (Figura 11).

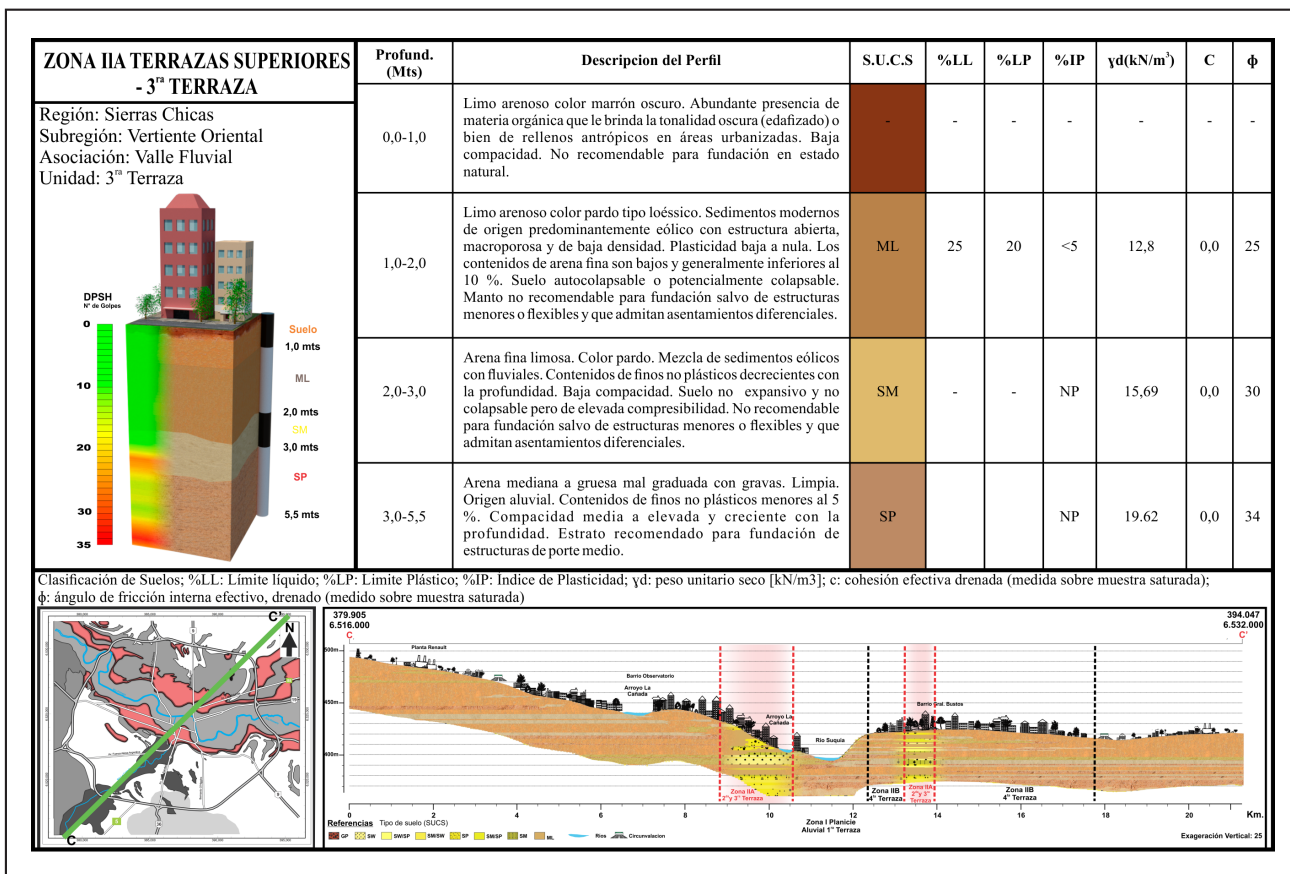


Figura 5. Terrazas intermedias, 3ra terraza del Río Suquia.

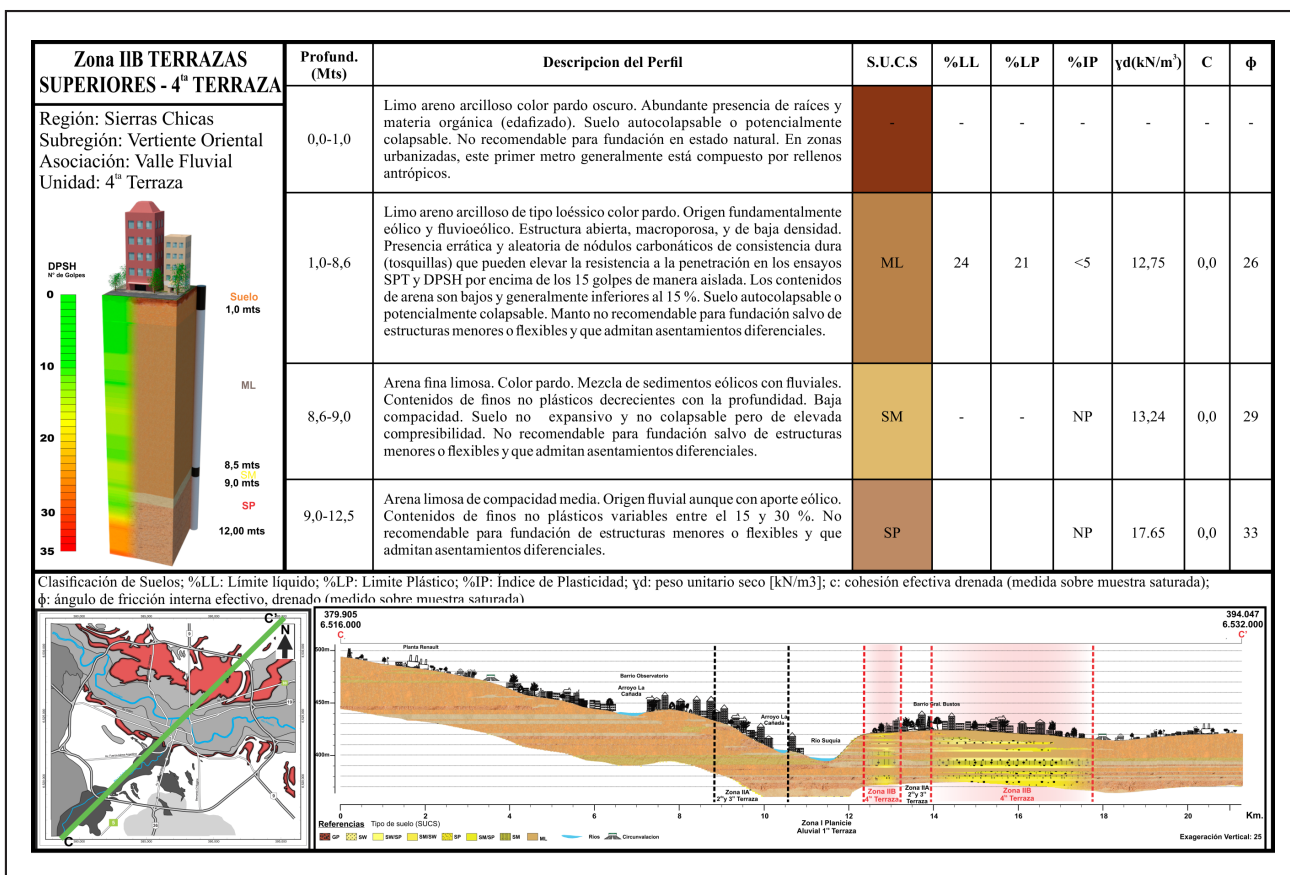


Figura 6. Terrazas superiores, 4ta terraza del Río Suquia.

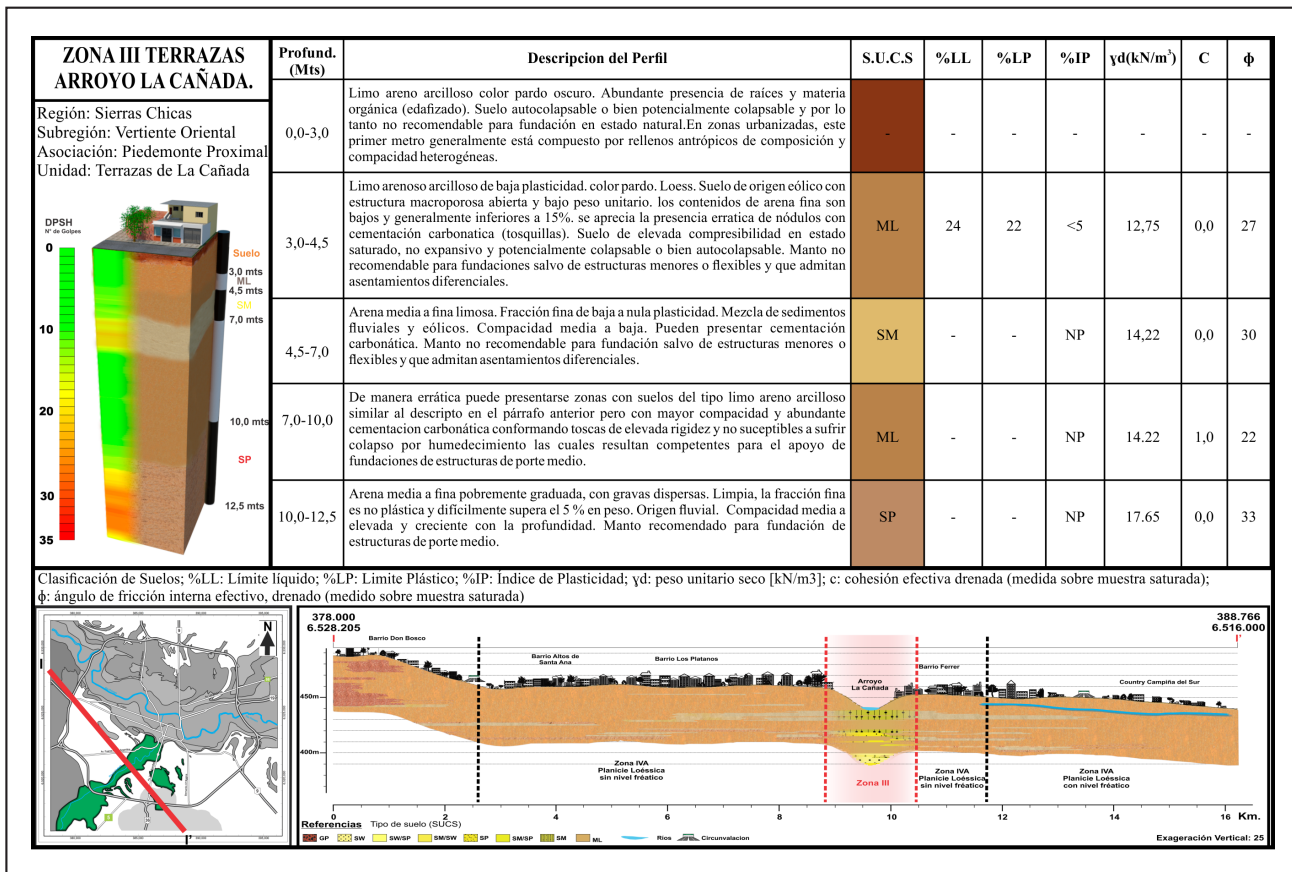


Figura 7. Terrazas Arroyo La Cañada.

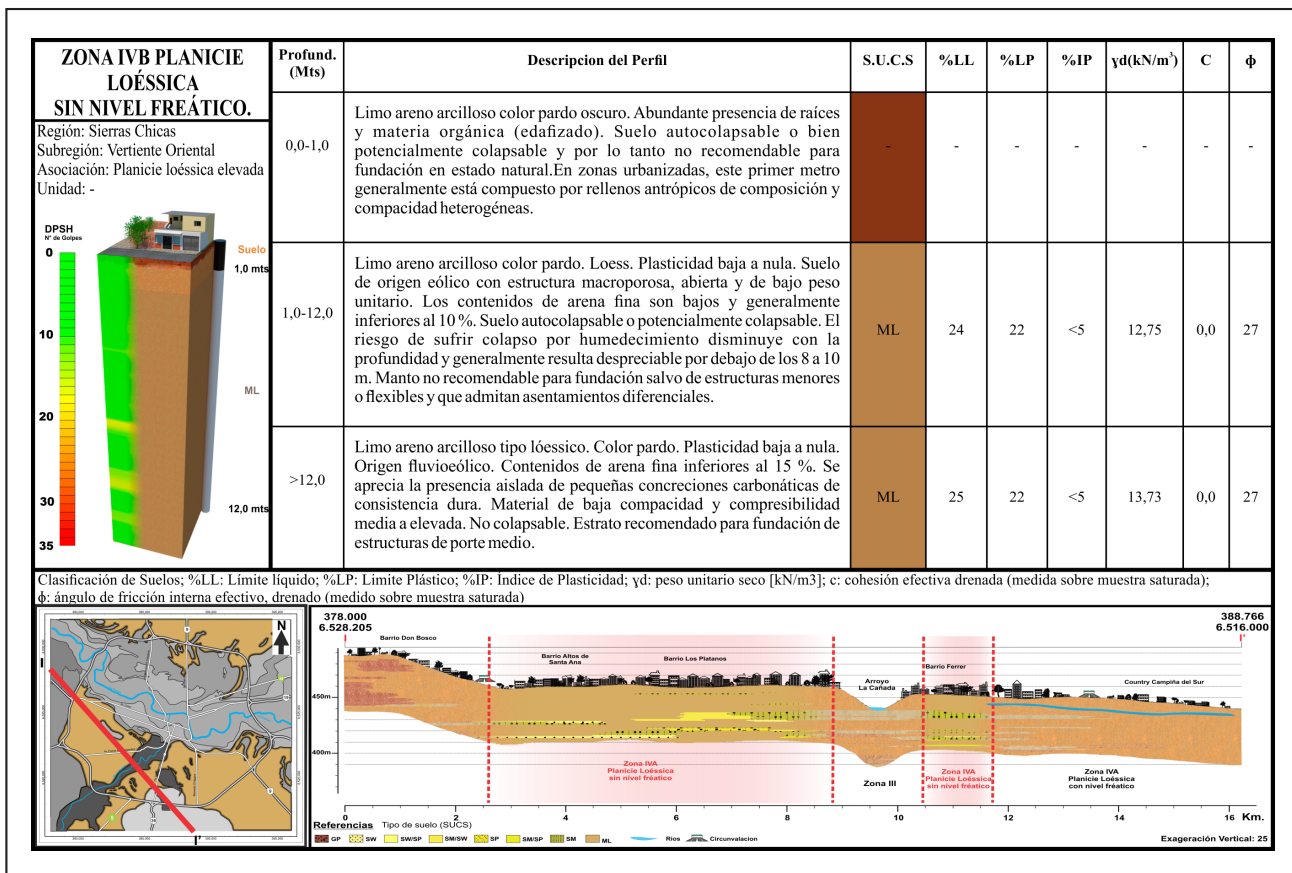


Figura 8. Planicie Loésica sin napa freática.

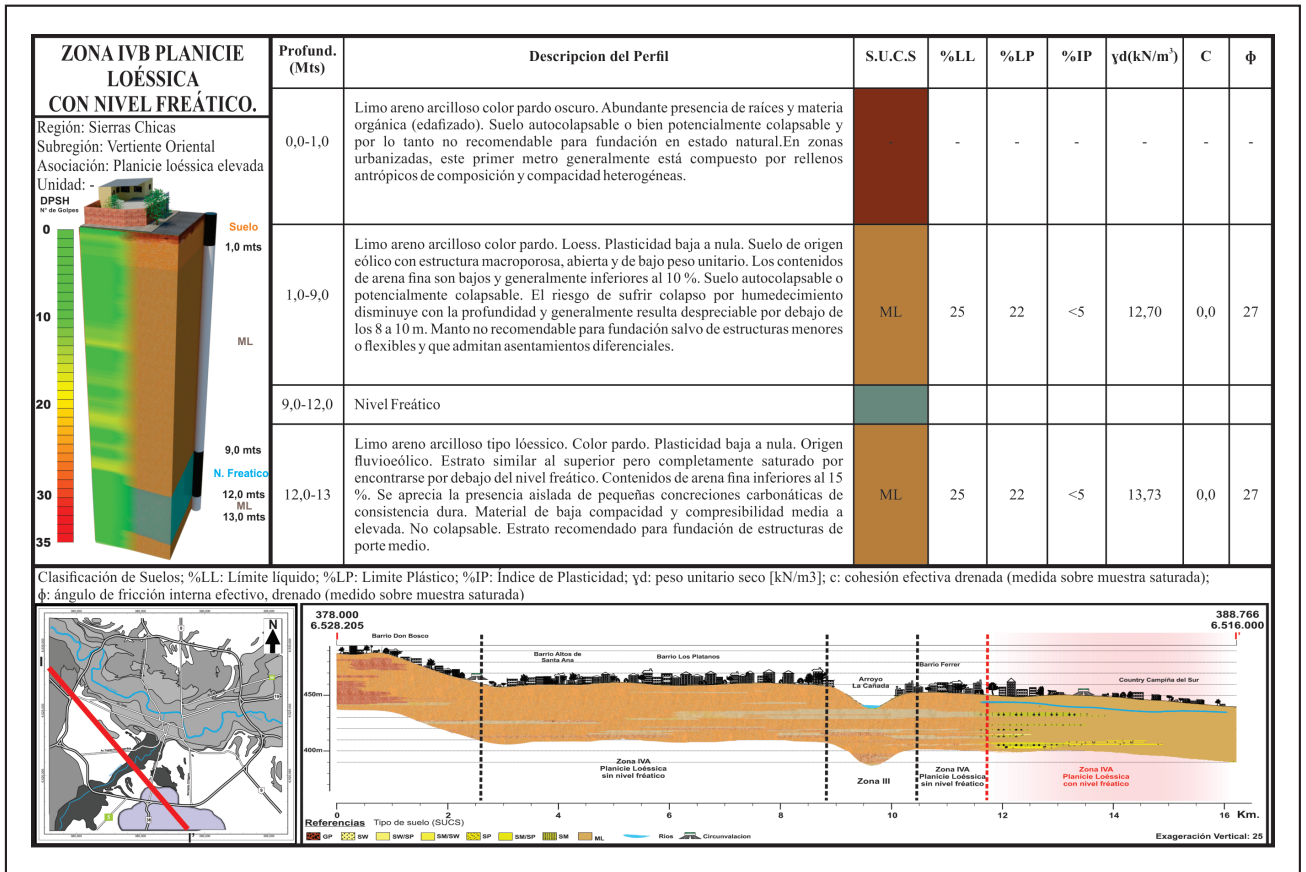


Figura 9. Planicie Loésica con napa freática.

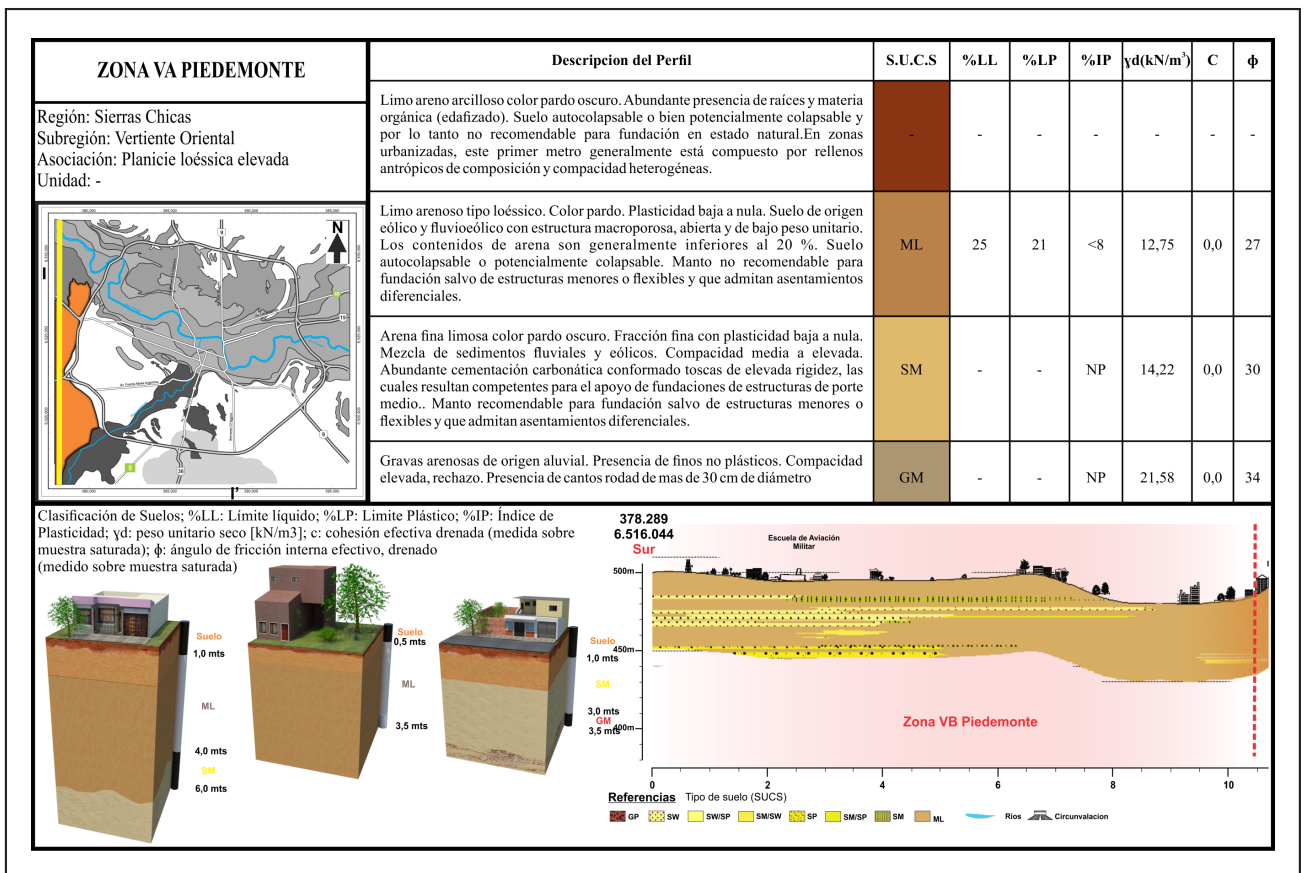


Figura 10. Piedemonte proximal.

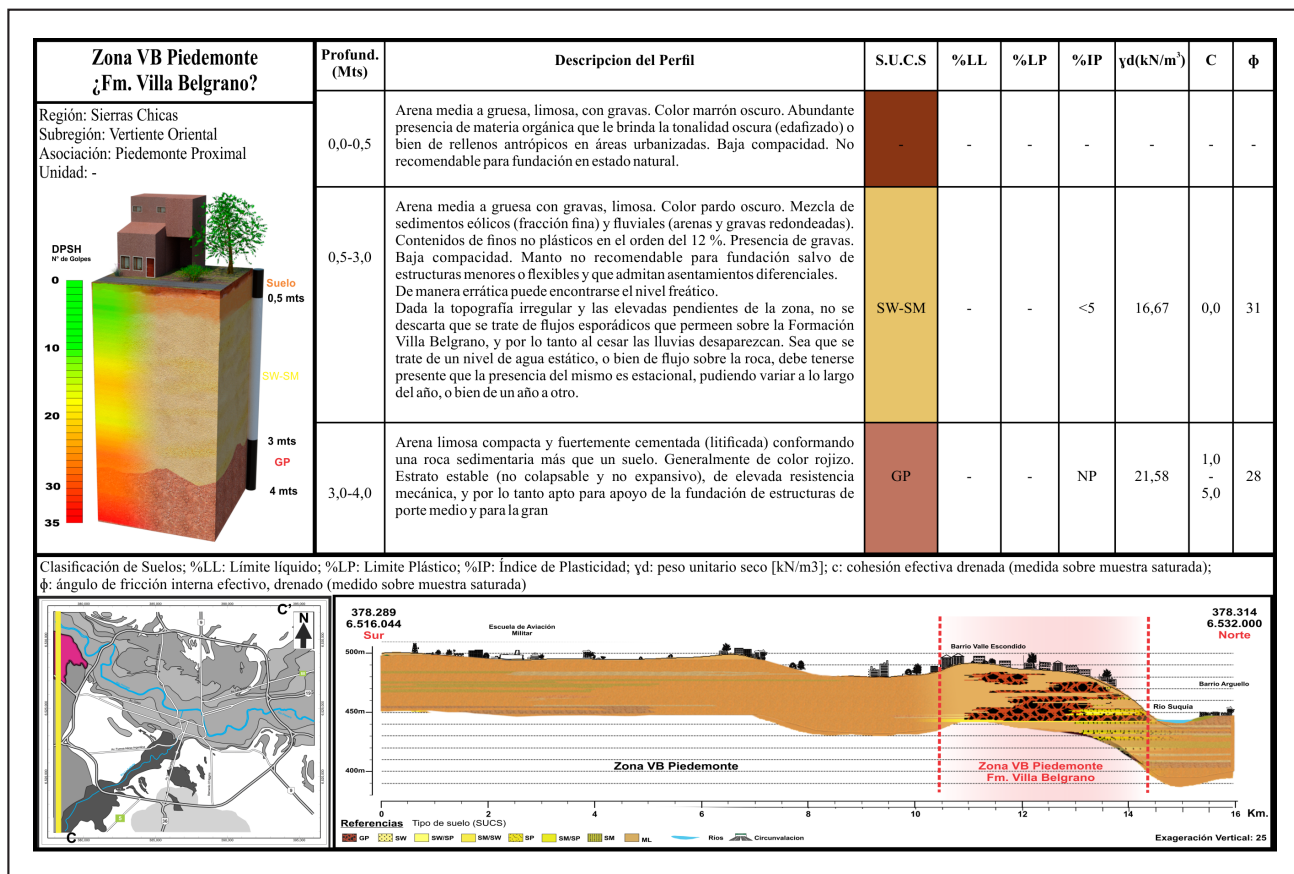


Figura 11. Piedemonte ¿Formación Villa Belgrano?.

MAPA DE PROFUNDIDAD DE RECHAZO EN EL ENSAYO DE HINCA DINÁMICA SÚPER PESADA (DPSH)

Este mapa se construyó tomando como base el mapa topográfico de la ciudad y una superficie imaginaria constituida por litologías que presentan un número de golpes (N_{DPSH}) mayor a 35 en el ensayo de hincado con cono de tipo DPSH (*Dynamic Probing Super Heavy* - Hincado Súper Pesado), el cual a los fines de este trabajo ha sido definido como N_{DPSH} de rechazo. Los lineamientos para la ejecución del ensayo de hincado DPSH se encuentran definidos por el Comité Técnico TC-16 de la ISSMGE (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering). Este ensayo consiste en introducir en el terreno un cono de acero de 51 mm de diámetro y un ángulo de avance de 60 grados, mediante la aplicación de golpes con una masa de 63,5 kg arrojada desde una altura de 76 cm (misma energía de hincado que el SPT), contando la cantidad de golpes necesarios para que el cono penetre una profundidad de 20 cm en el terreno.

El mapa de profundidad de rechazo se presenta en la Figura 12a. En el mismo se indican con diferentes colores las profundidades a las cuales se produce rechazo (más de 35 golpes para penetrar 20 cm) en el ensayo de hincado DPSH.

Asimismo, en la Figura 12b, se presentan las litologías a las cuales se produce el rechazo en los diferentes sectores de la Ciudad. Puede observarse que en su mayoría las litologías que presentan $N_{DPSH} > 35$ se corresponden con suelos granulares GP, SP, SW, SW, SM, entre otros. Sin embargo, en la Figura 12b

también se observan suelos clasificados como ML o ML / CL, los cuales dan rechazo por presentar cementación con carbonatos (toscas o limos loésicos con abundantes tosquillas), o bien encontrarse preconsolidados por desecación (*Rocca, 2006*).

La profundidad de rechazo ($N_{DPSH} > 35$) ilustrada en la Figura 12a puede tomarse de una manera tentativa y aproximada como una aproximación a la profundidad que deberían alcanzar las fundaciones, sean superficiales o profundas, de obras de arquitectura de porte medio, como es el caso de viviendas unifamiliares y edificios de hasta 4 plantas.

CONSIDERACIONES FINALES

En el presente trabajo se dividió a la ciudad de Córdoba en 5 zonas geotécnicas. Las mismas se delimitaron sobre la base de las características geomorfológicas dominantes de la ciudad. Dentro del ejido urbano, más precisamente dentro del anillo de Circunvalación, se observa un dominio casi exclusivo de sedimentos modernos de origen eólico (loess) y fluvial (arenas depositadas por el río Suquia y el Arroyo La Cañada).

El sector de piedemonte proximal está conformado en su base por sedimentos gravosos (GP) que afloran principalmente en el sector noroeste de la ciudad que, dadas sus características de roca sedimentaria rojiza, podrían corresponder a la Formación Villa Belgrano. Por otro lado, en los alrededores del ejido urbano, la zona de piedemonte se caracteriza también por presentar basamento metamórfico altamente meteorizado o en ocasiones arenas cementadas, todos mantos aptos para la fundación de

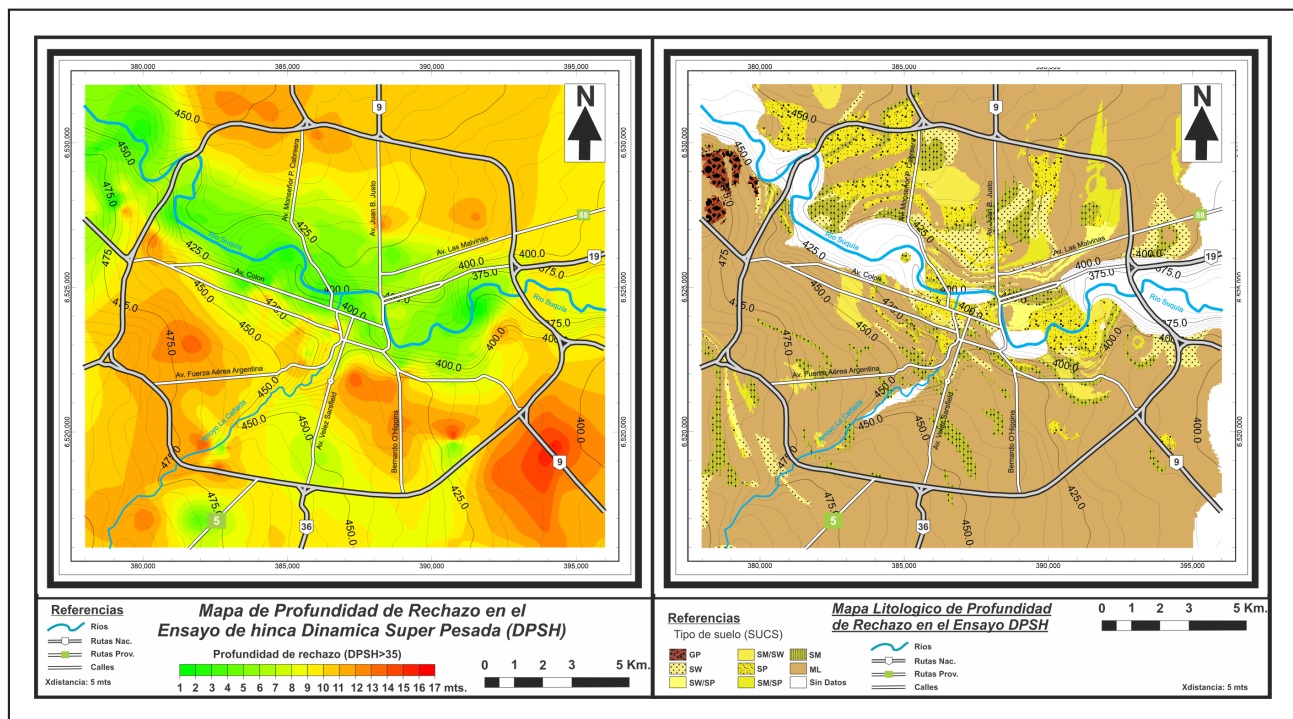


Figura 12. a) Mapa de profundidad de rechazo en la hinca con cono DPSH, b) Mapa de litologías que presentan $N_{DPSH} > 35$ golpes.

estructuras de porte medio. Los espesores y profundidades de las mencionadas capas no son uniformes debido a la variabilidad topográfica que presenta esta unidad geomorfológica.

Hacia el suroeste, también en la asociación piedemonte proximal y en dirección al centro de la ciudad se encuentra las terrazas pertenecientes al Arroyo La Cañada, que mayoritariamente están compuestas por alternancia de capas de arenas limosas (SM) con mantos de limos loésicos (ML). Los limos loésicos, en ocasiones presentan abundante cantidad de cementación carbonática conformando toscas de elevada rigidez y capacidad portante, y no susceptibles a sufrir colapso por humedecimiento. En este sector no solo hay aporte del arroyo, sino también del piedemonte de las Sierras de Malagueño. En su curso hacia el centro de la ciudad, el Arroyo La Cañada desemboca en el Río Suquía, donde los mantos de arenas se mezclan dando un perfil de arenas bien graduadas (terrazas del río) intercalado con arenas limosas (terrazas del arroyo), conformando el perfil característico del casco céntrico de la ciudad.

El río Suquía, en su paso por la ciudad, presenta cuatro niveles de terrazas asimétricas que se encuentran a distintas profundidades y corresponden a las paleoformas fluviales. Estas paleoformas responden a distintos emplazamientos del cauce producto del acortamiento y estrangulamiento de meandros, como así también a movimientos neotectónicos del río a lo largo de su historia geológica. Estos paleocauces y antiguas terrazas se encuentran mejor representadas en el sector norte de la ciudad. Las terrazas que se encuentran a mayor profundidad (del orden de 12 a 14 m) corresponden con las más antiguas, luego siguen las que se encuentran entre los 6 y 8 m, un tercer nivel se encuentra alrededor de los 3 m, y finalmente se presenta el lecho actual con las terrazas recientes que no superan el metro de profundidad y se encuentran en la zona ribereña.

La planicie loésica ocupa gran parte del ejido urbano. El material que la constituye es sumamente problemático por su inestabilidad frente al humedecimiento al momento de construir. Esta zona ha sido dividida en dos, una conformada por un perfil de loess que supera los 14 metros, y otra con litología similar, pero con presencia de la napa freática entre los 2 y 13 m de profundidad. El sector en el cual se encuentra el nivel freático es acotado y en general se asocia a la presencia de barrios con altas densidades ocupacionales y carentes, hasta hace poco tiempo, de obras de infraestructura cloacal. Por otro lado, este sector tiene el aporte hídrico proveniente de las Sierras de Malagueño y Los Cerrillos y pertenecería a la cuenca del Río Xanaes.

A partir de la zonificación geotécnica y de los datos aportados por los estudios de suelo, se construyó el mapa de profundidad de rechazo y el de la litología que presenta $N_{DPSH} > 35$ golpes. Estos mapas permiten planificar la investigación geotécnica para todo tipo de obras civiles. Si bien, las litologías en las que se alcanza el rechazo en la hinca Súper Pesada corresponden mayoritariamente a suelos granulares de compactación media a elevada, también se puede observar que el rechazo a la hinca se produce en un extenso manto de loess que corresponde a la Formación Pampeana. El mismo se trata de un loess retransportado que fue sometido a procesos de desecación y que en ocasiones presenta elevados contenidos de cementación carbonática, ambos fenómenos que favorecen su estabilidad frente al humedecimiento y capacidad portante, tornándolos en aptos para el apoyo de fundaciones de obras medianas.

En base a lo expuesto es posible sintetizar las siguientes conclusiones:

El análisis del subsuelo de la ciudad de Córdoba revela una gran heterogeneidad en los depósitos que la componen. Estos contrastes litológicos ponen en evidencia que para cada obra civil se requiere un análisis exhaustivo y pormenorizado

realizado por especialistas para determinar las características y rasgos fundamentales del comportamiento del suelo. La construcción del mapa geotécnico aquí presentado procura orientar la planificación de estudios geotécnicos para obras civiles, y de ninguna manera pretende desestimar la necesidad de ejecución de ensayos in-situ para cada obra y sitio en particular.

Finalmente, el mapa aporta información valiosa para el emplazamiento de futuros emprendimientos urbanísticos y para la ampliación del ejido urbano.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias 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 de la F.C.E.F. y N. de la U.N.C. por el espacio y equipamiento. Por otro lado, se agradece a los evaluadores cuyos comentarios y sugerencias ayudaron a mejorar la calidad de este trabajo.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AITCHINSON, G. D. (1973).
Structurally Unstable Soils; State of the Art.
Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscú, 161 - 190.
- 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.
- BODENBENDER, G. (1890).
La cuenca del Valle del Río Primero en Córdoba. Descripción geológica del valle del Río Primero desde la Sierra de Córdoba hasta la Mar Chiquita.
Boletín de la Academia Nacional de Ciencias. Córdoba, 12, 5-55.
- CANTÚ, M. P. (1992).
Provincia de Córdoba.
El Holoceno de la Argentina: Argentina,
Cadínqua I, 1-16.
- DIARIO LA VOZ DEL INTERIOR, 2012.
- FOGLIA, M. E. (1989).
Procesos de modernización en Córdoba.
Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- FRANCISCA F. M., ROCCA R. J., DAHBAR P. Y VERRA M. (2008).
Variabilidad de las propiedades geotécnicas de los limos loésicos de Córdoba.
Memorias del XIX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG 2008), La Plata, Argentina.
- FRENGUELLI, J. (1957).
Geografía de la República Argentina.
Neozoico T. II, tercera parte, Sociedad Argentina de Estudios Geográficos. Buenos Aires.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I., FERRER, M., ORTUÑO, L. Y OTEO, C. (2002).
Ingeniería geológica.
Pearson Educación.
- MOLL, L. Y ROCCA, R. J. (1991).
Properties of Loess in the Center of Argentina.
IX Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Chile, Vol. 1.
- QUINTANA SALVAT, F., BARBEITO, O. Y MENSÓ, R. (2001).
Carta de Peligrosidad (Amenaza) de Inundación, Erosión y Anegamiento para las Acciones de Prevención -Ciudad de Córdoba-,
Ed. Municipalidad de Córdoba.
- REGINATTO, A. (1970).
Propiedades mecánicas de algunos suelos de la ciudad de Córdoba.
2da Reunión Argentina de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Córdoba, Argentina.
- REPORT OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING (ISSMFE) (1989).
Technical Committee on Penetration Testing of Soils -TC 16 with Reference Test Procedures
CPT - SPT - DP - WST.
- RINALDI, V. A., ROCCA, R. J. Y ZEBALLOS, M. E. (2007).
Geotechnical characterization and behaviour of Argentinean collapsible loess.
Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, 2259-2286.

- Rocca R. J. (2006).
Confiabilidad de las estimaciones de colapsibilidad de la ciudad de Córdoba.
Memorias del XVIII Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG 2006). Vol I, San Juan, Argentina.
- ROCCA, R. J. Y QUINTANA CRESPO, E. (1999).
Geotechnical zonation of Cordoba city (Argentina) using cluster analysis.
Proceedings of the XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz Iguazu, Brasil, Vol II, 659-666.
- ROCCA, R. J., QUINTANA CRESPO, E., ABRIL, E. G., Y GOIO, M. G. (1995).
Carta geotécnica de la ciudad de Córdoba.
Asoc. Arg. Geol. Aplicada a la Ingeniería, Publicación Especial, 3, pp. 322-340.
- ROCCA, R. J., TERZARIOL, R. E., ZEBALLOS M. E. 2013.
Estimaciones, simulaciones y la influencia de la experticia en la predicción de la colapsibilidad de los suelos loessicos de la ciudad de Córdoba.
Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, Buenos Aires, N° 30, pp. 67 - 76.
- 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, 2003.
- SANTA CRUZ, J. (1972).
Geología al Este de la Sierra Chica (Córdoba) Valle del Río Primero.
Boletín de la Asociación Geológica de Córdoba, 1-34.