

# CONFIGURACION SCHLUMBERGUER OFFSETS EN LA INVESTIGACION DE AGUA SUBTERRANEA EN LA REGION DEL CHACO TARIJEÑO-BOLIVIA

**Klaus Fielitz<sup>1</sup> & Waldir Soruco**

**Resumen** - En la región sud de la república de Bolivia denominada Chaco Tarijeño con 14.000 km<sup>2</sup> de superficie, se realizaron mediciones de sondeos eléctricos verticales en perfiles con una longitud total de 165 km, con el objetivo de conocer la distribución regional de los sedimentos del subsuelo, se utilizó la configuración denominado “Schlumberguer Offsets” considerando como una variante de la configuración Schlumberguer, cuyo resultado es el de obtener en una sola medición 3 curvas: Una curva centro, una derecha y otra izquierda, las mismas facilita la interpretación cuando se tiene efectos laterales.

El área de estudio se encuentra atravesado por el río Pilcomayo donde los resultados obtenidos están representados en 10 cortes geoelectricos que muestran que en la parte sudoeste del río Pilcomayo donde cañadas o quebradas cruzan los perfiles de medición, las resistividades son mayores y se deduce que aquí el agua subterránea es recargada y tiene menor contenido de sal. En la parte noreste las resistividades del subsuelo son relativamente bajas con posibilidades mínimas para el aprovechamiento de agua subterránea. Los paleocacuces antiguos del río Pilcomayo son considerados como las áreas más importantes con resistividades relativamente altas que indican acuíferos con agua dulce.

**Key word** – Configuración Schlumberger Offsets

## **1. INTRODUCCION**

---

<sup>1</sup> Proyecto CABAS (Convenio Aleman Boliviano de Aguas Subterráneas)

El área de estudio, fue considerado como prioritario y estratégico para la búsqueda de agua debido a las condiciones geológicas y climatológicas que presenta la zona. El estudio se realizó en el sector Noreste y Sudoeste del Río Pilcomayo, distribuidos en perfiles de 60, 30, 20 y 12 km de extensión, obteniéndose resultados diferentes en relación de una zona con otra.

## **2. UBICACIÓN Y OBJETIVOS**

El área de estudio se encuentra al sud de la republica de Bolivia en la provincia Gran Chaco del departamento de Tarija, limita al sur con la republica Argentina, al norte con el departamento de Chuquisaca, al oeste con la serranía del Aguarague y al este con la Republica del Paraguay. Las coordenadas geográficas que delimitan el área de estudio son las siguientes: **(Mapa N° 1)**

Latitud: 21°00' – 22° 00' Sur

Longitud: 62°15' – 63° 45' Oeste

El objetivo es emplear en las mediciones geoeléctricas el método denominado Ofssets, considerado como una variación de la configuración Schlumberger, para determinar y conocer las propiedades geoelectricas de los materiales del subsuelo y detectar potenciales acuíferos que puedan ser explotados.

## **3. CLIMA, VEGETACIÓN Y TOPOGRAFIA.**

Las diferencias climáticas, que varían de subhúmedo a semi-árido, han tenido como resultado que se divida en tres grandes unidades fisiográficas: Chaco Seco, Chaco Húmedo y Planicie de Inundación del río Pilcomayo .

La precipitación media anual varía entre 500 y 600 mm, año en la frontera Bolivia-Paraguay. La temperatura promedio anual es de 25°C, máxima de 45°C y mínima de menos de 0°C. Predominan vientos fuertes de sur a norte y humedad relativa entre 20% y 65%.

La elevada evapotranspiración que se presente en un potencial de 1300-1500 mm/añual, debido a las altas temperaturas y a las precipitaciones estacionales mínimas, ocasiona un constante déficit de humedad en el suelo, constituyendo el factor limitante fundamental para el desarrollo agrícola-ganadero.

La topografía mayormente es casi plana, aunque en algunos sectores es ondulada. En forma muy esporádica se presentan algunos cerros de poca altura.

Dos grandes ríos vierten sus aguas a la llanura del Chaco, ellos son el río Parapetí y el río Pilcomayo. Estos ríos tienen sus nacientes en la Cordillera de los Andes, luego cruzan el Subandino y finalmente vierten sus aguas a la llanura chaqueña. El Chaco Seco, con clima semi-árido, carece de recursos hídricos superficiales, siendo el agua subterránea el casi único

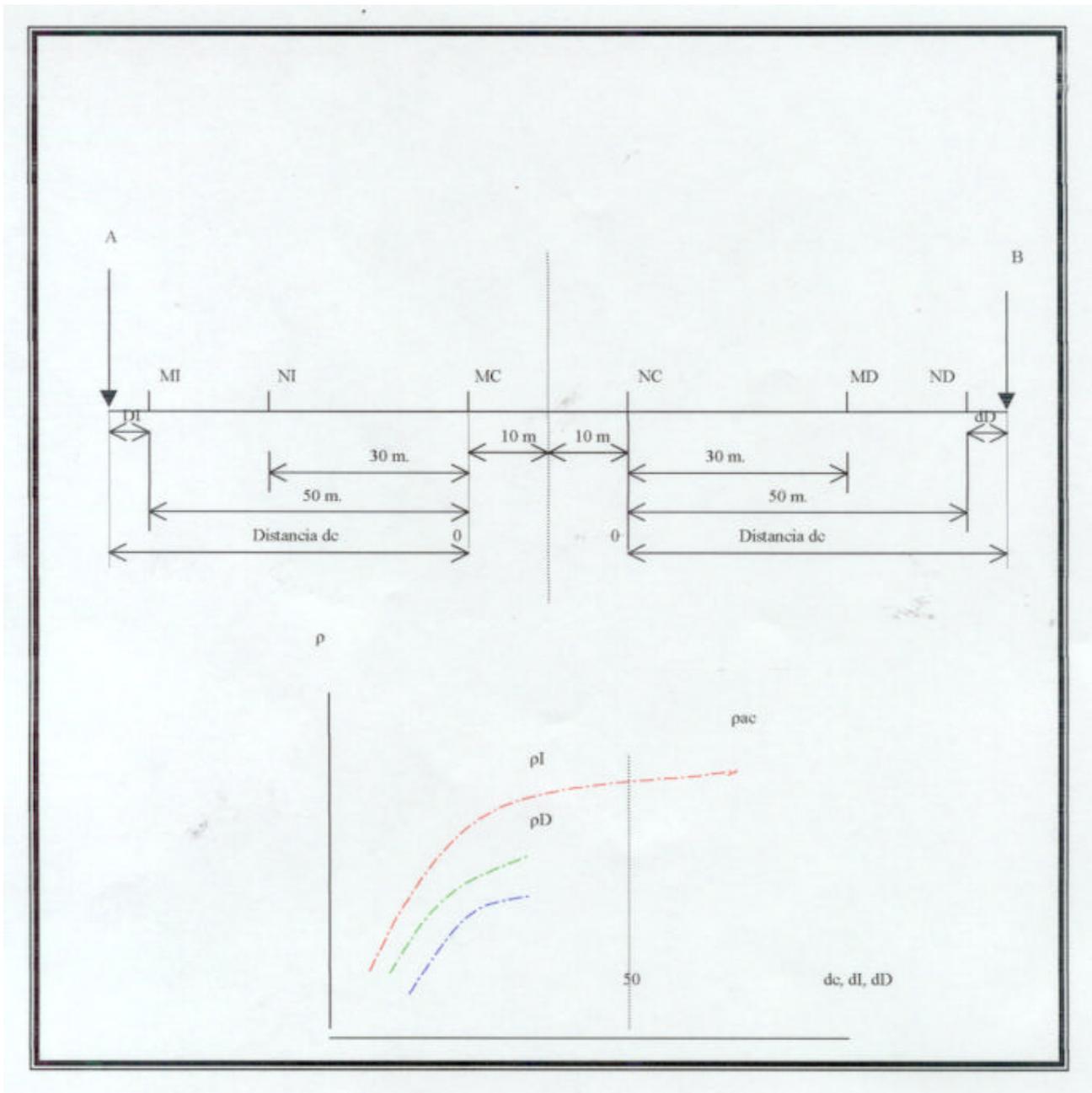
## **4. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA**

### **4.1 METODO SCHLUMBERGER OFFSET**

Se lo define como una variación del método Schlumberger, es una configuración creada por la Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (**BGR**) de Alemania.

Esta basado en los mismos principios y fundamentos teóricos del método Schlumberger, con la característica y ventaja de que este método ayuda a reconocer inhomogeneidades laterales que interfieren en las curvas de sondeos.

En un sólo sondeo se obtienen tres curvas: Una curva centro, una izquierda y otra curva derecha, de donde se puede elegir una sola para la interpretación. En cuanto a su configuración es la siguiente:



A medida que el parámetro aumenta, se hace mayor la apertura del dispositivo, obteniendo de esta manera información correspondiente a profundidades mayores.

Los datos obtenidos están representados por medio de curvas en función de la distancia entre electrodos, se grafica en papel bilogarítmico donde las resistividades aparentes se llevan en las ordenadas, y en las abscisas las distancias  $AB/2$ .

## 4.2 EQUIPO DE GEOELECTRICA

El equipo geoelectrico utilizado para las mediciones, fue construido por la Bundesanstalt fur Geowinssenschaften und Rohstoffe (**BGR**), de Alemania, es un modelo diseñado para este tipo de mediciones, tiene una elevada potencia de transmisión (800 W

de potencia), y una gran sensibilidad y exactitud del amplificador de medición, se puede medir voltajes de hasta aproximadamente 50 V, con un bajo porcentaje de error.

Este equipo esta constituido por 6 box, 3 en la parte superior y 3 en la parte inferior. Dos de los box en la parte inferior se constituyen en los canales de potencia cada uno de ellos con 400 W, el tercer box llega a constituirse en el control de la intensidad de corriente variando en un rango entre 200 y 2000 mA, en este mismo box están dos pulsadores de medición, uno manual y el otro automático, ambos utilizados de acuerdo a la programación del trabajo.

En la parte superior del equipo dos de los box son los controles para la calibración, compensación y el control del voltaje (mv) que varía en un rango de 20, 200 y 2000 mv. que de acuerdo a las circunstancias requeridas se aumenta o disminuye el voltaje, conjuntamente a estos se encuentran los puertos de conexiones para los electrodos de potencia. El tercer box en la parte superior es el transmisor de los datos de medición a través de un puerto de conexión estándar con una computadora "Notebook", que almacena los datos, los graba en un diskette y representa la curva de mediciones en la pantalla.

## **5. RESULTADOS**

### **5.1 RESULTADOS DEL SECTOR SUDOESTE DEL RÍO PILCOMAYO**

#### **5.1.1 Puntos de vista generales sobre la interpretación de los sondeos**

En los perfiles considerados a continuación, en parte, el nivel del agua subterránea está a una profundidad relativamente grande, así por ejemplo en el perfil E, está a 90-125 m de profundidad, en el perfil F a 125-135 m de profundidad, en base a observaciones de pozos existentes en la zona. Esto tiene dos consecuencias importantes para los sondeos geoeléctricos.

Por una parte, a mayores profundidades se reduce la resolución espacial del método de medición. Así, a una gran profundidad, el método de medición "ve" capas alternantes como un paquete grueso de capas con una resistividad promedia.

El segundo efecto del nivel relativamente bajo del agua subterránea es el siguiente: Como en las capas subterráneas secas generalmente hay mayores contrastes de resistividad que en las capas saturadas de agua, en las curvas de sondeo frecuentemente se registran grandes variaciones en las resistividades para la zona encima del nivel del agua subterránea. En las curvas de sondeos geoeléctricos, tal cambio de resistividades tiene como resultado el así llamado efecto de anisotropía. Además, por las capas alternantes se hace más grande la variedad de modelos de capas equivalentes que pueden ser asignados a una curva de mediciones.

Los dos efectos juntos dificultan la interpretación de las curvas de sondeo en áreas donde el agua subterránea está a un nivel bajo.

Como la relación entre la profundidad de un cambio de resistividades y la profundidad del nivel del agua subterránea tiene efectos sobre la interpretación de los datos, es necesario tener informaciones sobre el nivel del agua subterránea, de los pozos existentes.

### 5.1.2 Perfil D

El perfil D va en dirección oeste-este, aprox. a 15 km al norte de la frontera entre Bolivia y Argentina. Como tiene una longitud de unos 55 km, en seguida presentaremos los resultados en cuatro secciones.

#### **Sección D(1) - D(2):**

La sección D(1) - D(2) es la sección del perfil D que está más al oeste. Aquí, el nivel del agua subterránea probablemente esté a unos 70-90 m debajo del suelo. Esta estimación, que se basa en datos de las perforaciones El Breal y Sanja Honda, se incluye en la evaluación. Significa que las áreas de resistividad representadas como azul o verde oscuro están encima del nivel del agua subterránea, y por lo tanto no son interesantes para cuestiones de agua subterránea.

La sección del perfil comienza en el oeste en la cadena de colinas terciarias, que va desde Yacuiba hasta Villamontes. Allí, debajo del nivel del agua subterránea se miden resistividades relativamente bajas, de aprox. 12-17 ohm m, que indican condiciones desfavorables para la explotación del agua.

En los puntos de sondeo D8 y D9, por otra parte, hay resistividades entre 38 y 43 ohm m, lo cual hace suponer condiciones más favorables. En D13 y D14, nuevamente se pueden llegar a conclusiones desfavorables, especialmente por el nivel relativamente bajo del agua subterránea. En D15, finalmente se tiene resistividades entre 28 y 33 ohm m en el rango de profundidades que interesa. **(Fig. N° 1)**

#### **Sección D(2) - D(3):**

En esta sección, en D16, debajo del nivel del agua (estimado en 70 m debajo del suelo) hay resistividades de aprox. 35-40 ohm m. En el resto del perfil, las resistividades están en el rango de aprox. 12-25 ohm m, con lo cual son relativamente bajas. En el área entre D18 y D24, el perfil corta una elevación plana, donde probablemente afloran formaciones terciarias. Las resistividades mayores que parecen haber en D29 están encima del nivel del agua; por lo tanto, no son de interés. **(Fig. N° 2)**

### ***Sección D(3) - D(4):***

En esta sección de perfil, el nivel del agua debe ser fijado aprox. entre 66 m (Barro Blanco), y 52 m (La Burra). En D35 y D36, se miden resistividades de aprox. 35-40 ohm m. hasta una profundidad de aprox. 145-165 m. En D31 y D32, las resistividades en el rango de profundidades que interesa están aproximadamente 10 ohm m menor. Esto corresponde, cualitativamente, a las mediciones de las perforaciones de La Burra y Barro Blanco (desafortunadamente, las mediciones de perforaciones no pueden ser evaluadas en forma cuantitativa, ya que no hay datos de lodo y de invasión).

En todos los puntos de sondeo, a mayores profundidades se observan bajas resistividades, con valores menores a 17 ohm m. Hacia el este, estas bajas resistividades ocurren a profundidades cada vez menores. En D43, todas las capas debajo del nivel del agua tienen resistividades muy bajas, entre 6 y 10 ohm m. La tendencia hacia menores resistividades continúa en la siguiente sección de perfil. **(Fig. N| 3)**

### ***Sección D(4) - D(5):***

En la totalidad de la sección de perfil se observan resistividades que van desde bajas hasta muy bajas. En profundidades hasta aprox. 80 m, frecuentemente se encuentran resistividades alrededor de los 4 ohm m, que seguramente se deben a una salinización del agua subterránea.

Esta interpretación se ve apoyada por los datos del Pozo Camotero, que está aprox. 4 km al sur del punto de sondeo D57. Allí, se midió una conductividad del agua de 2900 microsiemens por cm (y un nivel del agua de 22 m bajo superficie).

La resistividad observada a mayor profundidad en todos los puntos de sondeo, de aprox. 12-17 ohm m, es aproximadamente igual a la resistividad en la profundidad observada en los perfiles anteriores. Estos valores pueden ser interpretados tanto como una salinización reducida del agua subterránea, como también como una existencia de sedimentos con un contenido relativamente elevado de arcilla y arena fina. **(Fig. N° 4)**

### **OBSERVACIONES EN LA TOTALIDAD DEL PERFIL D:**

En las primeras tres secciones del perfil D, es notable que todos los puntos de sondeo en los cuales se midieron resistividades relativamente elevadas, por ejemplo D8, D9, D16, D35 y D36, están relativamente cerca de quebradas. Si esto puede ser considerado como una coincidencia sistemática, esto significa que en este área las resistividades subterráneas

son influenciadas, en parte, por la recarga de agua subterránea, que influye en la salinidad del agua.

En términos generales, los datos del perfil D, en particular aquellos de las últimas dos secciones de perfil, dan un cuadro que, en la región observada, es difícil reconciliar con la idea de una salida de agua subterránea de la faja subandina debajo del Río Pilcomayo o hacia el Río Pilcomayo .

Las resistividades bajas medidas en la sección del perfil que está más al este demuestran que la salinización observada en el Pozo Camotero continúa de allí por lo menos 12 km hacia el noroeste. De acuerdo a los datos existentes, la posibilidad de la existencia de un acuífero de agua dulce, de un caudal significativo, puede ser excluída en esta región.

Sería interesante investigar la cuestión de si la región de resistividades reducidas con salinización está bastante limitada, o si continúa en dirección norte y sur.

### 5.1.3 Perfil E

El perfil va desde el comienzo del perfil D, aprox. 30 km hacia el norte. A continuación, lo presentaremos en dos secciones. A lo largo del perfil, hay profundidades relativamente grandes del nivel del agua subterránea. Así, en la perforación El Breal (cerca del sondeo E7), la profundidad del agua subterránea es de aprox. 90 m, en San Antonio, aproximadamente en la mitad del perfil, aprox. 123 m. Esto tiene efectos en los sondeos eléctricos tratados en el punto 4.1.

#### **Sección E(1)-E(2):**

Como ya mencionamos arriba, el nivel del agua subterránea en esta sección de perfil esta aproximadamente a 90-120 m de profundidad. Así, las áreas de resistividad elevada, representadas en azul y verde, están encima del nivel del agua. Debajo del nivel del agua, frecuentemente se observan resistividades entre 17 y 23 ohm m. Solo en E3 las resistividades son algo mayores que en los puntos cercanos. Sin embargo, aquí, al igual que en otros puntos, la confiabilidad de las resistividades evaluadas depende de la confiabilidad de la profundidad (estimada) del nivel del agua subterránea. **(Fig N° 5)**

#### **Sección E(2) - E(3):**

Esta sección de perfil es la prolongación, hacia el norte, de la sección anterior. En la parte sur, en el rango de profundidades que interesa nuevamente se observan resistividades alrededor de los 20 ohm m. hacia el norte las resistividades aumentan

ligeramente hasta aprox. 23-30 ohm m. Sin embargo, no se pueden considerar favorables las condiciones para la explotación de agua, especialmente si se considera que los 120 metros superiores, aproximadamente, no tienen agua, y que en profundidades de aproximadamente 150-200 m, las resistividades vuelven a bajar a menos de 23 y a menos de 17 ohm m, respectivamente. . **(Fig N° 6)**

### 5.1.3 Perfil F

En esta sección de perfil, en el rango de perforaciones que interesa nuevamente se hallan resistividades entre los 17 y los 30 ohm m. (en algunos casos también menores a 17 ohm m). Por lo tanto, no se trata de valores elevados con respecto a la esperanza de agua subterránea. En los puntos F5, F7 y F14, las resistividades son ligeramente elevadas, en comparación con los sondeos cercanos. En ambas partes, delas quebradas cruza el perfil. Así, los aumentos en las resistividades están relacionadas con una cierta probabilidad de recarga local de agua subterránea. En caso que en los dos paquetes de capas con 23-30 ohm m. se trata de capas alternantes de materiales de diferentes tamaños de granos, tampoco es improbable la existencia de capas arenosas. **(Fig. N° 7)**

## 6. RESULTADOS DEL SECTOR NORTE Y NORDESTE DEL RÍO PILCOMAYO

### 6.1 Perfil G-G'

#### Sección G (1), G (2)

De una manera general, se observa que en gran parte del área mostrado por la vista en corte las resistividades dominantes son relativamente bajas (de 5 a 45  $\Omega$ m), solo en la parte superior oeste se tienen resistividades relativamente elevadas (de 60 a 85  $\Omega$ m). La siguiente interpretación, se realiza considerando que el agua subterránea es dulce.

En la parte oeste, con los sondeos G2 y G3 se determino un cambio brusco en la continuidad lateral de las capas detectadas por los sondeos al este de G4. A dos kilómetros al oeste del sondeo G2, se tienen afloramientos de rocas terciarias, por esta razón se puede indicar que ambos sondeos (G2 y G3), detectan el terciario por debajo de una delgada cubierta superficial cuaternaria. Por lo anterior, se puede dar la siguiente interpretación: Suprayaciendo al área de baja resistividad, aprox. de 8 a 13  $\Omega$ m (parte basal), interpretada como arcilitas terciarias, se tiene un paquete con resistividades relativamente elevadas (aprox. 55-75  $\Omega$ m), que son interpretadas como areniscas. Por encima, nuevamente las resistividades son relativamente bajas (aprox. 18-30  $\Omega$ m); litológicamente puede corresponder a limolitas con intercalaciones de arcilitas.

Suprayaciendo a esta última, se tienen resistividades relativamente altas (aprox. 75-90  $\Omega\text{m}$ ); que son interpretadas como sedimentos arenosos.

En la parte inferior o basal, a lo largo de todo el corte y mostrando una morfología irregular en sus bordes y/o límites superiores (aprox. desde 30-290 m hacia profundidad), se tiene resistividades relativamente bajas (rojo, aprox. 8-13  $\Omega\text{m}$ ); litológicamente toda esta gran área se puede interpretar como una sola formación, constituida por sedimentos arcillosos; sin embargo, considerando que la parte inferior en el extremo oeste fue interpretado como arcilitas, no se descarta la posibilidad de la continuidad de esta misma litología a lo largo de toda la parte inferior del perfil. Suprayaciendo a la anterior, se tienen paquetes con resistividades mayores, comprendidas entre 13 y 45  $\Omega\text{m}$ ; en este caso, litológicamente se puede asignar a sedimentos tales como arenas finas y limos.

En la parte superior oeste, se tienen resistividades relativamente altas (azul, aprox. 75-90  $\Omega\text{m}$ ), que pueden ser interpretadas como sedimentos arenosos; producto de la erosión de areniscas de las colinas de terciarias situadas al oeste.

Por último en la parte superior-este del corte, por debajo de una delgada capa de sedimentos arcillo-limosos, se tiene un paquete de sedimentos con resistividades bajas 5  $\Omega\text{m}$ ; litológicamente se puede corresponder a sedimentos puramente arcillosos; sin embargo, no se descarta la posibilidad de que pueda estar bastante influenciado por la calidad del agua subterránea. **(Fig N° 8)**

## 6.2 Perfil L

En el Perfil L, encima del nivel del agua subterránea, que está aproximadamente a los 22 m, hay resistividades relativamente elevadas, mayores a los 30 ohm m. Esto es el caso en los puntos L43, L56, L129, L140 y L146. En base a las resistividades se puede deducir la existencia de capas arenosas, que llevan agua dulce. Los resultados de sondeo en L146 se correlacionan bien con las informaciones litológicas y las informaciones geofísicas de perforaciones, de la perforación Establecimiento. La observación de que en la parte superior de las capas llenas de agua subterránea las resistividades son algo menores está de acuerdo con el resultado de la medición de la perforación. La razón es, obviamente, que aquí hay capas de arena fina con una frecuencia algo mayor. Las resistividades algo menores en L86 posiblemente aparecen algo exagerados en la vista de corte, ya que faltan informaciones en las cercanías de L86.

Los puntos L146, L140 y L129 están en la Cañada El Quirquincho, una depresión ligera en la cual hay varios canales de desagüe, los puntos L43 y L56, en una depresión más al norte. En mediciones anteriores, en las elevaciones ligeras entre las cañadas se

observaron resistividades menores, que probablemente señalan agua un poco más salada. En general, las observaciones apoyan la hipótesis de que en el abanico cuaternario se recarga el agua subterránea sobre todo en las zonas de las cañadas. **(Fig N° 9)**

## **7. CONCLUSIONES.**

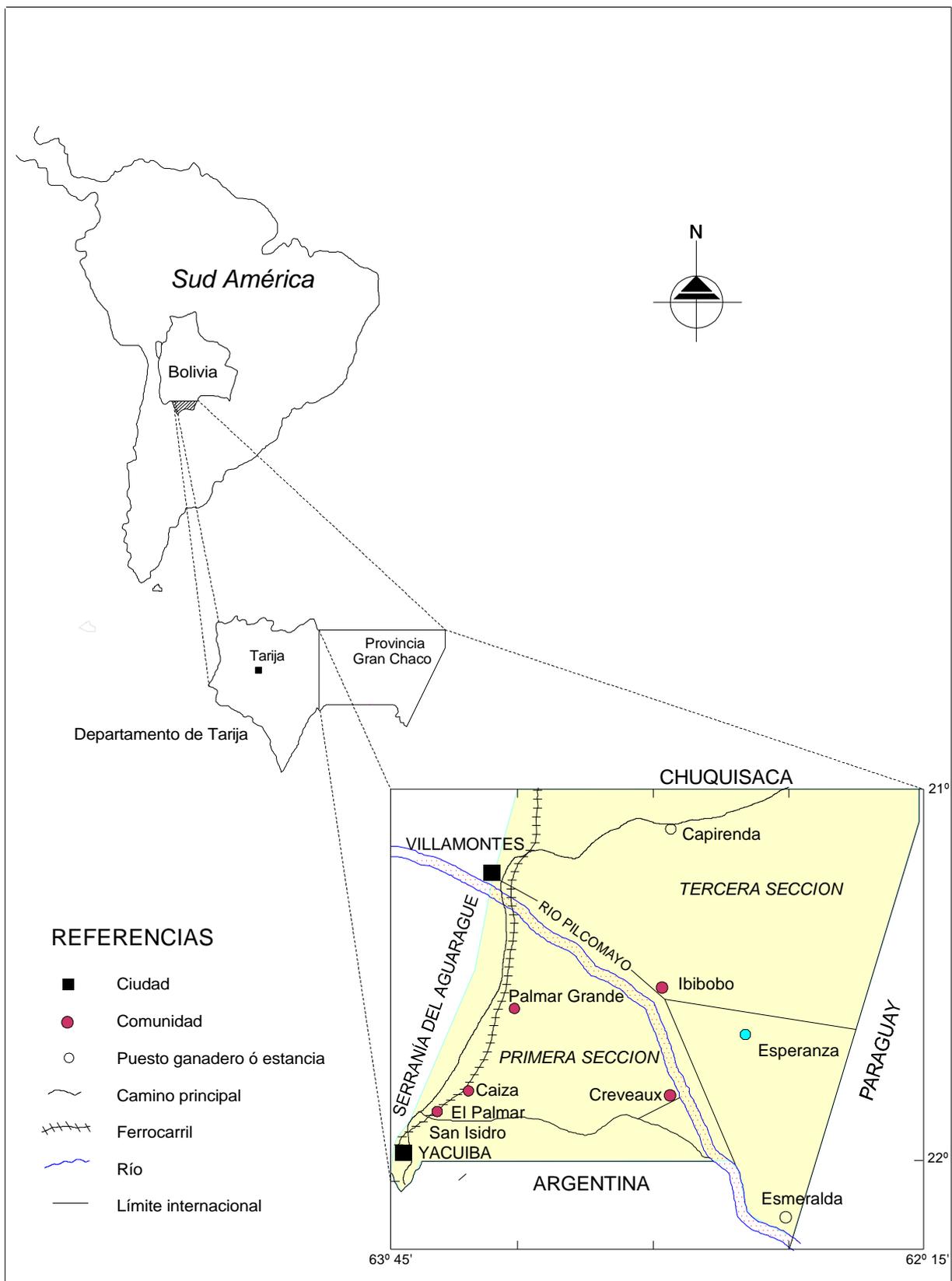
Las conclusiones que resultan del presente trabajo son las siguientes:

- En la parte oeste de la región investigada, se observa que en muchos lugares, donde los perfiles cruzan la quebradas, hay resistividades mayores que en los alrededores. De esto, se puede deducir que el agua subterránea en las cercanías de las quebradas probablemente tenga menor contenido de sal que en los alrededores, y que, en una parte considerable, es recargado allí.
- Las mediciones en el abanico cuaternario del Pilcomayo (en la parte este de la región investigada) indican que allí hay agua dulce principalmente en las depresiones ligeras alargadas, las así llamadas cañadas, mientras que fuera de las cañadas, en particular en el norte, hay una salinización del agua subterránea. Así, las observaciones apoyan la hipótesis de que el agua subterránea fue, o es, recargada, al menos en una parte considerable, en las cañadas.
- En el perfil E-E' las condiciones para la explotación de aguas subterráneas no es favorable, debido a que las resistividades son bajas y considerando que por encima de los 120 m. de profundidad aproximadamente no tienen agua y en profundidades de 200 m. las resistividades vuelven a bajar.
- En el perfil F-F' las resistividades son bajas, aumentando aunque no en forma considerable en el sector de las quebradas sondeos F5, F7 y F14, con cierta probabilidad de recarga local de agua subterránea.
- En el perfil G-G, en general las resistividades del subsuelo son relativamente bajas, con un rango de variación de 5-45  $\Omega\text{m}$ , estas fueron interpretadas como arenas finas, limos y arcillas. La posibilidad de aprovechamiento de aguas subterráneas son mínimas. Sin embargo, si consideramos que en el sector oeste, el nivel de saturación del agua subterránea está por encima de los sedimentos con resistividades relativamente altas aprox. 75-90  $\Omega\text{m}$ , las condiciones para un aprovechamiento de las aguas subterráneas sería favorable solo en este paquete de sedimentos.

- La calidad de agua en algunos sectores generalmente es buena, con posibilidades de aprovechamiento para consumo humano, animal y eventualmente riego (en pequeña escala a nivel huertas), deduciendo que para explotar suficiente agua subterránea y de buena calidad, es mayor en los paleocausas del Río Pilcomayo, que en las regiones de dunas, cubiertas de bosques, esta afirmación basamos a los resultados de las nueve perforaciones de agua existentes, que fueron realizadas en los abanicos aluviales del Río Pilcomayo. El agua extraída tiene una conductividad eléctrica máxima de 1100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se puede ver conductividades claramente mayores en las aguas de los pozos de las regiones de dunas cubiertas con bosques densos.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- CABRERA E. (1988) “**Los recursos hídricos subterráneos y sus posibilidades de aprovechamiento, Programa integral del Chaco, Santa Cruz-Bolivia**”
- FIELITZ k., INSINGER & GARABITO (1992): “**Estudio geoelectrico para la exploración de agua subterránea en el valle de Cochabamba y el Chaco Tarijeño**”, Cochabamba-Bolivia
- GARABITO, QUIROGA & SORUCO (1994): “**Investigación geoelectrica en la parte norte del Chaco Tarijeño**”, Cochabamba-Bolivia
- HUARTE J. (1977): “**Procedimientos de sondeos, Teoría, practica y evaluaciones**”, Servicio de publicaciones de la J.E.N., Madrid, España



**MAPA No 1: UBICACION DEL AREA DE ESTUDIO**