

# EFFECTO DEL ASCENSO DEL NIVEL FREÁTICO EN SUELOS LOÉSSICOS COLAPSABLES<sup>1</sup>

Víctor Rinaldi<sup>2</sup>, Marcelo Zeballos<sup>3</sup> y Ricardo Rocca<sup>4</sup>

Resumen: El desarrollo de áreas urbanas, en muchos casos, provoca con el tiempo modificaciones en las condiciones hidrogeológicas locales previamente existente. En un sector del sur de la ciudad de Córdoba, dominada por suelos de tipo loésicos altamente colapsables, se detectó a principios del año 2001 el ascenso de los niveles freáticos desde aproximadamente 10 m, según antecedentes 5 años previos, hasta alcanzar niveles próximos a la superficie. El área afectada comprende una extensión aproximada de 1.7 km<sup>2</sup> y una población de unos 5,600 habitantes. En la emergencia del suceso se solicitó la intervención de miembros del área de Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba a los fines de realizar un estudio de los orígenes del problema y la elaboración de un proyecto de remediación. Para este estudio se realizaron distintos trabajos incluyendo: la revisión de antecedentes geológicos-geotécnicos, la evaluación de las condiciones geotécnicas, y evaluación de las condiciones hidrológicas e hidráulica superficiales. Este trabajo presenta un resumen de los estudios realizados y un resumen del proyecto de remediación inicialmente propuesto que consistió básicamente en la colocación de varios pozos de bombeo. La distribución y localización de los mismos se realizó empleando una modelación numérica del flujo. La concordancia de las mediciones de descenso del nivel de agua y las estimadas mediante el modelo resultó muy aceptable.

**Palabras claves:** área Urbana, loess, nivel freático, remediación.

## EFFECT OF WATER TABLE LEVEL RISE IN COLLAPSABLE LOESSIC SOILS

Abstract: The development of new urban areas usually generates significant modification of the initial hydro geological original conditions. At the beginnings of the year 2001, it was detected the elevation of water level from -10 m approximately 5 years before reaching near to the soil surface of an important area located at the south of Cordoba City characterized by the presence of a highly collapsible formation of loess. The extension of the area was around 1.7 km<sup>2</sup> and the population settled there were approximately 5600 people. The importance of the problem required for the assistance of the University of Cordoba in order to study the origin of the water and to generate a remediation project. Basic studies consisted on the revision of geological and geotechnical relevant background and the evaluation of present geotechnical an hydro geological conditions. This work summarizes the main results and the proposed remediation project which consisted basically on the location of pumps into drainage boreholes. The distribution of the boreholes was performed by the aid of a numerical simulation program. The agreement between predicted and measured water level lowering was very good.

**Keywords:** loess, remediation, urban area, water level.

### INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano de áreas determina, en muchos casos, modificaciones en las condiciones hidrogeológicas locales. Son numerosos los ejemplos en los que la evolución del nivel freático produce condiciones inaceptables, tanto sanitarias como estructurales. Estas situaciones presentan antecedentes conocidos en la ciudad de Londres, en área pobladas de China, entre otras (CIRIA, 1989). En Argentina, los efectos más notables se han producido en la zona Centro Este de la Llanura Pampeana (Zeballos et al., 1999).

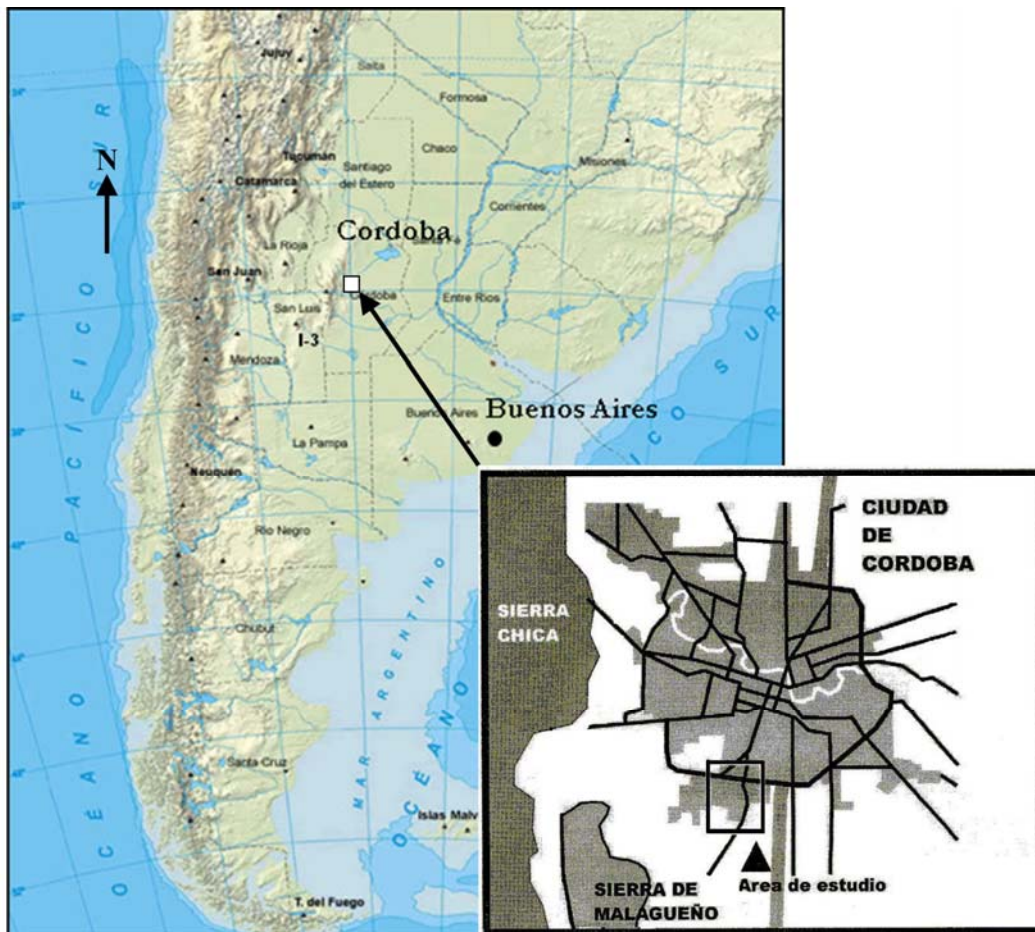
<sup>1</sup> Artículo recibido el 21 de julio de 2011 y aceptado para publicación el 28 de diciembre de 2011.

<sup>2</sup> Laboratorio de Geotecnia, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. E-mail: rinaldiva@yahoo.com

<sup>3</sup> Laboratorio de Geotecnia, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. E-mail: marcelozeballos@yahoo.com.ar

<sup>4</sup> Laboratorio de Geotecnia, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. E-mail: rjrocca@efn.uncor.edu

El estudio que se presenta corresponde al tratamiento de los problemas de ascenso del nivel freático en una zona caracterizada geológicamente por la existencia de una formación típica de suelos colapsables de espesor considerable. El área se localiza en el sector sur de la ciudad de Córdoba (barrios Alejandro Carbó, Santa Rosa Residencial y Cooperativa Luján). La Figura 1 muestra el plano de ubicación geográfica del sector. El área de interés limita al Sur y Oeste con un canal de riego (Canal Maestro Sur), al Este con una ruta de acceso a la ciudad de Córdoba (Ruta Provincial N° 36) y al Norte con una calle urbana. El área encerrada comprende una extensión de 1.7 km<sup>2</sup>, aproximadamente, y su población es de unos 5600 habitantes. En la Figura 2 se puede apreciar un mapa ampliado del sector descripto.

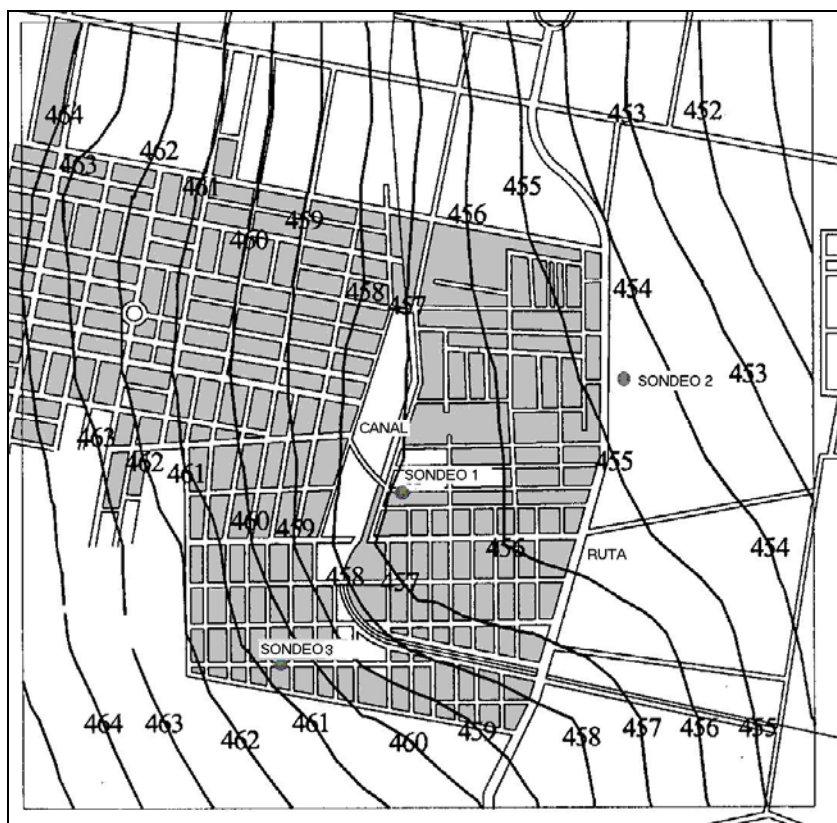


**Figura 1: Localización geográfica de la zona.**

La elevación de los niveles freáticos originó la colmatación de los pozos sanitarios absorbentes, lo que impedía la correcta evacuación de los desechos cloacales de los domicilios. No se contaba hasta el momento con redes sanitarias. La situación provocó, complementariamente, diversos problemas sanitarios con serias consecuencias para la salud de la población.

El objetivo de los estudios realizados fue: a) identificar las causas del fenómeno, b) desarrollar un plan para provocar el descenso de los niveles de agua a corto plazo, y c) proponer un proyecto de remediación que elimine o atenúe el fenómeno de ascenso del nivel freático. Para el cumplimiento de estos objetivos el plan de trabajos incluyó: a) nivelación topográfica del área, b) ejecución de una red de piezómetros para el monitoreo, c) estudios geológicos e hidrogeológicos a través de la evaluación de antecedentes y el estudio de aerofotografías e imágenes satelitales, d) estudios geotécnicos del perfil de suelos, incluyendo ensayos de bombeo, y e) elaboración de modelos simplificados de cálculo, que permitan reproducir la situación original y plantear el efecto de las soluciones proyectadas.

En este trabajo se presenta una breve descripción de las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrológicas previas en el sector de interés y los principales resultados obtenidos en cada uno de los estudios planteados. Así mismo, se resume el proyecto de remediación propuesto y los resultados obtenidos en el corto plazo para este sector.



**Figura 2: Plano del sector con las curvas de nivel superficial.**

### **Loess de la Ciudad de Córdoba**

Los loess y los limos loessoides (producto del transporte y la re-deposición de los loess primarios) cubren gran parte de la provincia de Córdoba y se caracterizan por estar formados por partículas de limos unidas entre sí por contactos de arcilla, generando macroporos susceptibles de sufrir procesos de colapso en presencia de agua. La deposición de cementantes se produce por la percolación de agua y su posterior evaporación, proceso mediante el cual se generan vínculos entre partículas (Houston et al., 1997). En algunos casos el cementante es poco soluble en agua, lo que implica la presencia de nódulos cementados que preservan la estructura del suelo aún en condiciones de saturación elevada (Rinaldi et al., 2007). La presencia de agentes cementantes le otorga a los limos loésicos características especiales tanto en su deformabilidad como en su resistencia al corte.

La cementación en el suelo, también denominada estructuración, puede ser desde muy ligera, lo cual se verifica en suelos muy jóvenes, hasta muy desarrolladas como es el caso de los suelos de climas semiáridos donde abundan los carbonatos y otros suelos donde la presencia de óxidos, sílice e incluso la temperatura han ocasionado la generación de cementación. Los suelos en donde la cementación es alta suelen denominarse como rocas blandas. La presencia de cementantes, en ocasiones, le confiere al suelo características similares a las de materiales de comportamiento elasto-plásticos. El comportamiento tensión-deformación de este tipo de suelos presenta un quiebre muy marcado pudiendo diferenciarse en la curva tensión-deformación dos tramos cuasilineales. El primero de los tramos manifiesta un comportamiento de tipo elástico, mientras que el segundo tramo es la componente plástica que presenta grandes deformaciones para moderados cambios de tensiones. El punto de quiebre de esta curva suele designarse como presión de colapso o fluencia. La presencia de un quiebre marcado debido a cementantes suele enmascararse cuando el suelo se encuentra en condición de semisaturación en donde las tensiones capilares tienden a provocar un efecto similar pero de comportamiento más dúctil.

La solubilidad de los cementantes es muy variable y depende de la composición y acidez del fluido de saturación. Así, la solubilidad de los carbonatos es muy elevada en presencia de aguas ácidas. En el caso de los minerales de sílice bien cristalizados, la solubilidad tanto en agua como en ácido es baja. Sin embargo, los minerales de sílice amorfa (vidrio volcánico en loess) o pobremente cristalizados, reaccionan con el agua alcalina, siendo solubles en ella (Rinaldi et al., 2007).

El efecto de succión en estos suelos tiene tres consecuencias concurrentes: La primera de ellas es la rigidización de la estructura debido a las fuerzas capilares por la formación de meniscos entre partículas. Este efecto se ve magnificado en los loess por la rigidización de los puentes de arcilla en las partículas de arena fina y limos. La segunda es la rigidización de los cementantes. Es sabido que la succión incrementa la resistencia al corte de los cementantes no solubles (Alonso y Gens, 1994), efecto que es notorio incluso en hormigones. Finalmente, la desaturación de los suelos aumenta la concentración de sales solubles que se precipitan en los contactos de las partículas incrementando su rigidez. Los efectos provocados por las fuerzas de succión y cementación son muy difíciles de evaluar por separado. Solamente en la condición saturada puede asumirse que la cementación real no soluble actúa en forma aislada, ya que la succión es nula.

### **Evaluación visual del sitio**

En una primera aproximación al problema se realizaron una serie de reuniones con autoridades de la Municipalidad y con los vecinos de los barrios afectados. De estas reuniones surgió que los problemas de elevación del nivel de aguas comenzaron a hacerse evidentes en el mes de Noviembre del año 2000. Los efectos generales fueron: la imposibilidad de evacuar los líquidos cloacales, el desborde de las cámaras de inspección y sifones, hundimientos de pozos absorbentes, fisuras en muros de viviendas, y humedecimiento de solados y zócalos.

En una segunda etapa, se realizó una inspección ocular al sitio. De esta inspección se comprobó que el Canal Maestro Sur se encontraba en malas condiciones de conservación. A lo largo de su recorrido se vieron estancamientos de agua, y falta de mantenimiento. Respecto de la profundidad de los pozos sépticos, se pudo corroborar que las profundidades excavadas de los mismos oscilaron entre 5 y 8 m. Por otro lado, se observó un pobre drenaje del sitio, con un escurrimiento preferencial en el sentido Oeste-Este. Al alcanzar el límite Este de la zona de interés se producen acumulaciones de agua que inundan la ruta. Este fenómeno está causado, fundamentalmente, por el deficiente funcionamiento de las alcantarillas allí localizadas. No se evidencian daños estructurales importantes en las construcciones.

### **Evaluación ambiental y geomorfológica**

**Clima.** Las características climáticas del área se caracterizan por el clima semi-seco con tendencia a semi-húmedo. La temperatura media anual varía entre los 14 y 16 °C, con una mínima media alrededor de 10 °C y una máxima media entre 20 y 25 °C. Las precipitaciones se encuentran entre los 700 - 800 mm anuales de promedio, con un déficit hídrico anual superior a los 100 mm.

**Topografía.** Las curvas de nivel relevadas del sector y demarcadas en la Figura 2 muestran claramente una pendiente del terreno generalizada en dirección Oeste-Este. La traza del canal de riego sigue perfectamente una de estas curvas. La pendiente del terreno resulta mayor al Oeste del área afectada y se reduce considerablemente al atravesar el canal de riego. El escurrimiento superficial, proveniente del Oeste, se mueve hacia los sectores más bajos, buscando a través de las líneas de máxima pendiente su antiguo cauce natural, dispuesto con un sentido SO - NE. La presencia del terraplén del canal de riego impide el escurrimiento natural, receptando parte del agua en el interior del canal deficientemente conservado.

Se realizaron nivelaciones del lecho del canal a lo largo de la traza. Los resultados muestran que la pendiente media es muy baja (2 por mil). Su bajo nivel de conservación determina que, en algunos tramos, la pendiente resulte invertida, produciendo acumulaciones de agua entre 0,50 a 0,80 m de altura. Estos tramos con acumulaciones permanentes de agua resultan puntos preferenciales de infiltración.

**Geomorfología.** El área estudiada se encuentra en un sector loésico levemente buzante hacia el Este, correspondiente a una planicie que descansa hacia el Oeste sobre los detritos de derrubio que cubren la falda oriental de las primeras estribaciones de la Sierra Chica de Córdoba. Los loess y limos loessicos que conforman los espesos mantos del área oriental a las sierras presentan como característica saliente su relieve ondulado. Las escasas diferencias de nivel, las ondulaciones propias de los depósitos eólicos y la presencia de paleocauces conforman la geomorfología tipificante de la llanura loessica cordobesa oriental. Sobre ese esquema se instala una red de drenaje cuyo comportamiento es

bastante variable, en función de las diferencias topográficas locales, la efectividad del sistema de bajos entrelazados que opera como evacuador de las aguas superficiales, el uso actual e histórico del suelo (ligado a la colmatación de bajos por finos) y las variaciones en las precipitaciones de cada año en relación a los valores medios. Esta realidad hace que, en ocasiones, se produzca la transferencia de volúmenes importantes de aguas superficiales entre un sector y otro de las sub-cuencas y las cuencas por un fenómeno de trasvase.

Dentro de los elementos empleados en el reconocimiento, se destaca el uso de aerofotografías e imágenes satelitales Landsat en las siete bandas estándar. Para su interpretación, se recurrió a la digitalización en alta resolución de los citados fotogramas y se realizaron procesamientos de realce y análisis espectral asistido por computadora, tanto de los fotogramas como de las escenas satelitales. Como resultado del procesamiento de realce digital de las imágenes y su estudio pormenorizado se ha detectado un patrón espectral y textural que se encuentra frecuentemente asociado a la presencia de paleocauces. La Figura 3 muestra que esa franja de escurrimiento (paleocauce) es perfectamente coherente con la topografía de detalle que muestra el mapa topográfico ya descrito en este estudio (ver Figura 2).

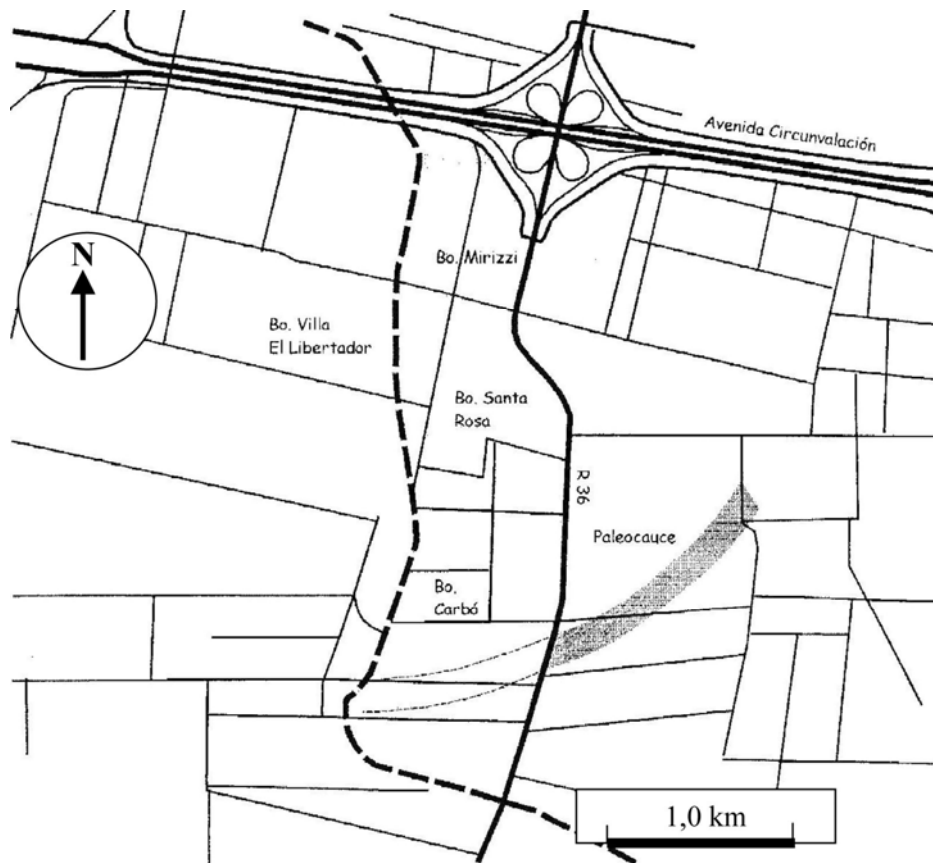


Figura 3: Desarrollo y localización en planta del paleocauce detectado mediante análisis espectral de imágenes.

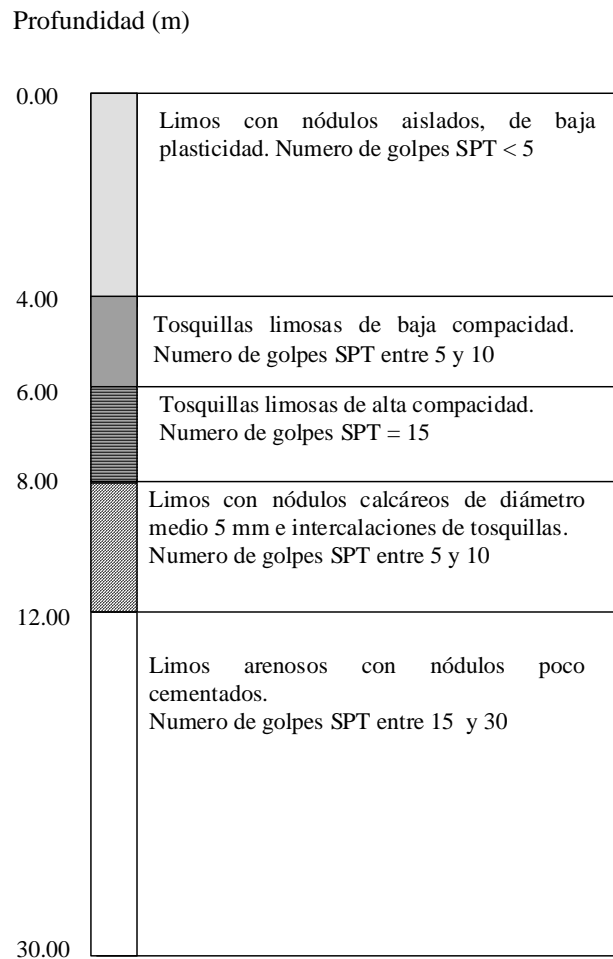
### Evaluación geotécnica e hidrogeológica

**Geotecnia.** Los antecedentes disponibles de la zona han permitido realizar una primera caracterización del perfil de suelos presentes. Una perforación profunda localizada en la zona indica la existencia de un paquete sedimentario de considerable espesor apoyado sobre el basamento rocoso cretácico y/o paleozoico. En la misma se alcanzó el basamento rocoso a los 574 metros de profundidad. Hacia el este, otra perforación lo alcanzó a una profundidad de 450 metros. Estos reconocimientos permiten concluir que el basamento rocoso es tan profundo que no tiene ninguna importancia desde el punto de vista del escurrimiento subterráneo en el fenómeno tratado. La estratigrafía regional indica que en los primeros 50 a 70 m, existen depósitos limosos predominantemente eólicos. Los registros históricos de las perforaciones antes indicadas hacen referencia a la existencia de la primera capa acuífera a no menos de 40 m de profundidad.

El Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba tiene una Base de Datos Geotécnica con 1300 perfiles de perforaciones, realizadas para estudios de fundaciones (Rocca y Quintana, 1997). Consultados los antecedentes del área se obtuvieron datos de 15 perforaciones en la zona. Estas perforaciones permitieron conformar perfiles transversales de la zona afectada en distintas direcciones.

Con el fin de verificar los datos de los estudios de suelos obtenidos de los antecedentes se realizaron tres perforaciones indicadas en la Figura 2 como sondeo 1, sondeo 2 y sondeo 3. En las perforaciones se realizaron ensayos de Penetración Estándar tipo SPT y recuperación de muestras inalteradas con tubos tipo Shelby.

En la Figura 4 se resumen los principales parámetros del perfil de suelos obtenido en el sondeo S1 hasta la profundidad de 30 m. Los suelos predominantes, observados en estas perforaciones, son sedimentos limosos de origen eólico de baja plasticidad. Se presentan estratos de variada potencia, con distintos grados de cementación y estratos arenosos en forma de lentes con amplias variaciones laterales. Las cementaciones se presentan como nódulos de entre 3 mm y 5 mm formados por agregación del mismo limo y cementados por arcillas. Estos nódulos son disgregables con una mínima presión. La granulometría equivalente sin disgregar de estos estratos muestra muchas veces retenidos en el tamiz # 10 entre 25 % y 60 %, y en el tamiz # 200 hasta 80 %. Esta característica otorga a los suelos una permeabilidad in-situ extremadamente elevada (como se verá más adelante). Estos suelos se presentan en forma muy marcada en los estratos localizados entre 5,00 m y 10,00 m de profundidad. La presión de fluencia de este estrato medido en compresión confinada resultó extremadamente alta ( $\sigma_f = 7 \text{ kg/cm}^2$ ) mientras que en los limos superiores resultó de entre  $0,60 \text{ kg/cm}^2$  y  $1,10 \text{ kg/cm}^2$ .



**Figura 4: Perfil típico de suelos del sector obtenido de la perforación S1 hasta 30 m de profundidad. Los números de penetración estándar se refieren a  $(N_1)_{60}$ .**

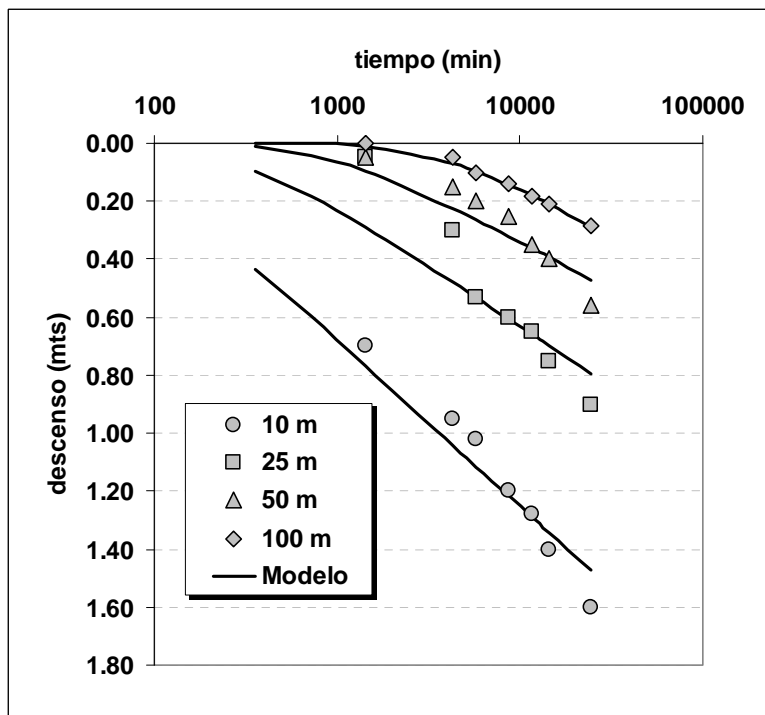
La resistencia a la penetración normalizada  $(N_1)_{60}$  es muy baja en los primeros metros (< 5 golpes) y aumenta con la profundidad alcanzando valores importantes (15 a 30 golpes) a partir de los 15,00 m. en el sondeo S1 y 18,00 m en el sondeo S2. Los nódulos del estrato entre 5,00 m y 10,00 m muestran valores de penetración entre 5 y 10 golpes. El nivel freático se localizó a 0,20 m desde la superficie en los sondeos S1 y S2 y - 1,40 m en el sondeo S3.

Adicionalmente a los sondeos se realizaron dos ensayos de bombeo en perforaciones indicados como B1 y B2 de diámetro 0,40 m (ver Figuras 12 y 13). En estas perforaciones se colocaron caños ranurados de 0,15 m de diámetro, volcando grava en el espacio anular entre la pared del pozo y el tubo.

El análisis de los resultados del ensayo de bombeo se realizó empleando las expresiones clásicas de Theis, y modificadas por Jacob (US Army Corps of Engineers, 1999). La misma indica que el descenso del nivel freático de un acuífero no confinado ( $s$ ), y a una distancia del punto de bombeo ( $r$ ), es proporcional al caudal de bombeo ( $Q$ ), la transmisibilidad del terreno ( $T$ ) y a la función de pozo  $W(u)$  que depende del almacenamiento ( $S$ ), la distancia al eje del pozo de bombeo ( $r$ ), y el tiempo en días ( $t$ ). La expresión básica de cálculo es:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{1}{y} * \exp(-y) dy = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (1)$$

Los parámetros hidráulicos a identificar con el ensayo de bombeo son la transmisibilidad y el almacenamiento. El primero se relaciona con la permeabilidad del terreno y el espesor de la capa drenante. Para el análisis de los resultados se ha realizado una estimación, a partir de los estudios geotécnicos, sobre un espesor promedio de 15 m de manto drenante, incluyendo materiales con distintas permeabilidades. En la localización prevista para la ejecución del ensayo se emplearon cuatro freatómetros próximos, a modo de perforaciones de control de la variación del nivel freático. Estas perforaciones se localizaron a 10, 25, 50 y 100 m del punto de ensayo. La Figura 5 muestra los resultados de este ensayo y el ajuste teórico.



**Figura 5: Tiempo de bombeo respecto del descenso observado en los puntos de control del ensayo de bombeo y ajuste del modelo empleado. Los marcadores indican la distancia del punto de control al pozo de bombeo.**

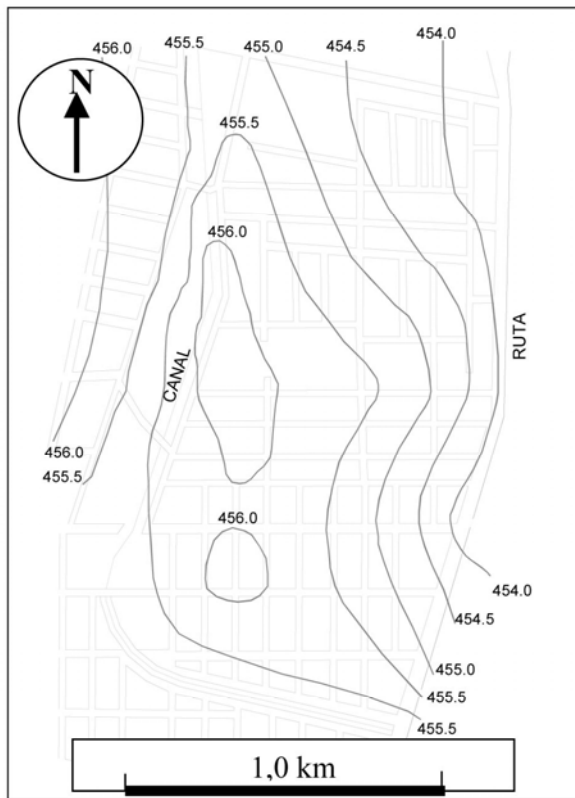
Los resultados de las mediciones muestran la existencia de un estrato equivalente continuo con una transmisibilidad de entre 85 y 105 m<sup>2</sup>/día. Asumiendo que el manto filtrante tiene un espesor de 15 m, la permeabilidad media del mismo resulta del orden de 6 x 10<sup>-5</sup> m/s a 1 x 10<sup>-4</sup> m/s. Estos valores de permeabilidad son dos órdenes de magnitud mayor a los



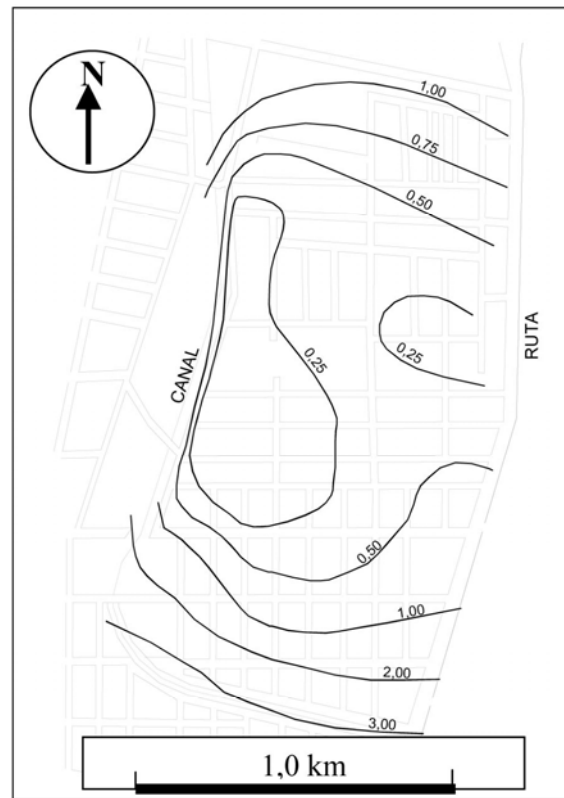
usualmente medidos en laboratorio sobre muestras de loess. Los parámetros de almacenamiento derivados de los ensayos muestran valores iguales a 0,08.

**Hidrogeología.** Teniendo en cuenta que los niveles freáticos registrados en la base de datos históricos mencionada más arriba corresponden a estudios de suelos realizados con diversas tecnologías y en distintos períodos, se pudo confirmar mediante comparación de cotas del nivel freático, la existencia de un flujo subterráneo con direcciones predominantes Sur - Norte y Oeste - Este.

En este trabajo se instaló una red de 32 piezómetros distribuidos en toda el área de estudio. La instalación de esta red permitió, por un lado, determinar la profundidad del agua existente y, posteriormente, monitorear el descenso de la misma durante los trabajos de saneamiento. En las Figuras 6 y 7 se muestran las curvas de profundidad de nivel freático medido respecto de la superficie del terreno natural, tanto en forma relativa al nivel de terreno, como en valores de cotas absolutas. La comparación de los registros históricos del área de interés con los antecedentes inmediatos y las primeras mediciones determinó la existencia de variaciones sustanciales en los niveles freáticos.



**Figura 6: Niveles piezométricos del agua expresados en m.s.n.m. al inicio de los trabajos de control.**



**Figura 7: Profundidad del nivel freático respecto de la superficie del terreno al inicio de los trabajos de control.**

Los distintos elementos analizados permiten presuponer los siguientes factores que tienen influencia en la insumisión del agua en el suelo:

1. Infiltración de fluidos domiciliario en el terreno: la población del sector descarga los líquidos cloacales en pozos sanitarios. Estos han sido construidos, en la mayoría de los casos, hasta profundidades menores a 8,00 m, no alcanzando claramente los niveles más permeables.
2. Aportes de áreas urbanas más elevadas: de acuerdo con la geología ya descrita, los aportes podrían ser causados por infiltraciones efectuadas en barrios ubicados al Oeste de la zona. Si bien no se han podido identificar en forma específica, los perfiles de suelo empleados como antecedentes muestran estratigrafías favorables para los movimientos regionales en sentido Oeste-Este.



3. Infiltraciones provenientes del canal de riego: este factor puede tener influencia debido a que se ubica en la parte alta de la cuenca en la que se localiza la zona bajo estudio. Al mismo tiempo es utilizado por las zonas más altas, localizadas al Oeste, como medio de evacuación de las aguas pluviales. Cualquier posible infiltración o derrame superficial en un canal de este tipo (sin revestimientos) incide en forma directa sobre el terreno. El problema se agrava si se tiene en cuenta los sectores con pendiente inversa en la traza del canal.
4. Deficiencia del sistema de drenaje superficial: el efecto de este factor se debe fundamentalmente al estancamiento de agua en los sistemas pluviales localizados al Este del barrio.
5. Reducción de los procesos de evapotranspiración: motivado por el crecimiento de la población en el sector. También contribuye la pavimentación de las calles, que produce una marcada reducción de la superficie disponible para la evapotranspiración de los fluidos que se encuentran en el terreno y en proximidades de su superficie.

El orden de los factores enumerados no indica importancia relativa de los mismos. Este último aspecto será tratado en los apartados siguientes.

### **Análisis de la información**

El análisis de los antecedentes geomorfológicos, geológicos, geotécnicos e hidrológicos descriptos anteriormente permite evaluar someramente las distintas causas que pudieron originar los asensos del agua. Esta valoración es fundamental para el planteo de las soluciones de remediación del sector afectado.

**Capacidad de almacenamiento del suelo.** La capacidad de almacenamiento del terreno se relaciona con el volumen de vacíos libres de agua en la condición inicial del suelo. En función de los estudios de suelo disponibles se ha considerado un perfil con el nivel freático originalmente a 10 m de profundidad (antigüedad 5 años promedio). Los parámetros básicos asumidos para el suelo comprenden un perfil uniforme conformado por limos arcillosos y arenosos, con un peso unitario de  $1,35 \text{ tn/m}^3$  y una gravedad específica de 2,64. A partir de estos parámetros surgen, por relaciones volumétricas y gravimétricas básicas, las siguientes variables: relación de vacíos  $e = 0,96$ , humedad de saturación  $w_s\% = 36\%$ , y porosidad  $n = 0,49$ . La distribución de humedades típicas para estos suelos, en las condiciones mencionadas se muestra en la Figura 8. De acuerdo con estas hipótesis, el volumen resultante posible de almacenamiento es igual a  $1,71 \text{ m}^3/\text{m}^2$ .

Este resultado, aceptando las condiciones iniciales de cálculo permite determinar que el máximo volumen de agua que puede ser absorbido por el suelo por metro cuadrado de superficie es  $1,71 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , asumiendo que la zona bajo análisis se comporta como una cuenca o depósito subterráneo, sin capacidad de evacuación de fluidos. Se entiende que esta hipótesis constituye una condición extrema, que a la luz de los estudios geomorfológicos y geológicos no se cumple en forma estricta. Sin embargo, la misma es asumida a este nivel del estudio a los fines de establecer valores límites de acotación del problema.

**Influencia de los aportes de los pozos sanitarios.** Asumiendo, con las limitaciones antes indicadas, la hipótesis discutida anteriormente se ha evaluado el tiempo necesario para la ocupación de la totalidad del volumen disponible si sólo se tiene en cuenta el aporte realizado a través de la infiltración de fluidos desde los pozos sanitarios. El tiempo requerido para la saturación está en relación casi directa con la provisión del fluido. En la Figura 9 se muestra el tiempo que demora en saturarse el suelo para distintos consumos de agua diaria por habitante para una población de 5600 habitantes. Los resultados permiten inferir que para consumos normales, el proceso de saturación total del medio se produce en forma relativamente rápida, es decir entre 2 y 7 años. En el cálculo de estos tiempos, no se han considerado movimientos regionales de los fluidos hacia otros sectores fuera de la zona bajo estudio, procesos de evapotranspiración, crecimiento gradual de la población en la zona. Sin embargo, el rango de valores calculados muestra que este aporte es muy importante.

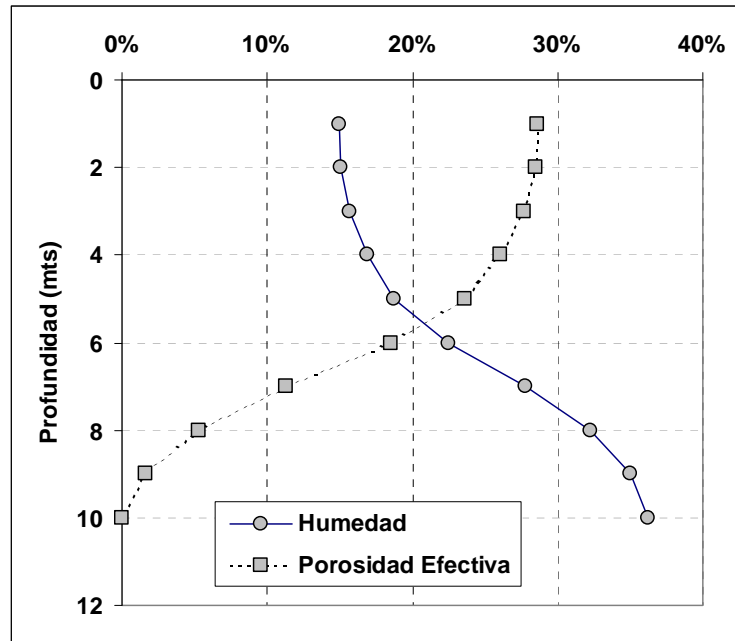


Figura 8: Variación del perfil de humedad y porosidad efectiva en la hipótesis de un perfil de terreno con el nivel freático a 10 metros de profundidad.

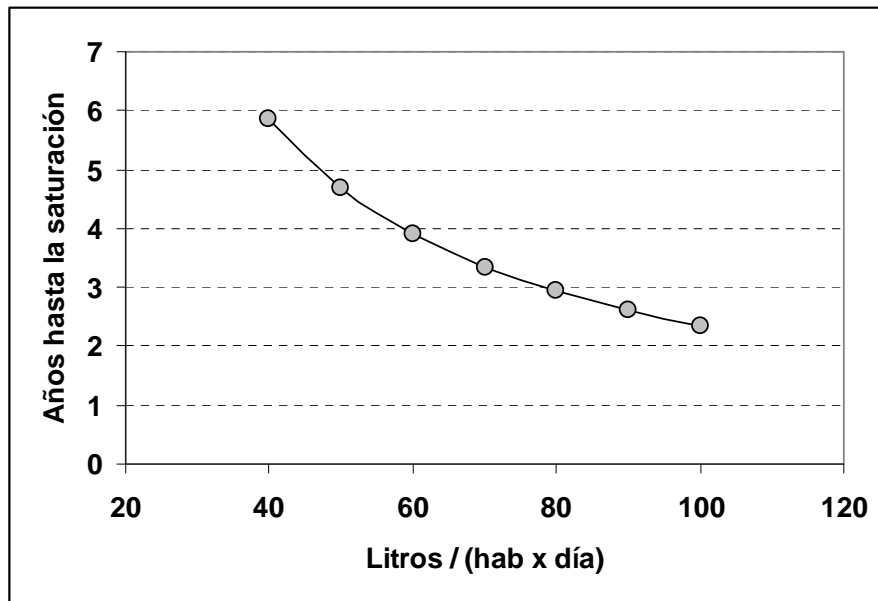
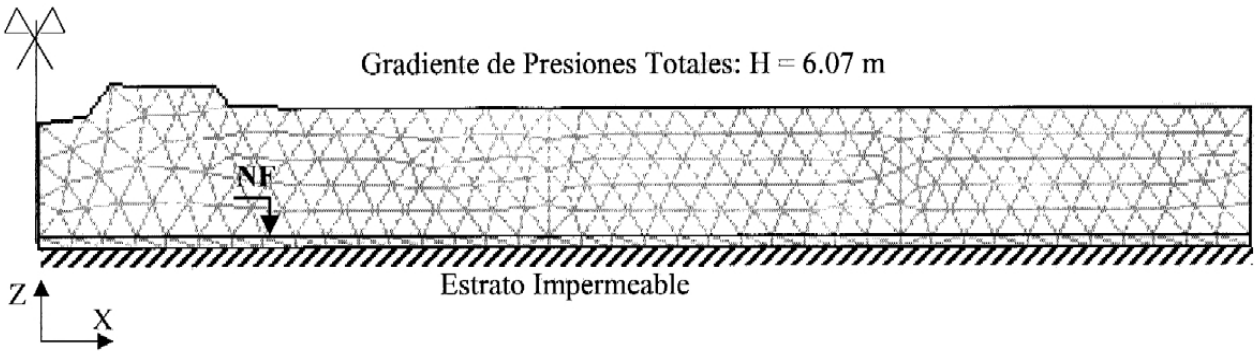


Figura 9: Volumen infiltrado respecto de años para la saturación completa del perfil de suelos asumido.

*Influencia de los aportes del canal de riego.* A los fines de evaluar el aporte de aguas provenientes del canal de riego, se realizó un modelo numérico mediante la técnica de elementos finitos. En la Figura 10 se presenta el perfil de cálculo y la malla adoptada. En este modelo se asume que los bordes de la figura son impermeables. En el modelo se estudió la influencia en el valor del caudal de infiltración debido a la profundidad del nivel freático y el coeficiente de permeabilidad.



**Figura 10. Modelo de elementos finitos empleado en la simulación del escurrimiento en el canal de riego.**

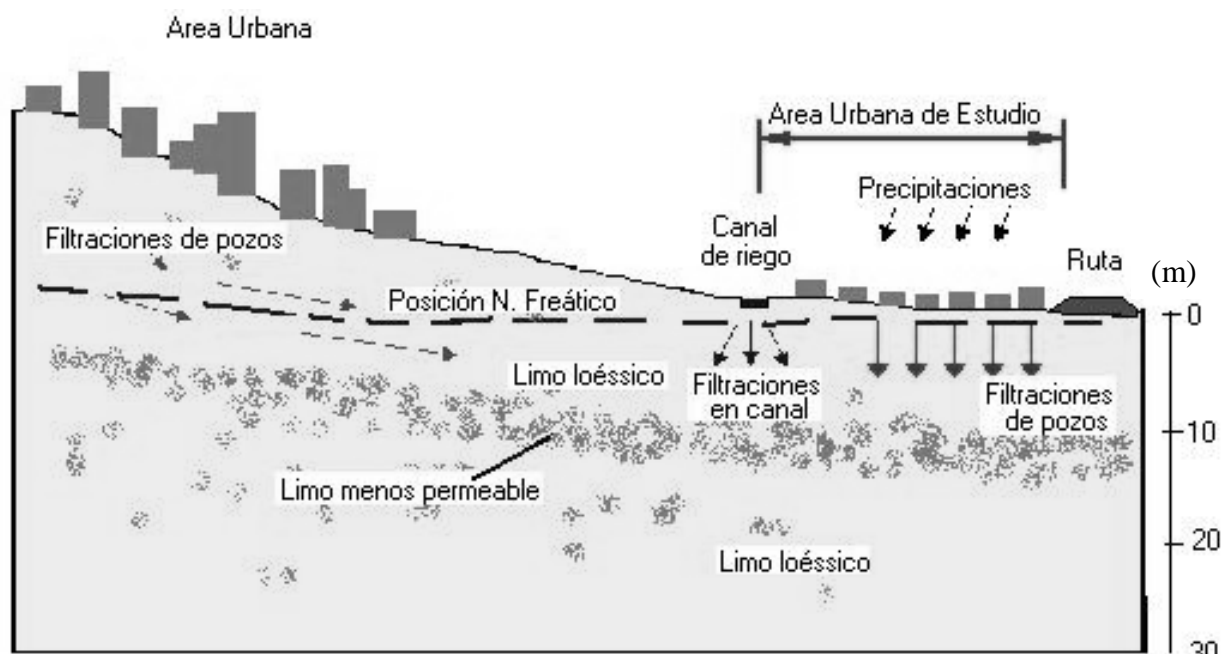
El estudio mostró que la profundidad del nivel freático tiene poca influencia en los resultados y que el parámetro sensible es el coeficiente de permeabilidad. Estudios del coeficiente de permeabilidad en este tipo de loess realizados tanto en este estudio como en investigaciones previas por parte de este grupo de trabajo, han derivado en los valores adoptados dentro de esta evaluación en el orden de  $2 \times 10^5$  cm/s. Para una longitud de canal de 1600 m se obtiene que el caudal infiltrado es de aproximadamente 50000 l/día. Este caudal es menor al infiltrado por los pozos absorbentes, sin embargo, se debe recordar en este punto que el canal hace más de 100 años que se encuentra en servicio, mientras que los pozos pueden datar en promedio de menos de 15 años. Por otro lado, en este cálculo se ha asumido que el suelo es uniforme. Sin embargo, pueden existir ciertos puntos de infiltración preferencial con menor permeabilidad.

**Influencia de otros aportes.** Los otros aportes de agua provenientes de las infiltraciones de aguas superficiales y del escurrimiento de napas del sector Oeste de la zona en estudio, ubicada a cotas más elevadas, resultan de difícil cuantificación. Sin embargo, se estima que no deben ser despreciables sus aportes, debido a la elevada densidad de población de estos barrios y la inexistencia de redes cloacales que hace que los líquidos sean también vertidos en pozos sanitarios. Los estudios de los niveles freáticos muestran un claro gradiente hacia el sector afectado.

### **Hipótesis de sistema de filtración**

En la Figura 11 se procura representar esquemáticamente el proceso de infiltración de agua en el perfil del terreno, según una traza con dirección Oeste – Este. La topografía muestra una pendiente generalizada del sector en dirección Sur-Norte y Oeste-Este. De acuerdo con los estudios geológicos y geotécnicos, en el perfil de suelos estudiado, se detectó la presencia de capas de toscas granuladas de profundidad y continuidad variable. Estas actúan como materiales de alta permeabilidad horizontal, intercalados con estratos menos permeables de limos compactos que generan una barrera para el flujo vertical de los fluidos. En este ambiente se puede asumir que los movimientos regionales y subterráneos de los fluidos se producen en sentido Oeste-Este.

Desde el punto de vista de las fuentes que aportan el agua de infiltración se ha determinado que las infiltraciones de aguas servidas a través de pozos sanitarios locales resulta uno de los más significativos. Este aporte puede verse incrementado significativamente por las aguas infiltradas en sectores externos a los estudiados. Se hace referencia especialmente a las infiltraciones de aguas servidas desde localizaciones urbanas ubicadas al Oeste de estos barrios.



**Figura 11: Esquema de perfil medio de la zona.**

Las evaluaciones numéricas muestran que las infiltraciones provenientes desde el canal de riego no tienen un efecto inmediato pero pueden llegar a ser importantes en plazos largos. La presencia permanente de agua debido a grandes deficiencias de mantenimiento, con sectores en los que se detecta contrapendiente respecto de la dirección de circulación, favorecen la infiltración continua de agua en el subsuelo. Finalmente, se determina que las infiltraciones por precipitaciones se producen localizadamente en el canal que se utiliza como evacuación de las aguas pluviales de distintos barrios localizados aguas arriba y en sectores próximos a la ruta ubicada al Este, donde se ha observado el anegamiento de los sistemas de desagüe.

### Proyecto de remediación

Las alternativas de solución al problema planteado han sido formuladas teniendo en cuenta los distintos factores determinantes del mismo. En tal sentido, las acciones propuestas por los autores comprenden dos grandes grupos:

- a) Acciones inmediatas de atenuación. Tendientes a la depresión del nivel freático actual en un plazo lo más breve posible, posibilitando la generación de condiciones adecuadas para el desarrollo de otras acciones.
- b) Acciones de modificación de fondo de la situación actual. Referidas al tratamiento de los aspectos específicamente relacionados con las fuentes de infiltración de los fluidos en el terreno, y las causas originales del problema.

Para la conformación del sistema de acciones inmediatas, se han desarrollado modelos numéricos que permiten valorar el efecto producido por la implementación de distintas soluciones. Estas soluciones se han concentrado en el desarrollo de una red de pozos de bombeo. El desarrollo de este proyecto incluyó la evaluación de distintas configuraciones de disposición de pozos en planta, y distintos regímenes de funcionamiento. Asimismo, se evaluaron los cambios en los estados tensionales de esfuerzos efectivos y succión del suelo, a los fines de evitar asentamientos globales que pudieran provocar daños estructurales importantes durante el bombeo. La evolución del descenso fue auscultada mediante un sistema de freatómetros, los cuales habían sido instalados previamente durante los estudios de investigación. Este seguimiento se realizó hasta los 120 días posteriores al inicio del bombeo y los resultados han sido comparados con el modelo propuesto. Finalmente, se describen sucintamente las acciones fundamentales de saneamiento del sector, tanto a mediano y como a largo plazo. Estas resultan tendientes a evitar la recurrencia del fenómeno.

## Plan de bombeo: Alternativa de corto plazo

**Localización de los pozos de bombeo.** La localización de los pozos de bombeo se planificó siguiendo los siguientes criterios fundamentales: a) criterios de carácter hidráulico, b) criterio geotécnico, c) criterio espacial, y d) criterio económico.

En el primer caso (condicionante hidráulico), se consideraba conveniente que las bombas estuvieran localizadas cubriendo todo el sector afectado por el agua, con mayor densidad en los lugares de mayor altura piezométrica. Siguiendo este criterio se beneficiaría en plazos más breves a aquellos puntos más afectados y, por otro lado, se tendría mayor efectividad y rendimiento con menor cantidad de pozos.

El condicionante geotécnico (criterio b) indica que resulta recomendable deprimir el agua lo más homogéneamente posible en todo el sector, o al menos evitar conos de depresión marcados, a los fines de no provocar potenciales asentamientos diferenciales en las estructuras. De acuerdo con este criterio, se requeriría instalar un número elevado de bombas de bajo caudal homogéneamente distribuidos. Al mismo tiempo, la cantidad de bombas condiciona los caudales de evacuación requeridos, aspectos que se relacionan directamente con el control de los efectos erosivos en el suelo y en proximidades de los puntos de extracción.

La instalación de las bombas según el condicionante espacial (criterio c) requiere asimismo de un espacio suficiente de trabajo para su instalación y funcionamiento. El lugar debe ser accesible a la inspección periódica, pero a su vez se debe evitar el acceso de depredadores que pudieran dañar los sistemas. En barrios densamente poblados, como el presente, no resulta fácil reunir todos estos requisitos, por lo que debió recurrirse a plazas, boulevares, patios de escuelas públicas y sitios baldíos que pudieran ser expropiados. La protección contra la depredación se realizó mediante un acondicionamiento blindado a tableros de control, mangueras y pozos.

Finalmente, el criterio económico (criterio d) limita fundamentalmente la cantidad de pozos a instalar. Este criterio no resultó fundamental en el presente caso debido a la urgencia del problema y la amplia difusión alcanzada actuó como un condicionante político impensado para las autoridades municipales.

El procedimiento empleado para conjugar los criterios arriba mencionados fue el siguiente:

- a) Se procedió a demarcar en un plano los sectores en los cuales se pudiera instalar un pozo de bombeo.
- b) Se realizó un modelo numérico, como se describe más adelante, en donde se modeló el perfil de suelos del sector y la localización potencial de las bombas.
- c) Se estudió, mediante este modelo, una secuencia de puesta en funcionamiento de los distintos pozos de bombeo.
- d) Se diseñó un plan de auscultación de la variación del nivel de agua con el tiempo, para permitir el ajuste del modelo y actuar en consecuencia.

**Descripción del modelo utilizado.** La simulación del comportamiento del nivel freático en la zona, y bajo la acción del sistema de pozos de bombeo, ha sido realizada a través de un modelo numérico desarrollado en el Área de Geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba. Este modelo toma como base la formulación clásica de Theis (1935), la misma es representativa del flujo en condiciones transitorias y en acuíferos confinados. La ecuación de flujo a resolver toma la forma:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{T}{S} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

en donde:  $h$  es la presión hidráulica del punto, cuyas coordenadas en planta son  $x$  e  $y$ ;  $T$  es la transmisibilidad y  $S$  es el almacenamiento. Ambos valores han sido deducidos de los ensayos de bombeo y de los estudios de antecedentes del comportamiento de materiales, similares a los aquí considerados.

La forma general de la ecuación, para las condiciones de contorno planteadas, y asumiendo inicialmente un comportamiento de acuífero confinado, responde a la expresión:

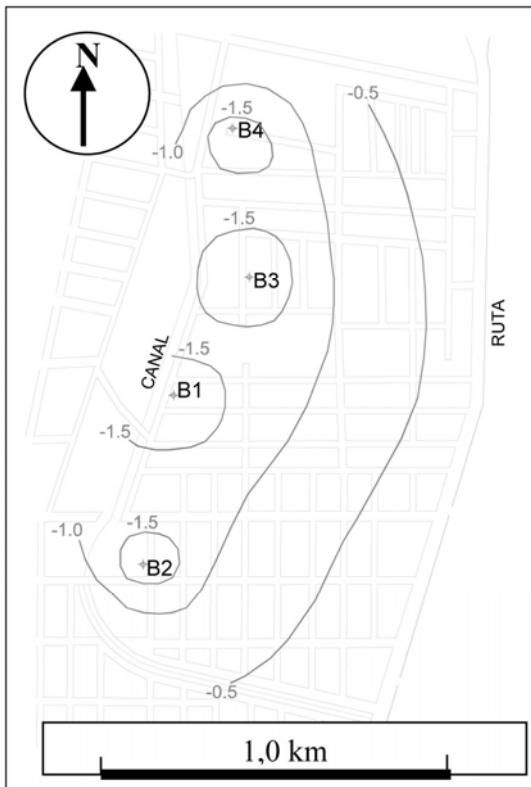
$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u) \quad (3)$$

en donde:  $\Delta$  es el descenso de la altura hidráulica total respecto de la posición inicial;  $Q$  es el caudal evacuado durante el período;  $W(u)$  es la denominada función de pozo, la cual depende de la variable intermedia  $u = (r^2 S) / (4T t)$ . Esta última variable depende de la distancia entre el punto de cálculo y la localización del pozo de bombeo ( $r$ ), y del tiempo desde el inicio del bombeo ( $t$ ).

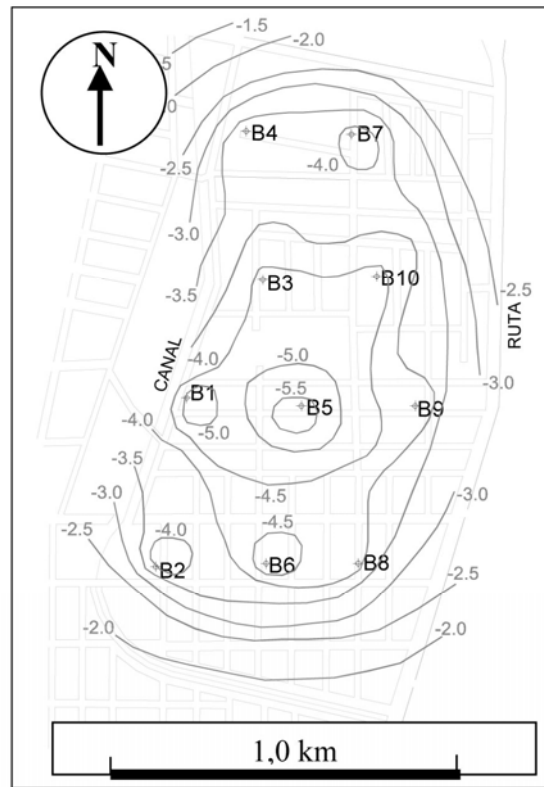
Sobre la expresión del descenso se han aplicado las correcciones sugeridas por Jacob (1944) para los valores calculados y asumiendo el comportamiento de acuíferos no confinados. Finalmente, los resultados obtenidos para el funcionamiento en conjunto del sistema de bombas han sido definidos a partir de la superposición de los efectos causados por cada unidad en forma aislada.

El modelo elaborado comprende la discretización de la superficie afectada y la ubicación "a priori" de las posiciones idealmente aconsejables para la localización de cada uno de los pozos de bombeo. Este modelo ha sido concebido a través del empleo del software Mathcad, complementado con el uso de hojas de cálculo y programas de modelación topográfica. Dentro de este modelo, el terreno bajo estudio ha sido discretizado en 200 puntos de interés, según una malla trazada en coordenadas coincidentes con el sistema de referencia geográfica empleado en los estudios topográficos. La modelación ha procurado reproducir el comportamiento esperado para el funcionamiento del sistema durante un plazo de 120 días.

Los escenarios de trabajo considerados, siguiendo los lineamientos de diseño antes señalados, implicaron la formulación de diversas alternativas de localización de los pozos de bombeo. Igualmente, se valoraron condiciones variables de la puesta en funcionamiento y los regímenes de extracción de agua. En términos generales, se concluyó en la conveniencia de aplicar caudales de extracción en el orden de los  $10 \text{ m}^3/\text{hr}$ . Este valor resulta aceptable en función de la permeabilidad del suelo, la geometría del pozo y a los fines del adecuado control de los fenómenos de erosión interna del suelo. A modo de ejemplo, se presentan las Figuras 12 y 13, representativas de dos configuraciones analizadas. Las mismas muestran las posiciones relativas del nivel freático para un período de funcionamiento del sistema de 45 días.



**Figura 12: Simulación de descenso del nivel freático. Tiempo de bombeo 45 días.**

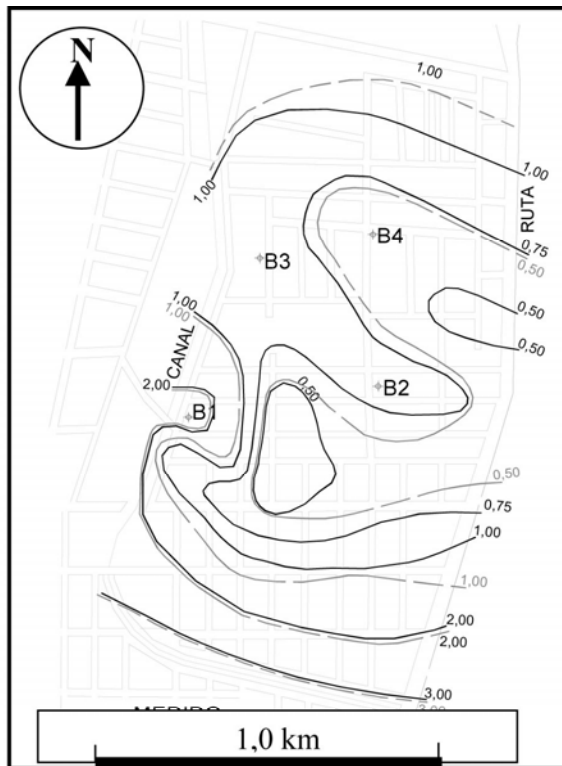


**Figura 13: Simulación de descenso del nivel freático. Tiempo de bombeo 45 días.**

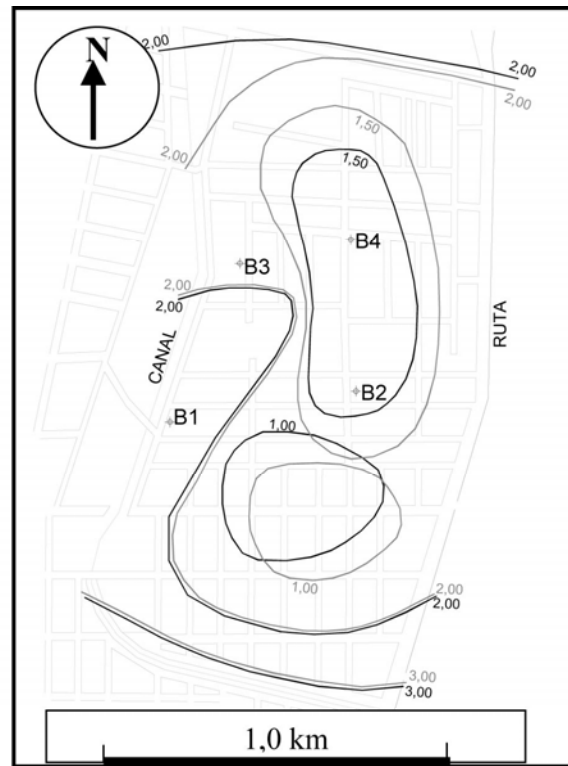
**Evaluación del plan implementado.** En el proceso de depresión del nivel freático sólo fueron requeridos, finalmente, 4 pozos de bombeo. En la Tabla 1 se presenta un listado indicando las bombas colocadas, el caudal de funcionamiento en régimen y la fecha de inicio del bombeo de cada una. Nótese que el bombeo se inicia con la puesta en funcionamiento de la bomba B1. Las Figuras 14 y 15 muestran el efecto provocado en el descenso del nivel freático a distintos tiempos de iniciado el bombeo. Los resultados medidos se comparan con las predicciones obtenidas a través del modelo numérico descrito más arriba.

**Tabla 1: Caudales y fecha de inicio del bombeo para cada una de las cuatro bombas instaladas:**

Bomba N°	Caudal (m <sup>3</sup> /hr)	Inicio Actividad
1	9.0	7/04/01
2	6.7	16/04/01
3	12.4	18/04/01
4	9.7	2/05/01



**Figura 14: Curvas de isocontorno de profundidades medidas a los 15 días de iniciado el bombeo. Se indican en la figuras las curvas teóricas obtenidas con el modelo**



**Figura 15: Curvas de isocontorno de profundidades medidas a los 45 días de iniciado el bombeo. Se indican en la figuras las curvas teóricas obtenidas con el modelo**

De los resultados obtenidos hasta los 45 días de iniciado el bombeo, se puede considerar que la efectividad del procedimiento ha sido significativa, teniendo en consideración que la totalidad de las bombas no han funcionado igual cantidad de días durante el período. En ese lapso se produjo una baja generalizada promedio de todo el sector, del orden de 1,20 m. La menor profundidad del agua relevada resulta de 0,75 m, respecto de la superficie. Esto permite el adecuado funcionamiento de los pozos absorbentes y cámaras sépticas devolviendo el normal funcionamiento del sistema de evacuación de los líquidos cloacales. Los descensos han sido homogéneos en todo el sector, lo cual se coincide con observaciones realizadas en el lugar, en donde no se han detectado grietas en las construcciones existentes.



La concordancia entre las predicciones realizadas mediante el modelo resultan más que aceptables. Esta concordancia permitió predecir los descensos para cada nueva bomba que entraba en actividad y planificar la posición de la próxima bomba con una base de información más racional y eficiente.

Mediciones realizadas posteriormente a los 120 días mostraban que en todos los puntos se había sobrepasado el límite de medición de los freáticos de control, que se construyeron con una longitud de 3,00 m.

**Consideraciones relativas al agua extraída.** Sobre las muestras de agua extraída de las distintas bombas colocadas, se realizaron controles químicos y bacteriológicos periódicos. Los niveles de bacterias fecales y coliformes, determinados en una serie de controles realizados, mostraron que los mismos resultaron por debajo de los límites admisibles para el volcado de efluentes a canales abiertos de acuerdo con las ordenanzas municipales vigentes. Por este motivo, la Municipalidad autorizó el volcamiento de los líquidos extraídos, en forma provisoria, en el canal de riego y aguas abajo del sector afectado, evitando el tratamiento de los mismos.

**Consideraciones geotécnicas.** A los fines de predecir los asentamientos potenciales de las construcciones existentes durante la depresión del nivel freático, se realizaron algunas consideraciones de carácter geotécnico. Para ello, se modeló el proceso de modificación del estado de tensiones efectivas en el terreno a causa de las variaciones en las condiciones de saturación. En este sentido, el descenso medio pretendido permitió la valoración de la redistribución del perfil de humedades en los niveles superiores del terreno y su adecuación en relación con la succión y las presiones efectivas. Las relaciones succión – humedad correspondiente a las curvas características de estos suelos, junto con determinaciones de las deformaciones asociados con variaciones en la succión han sido definida a partir de estudios previamente ejecutados en la Universidad Nacional de Córdoba (Zeballos et al, 1999), junto con otros antecedentes de evaluación de suelos similares a los aquí afectados. La aplicación de este doble criterio de valoración de los descensos ha permitido la predicción de valores del orden de los 2 cm, a modo de descenso global de la zona. Los mismos se encuentran constituidos en un 65% por las variaciones en los estados de tensión efectiva, en tanto que el resto se encuentra ocasionado por las modificaciones en los niveles de succión matricial.

### **Plan de remediación a mediano y largo plazo**

Como fuera descripto anteriormente, en un lapso razonablemente menor a 45 días de implementado el sistema de bombeo en el sector afectado, se restablecieron condiciones sanitarias de mínima aceptabilidad. La continuidad del bombeo se realizaría hasta alcanzar las condiciones en las cuales el nivel freático se estabilizaría en 4 a 5 m de profundidad. A partir de estas condiciones se realizó un plan de acciones tendientes a evitar la recurrencia del fenómeno. En esta sección se sintetizan las principales recomendaciones del proyecto. Estas recomendaciones incluyen: reparación del canal de riego, ejecución de una red cloacal para los barrios afectados y los que se encuentran aguas arriba de éstos, y reparación de los sumideros de aguas superficiales (alcantarillas y conducciones).

**Reparación del canal de riego.** Las paredes del canal de riego se encuentran materializadas por terraplenes. El estado de conservación de las paredes y el fondo del mismo resultaba muy deficiente. Esta situación se muestra en las Figuras 16 y 17. A los fines de evitar acumulaciones de agua y filtrado hacia la freática se recomendó realizar una impermeabilización del fondo y las paredes del mismo con geomembranas o suelos plásticos compactados, junto con un reperfilado completo. Una alternativa a la propuesta anterior sugería, de ser posible, el entubamiento del canal. Esta propuesta cumple con los objetivos de impermeabilidad, con el agregado de evitar el vertido de aguas servidas en el mismo a lo largo de su recorrido, mejorando adicionalmente el aspecto visual del sector y su entorno.

**Construcción de red cloacal.** Como fuera advertido anteriormente, la infiltración de agua en el subsuelo debido a la presencia de pozos absorbentes resulta uno de los factores más importantes. Por lo tanto, se recomendó instalar un sistema de redes cloacales, tanto en los barrios afectados, como en aquellos que se encuentran aguas arriba de los mismos y que aportan aguas por tener un nivel piezométrico más elevado.



**Figura 16: Vista del canal maestro sur al comienzo de los estudios.**



**Figura 17: Situación típica de descarga de canales de escurrimiento superficial sobre el canal de riego.**

**Reparación de alcantarillas.** El recorrido realizado por los sectores donde se localizaron las distintas alcantarillas y conductos de desagües pluviales permitió comprobar que los mismos se encontraban colmatados y fuera de servicio, permitiendo la acumulación de gran cantidad de agua que no podía sobrepasar el terraplén de la ruta interurbana en el borde Este. Aunque dicho inconveniente no define un aporte significativo de agua al subsuelo, eliminar lagunas de agua superficial presentes en forma permanente puede considerarse un efecto psicológico importante, y una mejora en el aspecto sanitario del lugar a un costo muy bajo.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una síntesis de los estudios realizados para la determinación de las causas que originaron el ascenso del nivel freático en el sector de interés localizado al sur de la ciudad de Córdoba, Argentina. De los mismos se puede inferir que existen múltiples efectos relacionados con el fenómeno. De acuerdo con los estudios geológicos y geotécnicos, en el perfil de suelos estudiado se detectó la presencia de capas de toscas granuladas de profundidad y continuidad variable. Éstas actúan como materiales de alta permeabilidad horizontal, intercalados con estratos menos permeables de limos compactos que generan una barrera para el flujo vertical de los fluidos. En este ambiente se puede asumir que los movimientos regionales y subterráneos de los fluidos se producen en sentido Oeste-Este. Desde el punto de vista de las fuentes que aportan el agua de infiltración se ha determinado que las infiltraciones de aguas servidas a través de pozos absorbentes locales resulta uno de los más significativos. Este aporte puede verse incrementado significativamente por las aguas infiltradas en sectores externos a los estudiados. Se hace referencia especialmente a las infiltraciones de aguas servidas desde localizaciones urbanas ubicadas al Oeste de estos barrios.

Las evaluaciones numéricas muestran que las infiltraciones provenientes desde el canal de riego no tienen un efecto inmediato pero pueden llegar a ser importantes en plazos largos. La presencia permanente de agua debido a grandes deficiencias de mantenimiento, con sectores en los que se detecta contrapendiente respecto de la dirección de circulación, favorecen la infiltración continua de agua en el subsuelo. Finalmente, se determina que las infiltraciones por precipitaciones se producen localizadamente en el canal que se utiliza como evacuación de las aguas pluviales de distintos barrios localizados aguas arriba y en sectores próximos a la ruta ubicada al Este, donde se ha observado el anegamiento de los sistemas de desagüe.

A fin de proyectar la remediación del sector de la ciudad de Córdoba, afectado por la elevación del nivel freático en este trabajo se presenta una síntesis del desarrollo de la alternativa de pozos de bombeo. De este trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones fundamentales:

- 1) El sistema de pozos de bombeo permite obtener descensos significativos en tiempos relativamente breves.
- 2) Los descensos del nivel freático más significativos ocurren en proximidades de los puntos de localización de los pozos de bombeo.
- 3) El descenso del nivel freático hace previsible la modificación del estado tensional en el terreno. Estas modificaciones pueden derivar en asentamientos de diversas magnitudes. Para evitar daños a las estructuras se requiere de descensos homogéneos en todo el sector tratado.
- 4) Los modelos numéricos de predicción muestran una buena aproximación a los resultados medidos en campo a pesar de la heterogeneidad inherente del suelo. Estos modelos permiten planificar la instalación de las bombas con una base racional importante.
- 5) La auscultación del comportamiento del agua durante el bombeo es de fundamental importancia. Esto permite el ajuste de los modelos y la realización de correcciones en caso de descensos bruscos o no previstos del agua.
- 6) La resolución del problema requiere así mismo, de la implementación de medidas de fondo tendientes a evitar la recurrencia del fenómeno. Para ello resulta imprescindible identificar las causas con la mejor precisión posible.

## REFERENCIAS

- Alonso, E. E. y Gens, A. (1994). "On the mechanical behavior of arid soils", keynote lecture, *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium on Engineering Characteristics of Arid Soils*, P. G. Fookes and R. H. G. Parry (eds.), London, U.K., pp. 173-205.
- CIRIA (1989). "The engineering implications of rising groundwater in the deep aquifer beneath London", G. Simpson, T. Blower, R.N. Craig and W.B. Wilkinson, Construction Industry Research & Information Association (CIRIA) Special Report 69.
- Houston S.L., Walsh, K., y Houston W.N. (1997). "Shear strength contribution of soil suction in cemented soils", *Anais do 3° Simposio Brasileiro do Solos Nao Saturados*, Rio de Janeiro, Brasil, Vol. 1, pp. 25-34.
- Jacob, C.E. (1944). "Notes on determining permeability by pumping tests under water table conditions", Open file Report, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Rinaldi V., Rocca R. y Zeballos M. (2007). *Geotechnical Characterization and Behavior of Argentinean Collapsible Loess*, en: *Proceedings of the Second International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, Singapore, K.K. Phoon, D.W. Hight, S. Leroueil, and T.S. Tan, Chapter 16, Taylor and Francis, pp. 2259-2286.
- Rocca, R.J. y Quintana Crespo, E. (1997). "La gestión de la información geotécnica de la ciudad de Córdoba". *Encuentro de Geotécnicos Argentinos*, Córdoba, Argentina, 16p.
- Theis, C.V. (1935). "The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage", *American Geophysical Union Transactions*, Vol. 16, pp. 519-524. En IRLI publication 48, SATEM: Selected Aquifer Test Evaluation Methods, 1989.
- U.S. Army Corps of Engineers (1999). *Engineering and Design - Groundwater Hydrology*, Engineering Manual EM 1110-2-1421, Department of the Army, Washington, DC.
- Zeballos, M; Redolfi, E. y Blundo, M. (1999). "Settlement generated by fluctuations in the freatic level", *XI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Foz do Iguazu, Brasil, Vol. 2, pp. 999-1006.