

La influencia de la tectónica cenozoica en la productividad de agua subterránea en zonas fracturadas: aplicación a Sao Paulo, Brasil

A. J. Fernandes⁽¹⁾ y D. L. Rudolph⁽²⁾

(1) Instituto Geológico, SMASP, Sao Paulo, Brasil

(2) Department of Earth Sciences, University of Waterloo, Waterloo, Canadá

RESUMEN

Se ha desarrollado un nuevo método, denominado Método de los Dominios Tectónicos Homogéneos (DTH), para correlacionar lineamientos estructurales en rocas fracturadas, reconocidas mediante fotointerpretación aérea, con las características de las fracturas subsuperficiales que están asociadas a zonas de elevada producción de aguas subterráneas. El enfoque utilizado consiste en correlacionar las estructuras de un área determinada con la orientación de los campos de esfuerzo primarios y las fracturas asociadas a la historia tectónica reciente de la región de estudio. La premisa principal de este método es que los eventos tectónicos más recientes en un área determinada son los que más han influido en la naturaleza de la red de fracturas existente y, consecuentemente, en las características del flujo regional de las aguas subterráneas.

Se seleccionó un lugar de estudio en el Estado de Sao Paulo (Brasil). En este lugar, la complicada historia tectónica, que data del Precámbrico, ha generado una porosidad por fracturación significativa en la roca madre. Este acuífero es utilizado intensamente para abastecimiento urbano e industrial. La actividad tectónica más reciente está asociada con cinco eventos diferentes del Cenozoico que generaron fracturas por medio de campos de esfuerzo de cizallamiento y de extensión. Por el proceso de formación, estas últimas tienden a dar lugar a aperturas efectivas y conductividades hidráulicas mayores. Aplicando el método DTH se identificaron las tendencias de fracturación en una serie de zonas de estudio. En la mayoría de los casos, se correlacionó la capacidad de producción de los pozos con su proximidad a estructuras extensivas. Otros factores, como el tipo de medio rocoso, tenían mucha menos influencia en la capacidad productiva de los pozos.

Por medio de esta aplicación, se muestra que el enfoque DTH proporciona una metodología para cartografiar las áreas de fracturación en medios rocosos que tienen un potencial elevado para el desarrollo de recursos de aguas subterráneas.

Palabras clave: Aprovechamiento de aguas subterráneas, Brasil, lineamientos, rocas fracturadas, tectónica

The influence of Cenozoic tectonics on the groundwater productivity in fractured zones: Application to the Sao Paulo area

ABSTRACT

A new approach, named the Homogeneous Tectonic Domain method (HTD) is developed to correlate structural lineaments recognised through air-photo interpretation with subsurface fracture features that are associated with zones of high groundwater production in fractured-rock environments. The analysis approach involves correlating the lineament features of a given area with the orientation of the primary stress fields and fracture structures associated with the recent tectonic history that affected the region of study. The main premise of the method is that the most recent tectonic events in a given area have had the most significant influence on the nature of the existing fracture network and subsequently on the regional groundwater flow characteristics.

A study site was selected within the State of Sao Paulo, Brazil, where a complex tectonic history dating back to the Precambrian has generated significant fracture porosity in the bedrock environment. The bedrock is heavily used in this area as a domestic and industrial aquifer. The most recent tectonic activity is associated with five distinct Cenozoic events that generated fracture features through both shear and extension stress fields. Due to the mode of formation, fracture zones generated by extension tend to have the largest effective apertures and are the most conductive to groundwater. By applying the HTD method in a series of test areas, fracture trends generated by shear and extension stresses could be identified. Water-well production capacity was correlated with proximity to extension-type structures in most cases. Other factors, such as the type of rock the well was completed in, had a much weaker influence on well capacity.

Through this application, the HTD approach was shown to provide a methodology for delineating fractured areas within rock environments that have high potential for groundwater resource development.

Key words: Brazil, fractured rocks, groundwater development, lineaments, tectonics

Introducción

El aprovechamiento de los recursos de agua subterránea en rocas fracturadas es muy común en diversas partes de la Tierra. En los acuíferos localizados en rocas duras, las zonas de alta productividad suelen estar asociadas a la presencia de zonas fracturadas conductivas, caracterizadas por una alta transmisividad. Identificar las zonas más productivas es problemático y en muchos casos se han usado métodos de carácter aleatorio. Un detallado análisis estructural y el entendimiento de la evolución tectónica en una zona determinada puede proporcionar información muy útil para los hidrogeólogos que intervienen en estudios a escala regional.

Trabajo previo se ha centrado en relacionar la estructura del substrato rocoso con la producción de agua subterránea a partir del análisis de la posición de los pozos en relación con los lineamientos (Gustafsson 1994; Mabee *et al.* 1994; Sander *et al.* 1996), o en relación con elementos estructurales, como flancos y ejes de plegamientos, buzamiento de los estratos y fracturas (Larson 1972; Sami 1996). El análisis de lineamientos se ha llevado a cabo en diversos tipos de datos obtenidos mediante sensores remotos, como fotos aéreas o imágenes LANDSAT TM (Sander *et al.* 1996) o SPOT, en muchos casos con ayuda de un SIG (Gustafsson 1994). Algunos estudios se han centrado en las implicaciones hidrogeológicas de la configuración de los lineamientos. Por ejemplo, Sidle y Lee (1995) concluyeron que la conductividad hidráulica anisótropa que observaron estaba relacionada con la orientación de las estructuras. Otro estudio sugirió que los caudales de extracción de los pozos no están directamente influenciados por el número de fracturas interceptadas por la perforación, sino que están controlados principalmente por las características de las zonas de fractura más superficiales (Briz-Kishore 1993). Basándose en un análisis tectónico y en datos procedentes de perforaciones, Larson (1972) concluyó que los pozos que atravesaban fracturas paralelas a los diques Jotnianos (de Meso a Neo-Proterozoico), de tipo extensional, eran mucho más productivos que los pozos que interceptaban zonas de cizalla. Una de las conclusiones principales de su trabajo fue que el proceso de deformación (extensión o cizallamiento) controla la apertura de las fracturas lo que, a su vez, controla el flujo subterráneo. Este concepto también se adopta en el presente estudio; sin embargo, y contrariamente a estudios anteriores, se investiga el papel de la tectónica frágil más reciente en la apertura o el cierre de los sistemas de fracturas antiguos y recientes.

El objetivo del presente trabajo, por tanto, es

expandir el conocimiento de la influencia de las estructuras frágiles sobre la circulación de agua subterránea en rocas fracturadas, y especialmente de las estructuras generadas o reactivadas durante el Cenozoico. La aplicación de este análisis puede ser útil para la planificación de las explotaciones a nivel regional. Para conseguir este objetivo se ha desarrollado un nuevo método que tiene en cuenta la tectónica Cenozoica y el análisis de lineamientos. Este método permite delinear las áreas con mayores expectativas en cuanto al potencial desarrollo de los recursos de agua subterránea.

La metodología se ha aplicado al sector oriental del estado de Sao Paulo en Brasil, un área que actualmente depende en gran manera del agua subterránea obtenida en rocas fracturadas para el suministro doméstico, industrial y agrario. El área de estudio tiene unos 2340 km² y en las últimas décadas ha experimentado un fuerte crecimiento tanto industrial como urbano. Campinas, la ciudad más importante de la región, está localizada a unos 100 km al norte de la ciudad de Sao Paulo. La localización y la geología del área de estudio se muestran en la Fig. 1.

Métodos y materiales

El desarrollo de un nuevo método para evaluar la influencia de la tectónica Cenozoica en la productividad de los pozos en un medio fracturado fue el principal resultado de un proyecto que tenía un alcance mayor. El proyecto global consistía en la elaboración de un mapa geológico y en el análisis en detalle de las estructuras frágiles, con el objetivo de desarrollar un modelo sobre la evolución de la tectónica Cenozoica en el área (Fernandes 1997). El mapa geológico se preparó a escala 1:100.000 y la tectónica Cenozoica se evaluó a partir de una gran cantidad de datos estructurales y del análisis de lineamientos a escalas 1:100.000 y 1:250.000, como se describe en Fernandes (1997). En el contexto de este estudio el término "lineamiento" se define tal y como fue propuesto por O'Leary *et al.* (1976), es decir, como "un elemento lineal de una superficie capaz de ser mapeado, como un arroyo recto o una cresta, que generalmente refleja una estructura subsuperficial".

Se usaron dos enfoques para el análisis de la productividad de los pozos: (1) el tradicional, donde se realiza una correlación entre la productividad de los pozos y la litología, proximidad a los lineamientos y características topográficas; y (2) un enfoque novedoso, llamado el método de los "dominios tectónicos homogéneos" (DTH), que permite evaluar la influencia de la tectónica Cenozoica en la productividad de

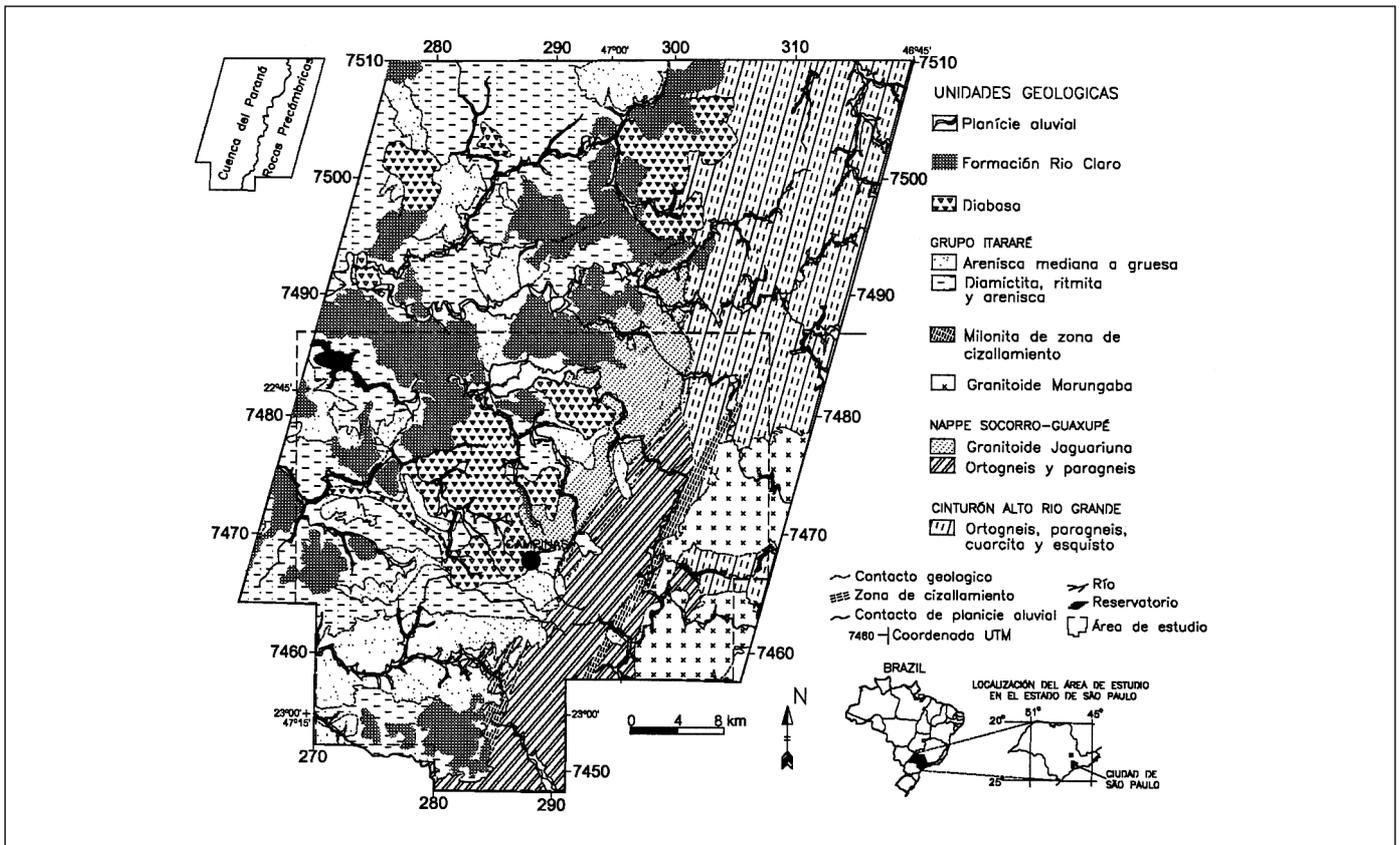


Fig. 1. Localización y geología del área de estudio en la región norte del estado de Sao Paulo, Brasil

Fig. 1. Location and geology of the study area in region north of Sao Paulo, Brazil

los pozos. Para ambos métodos se consultó la base de datos sobre pozos mantenida por el Instituto Geológico del Estado de Sao Paulo. La mayor parte de la información hidrogeológica se ha basado en los datos de las perforaciones, proporcionados de manera voluntaria por los perforistas locales. Estos datos se recogieron como parte de un proyecto interdisciplinar de planificación regional. Como tales, no todos los datos eran adecuados para una evaluación hidrogeológica, y frecuentemente las descripciones geológicas eran muy pobres. En el área de estudio la base de datos comprende 1300 pozos. De entre ellos se seleccionaron 434 pozos que incluían información sobre capacidades específicas. Información adicional que se incluye en la base de datos comprende flujos volumétricos, perfil litológico y detalles constructivos. La localización de cada pozo fue contrastada durante el trabajo de campo y éstos se dibujaron sobre mapas topográficos a escala 1:10.000 (Hassuda *et al.* 1993; Oda *et al.* 1995).

Como parte de la primera metodología analítica se dibujaron diagramas de frecuencia acumulada de los

valores de capacidad específica en función de: litología, proximidad a los lineamientos y dirección, y características topográficas. La proximidad a los lineamientos se determinó a partir de fotos aéreas a escala 1:25.000. Basados en observaciones de campo sobre los espesores medios de las zonas de fractura, que resultaron ser de alrededor de 70 m, se consideró que cualquier pozo localizado a menos de 70 m de un lineamiento se podía suponer asociado a este. Los pozos localizados a distancias mayores de 70 m de un lineamiento concreto no se consideraban asociados al mismo. Las características topográficas de cada pozo se determinaron a partir de mapas topográficos a escala 1:10.000. Los elementos litológicos interceptados por cada pozo se clasificaron a partir de la columna litológica registrada durante la perforación.

La segunda metodología (método DTH) se aplicó a cuatro subáreas delimitadas dentro del área de estudio, seleccionadas en función de su mayor densidad de pozos. En cada una de estas áreas se llevó a cabo un análisis detallado de los lineamientos, y la productividad de los pozos se comparó con la orienta-

ción y con el modo en que se supone que se formaron las fracturas para identificar las posibles correlaciones. El proceso seguido para el análisis se describirá en una sección posterior.

Características del área de estudio

Clima, geomorfología y geología

El clima de la zona es tropical, con unas sesiones seca y húmeda bien definidas (Monteiro 1973). La temperatura media anual oscila entre 18-20 °C, con máximas de 37-38 °C y mínimas de 4-6 °C. La precipitación media anual es de 1200-1400 mm, más intensa en primavera y verano (900-1000 mm) y menor en otoño e invierno (200-300 mm).

El área está constituida por dos regiones geomorfológicas, el Altiplano Atlántico hacia el este y la Depresión Periférica hacia el oeste, separadas por una frontera en dirección NNE-SSW (Ponçano *et al.* 1981). Estas dos regiones coinciden en gran manera con el límite entre las rocas Precámbricas y la Cuenca del Paraná (Fig. 1). La parte oriental, en la que subyacen las rocas Precámbricas, tiene un relieve más acusado que la occidental, y consiste en colinas, cerros y pequeñas montañas con fuertes pendientes y con alturas de 700-960 m. En la parte occidental, en la Cuenca del Paraná, subyacen rocas Fanerozoicas y su relieve está constituido por colinas de pendientes más suaves y de altura menor, entre 600-700 m.

La geología regional del área de estudio se ilustra en la Fig. 1 (Fernandes 1997). Las rocas basales, de edad Precámbrica, corresponden a gneises que pertenecen a los dominios de la unidad acuífera Socorro-Guaxupe (Proterozoico Medio a Superior) y al Cinturón del Alto Río Grande (Proterozoico Arcaico e Inferior a Medio); los gneises fueron intruidos por los granitoides de Jaguariuna y Morungaba. Las rocas Fanerozoicas de la región occidental están constituidas principalmente por:

- Una sucesión Permo-Carbonífera influenciada glacialmente y conocida como el Grupo Itarare, que suprayace sobre las rocas Precámbricas y que incluye diamictitas, areniscas y ritmitas argilo-limosas.

- Filones y diques de diabasa del Cretácico Inferior, con espesores que oscilan entre decímetros y 200 m.

- Depósitos Cenozoicos, entre los cuales la Formación Río Claro es la más importante, con potencias de hasta 30-40 m. Esta formación está constituida por lutitas, argilitas y areniscas que se suponen depositadas en un ambiente fluvial meandriforme.

Tectónica

A lo largo de la costa occidental de Brasil, la tectónica Cenozoica se asocia con la apertura del Sur del Océano Atlántico. En el estado de Sao Paulo la actividad tectónica dio lugar a la formación de cuencas elongadas que estuvieron luego sujetas a períodos de deformación. Durante ese tiempo se generaron o reactivaron un gran número de estructuras frágiles. Por este motivo los campos más recientes de tensiones sean los que probablemente controlen las aperturas de fractura actuales y, en consecuencia, la circulación del agua subterránea en el medio fracturado.

Las estructuras más antiguas de la zona corresponden a la foliación de gneises y a zonas de cizalla de edad Precámbrica, fallas y fracturas de edad superior a la diabasa Cretácica y fallas sindiabásicas (Fernandes 1997). Las rocas Precámbricas presentan tanto bandeado como foliación metamórfica en dirección NNE-NE y con un buzamiento de 60-80° hacia el NW. Son comunes las zonas de cizalla dúctiles con milonitas, las cuales se orientan generalmente subparalelas a la foliación de los gneises (Fig. 1). En el área de estudio, los eventos de deformación frágil más importantes parecen ser posteriores al magmatismo del Cretácico Inferior, porque los filones y diques de diabasa asociados han sido claramente afectados por estos eventos.

Existen dos mecanismos o modos de propagación, cizallamiento y extensión que, mediante deformación frágil, pueden generar fracturas. Frecuentemente las fracturas de cizalla presentan un par conjugado, mientras que las fracturas de extensión bisectan el ángulo agudo de este par conjugado. Las fracturas de extensión se orientan paralelas a la dirección de máxima compresión (σ_1) y perpendicular a la de mínima tensión (σ_3). La Fig. 2A muestra el campo de tensiones y la posición general en el espacio de las fracturas de cizalla que se generan por un régimen tectónico de desgarre. Ambas fracturas, de extensión y cizalla presentan planos de fuerte buzamiento.

En el campo se pueden reconocer los mecanismos de generación mediante el análisis de los elementos característicos de las superficies de las fracturas. Las fracturas de cizalla presentan espejos de falla, mientras que en las de extensión se observan marcas de plumosidad (Hodgson 1961). Como resultado del modo de propagación, la apertura de las fracturas de extensión tiende a ser mayor que la de las de cizalla, dando lugar a un flujo de agua subterránea más importante, como se discutirá posteriormente.

En el área de estudio la deformación frágil postdiabásica estuvo formada por cinco eventos tectónicos de desgarre denominados, de más antiguo a más

moderno, E1-NE, E2-EW, E3-NW, E4-NS y E5-NNE (Fernandes 1997). En esta notación la dirección que acompaña al número corresponde a la dirección de σ_1 (por ejemplo, en E1-NE la dirección de σ_1 es NE-SW); la dirección de σ_3 es perpendicular y ambas son subhorizontales (Fig. 2B).

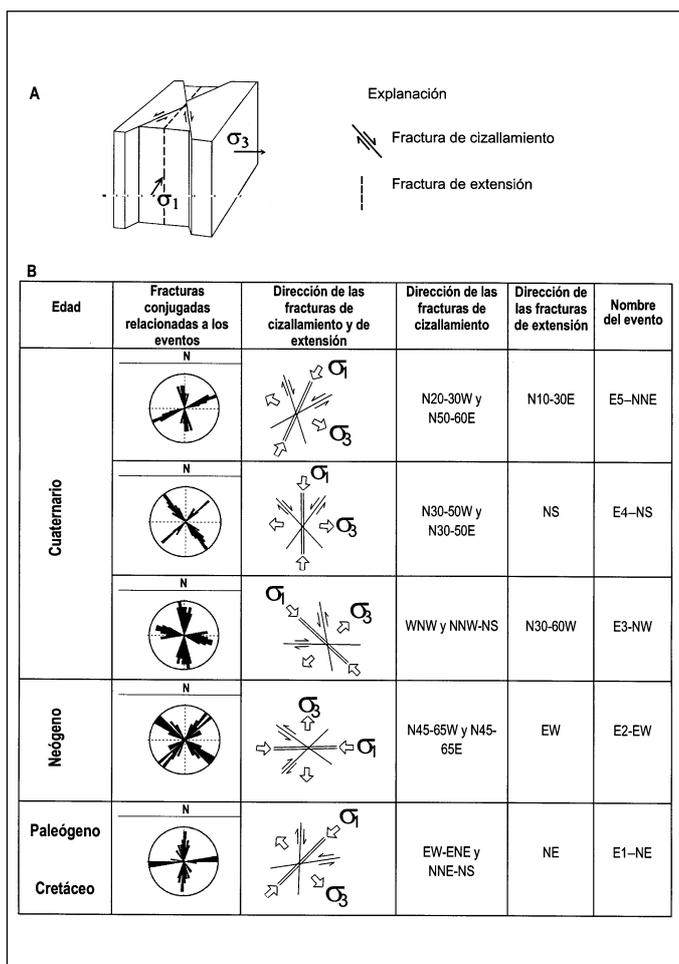


Fig. 2A. Orientación de tensiones y tipos de fracturas que se pueden generar en un régimen tectónico transcurrente. B) Diagrama simplificado de estructuras relacionadas con los eventos tectónicos post-diabasa; para cada evento Cenozoico se muestra: (1) el período de generación más probable; (2) la rosa de los vientos del par de fracturas conjugadas observado en el campo; (3) la orientación de las tensiones de extensión y cizalla (el norte apunta hacia el exterior de la página); (4,5) dirección de las fracturas de cizalla y extensión (perpendicular a σ_3); (6) nombre del evento

Fig. 2A. Stress orientation and corresponding types of fractures that can be generated by the strike-slip (transcurrent) tectonic regime. B Simplified sketch of structures related to post-dyabase tectonic events. For each Cenozoic event: (1) most likely time period of generation; (2) rose diagrams of conjugate fracture patterns observed in the field; (3) orientation of shear and extension fractures (north is pointing toward top of figure); (4,5) direction of shear and extension (perpendicular to σ_3) fracture patterns; (6) event name

Los cinco eventos Cenozoicos generaron fracturas que afectaron tanto las rocas Precámbricas como las Fanerozoicas (Grupo Itarare, diabasas y sedimentos Cenozoicos). Una excepción es el evento más antiguo, E1-NE, que no afectó a la Formación Río Claro. Las estructuras asociadas tienden a tener fuertes buzamientos, generalmente superiores a 70°. Fallas normales o inversas aparecen con poca frecuencia. El evento E1-NE generó fallas de desgarre sinistral en dirección EW- y dextrales en dirección NNE-. El evento E2-EW fue contemporáneo con la sedimentación de la Formación Río Claro y generó fallas de desgarre dextrales N45/65E-, sinistral N45/65W- y normales EW-. Los tres eventos más jóvenes son de edad cuaternaria. De entre ellos el más intenso fue el E3-NW, que produjo un gran número de fallas de desgarre, fundamentalmente dextrales EW- y sinistral NS/NNW-. Existe evidencia de que este período tectónico fue contemporáneo con la sedimentación de los depósitos cuaternarios. El evento E4-NS provocó fallas de desgarre dextrales N30/50W- y sinistral N30/50E, y el evento más moderno, E5-NNE, dextrales NNW- y sinistral N50/65E.

Los revestimientos de algunos pozos perforados en las rocas Fanerozoicas de la Cuenca del Paraná, 200 km al oeste de la zona de estudio, parecen haberse deformado con el tiempo posiblemente como consecuencia del campo actual de tensiones tectónicas. La sección transversal de los tubos de revestimiento tiene forma de elipse, cuyos ejes sugieren que el campo de tensiones actual es similar al producido por el evento E5-NNE (Lima *et al.* 1997).

La Fig. 2B resume las orientaciones de las fracturas de extensión y cizalla predominantes en la zona. Una de las hipótesis principales del presente trabajo es que la apertura efectiva de las fracturas de extensión es generalmente mayor que la de las de cizalla, por lo que consecuentemente son más transmisivas. Un uso práctico de este concepto, en cuanto a exploración hidrogeológica, requiere desarrollar un método que permita reconocer y localizar sobre un mapa estas fracturas. Este método se presentará más adelante.

Relaciones entre las características del substrato rocoso y la productividad de los pozos

El parámetro hidráulico que se utiliza en este trabajo como indicador de la productividad de un pozo es la capacidad específica (relación entre caudal y descenso en el pozo = Q/s). En general los valores de Q/s registrados (en 434 pozos) son muy bajos, con valores que oscilan entre 0.001-16 m³/h/m, con una

mediana de 0.12 m³/h/m. Los pozos incluidos en este estudio se perforaron tanto en rocas cristalinas (gneis, granito, diabasa) como sedimentarias.

Los registros estratigráficos indican que, en muchos casos, los pozos se perforaron en materiales de textura fina. Las profundidades de los pozos oscilan entre 40-360 m y la mayoría está entre 80-160 m. La Fig. 3 muestra la localización de los pozos usados en este estudio junto con sus valores de Q/s clasificados en cuatro grupos según el rango de valores.

Como se mencionó antes, los datos de productividad se han analizado tradicionalmente en relación a la proximidad de los lineamientos, la litología y las características topográficas con el objetivo de determinar la influencia de estos factores en la capacidad de producción de los pozos. En el presente trabajo estos factores se han evaluado junto con la dirección de lineamiento para todo el área en conjunto. Además, se realiza una comparación entre los pozos

que interceptan sólo el basamento rocoso y los que aprovechan también el recubrimiento (saprolita, sedimentos Cenozoicos de pequeño espesor y suelo). A modo de ilustración, se presenta un subconjunto de la base de datos en las fig. 4 a 8 en forma de gráficos de frecuencia acumulada de capacidad específica en función de diversos factores.

En la Fig. 4A se comparan los pozos que están claramente asociados a un lineamiento con aquellos que no lo están. Los lineamientos consisten generalmente en trazas delgadas asociadas a elementos topográficos. En los casos en los que un pozo está cerca de dos o más lineamientos, estos suelen ser no-paralelos e incluso se intersectan en algunos casos. El diagrama ilustra que, con una única excepción, los pozos con Q/s > 0.5 m³/h/m son todos próximos a, o directamente están sobre, un lineamiento. Además, los pozos próximos a más de un lineamiento suelen presentar valores de Q/s por encima de la mediana (Fig. 4B); sin embargo, el rango de capacidades específicas es el mismo que para los pozos asociados a un único lineamiento. Se midió también la longitud de los lineamientos y no se encontró una correlación clara entre este parámetro y los valores de Q/s.

Respecto a la dirección de lineamientos se pueden discernir algunas débiles tendencias (Fig. 5). Los valores de capacidad específica más altos tienden a estar asociados con lineamientos en el rango de azimutes de 120-160° (cuadrante NW), 10-40° (cuadrante NE) y, en menor medida, 90-100° (aproximadamente WNW). Sin embargo, algunos valores de Q/s muy bajos también se pueden asociar con las mismas orientaciones. Estas relaciones sugieren que estos conjuntos de lineamientos pueden incluir tanto fracturas abiertas como cerradas, cuya naturaleza depende probablemente de la historia tectónica local, tal como se discute en la sección posterior.

Para relacionar la productividad de los pozos con la litología del substrato rocoso se dividieron los pozos en cuatro categorías: gneis y granito, roca sedimentaria, diabasa y mezcla de las tres litologías. Las categorías se subdividieron después en pozos asociados y no asociados a un lineamiento (Fig. 6). En el caso de los pozos que no son cercanos a lineamientos las rocas sedimentarias exhiben el mayor valor mediano de Q/s (Fig. 6A). Para los pozos asociados a lineamientos, sin embargo, esta tendencia sólo es válida para el intervalo menor de valores de Q/s (<0.1 m³/h/m; Fig. 6B). Los pozos perforados en diabasa presentan los valores más altos y más bajos de capacidad específica cuando se sitúan próximos a lineamientos (Fig. 6B). Esta relación puede ser el resultado de dos características físicas de las diabasas: primero, su textura masiva que, en comparación con los gnei-

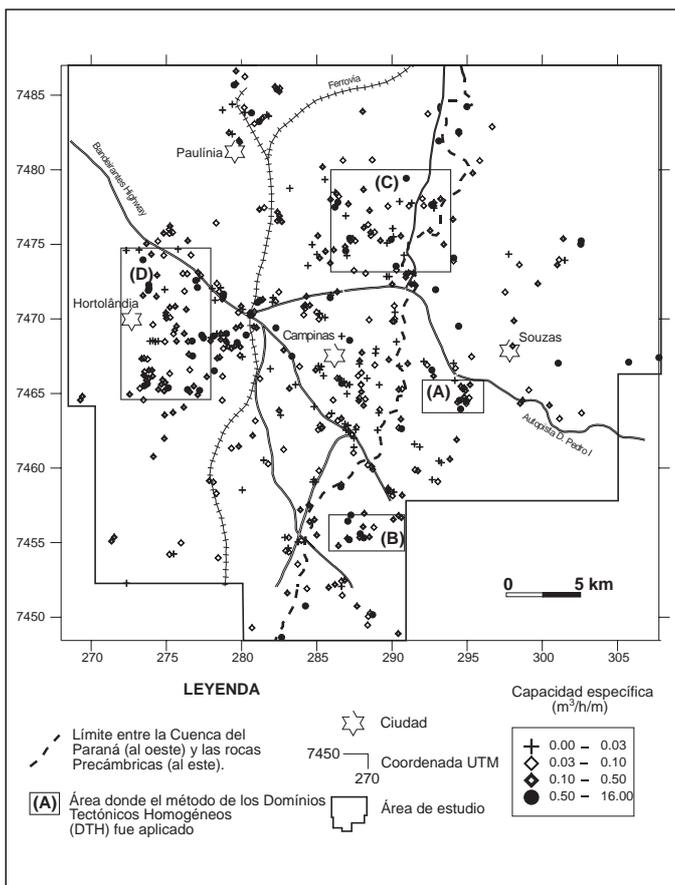


Fig 3. Localización de los pozos usados en el análisis dentro del área de estudio, clasificados según los valores de capacidades específicas (Q/s)

Fig 3. Location of wells in study area used in analysis, classified according to specific-capacity (Q/s) ranges

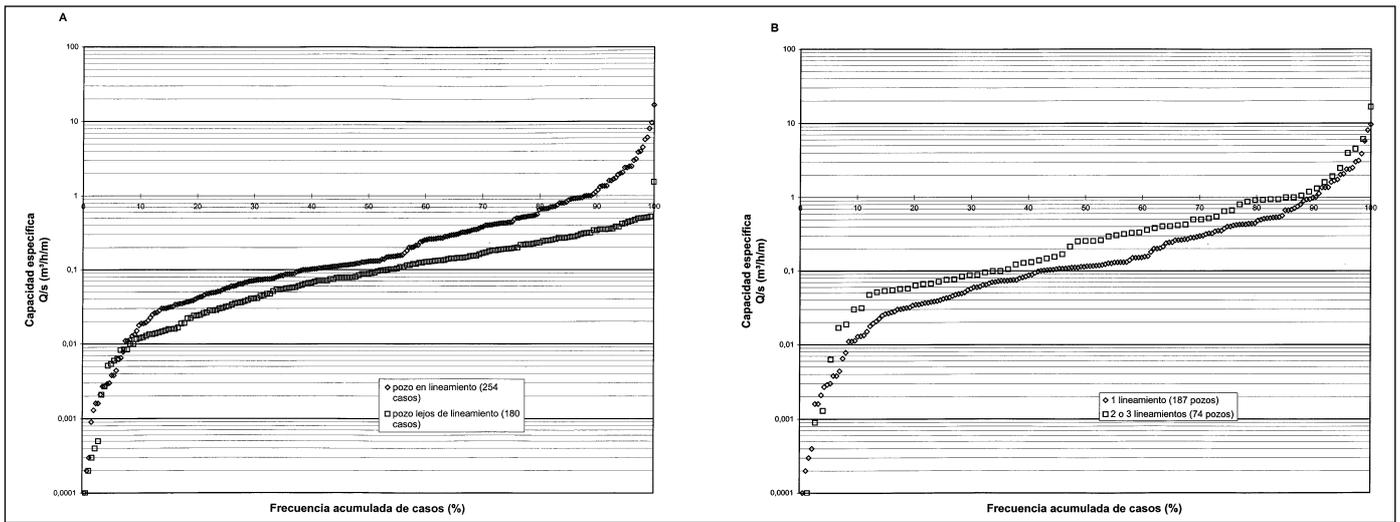


Fig. 4A. Distribuciones acumuladas de las capacidades específicas para los pozos localizados cerca o lejos de los lineamientos. B) Distribuciones acumuladas de capacidades específicas para los pozos localizados cerca de uno o de más de un lineamiento

Fig. 4A. Cumulative distributions of specific capacities for wells located close to or far from lineaments. B) Cumulative distributions of specific capacities for wells close to one or more than one lineament

ses, por ejemplo, tiene una permeabilidad primaria menor, y segundo, que las fracturas generadas en diabasas tienden a ser suaves, continuas y planas (Fernandes 1997), lo que resulta en un aumento de la permeabilidad secundaria en comparación con las fracturas localizadas en otros tipos de rocas.

La Fig. 6C muestra la relación entre las capacidades específicas y los espesores perforados de areniscas. De nuevo los pozos se subdividieron atendiendo a su proximidad a los lineamientos. No se aprecia una correlación clara entre el espesor de la capa de arenisca y la capacidad específica de un pozo, lo que puede ser debido a la heterogeneidad de los sedimentos. Sin embargo, los cinco pozos con valores de $Q/s > 0.7 \text{ m}^3/\text{h/m}$ se sitúan sobre lineamientos.

La productividad de los pozos se comparó también con las características topográficas (Fig. 7). En general los pozos situados en las zonas de valle tienden a ser los más productivos, lo que puede ser debido a dos causas: primero, los valles tienden a estar asociados con fracturas de carácter regional y consecuentemente con lineamientos, y segundo, en la zona de valles el nivel freático suele estar más próximo a la superficie, posibilitando un mayor descenso potencial con respecto a los pozos situados en zonas de mayor pendiente.

La capacidad productiva de los pozos que extraen agua también de los materiales de recubrimiento se compara con aquellos que perforan sólo el substrato rocoso (ver Fig. 8). De nuevo la presencia de un li-

neamiento en la proximidad de un pozo parece tener mayor importancia en la capacidad de un pozo que la presencia de esta capa de recubrimiento, principalmente en los pozos con $Q/s > 0.5 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

En resumen, los pozos más productivos de la región ($Q/s > 0.5 \text{ m}^3/\text{h/m}$) tienden a estar situados próximos a lineamientos. Esta proximidad es probablemente el factor más importante que controla la pro-

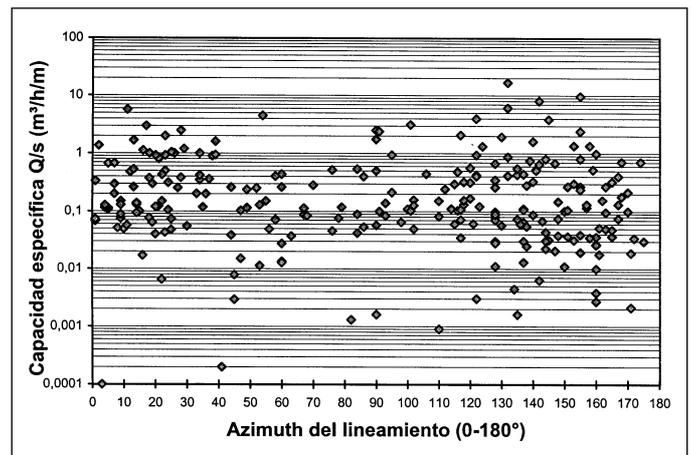


Fig 5. Relación entre las direcciones de los lineamientos y las capacidades específicas de los pozos

Fig 5. Relation between lineament directions and specific capacities of wells

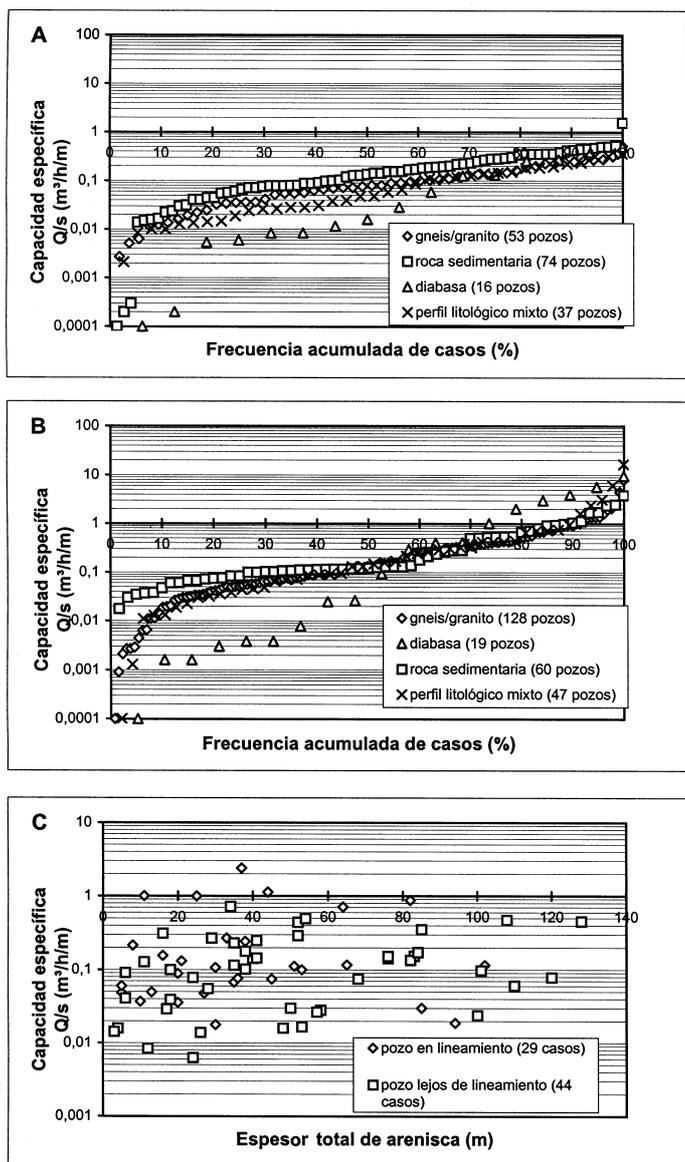


Fig 6. Distribuciones acumuladas de las capacidades específicas mostrando la influencia de la litología en la productividad de los pozos. A) Pozos localizados lejos de los lineamientos. B) Pozos localizados cerca de los lineamientos; C) Pozos que interceptan únicamente rocas sedimentarias del Grupo Itarare

Fig 6. Cumulative distributions showing influence of lithology on production capacity of wells. A Wells located far from lineaments; B wells located close to lineaments; C wells tapping only sedimentary rocks of the Itarare Group

ductividad de un pozo. Así, las zonas más transmisivas están controladas por estructuras que se manifiestan en la superficie del terreno en forma de lineamientos. Estas conclusiones están de acuerdo con las realizadas por otros investigadores anteriormente

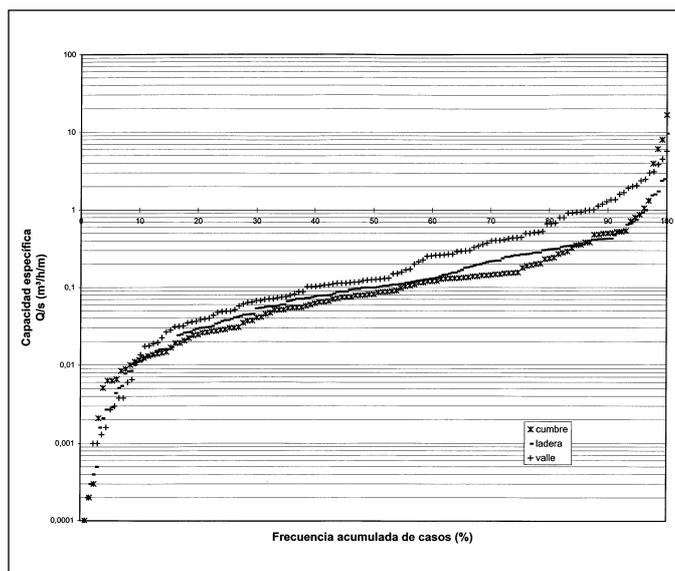


Fig 7. Distribuciones acumuladas de las capacidades específicas en función de las características topográficas

Fig 7. Cumulative distributions of well specific capacity relative to topographic setting

(Knopman y Hollyday 1993; Banks *et al.* 1994; Chilton y Foster 1995; Henriksen 1996; Yin y Brook 1996).

Sin embargo, muchos pozos localizados en el entorno de lineamientos presentan valores de Q/s bajos. Esto puede ser debido bien a que los pozos no intercepten la estructura subsuperficial representada en superficie por el lineamiento, bien porque algunos lineamientos están asociados con zonas de fractura compactas. La relación entre las características de la zona de fractura y el caudal de extracción de los pozos se estudia en detalle en la sección siguiente.

El método de los Dominios Tectónicos Homogéneos y su aplicación

Como se ha mencionado anteriormente, la actividad tectónica que provoca deformación frágil da lugar a (1) fracturas de cizallamiento que se mantienen bajo compresión y que no son muy transmisivas, y (2) estructuras de extensión, más permeables, que tienden a estar asociadas con aperturas de fractura mayores. El reconocimiento de la existencia de estas últimas tendrá un gran valor para la puesta en explotación de los recursos de agua subterránea. Con el propósito de poder realizar un mapeado de estas estructuras se desarrolló una técnica analítica a la que nos referiremos como el método de los Dominios

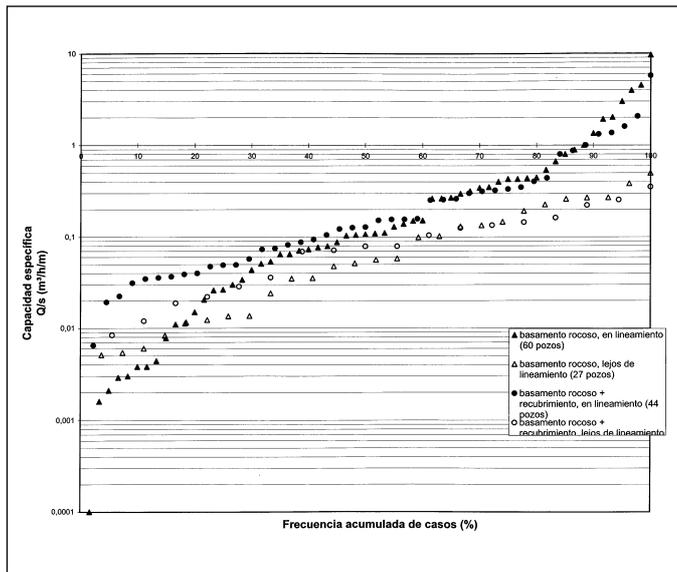


Fig 8. Distribuciones acumuladas de las capacidades específicas en función de que se explote el macizo rocoso únicamente o también el recubrimiento

Fig 8. Cumulative distributions of well specific capacities relative to exploration of overburden

Tectónicos Homogéneos (DTH). Este método supone el análisis multifaceta de los lineamientos a escalas 1:25.000 y 1:60.000. El método incorpora: (1) el conocimiento geológico de la evolución de la tectónica Cenozoica; (2) el entendimiento de los mecanismos que generaron las distintas estructuras relacionadas con cada evento tectónico; y (3) el carácter singular frágil y discontinuo de la deformación Cenozoica.

Los eventos Cenozoicos generaron fundamentalmente fallas de desgarre (Fig. 2A). Estas estructuras se caracterizan por planos de falla cuasi-verticales o por zonas de falla donde los movimientos han sido predominantemente en dirección horizontal (Ramsay y Huber 1987; Price y Cosgrove 1990). Las fracturas generadas por extensión también tienden a ser cuasi verticales y, por tanto, los elementos estructurales se manifiestan en el terreno en forma de trazas rectilíneas. Esta condición permite una identificación adecuada de la mayoría de las estructuras Cenozoicas mediante el análisis de lineamientos.

La región de estudio se caracteriza por lineamientos bien definidos y en general subparalelos a las estructuras generadas o reactivadas por la tectónica Cenozoica. Un mapa de lineamientos se muestra en la Fig. 9. En algunas áreas las pautas que siguen los lineamientos son muy similares a las direcciones de las estructuras principales generadas por alguno de

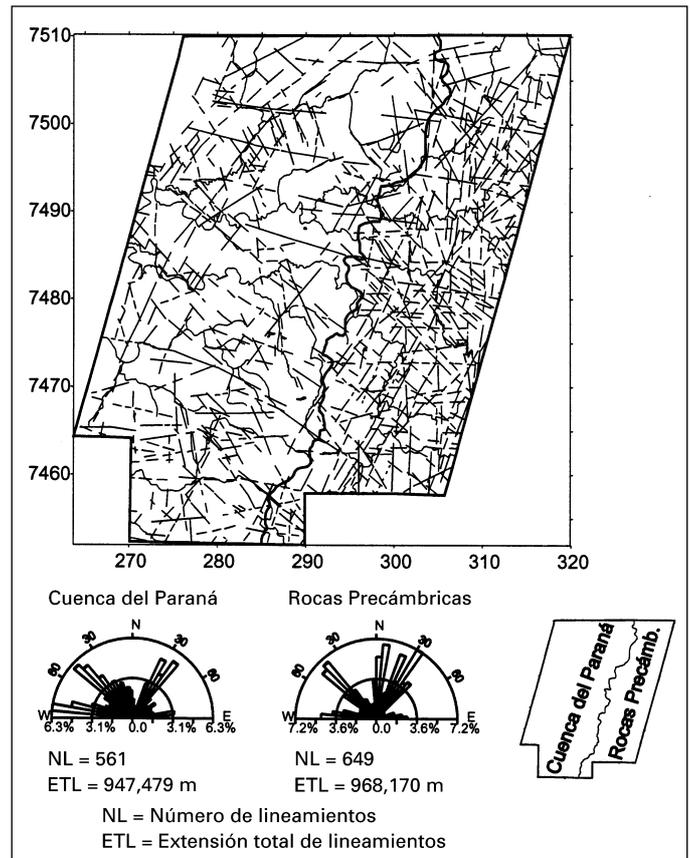


Fig 9. Distribución y orientación de los lineamientos, mostrando las tendencias estructurales más importantes. Los ejes en coordenadas UTM

Fig 9. Distribution and orientations of lineaments, showing main structural trends. Map axes in UTM

los cinco eventos Cenozoicos. En estos casos se asume que este evento específico tuvo una intensidad mucho mayor en esa área que los otros eventos tectónicos. Este tipo de áreas se denotan como dominios tectónicos homogéneos (DTH). Por consiguiente, entendiendo la orientación del campo de tensiones que generaron las estructuras en dichas áreas es posible evaluar qué lineamientos involucran fundamentalmente fracturas de cizalla o conjugadas y cuáles están asociados con fracturas de extensión.

Como ejemplo demostrativo se describe la aplicación del método DTH a cuatro áreas de la zona de estudio. Dos áreas se localizan principalmente en el Precámbrico (áreas A y B) y otras dos en la Cuenca del Paraná (áreas C y D) (ver Fig. 3). Las áreas se seleccionaron en zonas de gran densidad de pozos. Estos pozos entonces se correlacionaron con las

características de los lineamientos a través de un proceso que consistió en cuatro pasos:

1. Cada área se visualizó primero mediante fotos aéreas para estudiar las pautas que mostraban los lineamientos. Dependiendo de las orientaciones de las estructuras dominantes se reestablecieron los límites de las áreas para asegurar que en cada una de las áreas los lineamientos mostraran una pauta de direcciones homogénea y, consecuentemente, fueran representativos de una estructura tectónica homogénea.

2. Se realizó un trazado detallado de los lineamientos cartografiados a partir de fotos aéreas a escalas 1:25.000 y 1:60.000, que posteriormente se transfirieron a mapas topográficos a escala 1:50.000.

3. Se generaron diagramas de rosa de los vientos de los lineamientos para cada subárea mediante una subrutina de AUTOCAD. Se comparó entonces las direcciones principales registradas de los lineamientos con las direcciones de fractura provocadas por los diferentes eventos Cenozoicos, con el objetivo de determinar cuál de estos eventos había sido el más dominante en la zona. Una vez establecido el evento dominante se determinó la orientación más probable de las fracturas de cizalla y extensión.

4. Como último paso se determinaron las orientaciones de los lineamientos asociados a cada pozo sobre fotos aéreas a escala 1:25.000 y estas se compararon con la orientación de los lineamientos procedentes de las rosas de los vientos. De este modo se pudo inferir si un pozo concreto intersectaba zonas de cizalla o de extensión.

Los resultados obtenidos para cada área se describen a continuación

Áreas A y B (Precámbricas)

Estas dos áreas comprenden rocas graníticas de la unidad del Acuífero de Socorro-Guaxupe, que presenta foliación en dirección NNE con buzamientos de 70° hacia el NW. El área se localiza en una zona de transición entre la Depresión Periférica al oeste y el Altiplano Atlántico al este. La superficie topográfica se caracteriza por colinas y cerros con pendientes de suaves a medias y altitudes entre 650-800 m. Los detalles topográficos y estructurales de las áreas A y B se muestran en las fig. 10 y 11. Estas figuras constan de tres partes: (1) un mapa topográfico que marca los lineamientos y la localización de los pozos; (2) una rosa de los vientos mostrando las direcciones principales de los lineamientos; y (3) la orientación de las fracturas de cizalla y extensión asociadas con el evento Cenozoico que se supone dominante en el área.

Las direcciones principales de los lineamientos que muestran las rosas de los vientos en las zonas A y B corresponden a las EW-WNW, NNE, NS-NNW y NW (fig. 10B y 11B). La dirección NNE es paralela a la foliación Precámbrica de gneises y milonitas. Por tanto, el lineamiento NNE posiblemente corresponde a una deformación más antigua y de tipo dúctil. Por ello, se puede excluir del estudio de las deformaciones frágiles. La otra dirección estructural dominante corresponde a la generada por el evento E3-NW (fig. 2, 10C y 11C), donde los lineamientos EW y NS representarían fallas o fracturas de cizalla y los NW corres-

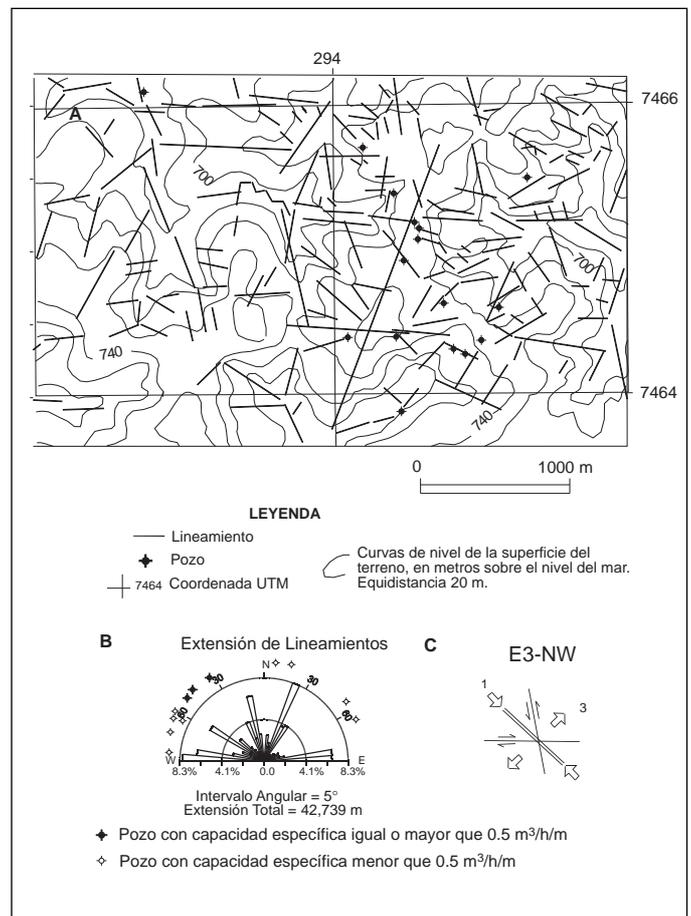


Fig 10. Área A. A) Mapa topográfico marcando los lineamientos, trazados sobre fotos aéreas a escalas 1:25.000 y 1:60.000, y la localización de los pozos. B) Rosa de los vientos de longitudes de lineamientos mostrando la variación de la capacidad específica de los pozos en función de la orientación de los lineamientos. C) Orientación esquemática de las fracturas de cizalla y extensión generadas por el evento E3-NW

Fig 10. Area A. A) Topographic map depicting lineaments, traced on 1:25000 and 1:60000 air photos, and location of wells. B) Lineament-length rose diagram showing variation of well specific capacity with lineament orientation. C) Schematic orientation of shear and extension fractures generated by event E3-NW

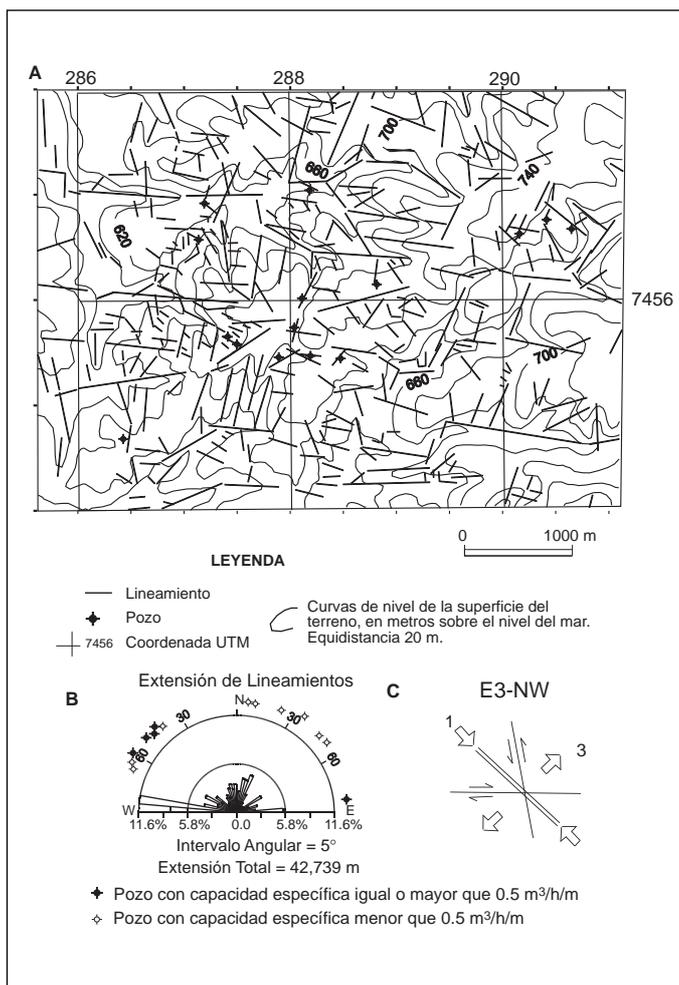


Fig 11. Área B. A) Mapa topográfico marcando los lineamientos, trazados sobre fotos aéreas a escalas 1:25.000 y 1:60.000, y la localización de los pozos. B) Rosa de los vientos de longitudes de lineamientos mostrando la variación de la capacidad específica de los pozos en función de la orientación de los lineamientos. C) Orientación esquemática de las fracturas de cizalla y extensión generadas por el evento E3-NW

Fig 11. Area B. A) Topographic map depicting lineaments, traced on 1:25000 and 1:60000 air photos, and location of wells. B) Lineament-length rose diagram showing variation of well specific capacity with lineament orientation. C) Schematic orientation of shear and extension fractures generated by event E3-NW

ponderían a fracturas de extensión. En consecuencia, A y B se consideran dominios tectónicos homogéneos.

La mayoría de los pozos productivos ($Q/s > 0.5$ m³/h/m) se localizan próximos a lineamientos en dirección N30-60W, paralelos a las fracturas de extensión o a la dirección σ_1 del evento E3-NW. Esto sugiere que en estas áreas la futura explotación de las aguas subterráneas debería concentrarse en los pun-

tos en los que los lineamientos N30-60W estuvieran presentes. Aunque la mayoría de los pozos productivos se asocian a lineamientos en dirección N30-60W, al menos uno de los pozos en el área B tiene una capacidad específica de 0.51 m³/h/m y está localizado sobre un lineamiento EW. Esto indica que aunque el evento E3-NW parece el dominante en el área B, pueden aparecer fracturas aisladas asociadas a otros eventos.

Área C

El área C se encuentra localizada en las rocas sedimentarias de la Cuenca del Paraná, y muchos de los pozos están perforados en argilitas y areniscas del Grupo Itararé y en diabasas. Granitos y gneises, pertenecientes a la unidad acuífera de Socorro-Guaxupe, afloran hacia el este y sudoeste, presentando una foliación en dirección ENE, y presentando ocasionalmente direcciones WNW y EW. El relieve es menos pronunciado que en las áreas A y B, en consecuencia, los lineamientos tienden a ser menos prominentes y más espaciados.

El área se subdividió en dos subáreas, C1 y C2, que presentan una distribución de lineamientos muy distintas, tal y como se muestra en la Fig. 12. Mientras la subárea C2 presenta una densidad muy baja de lineamientos, en la subárea C1 aparecen dos tendencias muy marcadas, en direcciones NNW y ENE. Estas direcciones correlacionan bien con las direcciones estructurales dominantes del evento E5-NNE (Figs. 2 y 12C), por lo que la subárea C1 se puede considerar un DTH. En C1 los pozos más productivos se localizan próximos a lineamientos NNE, probablemente asociados a las fracturas de extensión E5-NNE. En general los pozos próximos a lineamientos son bastante más productivos (la capacidad específica mediana es de 0.32 m³/h/m) que los no asociados a lineamientos (valor mediano de 0.05 m³/h/m).

La mayoría de los pozos ubicados en C1 están perforados en argilitas y areniscas, suprayaciendo diabasa o gneis/granito. Diez de los pozos interceptan una combinación de diabasa y gneis o roca sedimentaria y gneis/granito, y cinco de ellos interceptan sólo diabasa. Los pozos ubicados en C2 se perforaron principalmente en granito y gneis, la mitad de ellos con arenisca suprayacente. Los pozos más productivos están asociados a una combinación de proximidad a una fractura de extensión y la presencia de perfiles litológicos conteniendo arenisca.

La subárea C2 no presenta un esquema superficial de lineamientos bien definido; sin embargo, los pozos más productivos están asociados a lineamien-

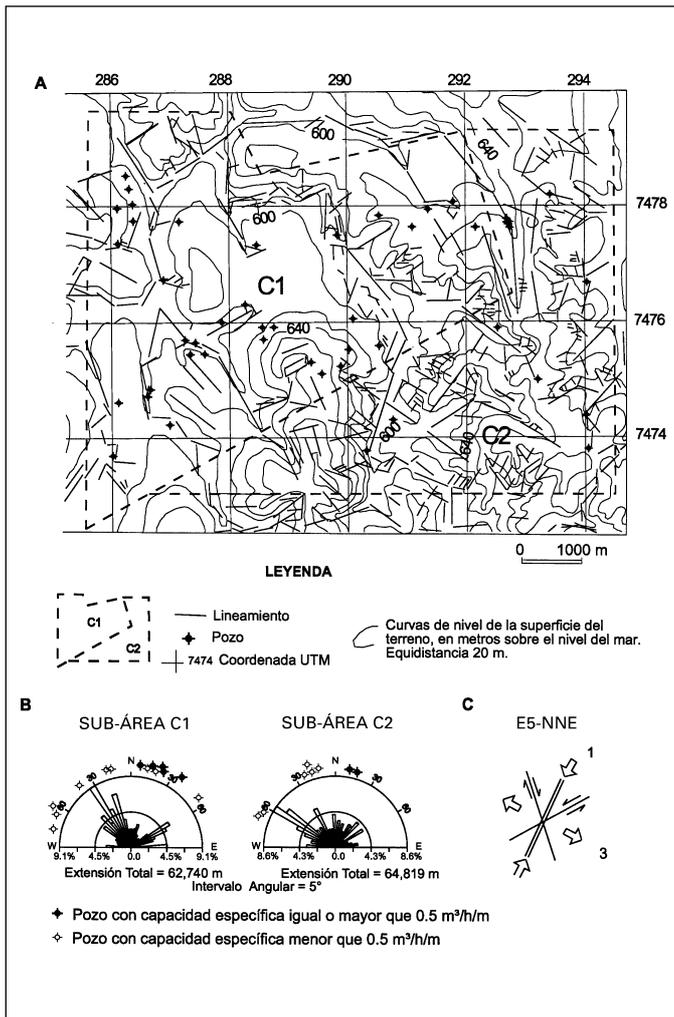


Fig 12. Área C. A) Mapa topográfico marcando los lineamientos, trazados sobre fotos aéreas a escalas 1:25000 y 1:60000, y la localización de los pozos. El área se dividió en dos subáreas, C1 y C2, que presentaban una pauta de direcciones de lineamientos muy distinta. B) Rosa de los vientos de longitudes de lineamientos mostrando la variación de la capacidad específica de los pozos en función de la orientación de los lineamientos. C) Orientación esquemática de las fracturas de cizalla y extensión generadas por el evento E5-NNE

Fig 12. Area C. A) Topographic map depicting lineaments, traced on 1:25000 and 1:60000 air photos, and location of wells. The area was divided into two sub-areas C1 and C2. B) Lineament-length rose diagram showing variation of well specific capacity with lineament orientation. C) Schematic orientation of shear and extension fractures generated by event E5-NNE

tos NNE. Probablemente en esta región el evento E5-NNE reactivó mediante extensión fracturas más antiguas de dirección NNE, en lugar de generar un número significativo de nuevas fracturas en las rocas Precámbricas altamente fracturadas.

Área D

El área D se localiza en la Depresión Periférica de la Cuenca del Paraná (Fig. 3) y está ubicada en un terreno notablemente más llano que el correspondiente a las otras zonas de estudio. Los pozos perforan tanto rocas sedimentarias (argilitas, areniscas muy finas y areniscas medias a gruesas) como intrusiones de diabasa. Todas estas rocas se encuentran parcialmente recubiertas por sedimentos Cenozoicos de la Formación Río Claro, que en algunos lugares presenta espesores de hasta 30 m. La mayoría de los pozos están en rocas sedimentarias, y de los 14 que presentan valores de Q/s superiores a 0.5 m³/h/m, 12 están sobre lineamientos.

Los detalles estructurales y topográficos del área D, junto con las rosas de los vientos, se presentan en la fig. 13. En general las tendencias direccionales están poco marcadas, por lo que es difícil correlacionarlas con ningún evento Cenozoico, como sí era posible en las áreas anteriores. Además, en contraste con las áreas previamente descritas, los pozos más productivos no están asociados claramente con una única dirección de lineamientos. La orientación de los lineamientos asociados a pozos de gran capacidad sugiere que los eventos E3-NW y E5-NNE fueron activos en el área, abriendo fracturas de direcciones NW- y NNE-, respectivamente. El área E es la mayor de todas y puede contener dominios tectónicos homogéneos de menor extensión donde los eventos E3-NW y E5-NNE sean predominantes. Estas áreas más pequeñas serían difíciles de identificar mediante simple análisis de lineamientos, fundamentalmente debido a que el relieve es muy llano, lo que no permite que los lineamientos se hagan evidentes mediante erosión.

Discusión

En la zona de estudio los pozos que presentan valores de capacidad específica más altos (>0.5 m³/h/m) están situados, con una única excepción, cerca o sobre lineamientos observables en fotos aéreas. Otros factores que potencialmente podrían controlar la productividad de un pozo perforado en roca, como las características topográficas, la litología y las características del recubrimiento tienen una importancia menor. Así, los lineamientos cartografiables a partir de fotos aéreas representan probablemente fracturas que se extienden a la subsuperficie. En estas fracturas la circulación de agua subterránea se incrementa con respecto a la circulación en la roca maciza.

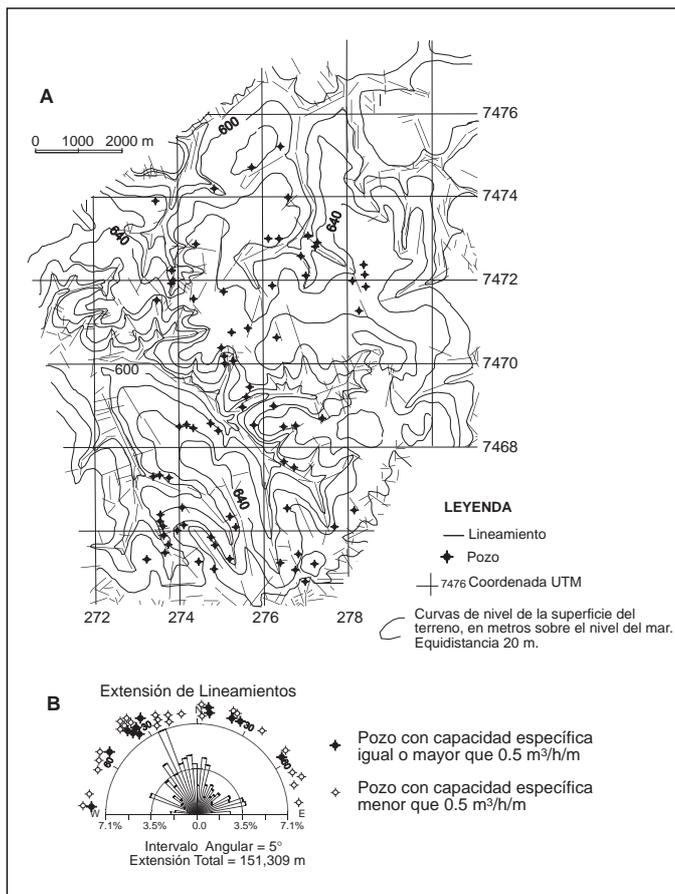


Fig 13. Área D. A) Mapa topográfico marcando los lineamientos, trazados sobre fotos aéreas a escalas 1:25.000 y 1:60.000, y la localización de los pozos. B) Rosa de los vientos de longitudes de lineamientos mostrando la variación de la capacidad específica de los pozos en función de la orientación de los lineamientos

Fig 13. Area D. A) Topographic map depicting lineaments, traced on 1:25000 and 1:60000 air photos, and location of wells. B) Lineament-length rose diagram showing variation of well specific capacity with lineament orientation

Por otra parte, un gran porcentaje de los pozos asociados con lineamientos (40%) presentan valores de Q/s muy bajos (<0.1 m³/h/m). Esto se debe principalmente a que muchos de los lineamientos caracterizables representan fracturas con aperturas efectivas pequeñas y valores de densidad de fracturación bajos. El método DTH, desarrollado como parte de este estudio, considera la apertura de fractura como el factor más importante que controla la conductividad hidráulica de la roca. Como resultado del modo de propagación las fracturas generadas por un mecanismo de extensión tienden a tener aperturas mayores que las creadas por un mecanismo de cizallamiento. Por medio del análisis de lineamientos y

conocimiento de la evolución tectónica del área de estudio, se puede estimar la dirección de las fracturas de extensión y así localizarlas entre todo el conjunto de lineamientos.

Como parte del análisis detallado de las áreas A, B y C, existen unas fuertes correlaciones entre la productividad de los pozos y su proximidad a lineamientos paralelos a la dirección de las fracturas de extensión asociadas a los eventos tectónicos predominantes en un área específica. Cuando los relieves son menos pronunciados, como en el área D, el método DTH es menos efectivo. Una posible explicación es que en pequeñas áreas con relieves muy suaves y si el análisis de lineamientos se lleva a cabo a escalas grandes (1:25.000 o 1:60.000 en este caso), las fracturas cartografiables se encuentran muy espaciadas entre sí, y una clara pauta de lineamientos suele ser difícil de reconocer.

El método DTH también indica que las direcciones de lineamientos N30-60W y NNE representan los elementos más conductivos, si se considera la productividad de los pozos asociados a ellos. Esto es probablemente debido a dos causas: (1) que el evento E3-NW fue el más intenso en el área de estudio y probablemente produjo o reactivó un gran número de estructuras, incluyendo fracturas de extensión en dirección N30-60W; y (2) que el evento E5-NNE, que produjo fracturas de extensión en dirección NNE, es el más moderno y es por tanto el que controla la apertura actual de algunas fracturas generadas en eventos anteriores.

Conclusiones

El análisis de lineamientos se ha aplicado en el pasado para estudiar la relación entre la presencia de fracturas y el flujo de agua subterránea a través de un medio rocoso. La inclusión del conocimiento detallado de la historia tectónica de una zona determinada, particularmente la historia más reciente, junto con un trazado cuidadoso de los lineamientos a partir de fotografías aéreas (método DTH), el proceso permite dar información predictiva sobre la posible explotación de los recursos de agua subterránea.

En el presente trabajo se considera detalladamente la influencia de los eventos tectónicos frágiles más recientes sobre la generación de zonas de fractura más transmisivas. Se concluye que en el área de estudio, el campo de tensiones relacionado con estos eventos tectónicos recientes, de edad Cenozoica o Cuaternaria, tiene un gran control sobre la apertura o el cierre de los sistemas de fracturas, antiguos y recientes. Así, los eventos recientes tienden a contro-

lar la apertura actual de las fracturas generadas en el Cenozoico o en períodos anteriores.

Tanto para las fracturas antiguas como para las más recientes, las aperturas dependen principalmente de la orientación de la superficie de la fractura en relación a las tensiones principales de un evento tectónico dado, ya que esta orientación controla el modo de propagación de la fractura (cizallamiento o extensión). Los trabajos previos, hechos en otras regiones, han considerado la actividad tectónica de tiempos geológicos más antiguos, la cual podría tener una influencia mucho menor en el tamaño de la apertura de fracturas que eventos tensionales más recientes.

El proceso de trazado de los lineamientos en la zona de estudio reveló que en muchos casos áreas adyacentes muestran pautas de direcciones de lineamientos muy distintas. Esto ilustra que la distribución de la deformación frágil en el área es muy heterogénea. En zonas más pequeñas sí fue posible correlacionar la pauta local de los lineamientos con uno o más de los eventos tectónicos Cenozoicos que se suponen predominantes en la zona. En los casos en que se ha podido establecer esta correlación, la mayoría de los pozos más productivos están asociados a lineamientos paralelos a las fracturas de extensión de los eventos tectónicos predominantes.

El método DTH es más útil cuando se aplica a áreas pequeñas que para estudios de carácter regional. Esto se debe a que los lineamientos que suelen ser fácilmente reconocibles a escala local no son tan evidentes al incrementar la escala de estudio y, además, aparece una mayor variabilidad en la población de lineamientos. También debe destacarse que el método DTH es más efectivo en zonas con relieves pronunciados, que facilitan el reconocimiento de los lineamientos mediante fotos aéreas.

En las zonas donde el método DTH es aplicable, una ventaja sobre previos métodos de análisis de lineamientos es que una vez determinada la historia tectónica de un área determinada, es posible predecir qué elementos estructurales son los que estarán más probablemente asociados a los pozos más productivos. De este modo se facilita el análisis de dónde se debería localizar las nuevas perforaciones para obtener caudales de extracción mayores, incluso en zonas donde no existe información previa sobre perforaciones. El método se puede aplicar a otras zonas donde exista un conocimiento razonablemente bueno de la historia reciente de la tectónica frágil. A partir del análisis de lineamientos, por tanto, los hidrogeólogos pueden correlacionar las direcciones de lineamientos con los distintos tipos de estructuras frágiles que se hayan podido relacionar con campos de tensiones de extensión.

Referencias

- Banks, D., Rhor-Torp, E., Skarphagen, H. 1994 Groundwater resources in hard rock: experiences from the Hvaler study, Southeastern Norway. *Applied Hydrogeology* 2(2): 33-42.
- Briz-Kishore BH. 1993 Assessment of yield characteristics of granitic aquifers in South India. *Ground Water* 31(6): 921-928.
- Chilton, P.J., Foster SSD. 1995 Hydrogeological characterisation and water-supply potential of basement aquifers in tropical Africa. *Hydrogeology Journal* 3(1): 36-49.
- Fernandes, A.J. 1997 Cenozoic Tectonics in the Middle Portion of the Piracicaba River Basin and its Application to the Hydrogeology of Fractured Media. PhD, University of Sao Paulo, Brazil (en Portugués).
- Gustafsson, P. 1994 Spot satellite data for exploration of fractured aquifers in a semi-arid area in Southeastern Botswana. *Applied Hydrogeology* 2(2): 9-18.
- Hassuda, S., Oda, G., Iritani, M., Lopes, M., Bertolo, R., Hirata, R., Ferreira, L. 1993 Hydrogeology of the Municipality of Campinas. En: *Geologic studies for assisting the land-use planning of the Municipality of Campinas (SP)*. Geological Institute – SMASP, Technical Report, 2: 139-221 (en Portugués).
- Henriksen, H. 1996. Relation between topography and well yield in bore-holes in crystalline rocks, Sogn og Fjordane, Norway. *Ground Water* 33(4):635-643.
- Hodgson, R. 1961 Classification of structures on joint surfaces. *Am J Sci* 259: 493-502.
- Knopman, D.S., Hollyday, E.F. 1993 Variation in specific capacity in fractured rocks, Pennsylvania. *Ground Water* 31(1): 135-145.
- Larson, I. 1972 Ground water in granite rocks and tectonic models. *Nordic Hydrology* 3: 111-129.
- Lima C, Nascimento, E., Assumpção, M. 1997 Stress orientations in Brazilian sedimentary basins from breakout analysis – implications for force models in the South American Plate. *Geophys. J Int* 130(1): 112-124.
- Mabee, S.B., Hardcastle, C.H., Wise, D.U. 1994 A method of collecting and analyzing lineaments for regional scale fractured-bedrock aquifer studies. *Ground Water* 32(6): 884-894.
- Monteiro, C.A.F. 1973 The climatic dynamics and the precipitation in the State of Sao Paulo: geographic study in way of atlas. Geographic Institute, Universidad de Sao Paulo, Brasil (en Portugués).
- Oda, G., Bertolo, R., Ferreira, L., Yoshinaga, S., Lopes, M. 1995 Hydrogeology. In: *Geologic studies for assisting the land-use planning in the middle portion of the Piracicaba river basin*. Geological Institute – SMASP, Technical Report, 3: 290-272 (en Portugués).
- O'Leary, D.W., Friedman, J.D., Pohn, H.A. 1976 Lineaments, linear, lineation – some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, 87: 1463-1469.
- Ponçano, W.L., Carneiro, CDR., Bistrichi, C.A., Almeida, FFM., Prandini, FL. 1981 The geomorphologic map of State of Sao Paulo. Publication 1183, Monographic Series 5, 2 volumes (en Portugués).

- Price, NJ., Cosgrove, JW. 1990 Analysis of geological structures, 1st edn. Cambridge University Press, Cambridge
- Ramsay, JG., Huber, MI. 1987 The techniques of modern structural geology. Volume 2: Folds and fractures, 1st edn. Academic Press, London.
- Sami, K. 1996 Evaluation of the variations in borehole yield from a fractured Karoo Aquifer, South Africa. *Ground Water* 34(1): 114-120.
- Sander, P., Chesley, MM., Minor, TB. 1996 Groundwater assessment using remote sensing and GIS in a rural groundwater project in Ghana: lessons learned. *Hydrogeology Journal* 4(3): 40-49.
- Sidele, WC., Lee, PY. 1995 Estimating local Ground-water flow conditions in a granitoid: preliminary assessments in the Waldoboro Pluton Complex, Maine. *Ground Water* 33(2): 291-302.
- Yin, ZY., Brook, GA. 1996 The topographic approach to locating high-yield in crystalline rocks: does it work?. *Groundwater* 30(1): 102.