

# CARACTERIZACION HIDROGEOLOGICA DE SISTEMAS FISURADOS PUNTA ESPINILLO (URUGUAY)

Jorge Montaña Xavier<sup>1</sup> ; María Paula Collazo<sup>1</sup>; Silvana Martínez Paulo<sup>1</sup> &  
Rosario Guerequiz<sup>1</sup>

**1) Resumen** - Se presenta una metodología de estudio para acuíferos fisurados motivados por las dificultades que existe en la caracterización hidrogeológica de estos sistemas.

El subsuelo esta constituido por rocas metamórficas, de bajo a mediano grado (micaesquistos, cuarcitas, anfibolitas y gneiss). Las rocas con mayor capacidad hidrogeológica son los gneiss a consecuencia de su mayor densidad y porosidad de fractura. Las fracturas portadoras se corresponden con el tipo tensional cuya direcciones preferenciales son N-S y complementaria.

La profundidad de fractura más frecuente se encuentra entre los 30 y 50 m. Por debajo de los 50 m la posibilidad de encontrar fracturas abiertas disminuye al cerrarse por el propio peso de su estructura.

La densidad media de pozos en la zona es de 13 por kilómetro cuadrado.

El caudal medio es de 10 m<sup>3</sup>/h, con un caudal específico de 2.43 m<sup>3</sup>/h/m.

Actualmente se está extrayendo un caudal diario de 1144 m<sup>3</sup>/día en un área de 16 Km<sup>2</sup>, lo que determina una sobreexplotación del acuífero que se manifiesta con descensos de los niveles hidráulicos muy marcados en los pozos, hasta el extremo de su agotamiento total. En función de ésta situación se planifica el ordenamiento del uso de este recurso con limitaciones e impedimentos en el incremento de la extracción de agua de éste acuífero.

**Palabras claves** - Medios fisurados, sobreexplotación, conductor hidráulico.

---

<sup>1</sup> Universidad de la República, Facultad de Ciencias, Departamento de Geología, Montevideo – Uruguay. Igua 4225. Tel/Fax (598-2) 525 8617 y. (598-2) 215 1035. [jmont@fcien.edu.uy](mailto:jmont@fcien.edu.uy); [mpaula@fcien.edu.uy](mailto:mpaula@fcien.edu.uy); [rosario@fcien.edu.uy](mailto:rosario@fcien.edu.uy).

## 2) OBJETIVOS

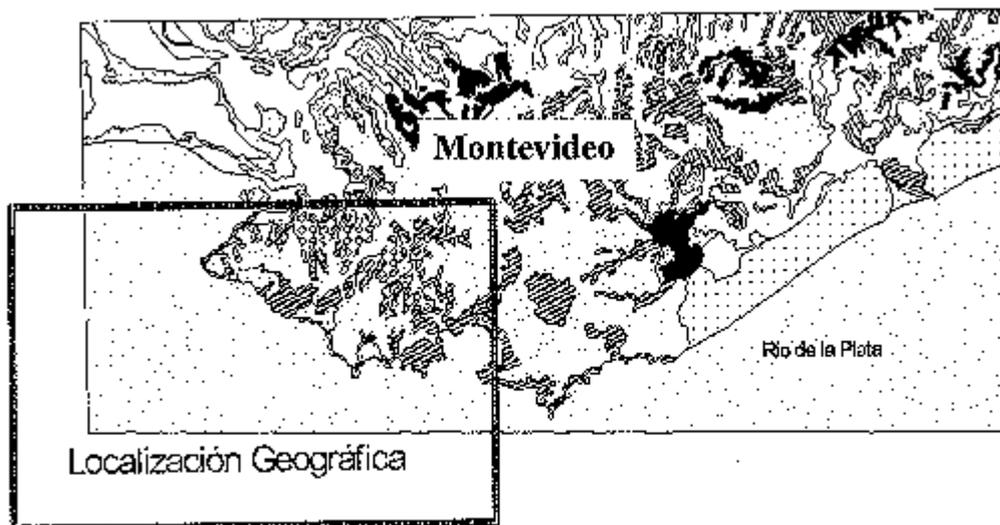
Caracterización geológica e hidrogeológica del medio fisurado., con énfasis en la parte hidráulica como base para la planificación de la explotación en una zona de intensa explotación del acuífero.

## 3) 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: 442.3 – 448 y: 6145 –6149. Ocupa una superficie aproximada de 16 Km<sup>2</sup>.

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.

**Mapa 1** Ubicación del área de estudio



## 4) GEOLOGIA

Las secuencias más antiguas son de edad Precámbrica y están constituida 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 Plata.

### 4.1) FORMACION 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 30km de ancho con un rumbo general E- NE.

#### **4.1.1) Gneisses.**

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
- Gneisses a dos micas, (biotita y muscovita).

#### **4.1.2) 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. Presentan un grado metamórfico de medio a alto

#### **4.1.3) Micaesquistos**

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

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

### **4.2) AREA SEDIMENTARIA**

#### **4.2.1) FORMACION FRAY BENTOS.- ( Mioceno).**

Se puede establecer que estos sedimentos rellenan antiguos valles desenvueltos en zona de fracturas correspondientes a terrenos Precámbricos. 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 gneisses 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.



#### **4.2.2) FORMACION LIBERTAD.-( Plioceno)**

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 marrónn, cuyo espesor no supera los 15m.

#### **4.2.3) 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.

#### **4.2.4) 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.

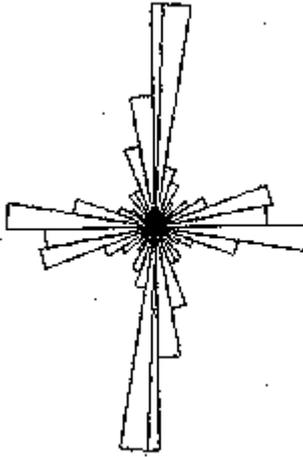
### **4.3) ANALISIS TECTONICO ESTRUCTURAL**

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

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 expresarlo adecuadamente.

El registro tectónico de la zona denuncia 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, correspondiente a las litologías de la Formación Montevideo, genera deformaciones en régimen dúctil-rúptil. La dirección principal de éste fenómeno es NS y EW.



**Figura 1** Rosa de diaclasado:  $n= 192$        $R= 0,17$   
 n: número de datos      R: desviación estandar

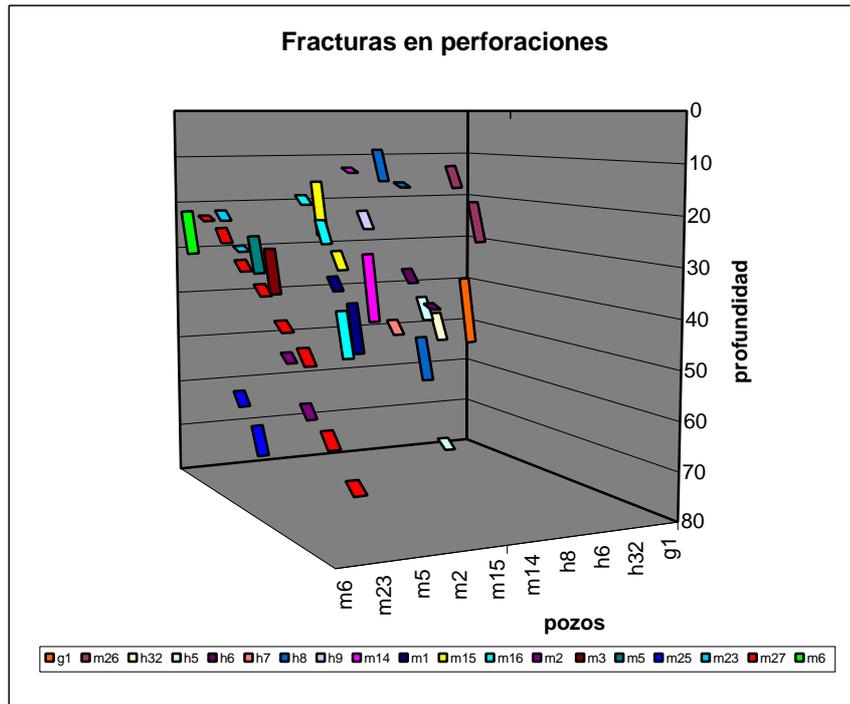
No ha sido posible distinguir apropiadamente la deformación en régimen rúptil de este evento, puesto que actualmente se superponen otras posteriores; sin embargo CARDELINO FERRANDO, estiman que serían las de dirección N30/40W, por estar rellenas de filones pegmatíticos, observación que comparten los 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 del Santa Lucía (Cretácica), que es el evento regional más importante; siendo las restantes lineaciones las conjugadas y subsidiarias de ella.

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 siguiente diagrama de diaclasado.

**Gráfico 1**



## 5). HIDROGEOLOGIA

El presente 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.

### 5.1) 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, representada por medios fisurados, constituida por rocas del Basamento Cristalino.

No se consideraron las Formaciones Fray Bentos y Libertad, por estar constituidas por sedimentos muy finos de baja permeabilidad, no teniendo importancia como fuente portadora de agua que puedan sostener una explotación intensiva.

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.

## **5.2 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 infiltraciones de los arroyos encauzados en fracturas.

## **5.3 CLASIFICACION HIDROGEOLOGICA DEL BASAMENTO.-**

Si el nivel alterado con sus características hidrogeológicas específicas no se considera al no tener importancia, puede afirmarse que la capacidad de almacenamiento de los acuíferos 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. Los dos últimos factores enumerados están influenciados por las condiciones geológicas locales, 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 definiremos los siguientes términos:

### **5.3.1 "Rocas compactas" o "Rocas secas" (Acuifugos).**

Rocas masivas con baja o ausente fracturación y por lo tanto sin posibilidad de almacenamiento de agua.

Esta roca compacta presentaría una dureza que indicaría que pueden transmitir la tensión a cuerpos de rocas vecinas sin quedar ellas fracturadas (como icebergs que quebrasen capas de hielo más débiles). Estas rocas son los verdaderos acuifugos.

### **5.3.2 Rocas dúctiles. (Acuitardos).**

Son principalmente esquistos poco transformados, las fracturaciones, cuando existen, se encuentran rellenas por materiales de alteración.

En este caso estarían representados por micaesquistos con baja capacidad de

almacenamiento de agua.

Se comportarían como típicos acuitardos.

### **5.3.3 Rocas quebradizas. (Acuíferos).**

Corresponde a rocas intrusivas como ser granitos, granodioritas, cuarcitas y pegmatitas y rocas metamórficas de medias a altas como los gneis o anfibolitas, que son las rocas más frecuentes en este Basamento. 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 convirtiéndolo en un verdadero acuífero.

## **5.4 ALMACENAMIENTO DE AGUA EN FUNCION DEL TIPO TECTONICO.**

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

### **5.4.1 Diaclasas de Tensión (a=1), debidas a deformación plástica.**

Estos tipos de fracturación producen una escasa o nula interconexión entre diaclasas o fracturas limitando la capacidad de almacenamiento. Este tipo de tectónica desarrolla acuíferos pobres.

### **5.4.2 Fracturas de Tensión (a=2)**

Este tipo de fracturación tiene generalmente gran capacidad de almacenamiento debido a su origen tensil.

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

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

### **5.4.3 Fracturas de corrimiento.**

Es muy complejo el efecto que tiene éste tipo de fracturación en el almacenamiento de agua. En algunos casos estas fracturas están bastante cerradas por el efecto de presiones residuales, que limitan el espacio entre bloques. En otros casos puede existir una fuerte fracturación ligada a una posterior e intensa alteración con formación de arcillas que limitan la permeabilidad y el almacenamiento de agua en la roca. 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 con la obtención de excepcionales caudales en pozos perforados.

#### **5.4.4 Interconexión de Fracturas.**

La importancia de una buena 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 genera materiales arcillosos a partir de epimetamorfitos, se produce un relleno del espacio poroso de baja permeabilidad, disminuyendo el almacenamiento del sistema y desarrollando acuíferos pobres, como son las zonas de micaesquistos .

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

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

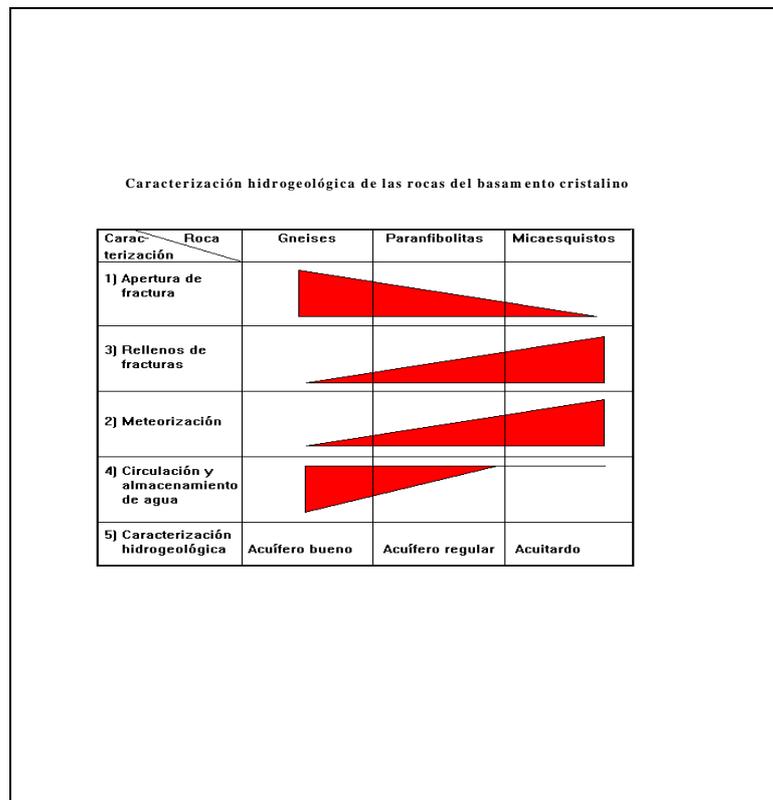
En la zona (borde de fosa) se ha detectado ésta relación por ser el escenario de movimientos continuos que ha producido el desarrollo de fracturas rellenas de materiales arcillosos que limitan la circulación de agua. Un ejemplo esquemático se representa en la figura en la próxima página.

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 buena 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 parafibrolitas desarrollan una buena fracturación pero presentan un mayor relleno de fracturas en función del número de entidades tectónicas que la afectaron generando materiales de relleno de fractura con porcentajes medios del tipo arcillosos. Esta situación determina que exista circulación y almacenamiento de agua pero una menor "permeabilidad de fractura", resultando pozos con menores caudales si lo comparamos con los gneises.

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



**Figura 2:** Caracterización hidrogeológica de las rocas del basamento cristalino.

Desde el punto de vista hidrogeológico estas rocas se comportan como acuíferos pobres o como simples acuitardos cuando alternan con otras rocas metamórficas como los gneises o las paranfibolitas.

Esta caracterización que se presenta, es de fundamental importancia para la prospección de aguas subterráneas y debe ser utilizado como referencia hidrogeológica en la prospección de agua.

Cuando se presenta una sucesión de rocas metamórficas como las mencionadas pueden ser tenidas en cuenta estas propiedades para profundizar o no las captaciones de aguas subterráneas. En los pozos realizados en el área se ha encontrado que las fracturas portadoras se encuentran en los gneises o anfibolitas una vez que se ha atravesado los micaesquitos.

### 5.5. CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO Y RENDIMIENTO DE POZOS.-

Como en toda área de roca dura es muy difícil predecir el rendimiento o la capacidad de almacenamiento del reservorio. En general se consideran de baja capacidad.

Para interpretar la información del inventario se ordenaron en planillas, los datos de Profundidad, Nivel Estático acotado, Nivel dinámico, Caudal y Caudal Específico. La caracterización del medio fisurado se realizará a través del análisis estos datos.

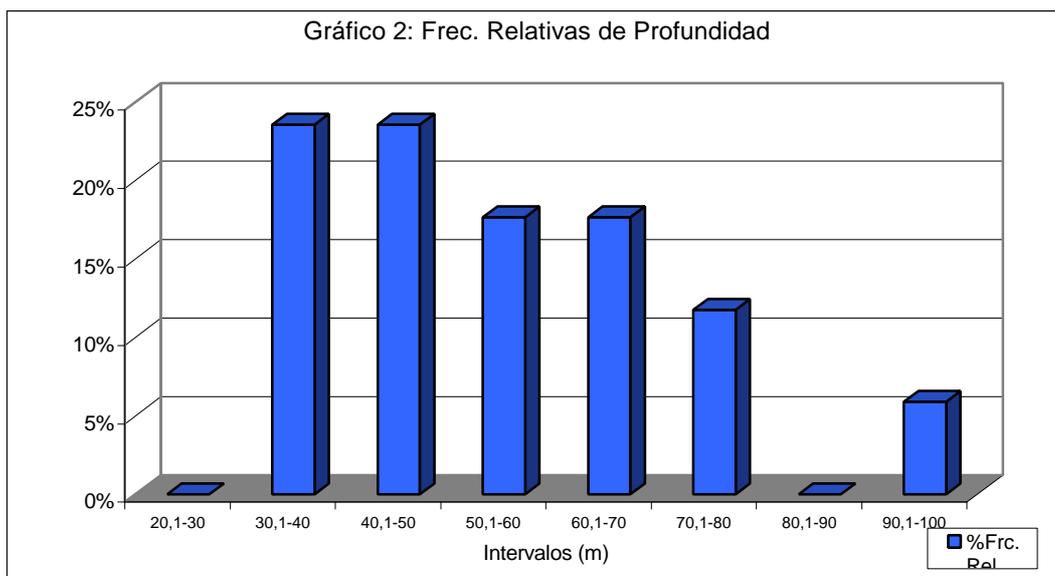
### 5.5.1 Profundidad.-

La profundidad máxima alcanzada en las 34 perforaciones inventariadas en el área, es de 99 m y la profundidad mínima fue de 32 m. La profundidad media es de 55.54m.

En general los pozos perforados son construidos 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 su estructura.

**Gráfico 2**

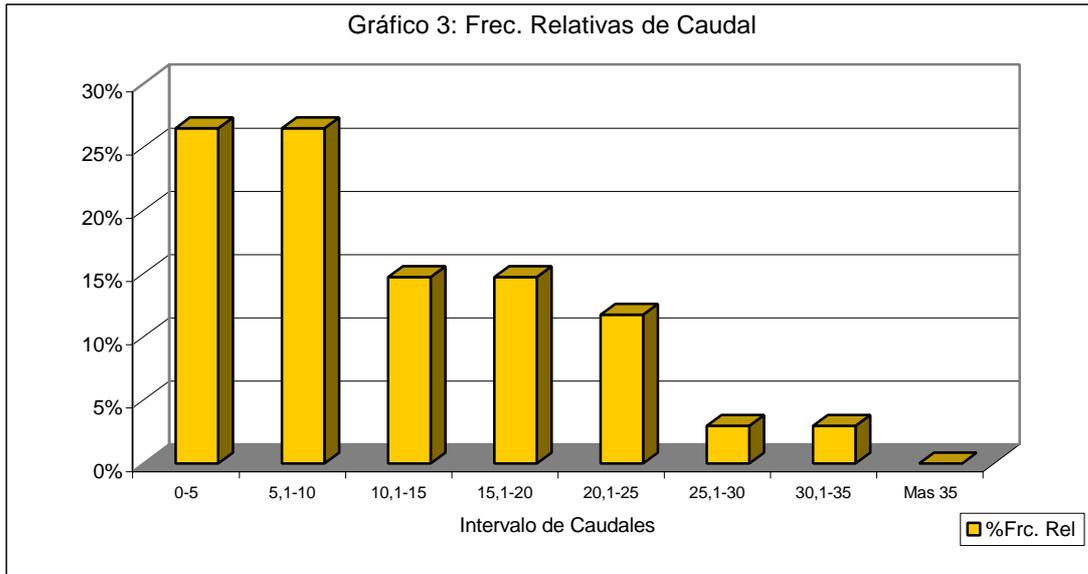


### 5.5.2 Caudal

El caudal total máximo alcanza los 32 m<sup>3</sup>/h y el mínimo de 0,5 m<sup>3</sup>/h

El valor más frecuente es entre 1 y 10m<sup>3</sup>/h.

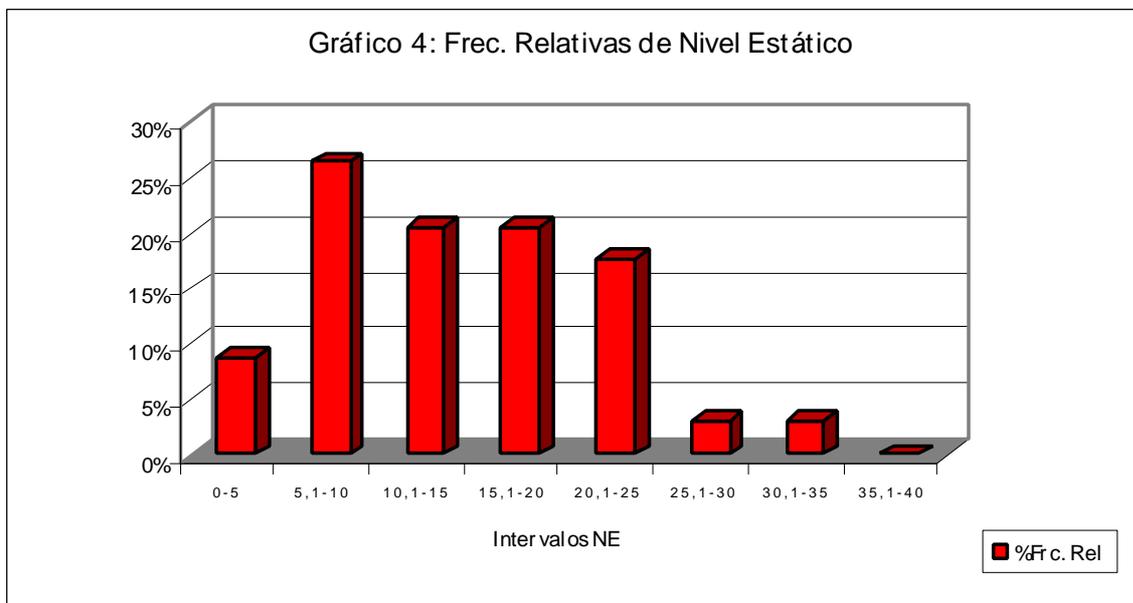
**Gráfico 3**



### 5.4.3 Niveles estáticos

Los niveles estáticos son normalmente cercanos a la superficie, aproximadamente en el 80% de los casos se sitúan antes de los 20 metros. Los valores más frecuentes se encuentran entre 5 y 10 m.

### Gráfico 4



### 5.4.5 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.

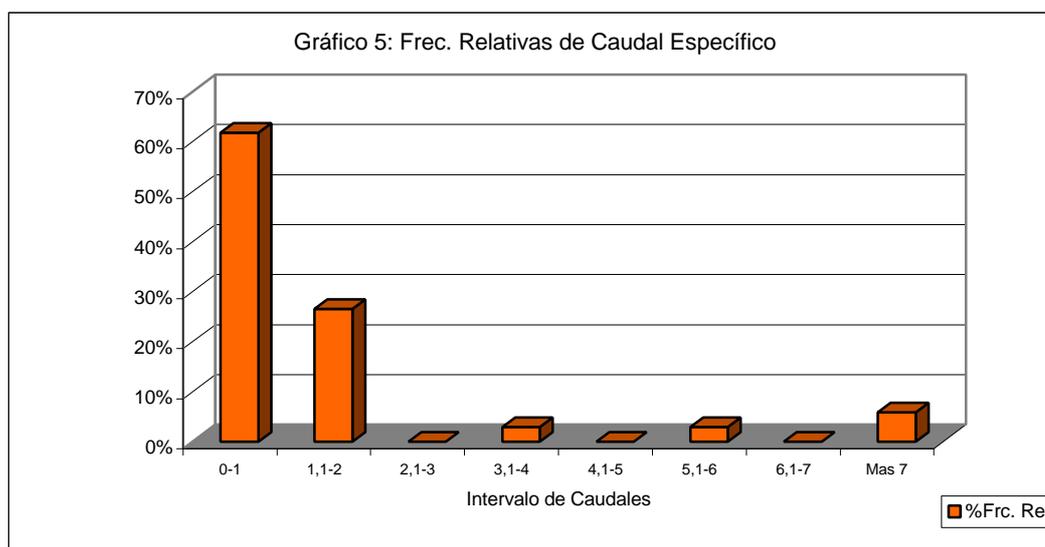
Las principales características hidrogeológicas del Basamento Cristalino son la heterogeneidad y la anisotropía. Es poco frecuente que en un mismo medio fracturado, los aportes de agua sean originados por estructuras semejantes. Sin alcanzar a realcionar, las orientaciones portadoras con el Caudal Específico,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

El valor promedio de Caudal Específico es de  $2,43 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ .

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 de este sistema fisurado.

### Gráfico 5



## 6 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 fijamos un caudal medio de  $11 \text{ m}^3/\text{h}$ , se estaría extrayendo  $143 \text{ m}^3/\text{h}$  para un régimen de 8 horas de bombeo, lo que en verano alcanzaría un valor de  $1144 \text{ m}^3/\text{día}$

Esta extracción intensiva conjuntamente con distancias entre pozos menores a los 200m determina una sobre explotación del acuífero que causa un pronunciado descenso de los niveles hidráulicos al extremo de haberse agotado cuatro pozos.

Esta situación, determinó la recomendación de impedir la realización de nuevos pozos en el área, mejorar la eficiencia de los sistemas de riego, sustituyendo los antiguos por el sistema de goteo y fijar los horarios de bombeo principalmente en la noche para el

período estival.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1- En la región se distingue una única unidad hidrogeológica, los sistemas fisurados, representados por el Basamento Cristalino.
- 2- Las litologías que funcionen 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 ( $\alpha=2$ )
- 4- Las direcciones preferenciales de las fracturas son en dirección NS y su complementaria.
- 5- Del estudio estadístico se observa que la profundidad más frecuente 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 de su estructura.
- 6- El caudal extraído en el período estival es del orden de 1144m<sup>3</sup>/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 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.

## 8 BIBLIOGRAFIA

- BOSSI, J & NAVARRO, R (1991) *Geología del Uruguay*. Ed. Universidad de la República – Uruguay.
- CAMPAL, N & OYHANTCABAL, P. (1988) *Formación Mosquitos* Actas del 1er Congreso de Uruguayo de Geología.
- CARDELINO, F & FERRANDO, F. (1969) *Carta Geológica del Departamento de Montevideo a escala 1:100000*. Universidad de La República - Uruguay

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