

**METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS
DISCONTINUOS - PUNTA ESPINILLO - URUGUAY**

***METHODOLOGY TO STUDY HYDROGEOLOGIC FRACTURED SYSTEMS
PUNTA ESPINILLO - URUGUAY***

Jorge Montaña Xavier

INGEPA – Facultad de Ciencias

Iguá 4225, C.P. 11400, Montevideo, Uruguay.

Fax: (0598-2) 525 8617, e-mail: jmont @fcien.edu.uy

María Paula Collazo

INGEPA – Facultad de Ciencias

Iguá 4225, C.P. 11400, Montevideo, Uruguay.

Fax: (0598-2) 525 8617, e-mail: mpaula@fcien.edu.uy

Rosario Guérèquiz

INGEPA – Facultad de Ciencias

Iguá 4225, C.P. 11400, Montevideo, Uruguay.

Fax: (0598-2) 525 8617, e-mail: rosario@fcien.edu.uy

Silvana Martínez Paulo

Investigadora Invitada

Iguá 4225, C.P. 11400, Montevideo, Uruguay.

Fax: (0598-2) 525 8617, e-mail: jmont @fcien.edu.uy

RESUMEN

Se presenta una metodología de estudio para sistemas discontinuos debido a los escasos antecedentes existentes sobre el tema. El subsuelo está constituido por rocas metamórficas, de bajo a mediano grado (micaesquistos, cuarcitas, anfíbolitas y gneis). Las rocas con mejor capacidad hidrogeológica son los gneis debido a su mayor densidad y porosidad de fractura. Las fracturas portadoras se corresponden con el tipo tensional cuya direcciones preferenciales son N-S y E-W. La profundidad de fractura más frecuente se encuentra entre 30 y 50 m. Por debajo de 50 m la posibilidad de encontrar fracturas abiertas disminuye por el cerramiento que prevee la presión litostática. Existe una gran extracción de agua del sistema discontinuo con una densidad media de 13 pozos por kilómetro cuadrado, un caudal medio de 10 m³/h, y un caudal específico promedio de 2.4 m³/h/m. En un área de 16 Km² se está extrayendo un caudal diario de 1144 m³, lo que determina una sobre-explotación del acuífero, que se manifiesta con descensos de los niveles hidráulicos hasta el extremo de su agotamiento total. En función de ésta situación se planifica el ordenamiento del uso del recurso con limitaciones e impedimentos en el incremento de la extracción de agua.

Palabras Clave: Medio fisurado, sobre-explotación, conductor hidráulico.

ABSTRACT

Here is presented a methodology to study fractured systems, motivated by the scarce studies referred to this subject. The subsoil is composed of metamorphic rocks of low to medium grades (micaschist, quartzite, amphibolite and gneiss). The rocks with the biggest hydrogeologic capacity are the gneisses due to their high fracture density and porosity. The bearing fractures correspond to the tensional types whose preferential directions are N-S and E-W. Between 30 and 50 m depth, lies the most frequent fracture. Below 50 m the possibility to find open fractures decreases, because they close due to the lithological weight.

There is a great extraction of water from this discontinuous system with a mean density of wells of 13 Km² and a mean yield of 10 m³/h, with a specific yield of 2.43 m³/h/m.

Nowadays, a daily flow of 1144 m³ it is being extracted in an area of 16 Km². This shows an over-exploitation of the system reflected in high drawdowns in wells, even coming to the extreme of their complete depletion. Considering the above observations, it is planned to establish an arrangement for the use of this resource, with

limitations and controls in the increasing of the extraction.

Key words: discontinuous system, over-exploitation, hydraulic conductor

OBJETIVOS

Caracterización geológica e hidrogeológica del medio fisurado, con énfasis en la parte hidráulica como base para la planificación del manejo en una zona de intensa explotación del acuífero.

AREA DE ESTUDIO.

Se ubica en el sur del país, en el límite de los Departamentos de Montevideo y San José, en la desembocadura del Río Santa Lucía sobre la margen noroeste del Río de la Plata. Delimitada por las siguientes coordenadas geográficas (UTM) x: 442 – 448 y: 6145 – 6149. Ocupa una superficie aproximada de 16 Km², (Figura 1).

Las altitudes registradas en los relevamientos con GPS indican valores máximos aproximados del orden de los 35 m s.n.m., predominando las alturas comprendidas entre las cotas 20 y 25 m s.n.m.

GEOLOGIA

El área se encuentra en el borde sureste de la fosa tectónica de Santa Lucía. Las secuencias más antiguas son de edad Precámbrica y están constituidas por rocas metamórficas de grado bajo a medio, ocupan cerca del 90% del área y el resto corresponde a depósitos cuaternarios localizados en la zona costera del Río de la Plata.

Formación Montevideo (Precámbrico)

Es un cinturón metamórfico situado al sur del Cratón del Río de la Plata, actualmente denominado Terrane Piedra Alta. Las litologías han sufrido metamorfismo de grado medio a alto. Se desarrollan en una faja de aproximadamente 30 km de ancho con un rumbo general E- NE.

Gneises.

Es la litología más abundante que se caracteriza por presentar un metamorfismo de grado medio a alto con tamaño de grano fino a medio. El cuarzo y la oligoclasa están siempre presentes en su composición mineralógica y según la presencia de sus minerales accesorios se pueden clasificar en

- Gneis a biotita
- Gneises a dos micas (biotita y muscovita).

Anfibolitas

No se han observado afloramientos de estas rocas, aunque están presentes en la mayoría de las perforaciones realizadas, constituyéndose en la segunda litología en importancia. Poseen un grado metamórfico de medio a alto

Micaesquistos

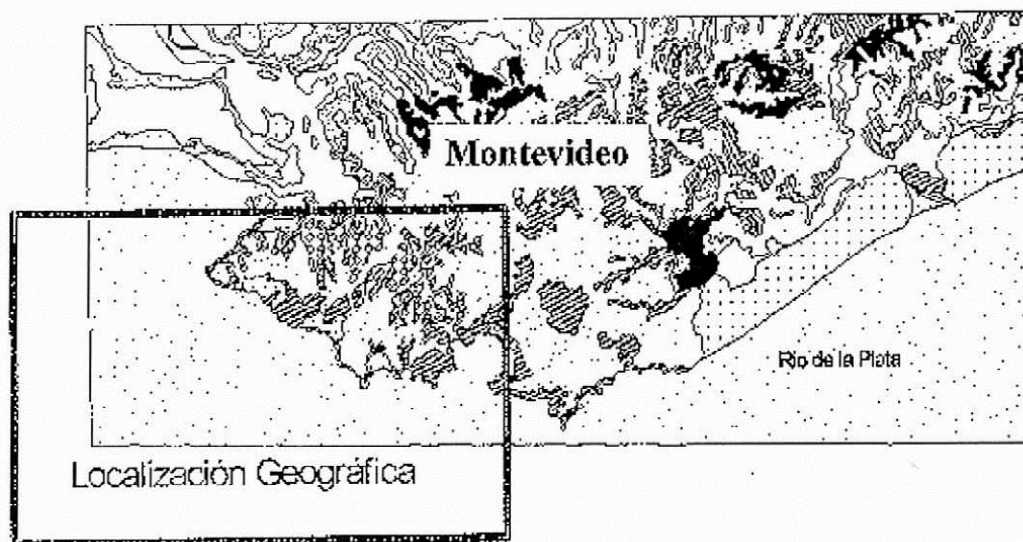


Figura 1 : Mapa de ubicación.

Figure 1: Localization map.

Son rocas poco resistentes a la meteorización; ello limita sus posibilidades de afloramiento, lo que hace suponer que su desarrollo dentro de la zona estudiada puede ser más importante.

Se destaca que se ha detectado en los mantos de alteración, la presencia de arcillas expansivas en gran proporción (esmectitas), que limita las posibilidades de circulación de agua

Área Sedimentaria

Formación Fray Bentos (Oligoceno)

Estos sedimentos rellenan antiguos valles labrados en zonas de fracturas correspondientes a terrenos precámbricos. Su techo se caracteriza por presentar una morfología suavemente ondulada.

En general se reconocen para esta unidad tres litofacies:

a) Brechas, matriz-soportada con clastos de anfibolitas y gneises en una matriz limo arcillosa de color castaño a anaranjado.

b) Limoarcillitas, limolitas arenosas (en ocasiones areniscas limosas), pardo rosadas a marrón rojizas. En general presentan abundantes concreciones de carbonato de calcio.

c) Areniscas finas a muy finas rosadas, bien seleccionadas, cuarzosas a cuarzo-feldespáticas, con cemento carbonático y estructura masiva. El espesor medio es de 20m.

Formación Libertad (Pleistoceno)

Es la litología de mayor expresión superficial, ocupa entre el 70 a 80% del área. Se presentan como pelitas con concreciones de carbonato de calcio bien seleccionadas, color marrón, cuyo espesor no supera los 10m.

Dunas

Se desarrollan hacia el continente en la costa del Río de la Plata, están constituidas por arenas finas bien seleccionadas, redondeadas, cuarzosas; con estratificación cruzada y color blanco.

Arenas Costeras (Actual)

Se desarrollan sobre la costa y playas de los ríos Santa Lucía y de la Plata. Están formadas por arenas medias a finas, redondeadas, cuarzosas; con estratificación cruzada y color blanco.

Análisis Tectónico Estructural

El método aplicado para el análisis tectónico estructural, consistió en el estudio de fotolineaciones que permitió reconocer el patrón tectónico estructural.

El procesamiento de la información se realizó en base a dos criterios fundamentales: longitudes y frecuencias de las lineaciones; representadas luego en diagramas tipo «rosa de vientos» que permitieron expresarlas adecuadamente.

En el registro tectónico se aprecian varias etapas de deformación, dichos eventos afectaron preponderantemente a las rocas del basamento cristalino y controlaron los procesos de depositación sedimentaria.

El evento orogénico Transamazónico, afecta a la Formación Montevideo, generando deformaciones en régimen dúctil-rúptil. La dirección principal de éste fenómeno es NS y EW (Figura 2).

No ha sido posible distinguir apropiadamente la deformación en régimen rúptil de este evento, puesto que actualmente se superponen otras posteriores; sin embargo Cardelino y Ferrando (1969), estiman que serían las de dirección N30/40W, por estar rellenas de filones pegmatíticos, observación que comparten los autores.

Esto implica una fase distensiva hacia el final del orógeno, en régimen dúctil-rúptil, puesto que algunos de éstos filones generan pliegues y formas irregulares.

La fracturación N40/50E constituye la principal dirección de la Fosa Tectónica de Santa Lucía (Cretácica), que es el evento regional más importante, siendo las restantes lineaciones las conjugadas y subsidiarias de ella.

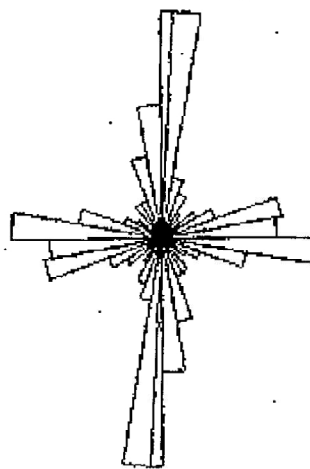


Figura 2: Rosa de diaclasado: N° de datos (n)=192, desviación estandar (R)=0.17

Figure 2: Rose Diagram: Data number (n)=192, standard (R)=0.17.

Paralelamente a esta Fosa, se han formado otras de menor tamaño generadas por hundimiento o levantamiento de bloques, producidos por los fallamientos asociados a la apertura de la fosa principal y reactivados durante el Terciario inferior. El resumen del estudio de fracturación se presenta en el correspondiente diagrama de diaclasado, (Figura 2).

HIDROGEOLOGIA

El trabajo se orienta principalmente a desarrollar la caracterización hidrogeológica de los sistemas acuíferos de la región.

Con la información obtenida se procuró alcanzar un conocimiento detallado respecto a la capacidad del acuífero, con el fin de planificar la explotación y conservación de las aguas subterráneas.

Unidades hidrogeológicas

La identificación de las grandes unidades hidrogeológicas se basa esencialmente en las relaciones geológicas y geomorfológicas. Estas unidades se diferencian en cuanto al medio físico, tipo de ocurrencia del agua subterránea, tipo de depósito y condiciones de circulación de agua.

En la región se distingue una única unidad hidrogeológica, en un medio fisurado, constituida por rocas del Basamento Cristalino.

No se consideran las formaciones Fray Bentos y

Libertad, al estar constituidas por sedimentos muy finos de baja permeabilidad, que no tienen importancia como fuente productora de agua.

Como consecuencia de lo señalado y siguiendo el objetivo principal del estudio, se ha puesto énfasis en la investigación de los medios fisurados representados por el Basamento Cristalino.

Sistema Fisurado

En la mayoría del área el agua subterránea se almacena y circula principalmente en medios fisurados. Los niveles alterados son de poco espesor, no mayor a los cinco metros, sin importancia hidrogeológica. En estas regiones las estructuras de drenaje se emplazan generalmente a lo largo de sistemas de fracturas.

Debido a que la mayoría del Basamento Cristalino está cubierto por sedimentos de baja permeabilidad (Formación Libertad), la recarga se da principalmente por las infiltración de los arroyos encauzados en fracturas.

Clasificación Hidrogeológica del Basamento

La capacidad de almacenamiento en rocas duras, depende exclusivamente del volumen y la porosidad de fractura. A su vez la porosidad dependerá de la historia tectónica que ha sufrido la zona y de los procesos de alteración. Estos factores están influenciados por las condiciones geológicas,

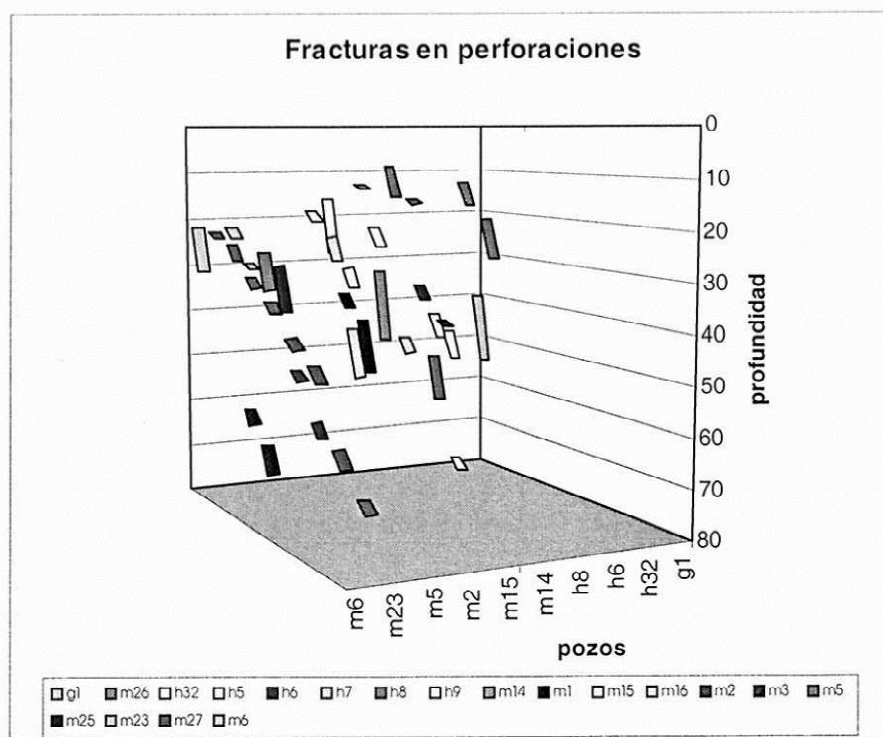


Figura 3 : Profundidad de las fracturas portadoras

Figure 3 : Brearing fractures depth.

topográficas y climáticas.

La capacidad de almacenamiento de las rocas depende también del tipo de fractura, del área y de la densidad de fracturación.

Para el análisis de estas características se definen los siguientes términos:

Rocas compactas o Rocas secas (Acuífugos)

Rocas masivas con baja o ausente fracturación y por lo tanto sin posibilidad de almacenamiento de agua. Estas rocas compactas poseen una dureza que permitiría transmitir la tensión a cuerpos de rocas vecinas sin fracturarse (como icebergs que quebrasen capas de hielo más débiles). Estas rocas son los verdaderos acuífugos.

Rocas dúctiles (Acuitardos)

Son principalmente esquistos de bajo grado, las fracturaciones, cuando existen, se encuentran rellenas por materiales de alteración. En este caso están representados por micaesquistos con baja capacidad de almacenamiento de agua. Su comportamiento se aproxima a los acuitardos.

Rocas quebradizas (Acuíferos)

Corresponde a rocas intrusivas como ser granitos, granodioritas, cuarcitas y pegmatitas y rocas metamórficas de medio a alto grado como los gneises o anfibolitas. Estas dos últimas litologías son las más frecuentes y muestran un tipo de fracturación densa que la ubican como una roca donde se almacena y circula agua convirtiéndola en un verdadero acuífero.

Almacenamiento de agua en función del tipo tectónico.

Desde el punto de vista hidrogeológico se pueden distinguir tres tipos de fracturas que marcan la magnitud del almacenamiento en el medio discontinuo, éstas son:

Diaclasas de Tensión (a=1)

Derivan de la deformación plástica que genera fracturación con una escasa o nula interconexión entre diaclasas limitando la capacidad de almacenamiento. Este tipo de tectónica desarrolla acuíferos pobres.

Fracturas de Tensión (a=2)

Tienen generalmente gran capacidad de almacenamiento debido a su origen tensil.

Forman redes de fracturas interconectadas que constituyen grandes espacios para la circulación y almacenamiento de agua, constituyendo buenos acuíferos.

Estas fracturas son las más frecuentes dentro de la región y los pozos de mayor rendimiento están ubicados en su ámbito.

Fracturas de Corrimiento.

Es muy complejo el efecto que tiene éste tipo de fracturación en el almacenamiento de agua. En algunos casos las fracturas están bastante cerradas por el efecto de presiones residuales, que limitan el espacio entre bloques. En otros, puede existir una fuerte fracturación ligada a una posterior e intensa alteración con formación de arcillas que limitan la permeabilidad. También puede suceder que las fracturas estén rellenas de arena, mejorando las cualidades hidrogeológicas y transformándola en un acuífero.

Puede suceder que dos o más fallas de corrimiento se corten formando un eje de intersección creando grandes espacios o cavernas lo que permite caudales excepcionales.

Interconexión de Fracturas.

La importancia de una gran interconexión entre las fracturas es fundamental para desarrollar un buen acuífero, al generar un sistema continuo, comunicando familias de fracturas desarrolladas por uno o varios eventos tectónicos.

Existen casos donde los bloques fracturados producen materiales de alteración que en función del material madre y del proceso de alteración pueden aportar diferentes productos con consecuencias en la porosidad y continuidad del sistema. Si generan materiales arcillosos a partir de epimetamorfitos, se produce un relleno del espacio poroso de baja permeabilidad, disminuyendo la permeabilidad y desarrollando acuíferos pobres, como son las zonas de micaesquistos.

Otra alternativa es el desarrollo de espacios libres con materiales de relleno arenosos de alta permeabilidad, creando un gran volumen de almacenamiento (gneisses).

Se ha observado el descenso de la porosidad de fractura en función del número de eventos tectónicos que sufre un bloque rocoso.

En la zona (borde de fosa) se ha detectado esta

Característica	Gneises	Paranfilitas	Micasquistos
1) Apertura de fracturas	Alta	Baja	Muy baja
2) Rellenos de fracturas	Baja	Alta	Muy alta
3) Metasomatización	Baja	Alta	Muy alta
4) Circulación y almacenamiento de agua	Alta	Baja	Muy baja
5) Caracterización hidrogeológica	Acuífero bueno	Acuífero regular	Acuífero malo

Figura 4 : Caracterización hidrogeológica del basamento cristalino.

Figure 4 : Crystalline rocks hidrogeologic characterization

relación por ser el escenario de movimientos continuos que produjeron el desarrollo de fracturas rellenas de materiales arcillosos que limitan la circulación de agua. Un ejemplo esquemático se representa en la figura 4.

Realizando un resumen de las características hidrogeológicas del Basamento Cristalino de la zona podemos establecer que:

1) Las rocas que funcionan como un buen acuífero son los gneises ya que presentan una fuerte fracturación, poco relleno de fracturas o en su defecto, el material de relleno es arenoso generando una buena «permeabilidad de fractura», lo que facilita el almacenamiento y circulación del agua subterránea convirtiéndolo en un buen acuífero fisurado.

2) Las paranfilitas desarrollan una buena fracturación, pero presentan un mayor relleno de fracturas en función del número de entidades tectónicas que las afectaron, generando materiales de relleno de fractura con porcentajes medios del

tipo arcilloso. Esta situación determina que exista circulación y almacenamiento de agua pero una menor «permeabilidad de fractura», resultando pozos con menores caudales, comparados con los gneises.

3) Por sus características constitutivas los micaesquistos tienen menor apertura de fractura y su alteración produce arcillas que rellenan las fracturas limitando la circulación de agua subterránea.

Desde el punto de vista hidrogeológico estas rocas se comportan como acuíferos pobres o como simples acuitados cuando alternan con otras rocas metamórficas como los gneises o las paranfilitas. Esta caracterización, es de fundamental importancia para la prospección de aguas subterráneas.

Cuando se presenta una sucesión de rocas metamórficas como las mencionadas podrían ser tenidas en cuenta ante la decisión de profundizar o no las perforaciones. En los pozos realizados en el área se ha encontrado que las fracturas portadoras con mayor acumulación de agua se encuentran en los gneises o anfíbolitas.

Capacidad de almacenamiento y rendimiento de pozos

Como en toda área de roca dura es muy difícil predecir el rendimiento y la capacidad de almacenamiento del reservorio.

Para interpretar la información del inventario se ordenaron en planillas, los datos de Profundidad, Nivel Estático Acotado, Nivel Dinámico, Caudal y

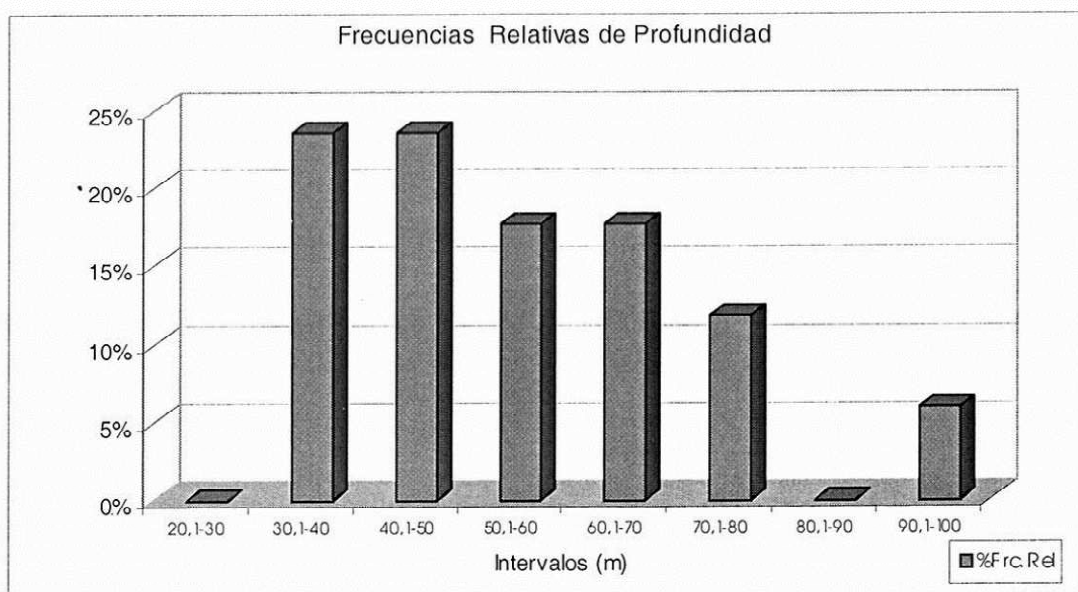


Figura 5 : Frecuencias relativas de profundidad.

Figure 5 : Depth relative frequencies.

Caudal Específico. La caracterización del medio fisurado se basa en el análisis de estos datos.

Profundidad

La profundidad máxima registrada fue de 99 m y la mínima de 32 m. La profundidad media es de 55 m.

En general los pozos se perforan con diámetros de 8" hasta 10-15m y luego de 6" hasta el final. La tubería es de hierro con costura.

Del estudio estadístico se observa que la profundidad más frecuente de captación se encuentra entre 30

y 50 m, indicando que la mayoría de la fracturación portadora de agua se encuentra en los primeros 30 m. Debajo de los 50 m la posibilidad de encontrar fracturas abiertas disminuye al cerrarse estas por el propio peso de la estructura (Figura 5).

Caudal

El caudal máximo alcanza 32 m³/h y el mínimo 0,5 m³/h. El valor más frecuente varía entre 1 y 10 m³/h, (Figura 6).

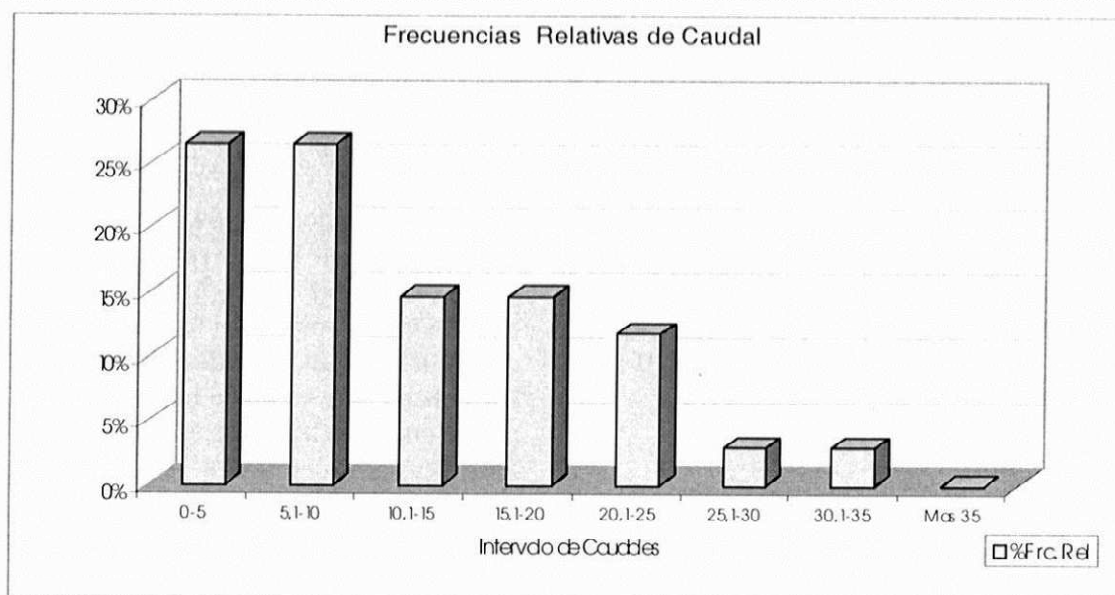


Figura 6 : Frecuencias Relativas de Caudal

Figure 6 : Flow relative frequencies.

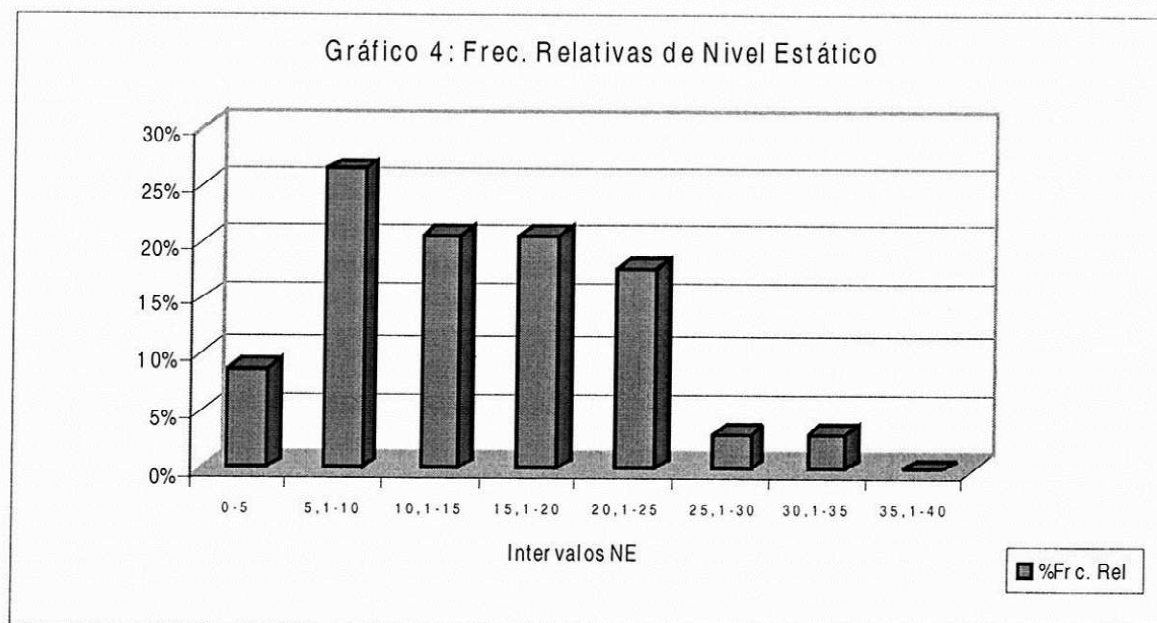


Figura 7 : Frecuencias relativas de Nivel Estático.

Figure 7 : Static level relative frequencies

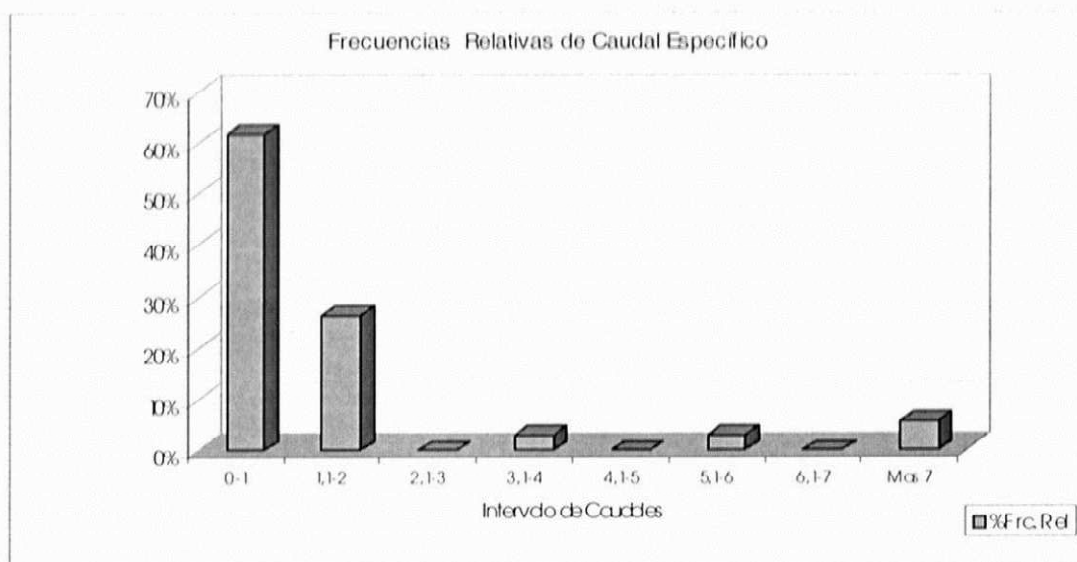


Figura 8 : Frecuencias relativas de Caudal Específico.

Figure 8 : Specific flow relative frequencies.

Niveles estáticos

Los niveles estáticos, aproximadamente en el 80% de los casos se sitúan antes de los 20 metros. Los valores más frecuentes varían entre 5 y 10 m (Figura 7).

Caudal Específico

La capacidad específica representa el cociente entre el Caudal (Q) expresado en m^3/h y el descenso acumulado (expresado en m) a cualquier instante de bombeo.

Las principales características hidrogeológicas del Basamento Cristalino son la heterogeneidad y la anisotropía. Es poco frecuente que en un mismo medio fracturado, los aportes de agua sean originados por estructuras semejantes. Sin alcanzar a relacionar, las orientaciones portadoras con el Caudal Específico, se logró igualmente una caracterización del sistema fracturado en función del caudal específico.

El valor promedio de Caudal Específico es de $2,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

El valor más frecuente se encuentra entre $0,5$ y $1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. Este parámetro puede ser utilizado como referencia puntual del potencial del sistema fisurado, (Figura 8).

USO ACTUAL

La densidad media de pozos en la zona es de 6 por kilómetro cuadrado, con un máximo de 13 por kilómetro cuadrado. Si se adopta un caudal medio de $11 \text{ m}^3/\text{h}$, se estaría extrayendo un máximo de $143 \text{ m}^3/\text{h}$ un régimen de 8 horas de bombeo en verano

alcanzaría un valor de $1144 \text{ m}^3/\text{día}$.

Esta extracción intensiva conjuntamente con distancias entre pozos menores a los 200 m determina una sobre explotación del acuífero que causa un pronunciado descenso de los niveles hidráulicos al extremo de haberse agotado cuatro pozos, cuyo caudal medio era de $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

Esta situación determinó la recomendación de: impedir la construcción de nuevos pozos en el área; mejorar la eficiencia de los sistemas de riego, sustituyendo los antiguos por el goteo; y fijar los horarios de bombeo, principalmente durante la noche, para el período estival.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1- En la región se distingue una única unidad hidrogeológica, enfatizada en los sistemas fisurado, del Basamento Cristalino.
- 2- Las litologías que funcionan como un sistema fisurado son los gneises ya que presentan una buena fracturación, poco relleno de fracturas o en su defecto, el material de relleno es arenoso generando una buena permeabilidad de fractura.
- 3- Desde el punto de vista tectónico, las fracturas más frecuentes de la región y los pozos de mayor rendimiento se ubican en las fracturas de tensión ($a=2$)
- 4- Las direcciones preferenciales de las fracturas son NS y su EW.
- 5- Del estudio estadístico se observa que la profundidad más frecuente de los pozos se encuentra entre 30 y 50 m. Esta profundidad está indicando que la mayoría del sistema de

fracturas portadoras se encuentra en los primeros 30 m. Debajo de los 50 m la posibilidad de encontrar fracturas abiertas disminuye al cerrarse éstas por el propio peso litostático.

- 6- El caudal extraído en el período estival es del orden de 1144 m³/día. La densidad media de pozos es de 6 por kilómetro cuadrado, con un máximo de 13 por kilómetro cuadrado. Esta extracción causó el descenso de los niveles hidráulicos con agotamientos de algunos pozos.

Con el fin de frenar la sobre explotación del acuífero se tomaron las siguientes medidas: impedir la realización de nuevos pozos en el área, mejorar la eficiencia de los sistemas de riego y fijar horarios de bombeo principalmente en la noche para el período estival.

BIBLIOGRAFÍA

BOSSI, J & NAVARRO, R Geología del Uruguay. Ed. Universidad de la República – Uruguay. (1991). PPVol.I,580p

- CARDELINO, F & FERRANDO, F. *Carta Geológica del Departamento de Montevideo a escala 1:100000*. Universidad de La República - Uruguay. (1969)
- CORONEL, N & VEROVSLASKY, G & GOSO, C, *Carta Geológica del fotoplano La Barra – Los Cerrillos-, a escala 1:10000*. Ed.: DINAMIGE – Facultad de Agronomía – Facultad de Humanidades y Ciencias. (1989)
- CUSTODIO, E & Llamas, MR *Hidrología Subterránea* 2° Edición. Vol. I y II. Editorial Omega – Barcelona – España. (1996)
- GUSTAFSON, G & KRASNY, J (1994) *Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance.. Applied Hydrogeology* 2(2):64-75.
- MONTAÑO J.& CHULEPIN H. *Carta Geológica de Montevideo*. C. S. I. SOGREA. (1992)
- PRECIOZZI, F et. al., *Carta Geoestructural del Uruguay a escala 1:200000*, (1979) Ed.:DINAMIGE.
- VAZ CHAVEZ, N (1991). *Análisis estructural del área de Punta Espinillo*. (inédito), pág 45
- WALTHER, K *Estudio petrográfico de la Formación Montevideo*. Instituto Geológico del Uruguay. (1947). Bol. n°33, 1-138 p