

ACUÍFERO RAIGÓN - Parte 1: CARACTERIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA

Bessouat, Claudia¹ ; De Souza, Sergio² ; Oleaga, Alejandro³ & Pacheco, Fernando⁴

Resumen - Raigón es un sistema hidráulico subterráneo en medio sedimentario, situado en el departamento de San José, Uruguay. La región considerada abarca 2271 km².

La topografía se desarrolla principalmente entre los 10 m y los 40 m, con pendientes moderadas. Para caracterizar la zona de estudio se analizó la geología mediante perforaciones existentes y se desarrollaron actividades de campo. Se realizaron 10 cortes geológicos y una Carta con la Geología de Superficie. Se ejecutaron 11 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), distribuidos en el área de estudio, como elementos de apoyo para la construcción del modelo conceptual.

A los efectos de la caracterización hidráulica se utilizaron niveles piezométricos de pozos relevados en las campañas realizadas en 1986 (DINAMIGE) y 1999 (IMFIA). De la comparación entre ambas superficies potenciométricas se observó un descenso general de los niveles hidráulicos.

El sistema hídrico subterráneo se concibió como un solo acuífero, salvo en el área sudeste donde ya se había calibrado la recarga y la conductividad hidráulica mediante la simulación de un esquema bicapa. Las condiciones de borde utilizadas se reducen a dos: descarga en arroyos y ríos y borde impermeable en zonas de contacto con la roca.

La diferencia entre la piezometría observada y calculada fue menor de 1 m, en general.

Palabras clave: acuífero, geometría, hidráulica

¹ Ing. Civil H y A; (IMFIA. Facultad de Ingeniería. UdelaR, J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. tel: (+5982) 711 33 86 interno 115, fax: (+5982) 711 52 77 e-mail: raigon@fing.edu.uy

² Geólogo, (IMFIA. Facultad de Ingeniería. UdelaR, J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. tel: (+5982) 711 33 86 interno 115, fax: (+5982) 711 52 77 e-mail: raigon@fing.edu.uy

³ Ing. Civil H y A (IMFIA. Facultad de Ingeniería. UdelaR, J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. tel: (+5982) 711 33 86 interno 115, fax: (+5982) 711 52 77 e-mail: raigon@fing.edu.uy

⁴ Bach. en Ing. Civil H y A (IMFIA. Facultad de Ingeniería. UdelaR, J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. tel: (+5982) 711 33 86 interno 115, fax: (+5982) 711 52 77 e-mail: raigon@fing.edu.uy

INTRODUCCIÓN

El acuífero Raigón es la principal fuente de abastecimiento a poblaciones y explotaciones industriales, agrícolas y ganaderas de la zona. El objetivo de los trabajos realizados fue la generación de la información necesaria para desarrollar una carta de vulnerabilidad en una instancia posterior. Como parte de las tareas llevadas adelante, se calibró un modelo del flujo en estado estacionario en el acuífero

La determinación de los límites del área de estudio se realizó a partir de la Carta Geológica del Uruguay (DINAMIGE, Escala 1:500.000), tomando como límite general los afloramientos de rocas ígneas al Norte y los límites naturales al Este y al Sudoeste y utilizando accidentes geográficos cercanos al borde de dichos afloramientos, siempre que los hubiere. La región considerada abarca 2271 km², e incluye completamente al acuífero.

La Figura 1 muestra la ubicación del área de trabajo en el territorio nacional.

INFORMACIÓN BÁSICA UTILIZADA

En una primera instancia se procedió a la digitalización de las principales características geográficas del área. A partir de las cartas 1:50000 del Servicio Geográfico Militar (SGM) se registraron los principales cursos de agua, los bañados, los caminos y rutas, los poblados, y las curvas de nivel cada 10 m referidas al cero oficial (nivel medio de las aguas en el puerto de Montevideo). En la Figura 2 se presenta el mapa general del área de interés.

La topografía se desarrolla principalmente entre los 10 m y los 40 m, con pendientes moderadas, encontrándose al Noroeste y Norte de la región elevaciones de hasta 70 metros, alcanzando 90 metros en el extremo oeste.

Se generó una base de datos con la descripción constructiva y geológica de perforaciones ubicadas en el área de estudio. Esta información fue utilizada para definir la geometría del acuífero.

El programa utilizado a tales efectos fue "Ground Water For Windows, Versión 1.1" de las Naciones Unidas. La información sobre perforaciones fue brindada por empresas perforistas, que contaban con fichas de datos constructivos confiables.

El banco de datos se compuso con aproximadamente 170 registros de pozos ubicados en el tercio sudeste del Acuífero Raigón y por 22 registros de perforaciones ubicados en el resto del área. Si bien este número de perforaciones dentro de los dos tercios restantes del área era reducido, fue suficiente para definir los parámetros de interés, acudiendo al

conocimiento adquirido acerca del funcionamiento hidráulico del acuífero y al apoyo de geólogos, en términos de definir la geometría del sistema.

El banco de datos recopila información acerca del aspecto descriptivo de cada perforación. Se indica la ubicación de cada una de ellas, especificando las coordenadas planas de la misma, cuando el punto fuera relevado por Geoposicionamiento Satelital (GPS). En su defecto, se indican las coordenadas aproximadas obtenidas de la ubicación de cada una de las perforaciones en las Cartas del Servicio Geográfico Militar, escala 1:50000. Cada registro cuenta con la identificación del propietario de la perforación, la zona donde se encuentra y en algunos casos, el uso que se le da y el caudal extraído correspondiente a un determinado descenso del nivel piezométrico mediante aforo.

Con respecto a los datos técnicos de carácter constructivo, se tiene información de la profundidad que alcanza cada perforación, de los diámetros de la entubación y de la ubicación de los filtros y de la litología. A partir de ellos, se pueden definir los perfiles geológicos en distintos ejes y, por lo tanto, la geometría del acuífero.

Se utilizaron niveles piezométricos de pozos relevados en la campaña realizada por la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE) en octubre de 1986, cuando el acuífero estaba prácticamente inexplorado, por lo que pudo suponerse en estado estacionario.

Con la intención de completar la información en algunas zonas, se agregaron datos de pozos de años próximos a 1986 – también de campañas hechas por DINAMIGE - en los que no se vio variación apreciable del nivel en las distintas mediciones realizadas a través del tiempo. La cantidad de lecturas utilizadas en la confección de los planos de superficies piezométricas dependió de la profundidad de los pozos donde se hizo la medida. La selección se hizo atendiendo a la ubicación de la zona filtrante del pozo y con la restricción de que la misma captara la primera capa acuífera. Se utilizaron medidas de 51 pozos.

A los efectos de confeccionar una piezometría actual se realizó una campaña de medición de niveles en los meses de junio y de julio de 1999. En la selección de puntos a medir se optó por tomar aquellos distribuidos homogéneamente en el área, y que fueran pozos que contaran en lo posible con descripción litológica y GPS. Posteriormente se realizó otra campaña para geoposicionar aquellos puntos que no tenían cota y coordenadas. Los pozos relevados fueron poco más de 20.

GEOLOGÍA

En esta etapa se analizó desde el punto de vista geológico una serie de perforaciones, y se desarrolló actividades de campo en las cuales se relevaron áreas nuevas, se chequearon contactos y se verificaron perfiles y arreglos geológicos.

Con todos los datos obtenidos más la revisión bibliográfica y trabajos de gabinete (fotointerpretación, revisión bibliográfica, revisión de perforaciones, construcción de cortes geológicos y de mapa geológico de superficie), se llegó a un documento final que consta de una Carta Geológica (Figura 3), cinco nuevos Cortes que se añaden a 7 existentes, y la Memoria Descriptiva correspondiente. Para la construcción de los cortes geológicos se fijaron direcciones preferenciales para dar continuidad a los cortes existentes y se cortó la cuenca y las direcciones de depósito de la secuencia Mio-pliocénica para una mejor visualización del arreglo de las unidades involucradas. Una vez definido el punto anterior, se construyeron los perfiles topográficos correspondientes a las direcciones de Corte. Luego se volcó la geología de superficie sobre ellos, y para lograr el arreglo de las unidades en subsuperficie, se ubicaron las perforaciones correspondientes a la dirección del Corte Geológico. Con toda esta información se obtiene la visión geométrica tridimensional del subsuelo del área en estudio.

Los sedimentos que componen el Sistema Acuífero Raigón están emplazados en la Fosa Tectónica del Santa Lucía (Cuenca del Santa Lucía).

La columna estratigráfica para el área de estudio es:

CUATERNARIO

Reciente y Actual

Arenas fluviales y costeras

Holoceno

Formación Villa Soriano

Pleistoceno

Formación Dolores

Formación Chuy

Formación Libertad

TERCIARIO

Plioceno

Formación Raigón

Mioceno

Formación Camacho

Oligoceno

Formación Fray Bentos

PRECÁMBRICO MEDIO

Complejo Basal

Granitos Sintectónicos Indiferenciados y Granitos Tardipostectónicos

Formación San José

PRECÁMBRICO MEDIO

Las Litologías asociadas al Precámbrico que se presentan en el área de trabajo, se encuentran relacionadas a tres unidades principales del Basamento Cristalino, que son: 1.- Complejo Basal; 2.- Granitos Sintectónicos Indiferenciados y Granitos Tardi-postectónicos 3.- Formación San José.

COMPLEJO BASAL

Se entiende por Complejo Basal el conjunto litológico que ha sido cartografiado en el sector sur oeste del país, y que suele manifestarse como un conjunto de rocas en relaciones genéticas complejas.

En el área de trabajo, el Complejo aflora principalmente en una franja de dirección NE, que en términos generales comienza en las proximidades de la desembocadura del Arroyo La Boyada en el Arroyo Pavón, siguiendo una línea de afloramientos a lo largo del último de los cursos de agua, hacia el NNE, hasta la Ruta Nacional N°11, en las proximidades de la Ciudad de San José. También se han cartografiado litologías asociadas al Complejo Basal, en las márgenes del tramo medio superior, del Arroyo Luis Pereira.

Desde el punto de vista litológico, para el área de trabajo, se han identificado principalmente dos litologías como predominantes, que son Granitos neises y Neises. Asociados a éstas se han encontrado bandas con micaesquistos y cuarcitas.

Este conjunto litológico conforma con las unidades de rocas cristalinas subsiguientes parte del borde de la Cuenca Tectónica del Río Santa Lucía.

GRANITOS SINTECTÓNICOS

Dentro de las litologías del Complejo Basal, existentes no solo en el área de estudio sino que también en el resto del país, existen una serie de granitos indiferenciados. Para nuestro caso, se ha observado un granito de estas características en el curso medio del Arroyo Carreta Quemada.

FORMACIÓN SAN JOSÉ

Esta Formación se desarrolla en términos generales en los departamentos de San José, Florida y Colonia.

Para el área de trabajo, esta unidad se presenta: - en el sector norte- asociada a una faja de dirección NW, en el tramo medio a alto del Arroyo de la Virgen, mientras que hacia el oeste, el Cristalino conforma un límite de cuenca, constituido por una faja de rumbo general NE, con sus principales afloramientos asociados a las márgenes del Arroyo Pavón.

Cabe destacar que en el norte del área de estudio las rocas del basamento cristalino también han sido detectadas en subsuperficie, en algunas perforaciones.

Desde el punto de vista litológico, la Formación San José para el área de estudio está constituida por neises, anfíbolitas y algunos micaesquistos.

El conjunto de las litologías mencionadas más arriba, conforman el borde de la Cuenca, en la cual se desarrolla, se deposita y evoluciona la Formación Raigón.

CRETÁCICO

FORMACIÓN MIGUES

Esta unidad se encuentra asociada a los fenómenos de subsidencia generados por eventos tectónicos en la primera etapa de la cuenca.

Ella está conformada por areniscas finas a muy finas, con niveles de areniscas medias a gravillosas, con episodios finos arcillosos.

En el área de estudio esta unidad no ha sido detectada a nivel de perforación salvo en el pozo de Rincón de la Bolsa, donde presenta una potencia aproximada de 700 metros. En nuestra área de trabajo no se ha detectado la misma a nivel de superficie.

FORMACIÓN ASENCIO

Esta unidad pertenece al Cretácico inferior y su presencia no ha sido confirmada en el área de trabajo, si bien existen una serie de afloramientos en el sector NNW que podría ser asimilables a eventos cretácicos. Ellos no han sido cartografiados pues no se disponía de suficiente información, quedando como una alternativa para futuros estudios.

TERCIARIO

FORMACIÓN FRAY BENTOS

Esta unidad constituye hacia el NNW, W y centro del área de estudio el piso del acuífero. Se compone de areniscas finas a muy finas, cuarzo feldespáticas, subangulosas, matriz limo arcillosa, con cemento calcáreo y ocasionalmente silíceo, siendo su color general el pardo amarronado a pardo rosáceo.

Esta unidad fue definida por Goso (1965). Se caracteriza por estar constituida por limos y/o areniscas finas a muy finas, masivas, generalmente algo carbonatadas, de color rosado a marrón claro.

Aflora en los sectores centro y norte del área en estudio; hacia las márgenes del Arroyo de la Virgen, y en la confluencia del Arroyo Sarandí con el Río San José, y del Arroyo Cagancha con el Río San José, en algunos desmontes de la Ruta Nacional N° 1 y en los entalles de una serie de cañadas del área en estudio. Esta unidad, conjuntamente con el Basamento Cristalino desarrolla las zonas de mayor cota altimétrica en el área, generando suelos asociados a una actividad agropecuaria intensa.

Para el área mapeada, la Formación Fray Bentos presenta dos unidades litológicas, una caracterizada por sedimentos medios, finos y muy finos (esencialmente psamitas y pelitas), y otra, caracterizada por granulometrías gruesas y muy gruesas (esencialmente psefitas). La primera unidad superior se encuentra en el sector centro y sur del área. En estos casos se trata de una arenisca fina a muy fina, de color rosado, masiva, con niveles y nódulos de carbonato de calcio, encontrándose también carbonato en la matriz. Estas litologías evolucionan tanto lateralmente como verticalmente a limos y loess algo arenosos, rosados, con carbonato en la matriz. La segunda unidad inferior se halla hacia el sector norte y noreste del área en estudio, ocupando las zonas de mayor cota de la región. Está integrada por arenas gruesas a muy gruesas, conglomerádicas, polimícticas, subangulosas, mal seleccionadas, matriz soportada. Estas litologías estarían asociadas a depósitos de canales, próximos a la zona de aporte. Los espesores promedios, serían para el miembro superior de aproximadamente 15 metros, y para el inferior superaría los 25 metros.

Esta Unidad presenta contactos discordantes en base y tope, siendo hacia la base con las litologías del Basamento Cristalino, y hacia su tope con la Formación Camacho. La edad de la misma es: Oligoceno Inferior a medio.

FORMACIÓN CAMACHO

Esta unidad sólo ha sido detectada a nivel de perforaciones, y en especial en el sector sur del área de trabajo

En subsuperficie, en un total de 15 perforaciones analizadas, pertenecientes a OSE, Hidromar, Matrin y Coperpoa, se han encontrado las sedimentitas de la Formación Camacho, con espesores promedios de 20 metros y algunas excepciones en las que supera los 25 metros, tanto en su facies arenoso como arcilloso, en contacto discordante con los sedimentos de la Formación Fray Bentos.

Esta unidad presenta litologías asociadas a un ambiente marino a marino litoral, costero, de playa (Martínez 1994, Sprechman 1974).

Las relaciones de contacto de la Formación Camacho, son discordantes hacia su base con la Formación Fray Bentos, y podría llegar a existir un pasaje gradual hacia las litologías de la Formación Raigón.

FORMACIÓN RAIGÓN

La Formación Raigón fue definida por Goso (1965), y para el área de estudio no había sido mapeada hasta el momento.

Esta Formación ha sido cartografiada en el sector norte del Río San José en toda su extensión hasta el Arroyo de la Virgen y el Arroyo Carreta Quemada, así como a lo largo del Arroyo San Gregorio y el Arroyo Luis Pereyra. Se apoya directamente sobre la unidad anterior, desarrollando un nivel erosivo. No se han observado grandes exposiciones, salvo en la zona costera, asociada a las barrancas del Río de la Plata. Su presencia a nivel de suelos es casi siempre visible.

Se caracteriza por contener arenas gruesas a medias, a veces gravillosas, cuarzo-feldespáticas, de regular a bien seleccionadas. Dependiendo de la granulometría, llega a ser mal seleccionada y polimíctica en los casos de las gravillas.

En base a las características geomorfológicas a nivel de foto, así como de su distribución espacial, y litologías, esta unidad en el sector en estudio podría asociarse a sistemas fluviales a fluviales deltaicos, desembocando en pequeñas bahías someras y tranquilas, generando niveles erosivos, de corte y relleno en la unidad inferior.

La potencia promedio de esta unidad en la zona de trabajo a nivel de afloramientos no superaría los 5 metros; mientras que en las perforaciones alcanza espesores promedios de 10 m a 15 m.

CUATERNARIO

FORMACIÓN LIBERTAD

Esta formación definida por Goso (1965), constituida por limos arcillosos y loess, pardos amarronados, se encuentra presente en un área importante mapeada, depositándose por encima de las unidades antes mencionadas, desarrollando formas de lomadas suavemente onduladas.

Litológicamente esta constituida por lodolitas masivas, limos arcillosos marrones a pardo amarronados, con un bajo porcentaje de arena gruesa y algo de gravilla, dispersa en la matriz. Dentro de estas litologías predominan los limos pardo amarronados, con niveles de carbonato de calcio, tanto en concreciones como disperso en la matriz.

Esta unidad genera suelos bastante espesos. Sobre los mismos se desarrolla una gran actividad productiva. En base a lo anterior, no desarrolla gran cantidad de afloramientos,

generando grandes zonas con cobertura. A pesar de esto, se han encontrado algunas cárcavas , en las cuales es posible observar la Formación Libertad, así como en desmontes de caminos y en cunetas de los mismos.

El espesor promedio de la unidad para el área de trabajo es del orden de los 10 metros, aunque en algunas zonas, y en base a algunas de las perforaciones para explotación de aguas subterráneas relevados, ella puede alcanzar hasta 15 metros y más.

Esta unidad fue generada en un ambiente de estepas, árido frío, asociado a un evento glacial, en fase regresiva. Los contactos son discordantes hacia la base, con la Formación Raigón.

FORMACIÓN CHUY

Esta Formación fue definida por Delaney (1963) y redefinida por Goso (1972). En el área mapeada ha sido identificada, asociada principalmente a la línea de costa, o en las planicies de los principales cursos de agua. Presenta desarrollo y exposición relativa, no generando excelentes afloramientos.

Se caracteriza por presentar arenas finas a medias, cuarzo feldespáticas, de colores amarillentos, con sectores rojizos a ocres, dados por una pátina de óxido de hierro. En algunos sectores se encontró intercalaciones de niveles arcillosos a arcillo arenosos.

Esta unidad desarrolla en su casi totalidad formas de paisaje muy planas a planas. Siendo visible su terraza, cuando es retomada por el entalle asociado a los principales cursos de agua actuales. La potencia promedio de esta unidad para el área es del orden de los 5 metros. Según la litología, estructuras sedimentarias observadas y de acuerdo al contenido fosilífero el ambiente de esta formación sería marino litoral, asociado a una ingesión marina cuaternaria.

Los contactos de esta unidad son discordantes con las unidades subyacentes, así como con la unidad superior.

FORMACIÓN DOLORES

Esta formación fue definida por Goso (1972). Se encuentra presente en casi todo el fotoplano, estando asociada a los principales cursos de agua. Se desarrolla en la costa del Río San José y del Arroyo Luis Pereyra, donde se pueden observar afloramientos asociados a las barrancas de dichos cursos de agua.

Está constituida por arcillas y limo arcillosos, con alto contenido de arenas, de color pardo a pardo amarronado. Se ha observado dentro de la unidad, en la zona de barrancas, niveles areno arcillosos, de color marrón claro, con lentes de arcillas y niveles de carbonato de calcio. En algunos sectores, estos niveles son de gran extensión lateral, llegando a tener longitudes del orden de los 200 a 300 metros, y 0,50 metro de espesor. En la zona de barrancas, donde presenta su mejor exposición, la potencia promedio de la unidad es de 2,50 m a 3,00 m.

Esta unidad ha sido cartografiada en una relación directa de superposición a las Formaciones anteriores, siendo la relación que más predomina la de Dolores-Chuy, ocupando el plano de terraza mas bajo. En algunos sectores se deposita en forma discordante sobre la Formación Fray Bentos. Desde el punto de vista paleogeográfico, esta unidad es el producto de un momento regresivo, y la consecuente acción de erosión de las unidades anteriores.

Formación Villa Soriano

Esta formación definida por Goso (1972) se encuentra representada en todo el sector sur del área. Está asociada a la desembocadura de los cursos de agua en el Río de la Plata, y en algunos casos, en el curso medio de los mismos.

Desarrolla la planicie más baja cartografiada, estando muchas veces recubierta por sedimentos pertenecientes al Reciente y Actual generando grandes zonas de bañados.

Litológicamente está constituida por arenas finas a muy finas mal seleccionadas, con abundante arcilla en la matriz, también en lentes, de colores ocre, grises y gris verdosos.

El espesor promedio es de 3 metros, encontrándose en algunos pozos hasta 5 metros. Según los fósiles encontrados, y las relaciones estratigráficas, la edad tentativa para esta unidad es Pleistoceno Superior-Holoceno.

Reciente y Actual

Fueron cartografiados bajo esta denominación los sedimentos más modernos, pertenecientes al post Holoceno. Se asocian a los cursos de agua, coluviones y franja costera del Río de la Plata, que en el área presentan una gran importancia por su expresión y su asociación con la actividad minera, en lo referente a la existencia de canteras y areneras, que extraen materiales de estos sedimentos.

Se trata de sedimentos arenosos, finos a medios, bien seleccionados, para el caso de las barras y albardones arenosos de la costa y arenas medias a finas, de selección regular, asociadas a las barras del curso bajo y medio de los principales ríos y arroyos del área.

GEOFÍSICA

Se planificó la ejecución de 11 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), distribuidos en el área de estudio de manera tal que se pudieran utilizar como elementos de apoyo del modelo conceptual.

Todos los SEV se realizaron utilizando el arreglo electródico de Schlumberger, que puede clasificarse como un dispositivo del tipo lineal, de 4 electrodos, en el que se cumple que MN (distancia entre los electrodos de potencial) es muy pequeña frente a AB (distancia entre los electrodos de inyección corriente), lo que hace que las medidas realizadas puedan atribuirse al punto central del arreglo. Debido a la precisión de las mediciones geoeléctricas en campo y a la teoría de la propagación de errores puede imponerse como norma general, en cada configuración de trabajo, que se deberá cumplir que $MN \leq AB/5$.

El equipo de trabajo utilizado es Sting R1 fabricado por la firma AGI Advanced Geosciences Inc.

Se trabajó con aperturas variables de los electrodos de inyección de corriente, en cada caso, según la litología esperada y observada de cada uno de los sondeos realizados. Se mantuvieron fijos los electrodos de potencial hasta que la desviación observada entre las mediciones en el equipo fuese mayor que lo adecuado (2%), momento en el cual se procedió a aumentar la intensidad de corriente - siempre que fuese posible - o a empalmar la curva de resistividades aparentes alejando los electrodos de potencial a la distancia más conveniente, verificando en cada caso que se siguiesen cumpliendo las hipótesis de la teoría de Schlumberger.

La tarea de interpretación fue hecha con el software Resist en su versión 1.0. No se realizaron interpretaciones automáticas.

El SEV12 se efectuó en dos oportunidades. Los datos arrojados en ambos casos son muy erráticos, no pudiéndose realizar una interpretación confiable de las mediciones de campo.

Un detalle de la interpretación de los SEV puede observarse en la Figura 4.

PIEZOMETRÍA

A partir de los datos de niveles medidos se confeccionaron los mapas de curvas piezométricas para octubre de 1986 y para junio de 1999. Los niveles de vinculación con los ríos se obtuvieron de los datos promedio mensuales de la Dirección Nacional de Hidrografía (DNH) en sus puntos de registro para el sector sudeste de la zona de estudio (Proyecto CONICYT – BID 71/94), y en las restantes zonas se utilizaron cotas provenientes de las cartas planialtimétricas 1:50000.

Se tomó como nivel en la costa la cota -0.34 m que corresponde al nivel medio del Río de la Plata de las lecturas del mareógrafo de Santiago Vázquez en octubre de 1986. Las variaciones de nivel a lo largo de la costa son muy pequeñas (20 cm entre Colonia y Montevideo), por lo que se utilizó este nivel en toda la faja costera involucrada.

Para el trazado de las curvas se confeccionó previamente una grilla que fue el resultado de una interpolación lineal por kriging, a partir de los datos de niveles en distintos puntos de la región. Comparando las curvas piezométricas correspondientes a los dos momentos considerados, y a pesar de las diferencias ocasionadas por haber utilizado distinta red de medición para 1986 y 1999, puede observarse un descenso general de los niveles hidráulicos que llega a 5 m en el principal sector de recarga. Esto indicaría una explotación de volúmenes mayores a los de recarga o disminución de la misma en el período.

La Figura 5 muestra la superficie piezométrica del año 1986 a través de las curvas cada dos metros, y las divisorias de aguas superficiales y subterráneas.

MODELO CONCEPTUAL

El sistema hídrico subterráneo, a los efectos de la construcción del Mapa de Vulnerabilidad, se concibe como un solo acuífero, salvo en el área sudeste, limitada por la Radial de Ruta 3 con Ruta 1, donde ya se había calibrado la recarga y la conductividad hidráulica mediante la simulación de un esquema bicapa. Las condiciones de borde utilizadas se reducen a dos: descarga en arroyos y ríos, y borde impermeable en zonas de contacto con la roca. Para la simulación se dividió el área en cuatro secciones.

MODELO NUMÉRICO

A los efectos de determinar los valores de transmisividad en algunos puntos, para luego tomarlos como punto de partida de la modelación del área restante, se analizaron los ensayos de recuperación realizados por la empresa de aguas del estado (OSE) en sus pozos

del área. Para la interpretación se utilizó el software "Groundwater Software for Windows" (GWW) de Naciones Unidas.

En la Figura 6 se observan las cuatro subáreas en que se dividió el dominio para efectuar la modelación y muestran el acuerdo al que se llegó entre la piezometría inicial y la calculada mediante la modelación para estado estacionario (1986).

La diferencia entre las piezometrías observadas y calculadas en el conjunto de subáreas fue de 1.38m por exceso y 1.22m por defecto para las celdas cuyos niveles se apartaron más, y, en general, fue menor a 1 m. Las celdas con que se trabajó fueron cuadrados de 1.5 km de lado. En el área sudeste, las celdas fueron de 1 km de lado, y se simuló dos capas.

CONCLUSIONES

- Se generó un banco de datos actualizado y versátil
- Se llevó a una escala de mayor detalle la geología de superficie y suelos
- Se completó el modelo conceptual del acuífero
- Se realizó una modelación numérica preliminar completa para régimen estacionario

El abastecimiento de agua potable a poblaciones e industrias, las políticas de promoción del riego y la necesidad del mismo para el desarrollo del sector agrícola-ganadero, completan un cuadro que pone de relieve la importancia estratégica del uso y protección del sistema acuífero de Raigón. La recarga neta se sitúa en los mayores relieves y las descargas más fuertes se dan hacia el Río de la Plata y hacia arroyos de su cuenca.

Con esta caracterización del sistema hídrico subterráneo, junto al modelo numérico calibrado y al estudio de vulnerabilidad (posible con la información obtenida en las instancias descritas), se conforma un potente paquete aplicable a la planificación y a la gestión del recurso.

BIBLIOGRAFÍA

- **Carballo, E., INYPSA.** 1995. *Estudio Acuífero Raigón. Informe Final.* PRENADER. Uruguay.
- **Custodio, E., Llamas, M.** 1976. *Hidrología Subterránea* (Tomos I y II). Ediciones Omega, Barcelona, España, 2290 pgs.

- **de los Santos, J. et al.** 1998. *Modelación Numérica del Acuífero Raigón*. Proyecto CONICYT – BID 71/94. IMFIA, UdelaR.Uruguay.
- **Iakubovskii, IU. V., Liajov, L.L.** 1980. *Exploración eléctrica*. Ed. Reverté, Barcelona, España, 421 pgs.
- **Mc. Donald M., Harbaugh A.** 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Books and Open-File Reports Section, U.S.G.S., Colorado, U.S.A., 585 pgs.
- **Meskale, M.H.** 1989?. *Un estudio integral de la cantidad y de la calidad del agua subterránea en la subcuenca inferior del Río Santa Lucía*. Tesis Parcial de Doctorado, Univ. de Montreal en Quèbec, Canadá.
- **Orellana, E.** 1982. *Prospección geoelectrónica en corriente continua*. De. Paraninfo, Madrid, España, 578 pgs.
- **Pérez Franco, D.** 1982. *Hidráulica Subterránea*. Ed. Científico - Técnica, La Habana, Cuba.
- **Todd, D.K.** 1980. *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons, U.S.A., 535 pgs.

en Geología:

- **Bossi, J., Navarro, R.** 1991.- *Geología del Uruguay*. 2 Tomos. Oficina de Publicaciones de la Univ. de la Rep. Montevideo, Uruguay.
- **Caorsi, J.H., Goñi, J.** 1958.- *Geología Uruguaya*. Inst. Geol. Uruguay, Bol. 37, pp 1-73, Montevideo, Uruguay.
- **Delaney, P.** 1963.- Fisiografía e geología da superficie da planície costeira do Rio Grande do Sul. Tes. Fac. Filos. Ciências e Letras, Univ. de Sao Paulo.
- **Goso, H.** 1965.- *El Cenozoico en el Uruguay* . Informe interno. Instituto Geológico del Uruguay. Pp 1 – 77.
- **Goso, H.** 1972.- *Cuaternario*.- MAP-PELS. Montevideo, Uruguay. Informe Interno.
- **Goso, C., S. de Souza.** 1993.- Análisis faciológico y paleogeográfico de la Secuencia Miopliocénica del sector occidental de la Cuenca del Santa Lucía (Uruguay). V Simposio Sul Brasileiro de Geología.- Curitiba, Brasil.
- **Goso, H., C. Goso, M. Musso, A. Martínez.** 1998.- Estudio Geotécnico del Puente Buenos Aires - Colonia: Materiales para el aprovisionamiento de la Obra.

Departamento de Geotécnica, Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería. Montevideo,

- **Hart, S.** 1966.- Radiométric ages in Uruguay and Argentina, and their implications concerning continental drift. San Francisco, USA.
- **Lambert, R.** 1940.- Observaciones Geológicas en la Región Sudoeste del Uruguay. Inst. Geol. Uruguay, Inf. y Notas preliminares. 6: 1-11. Montevideo, Uruguay.
- **Martínez, S.** 1994.- Bioestratigrafía (invertebrados) de la Formación Camacho (Mioceno - Uruguay). Tesis Doctoral N° 2722; FCEN, Universidad de Buenos Aires. Argentina.
- **Serra.** 1943.- Mapa Geológico del Departamento de Colonia. Instituto Geológico del Uruguay. Montevideo, Uruguay.
- **Sprechmann, P.** 1978.- Paleoecología, paleogeografía y estratigrafía de la región costera del Uruguay durante el Neogeno y el Cuartario. Actas del 2ª Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía, y 1º Congreso Latinoamericano de Paleontología. Tomo III.- Buenos Aires, Argentina.
- **Spoturno, J., S. De Souza, E. Peel, R. Guerequiz, P. Collazo.** 1999.- Síntesis Geológica a Escala 1/250.000 de la Cuenca del Santa Lucía. Departamento de Geología, Facultad de Ciencia, Montevideo, Uruguay.- En prensa.
- **Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen W. y Rossi P.** 1985.- Carta Geológica del Uruguay. Escala 1/500.000.- 2 mapas y memoria explicativa. DI.NA.MI.GE. Montevideo, Uruguay.

FIGURAS

Figura 1 - Ubicación general del Acuífero Raigón

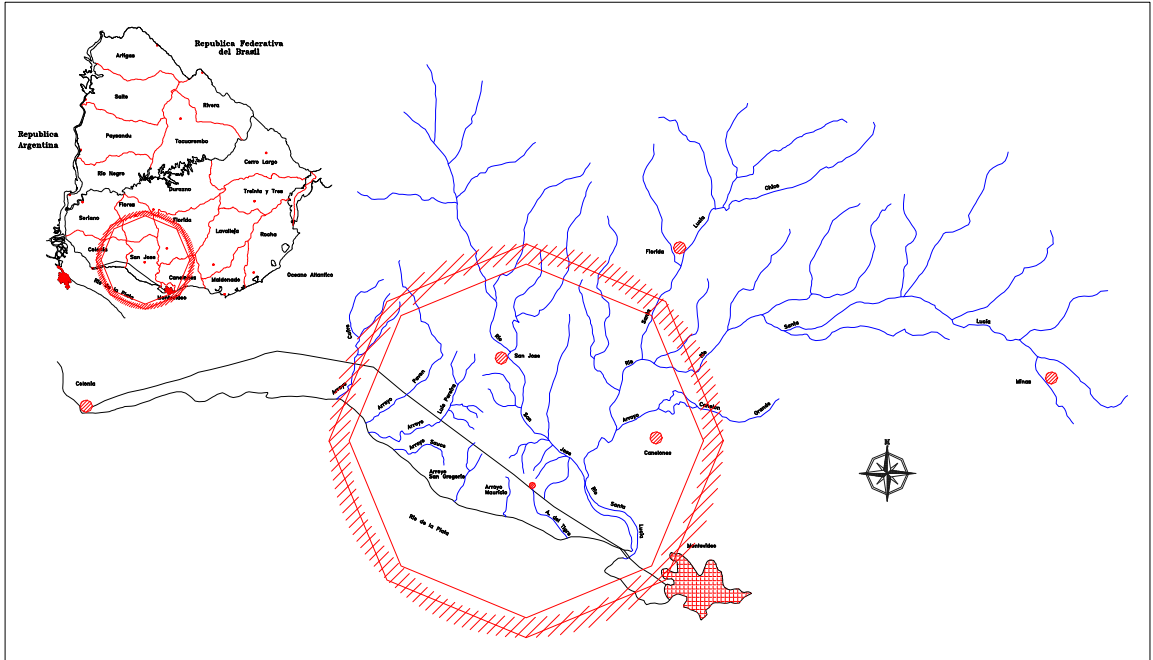
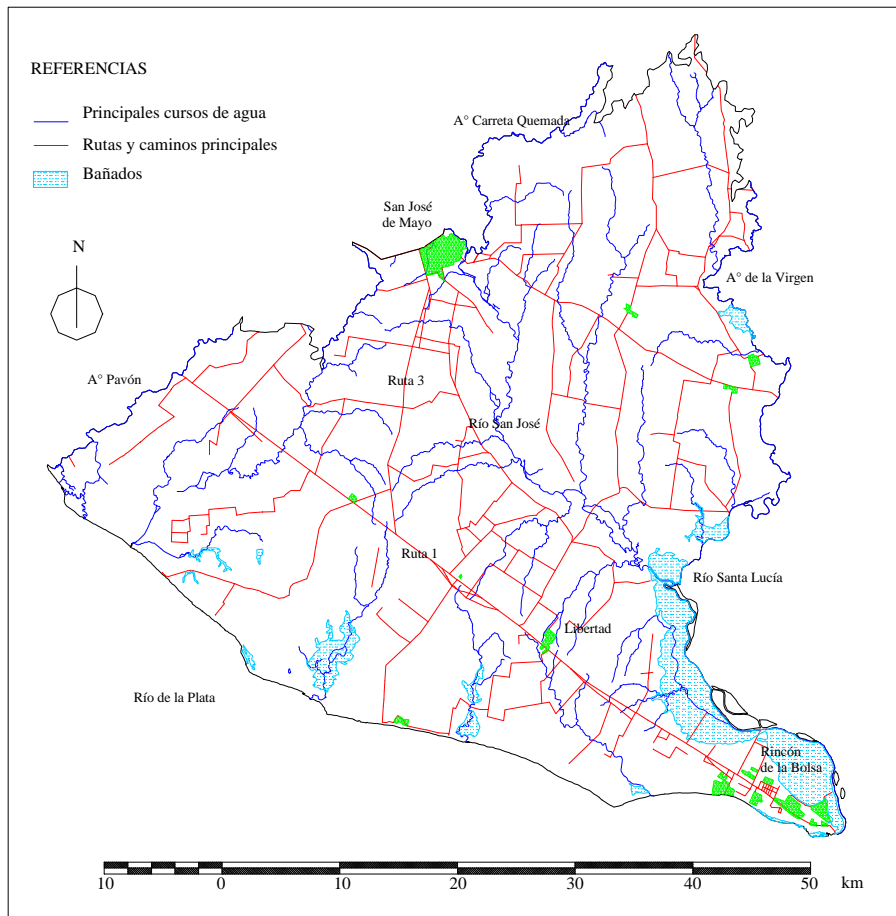













Figura 2 - Cartografía General del Area de Estudio



Referencias

-  Centros Poblados
-  Principales cursos de agua
-  Rutas y caminos principales

-  Fm. Actual
-  Fm. Villa Soriano
-  Fm. Dolores
-  Fm. Libertad
-  Fm. Chuy
-  Fm. Raigón
-  Fm. Fray Bentos
-  Basamento Cristalino

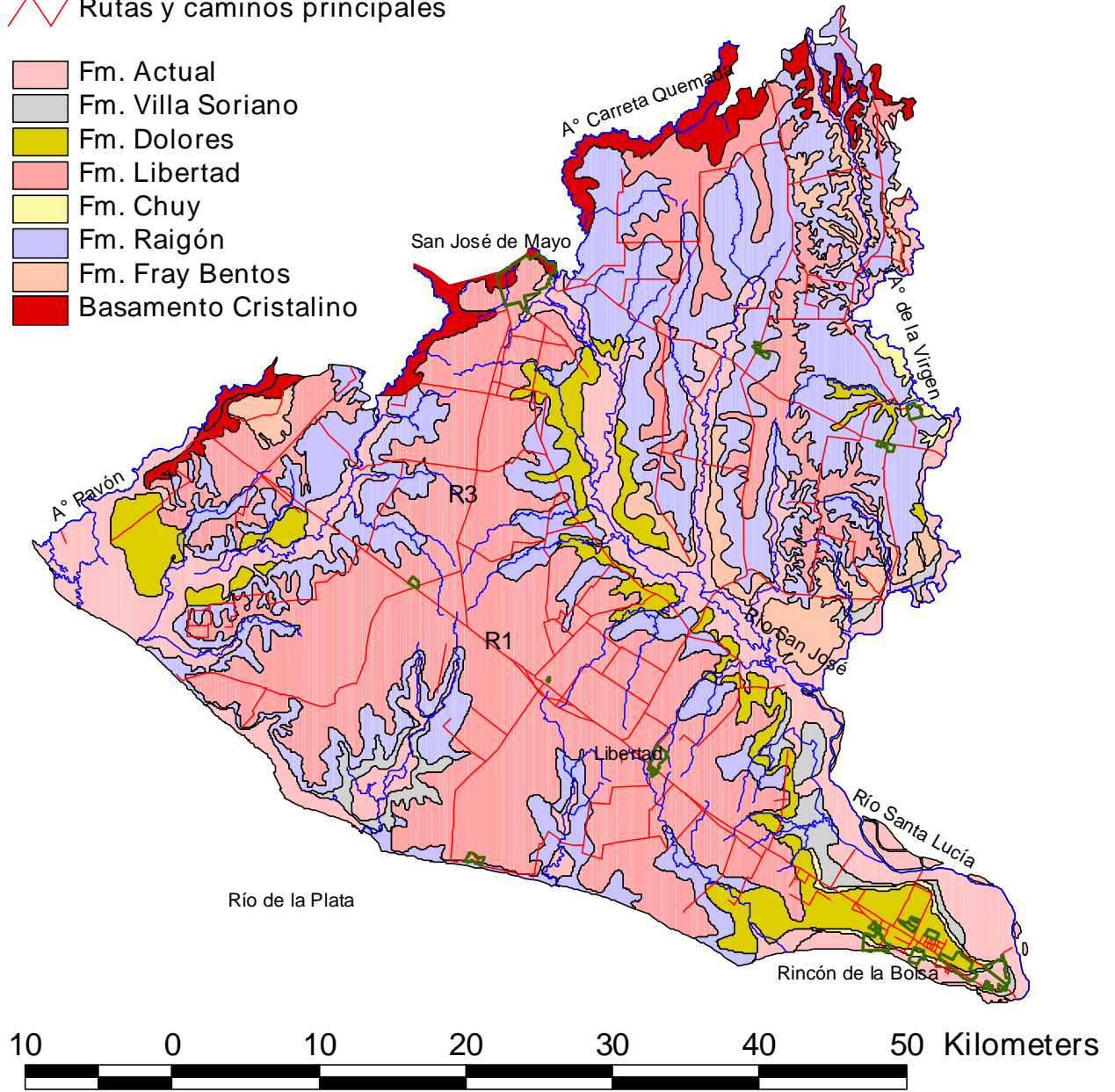


Figura 3 – Carta geológica

Figura 4 - UBICACION E INTERPRETACION DE LOS SEV REALIZADOS

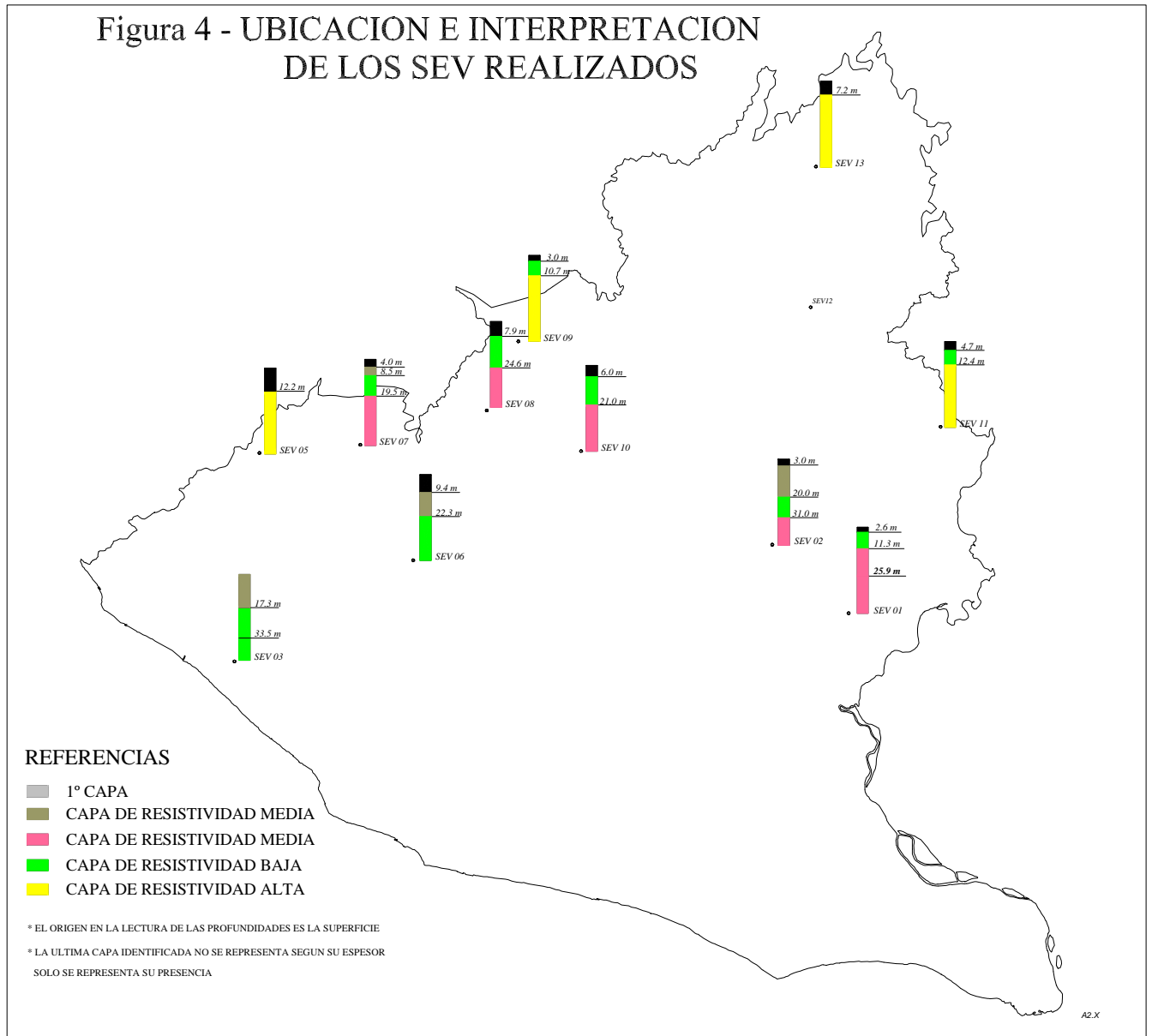


Figura 5 – Características hidráulicas del área de estudio

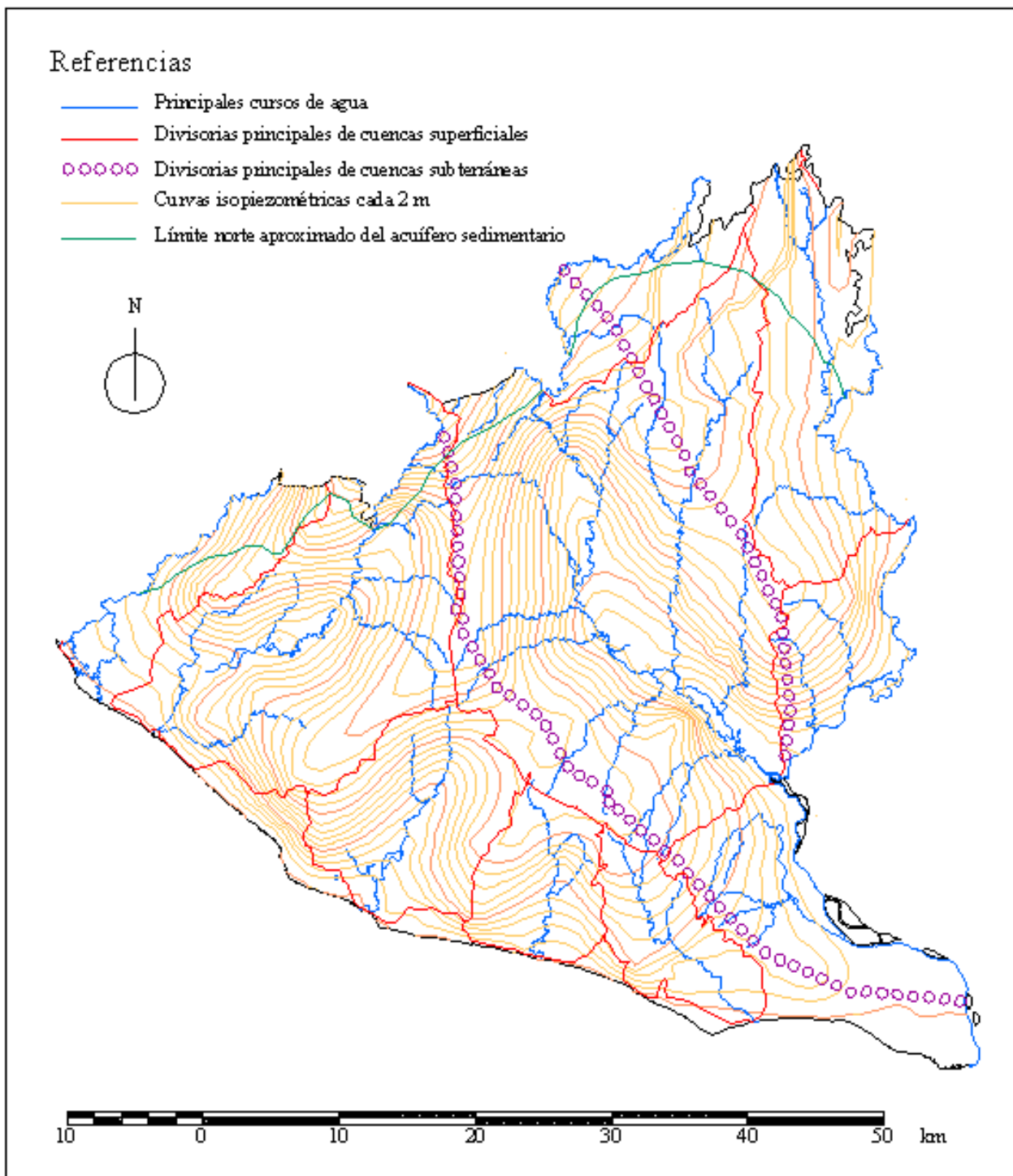


Figura 6 – Modelación del flujo en el acuífero

