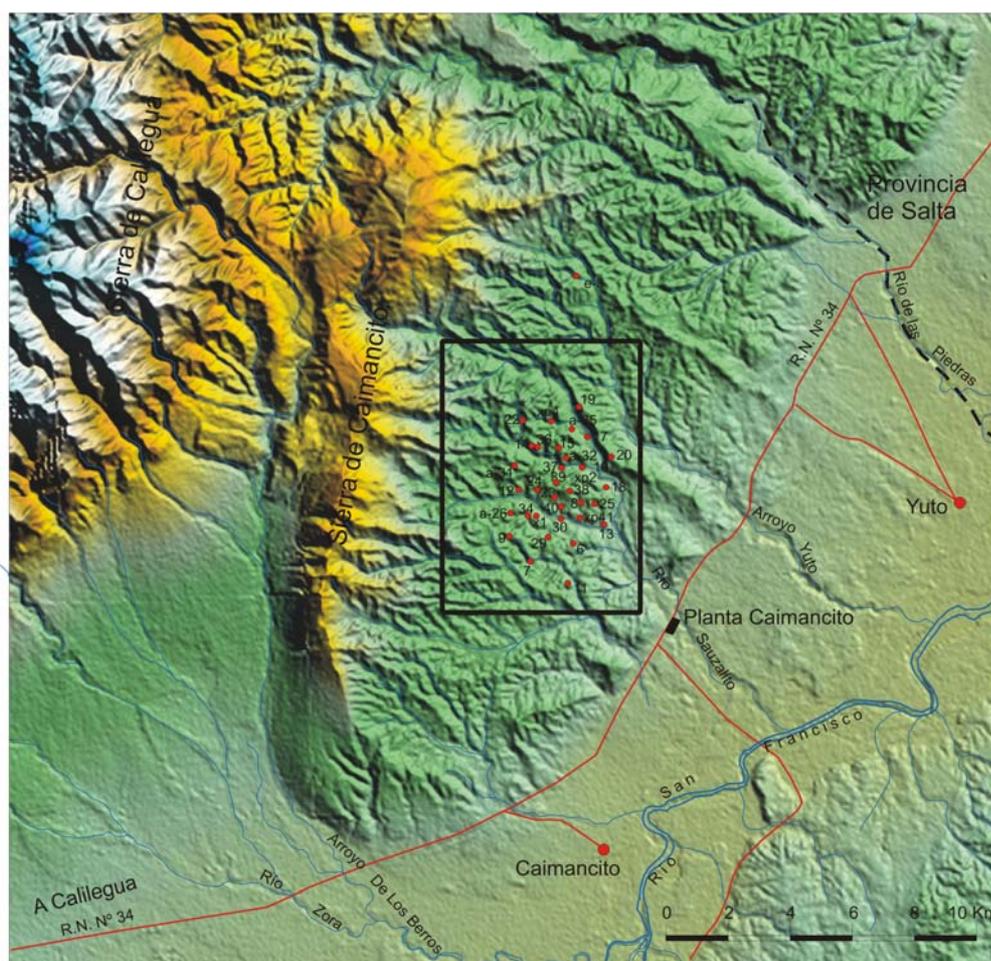


ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA INYECCION PROFUNDA DE EFLUENTES SALINOS EN EL YACIMIENTO CAIMANCITO

Caimancito, Departamento Ledesma

Provincia de Jujuy, República Argentina



Pluspetrol S.A.

Julio, 2008

Av. Batalla de Salta N° 962.
Barrio Ciudad del Milagro. (4400)
Salta Capital
Tel/Fax: 0387- 4251302
e-mail: conhidro@arnet.com.ar
Av. Ocampo N° 1570 (4700)
San Fernando del Valle de
Catamarca
Tel/Fax: 03833 - 454148
e-mail: conhidrocat@arnet.com.ar

INDICE

Personal Interviniente	6
1. Introducción y Objetivos	9
2. Ubicación y Vías de Acceso	9
3. Metodología de Trabajo	10
3.1. Análisis y Valoración de Antecedentes	10
3.2. Interpretación de Imágenes Satelitales	10
3.3. Interpretación de Líneas Sísmicas y Logs de Pozos	10
3.4. Prospección Geoeléctrica	15
3.5. Prospección Magnetotelúrica	17
Dinámica del trabajo MT	18
Procesamiento	21
Inversión de Datos MT	24
3.6. Censo de Puntos de Agua	26
3.7. Ambiente Hidrogeológico	27
3.8. Hidroquímica	28
4. Resultados	29
4.1. Características Generales del Area de Estudio	29
4.1.1. Clima	29
4.1.2. Fisiografía	36
4.1.3. Geología Regional	39
4.1.4. Hidrogeología Regional	44
4.2. Fotointerpretación de la Comarca del yacimiento	48
4.2.1. Introducción	48
4.2.2. Topografía	48
4.2.3. Interpretación	49
4.3. Modelo Geológico Local	52
4.3.1. Geología	52
4.3.2. Geofísica	54
4.4. Ambiente Hidrogeologico	82
4.4.1. Censo de pozos	82
4.4.2. Hidrogeología Local	83
4.5. Características Hidrogeoquimicas	90
4.6. Prefactibilidad de Inyección Profunda	104
5. Conclusiones y Recomendaciones	109
6. Bibliografía	111

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la zona de estudio.	9
Figura 2: Mapa de Isoyetas anuales de la zona de estudio y áreas vecinas.	35
Figura 3: Configuración fisiográfica del Yacimiento Caimancito y alrededores.	38
Figura 4: Fotogeología del Yacimiento de Caimancito y alrededores.	53
Figura 5: Ubicación de la líneas sísmicas en el área Caimancito. En color verde, líneas sísmicas en soporte papel utilizadas en la interpretación.	54
Figura 6: Mapa estructural al tope de la Formación Yacoraite.	58
Figura 7: Mapa isocrónico del nivel reflectivo más superficial en Terciario Subandino.	62
Figura 8: Mapa de ubicación de pozos en el Yacimiento Caimancito (en color negro, se han representado los pozos actualmente en producción).	65
Figura 9: Mapa de ubicación de SEV.	68
Figura 10: Perfil Geoeléctrico Calilegua – Caimancito.	70
Figura 11: Perfil Geoeléctrico Acceso Caimancito – Estación FFCC Pueblo Caimancito.	72
Figura 12: Perfil Geoeléctrico Acceso Caimancito – Acceso Norte Yuto.	74
Figura 13: Perfil Geoeléctrico Yacimiento – Ruta N° 1 – Acceso A Vinalito.	76
Figura 14: Perfil Geoeléctrico Ruta Provincial 84 – Caimancito – Río Zora.	78
Figura 15: Mapa Ubicación de Estaciones MT.	79
Figura 16: Correlación eléctrica tentativa empleando las secciones 1D de cada estación MT.	80
Figura 17: Mapa hidrogeológico de la zona de estudio.	89
Figura 18: Ubicación de los puntos de muestreo de aguas superficiales y subterráneas para análisis físico – químico y puntos de control de campo donde se determinaron conductividad eléctrica y temperatura.	91
Figura 19: Ubicación de los pozos inyectoros 1, 2 y 3 utilizados por la anterior operadora del área. Puntos de muestreo para análisis físico - químico de aguas en la zona inmediata a los pozos inyectoros.	103
Figura 20: Perfil estructural transversal del Yacimiento Caimancito y alrededores, con el horizonte reflectivo superficial del Terciario Subandino.	107

INDICE DE FOTOS

Foto 1: Equipo de geoelectrica en corriente continua.	16
Foto 2: Instalación de Estación MT en inmediaciones de La Lucrecia.	19
Foto 3: Sensor magnético X conectado al equipo receptor.	20
Foto 4: Equipo receptor EMI.	20
Foto 5: Río San Francisco. Vista hacia el norte desde la Estación de Aforos.	37
Foto 6: Vista panorámica hacia el este, desde el río San Francisco. Obsérvese las pequeñas lomadas de las Aguas Calientes.	37
Foto 7: Ejecución de Sondeo Eléctrico Vertical sobre la ruta provincial N° 1.	67
Foto 8: Sondeo Eléctrico Vertical en el camino de acceso al Yacimiento Caimancito.	67
Foto 9: Pozo para abastecimiento de agua existente en la Planta de Almacenaje Caimancito. No se cuenta con información antecedente de esta obra.	84
Foto 10: Pozo en Estación de Aforos Río San Francisco. Constatando profundidad y midiendo nivel estático.	86
Foto 11: Pozo excavado propiedad del Sr. Portal, localizado en inmediaciones de la ruta Provincial N° 1, en inmediaciones de la bifurcación del camino a Vinalito.	87
Foto 12: Pozo perforado (actualmente abandonado) en La Lucrecia.	88
Foto 13: Manantiales de aguas termales en Aguas Calientes. Obsérvese la capa buzante de limolitas y arcilitas y en el medio un nivel de gravas. Toda la secuencia es de edad terciaria. Las manchas oscuras son óxidos.	88
Foto 14: Río Sauzalito, en inmediaciones de la ruta nacional N° 34 (Muestra M19).	92
Foto 15: Arroyo Yuto, sobre ruta nacional N° 34 (Muestra M20).	92
Foto 16: Arroyo Sauzalito en punto de control de muestra M 23. Obsérvese restos de infraestructura en el cauce del río y en las márgenes del mismo.	97
Foto 17: Arroyo El 15, en la zona del puente de caño (Muestra M 26).	97

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1: Dispositivo Schlumberger para prospección geoelectrica en corriente continua.	15
Gráfico 2: Representación de las curvas de campo empalmada (en negro) y de interpretación optimizada (en rojo). En azul se representa el modelo geoelectrico con las resistividades verdaderas y las profundidades.	16
Gráfico 3: Esquema general de un dispositivo de campo para el registro MT.	19
Gráfico 4: Pluviograma Estación Caimancito.	30
Gráfico 5: Termograma de la Estación Caimancito.	30
Gráfico 6: Índice de Gaussén para la Estación Caimancito.	31
Gráfico 7: Pluviograma Estación Yuto.	31
Gráfico 8: Termograma de la Estación Yuto.	32
Gráfico 9: Índice de Gaussén para la Estación Yuto.	32
Gráfico 10: Pluviograma Estación Calilegua.	33
Gráfico 11: Termograma de la Estación Calilegua.	33
Gráfico 12: Índice de Gaussén para la Estación Calilegua.	34
Gráfico 13: Diagrama Piper de la muestra M1- Salmuera de Inyección.	99
Gráfico 14: Diagrama Piper de muestras de aguas subterráneas del entorno al Yacimiento Caimancito.	100
Gráfico 15: Diagrama Piper de muestras de aguas superficiales del entorno del Yacimiento Caimancito.	101
Gráfico 16: Porcentaje de arcillas, arenas y limos en las secuencias terciarias, desde 30 a 1990 metros de profundidad en el Pozo en J.Ca. X- 1.	104

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Precipitaciones medias mensuales para el ciclo 1.935 – 1.990 en la Estación Caimancito.	30
Tabla 2: Registros termométricos estimados para la para la Estación Caimancito.	30
Tabla 3: Índice de Gausсен.	31
Tabla 4: Precipitaciones medias mensuales para el ciclo 1.934 – 1.990 en la Estación Yuto.	31
Tabla 5: Registros termométricos estimados para la para la Estación Yuto.	32
Tabla 6: Índice de Gausсен.	32
Tabla 7: Precipitaciones medias mensuales para el ciclo 1.935 – 1.990 en la Estación Calilegua.	33
Tabla 8: Registros termométricos estimados para la para la Estación Calilegua.	33
Tabla 9: Índice de Gausсен.	34
Tabla 10: Pozos existentes en la zona de estudio.	82
Tabla 11: Mediciones de conductividad eléctrica y temperatura en campo de muestras de agua.	90
Tabla 12: Determinaciones efectuadas a la muestra M1 (Muestra de Salmuera de Inyección).	93
Tabla 13: Determinaciones efectuadas a las muestras M4, M9, M10, M11 y M13.	94
Tabla 14: Determinaciones efectuadas a las muestras M14, M18, M19 y M20.	95
Tabla 15: Determinaciones efectuadas a las muestras M21, M22, M24 y M25.	96
Tabla 16: Determinaciones efectuadas a las muestras M26, M27, M29 y M30.	98

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Línea 8 c.	11
Ilustración 2: Línea 29200.	12
Ilustración 3: Línea 29205.	13
Ilustración 4: Línea 3c.	13
Ilustración 5: Línea sísmica 11c.	55
Ilustración 6: Línea sísmica 13c.	56
Ilustración 7: Línea sísmica 29205.	57
Ilustración 8: Modelo 2D en modo TM de las estaciones MT relevadas.	81
Ilustración 9: Columna estratigráfica sintetizada correspondiente al Pozo J.Ca. x – 1; desde 30 a 1990 metros bajo boca de pozo.	105

PERSONAL INTERVINIENTE

Rodolfo Fernando García

Geólogo, Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. 1988.

Doctor en Ciencias Geológicas. Universidad Nacional de Salta. 1998.

Docente Regular de la Cátedra de Hidrogeología de la Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

Docente de la Cátedra de Hidrogeología Aplicada de la Escuela de Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

Geólogo Consultor del Consejo Federal de Inversiones en el Programa Desarrollo de Pequeña Comunidades en las Provincias de Salta, Jujuy y La Rioja. 1992 - 2000.

Geólogo Consultor de Proyectos Agrícolas, Ganaderos y de Aprovechamiento de los Recursos Hídricos de empresas privadas y estatales.

Geólogo Consultor - Experto FOAR. Fondo Argentino para la Cooperación Horizontal en la República de Guatemala. 2004.

Geólogo Consultor del Servicio Provincial de Agua Potable y Saneamiento de la Provincia de Formosa. Programa Esmeralda. 2004 – 2008.

Representante Técnico de la Provincia de Formosa Sistema Acuífero Guaraní.

Federico Alberto Moya Ruiz

Geólogo: Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. 1989.

Post-grado: Universidad de Tübingen. Alemania. Hydrogeology and Engineering Geology of Tropical and Subtropical Regions". 1990 - 1991.

Geólogo Consultor del Consejo Federal de Inversiones en los Programas APAPC (Agua Potable a Pequeñas Comunidades) de las Provincias de Salta, Jujuy y Santiago del Estero, años 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999 y 2000.

Geólogo Consultor de Proyectos Agrícolas, Ganaderos y de Aprovechamiento de los Recursos Hídricos.

Geólogo Consultor - Experto FOAR. Fondo Argentino para la Cooperación Horizontal en la República de Guatemala. 2004.

Geólogo Consultor del Servicio Provincial de Agua Potable y Saneamiento de la Provincia de Formosa. Programa Esmeralda. 2004 – 2007.

Verónica Rocha Fasola

Geólogo: Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. 1998.

Auxiliar de Investigación del Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA). Cátedra de Hidrogeología – Instituto INASLA. 1997 - 2004.

Docente Regular de la Cátedra de Hidrogeología de la Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

Docente de la Cátedra de Hidrogeología Aplicada de la Escuela de Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

Inscripta en la Carrera de Postgrado Doctorado en Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Salta.

Geóloga Consultora de Proyectos Agrícolas, Ganaderos y de Aprovechamiento de los Recursos Hídricos.

Geólogo Consultor del Servicio Provincial de Agua Potable y Saneamiento de la Provincia de Formosa. Programa Esmeralda. 2004 – 2007.

Néstor Valentín Vitulli

Geólogo. Universidad Nacional de Salta. 1979.

Intérprete Geofísico. Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ingeniería. 1981.

Docente de la Cátedra Geofísica. Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

27 años de experiencia en Geofísica con mayor participación en Interpretación Sísmica, en Yacimientos Petrolíferos Fiscales, YPF S.A. y Repsol – YPF. Ésta incluye análisis, estudio, y propuestas de perforación de pozos petroleros con conocimiento de la geología de subsuelo.

A partir del año 1995 a la fecha; Interprete Geofísico Senior con manejo de Work-stations de los software Geoquest Cía Schlumberger (IES, IESX 2D-3D), software GeoProbe Cía Halliburton. En ambiente PC KINGDOM Suite, de Seismic Micro-Technology, Inc.

Desempeño actual: SAT SRL. (Servicio de Asistencia Técnica), prestando asesoría geofísica en la empresa Repsol – YPF.

Esteban Tálamo

Geólogo: Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. 1998.

Geólogo Consultor de Proyectos Agrícolas, Ganaderos y de Aprovechamiento de los Recursos Hídricos.

Especializaciones en Hidrogeología, gestión de los recursos hídricos y gestión ambiental Colaborador en estudios de identificación de fuentes de agua ante el Consejo Federal de Inversiones (CFI).

Jefe del Subprograma Auditoria, Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable, Gobierno de Salta (2000–2003).

Geólogo de la Agencia de Recursos Hídricos, Gobierno de Salta (2003). Integrante de la Comisión redactora del Proyecto de Reglamentación del Código de Aguas (Ley 7017).

Geólogo Consultor del Servicio Provincial de Agua Potable y Saneamiento de la Provincia de Formosa. Programa Esmeralda. 2004 – 2007.

Cristina Pomposiello

Licenciada en Ciencias Físicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires (UBA.). 1969.

Doctora en Ciencias Físicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. (UBA). 1978.

Profesora Asociada en la Cátedra de Física III UTN. 1999 hasta 2004.

Profesora en el módulo de Energía Geotérmica en el Master de Energía no-convencionales de la Universidad de Salta. 1999 y 2001.

Profesora Invitada en el Doctorado en Ciencias de la Tierra en la Universidad de San Juan. 2001.

Profesora en el módulo de Energía Geotérmica en el Master de Energía no-convencionales de la Universidad de Catamarca. 2005.

Investigadora Independiente CONICET. Centro de Estudios en Recursos Geológicos. 1990–2000.

Investigadora Principal CONICET. Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS). 2000 hasta la actualidad.

Miembro de la Comisión asesora de Ciencias de la Tierra (3-89 al 7-89) CONICET.

Secretaria del Comité Argentino para el Programa de la Litosfera. (7-93 hasta 1996).

Presidenta del Subcomité de Geomagnetismo y Aeronomía CNUGGI (2001 -2006).

Miembro de la Comisión “ad-hoc” de Ciencias de la Tierra para Ingreso a la Carrera de investigador (2001) CONICET.

Integrante de la Comisión de Termalismo en la Salud del Ministerio de Salud (2002).

Alicia Beatriz Favetto

Licenciada en Ciencias Físicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires (UBA.). 1981.

Doctora en Ciencias Físicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. (UBA). 1990.

Auxiliar Docente Curso Protección Radiológica. Comisión de Energía Atómica y Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires.1982.

Docente del Departamento de Física. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires (UBA.). 1992 – 2000.

Técnico Asociado Carrera de Apoyo a la Investigación. CONICET. 1980-1981.

Profesional Asistente Carrera de Apoyo a la Investigación. CONICET. 1982-1988.

Profesional Asociado Carrera de Apoyo a la Investigación. CONICET. 1988-1995.

Investigador Asistente de la Carrera del Investigador. CONICET. 1995-1998.

Investigador Adjunto de la Carrera del Investigador. CONICET. 1998-2005.

Investigador Independiente de la Carrera del Investigador. CONICET. Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS). 2005 hasta la actualidad.

Miguel Fernando García Ortiz

Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ingeniería.2006.

Pasante en Aguas de Salta (SPASSA). Departamento de Catastros.

Encargado Área Proyectos de Conhidro S.R.L.

Marcelo Sánchez López

Geólogo. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales.2007

Geólogo Consultor de Proyectos Agrícolas, Ganaderos y de Aprovechamiento de los Recursos Hídricos.

Técnico Electro – Mecánico.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

A solicitud de Pluspetrol S.A., se realizó un Estudio de Prefactibilidad para evaluar la posibilidad de realizar la Inyección Profunda de Efluentes Salinos en el Área del Yacimiento Caimancito, Departamento Ledesma, Provincia de Jujuy.

2. UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

La zona de estudio se encuentra ubicada a 130 kilómetros al noreste de la ciudad de San Salvador de Jujuy. Se accede por medio de la ruta nacional N° 34, asfaltada y en buen estado de conservación. El Yacimiento Caimancito, se localiza en inmediaciones de esta vía de comunicación (Figura 1).

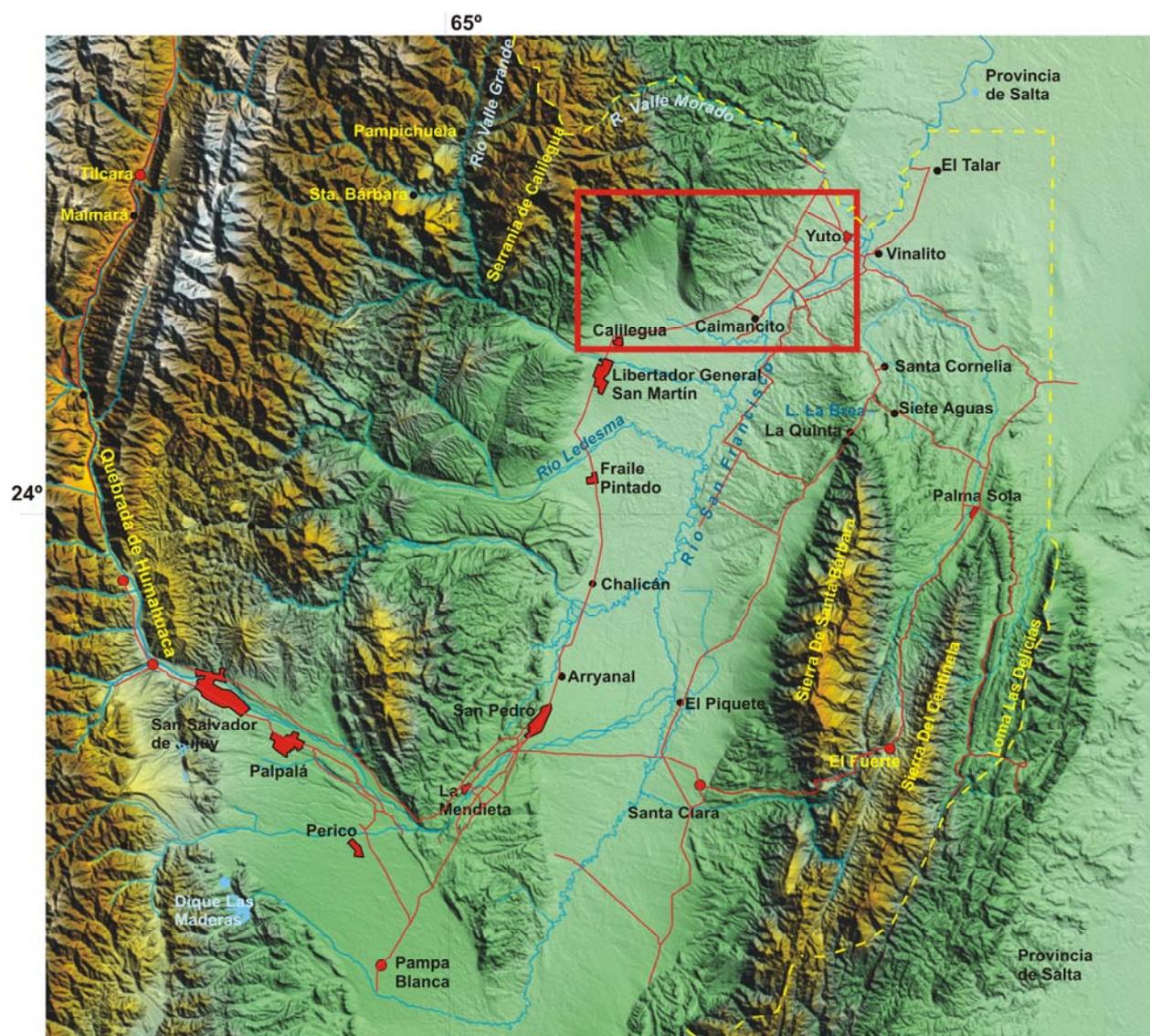


Figura 1: Ubicación de la zona de estudio.

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE ANTECEDENTES

La información referente a las características del ciclo externo del agua subterránea se obtuvo, en parte, de “Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino” (Bianchi y Yañez, 1992); del “Proyecto HIDROMAPA” (Fuentes et. al., 1995) y del estudio “Abastecimiento de Agua a Pequeñas Comunidades Localidades de El Bananal – Yuto” (García, 1995).

Las características litológicas y geométricas del medio de circulación se reconstruyeron a partir de los datos brindados por el Mapa Geológico del Noroeste Argentino escala 1: 500.000” (Yacimientos Petrolíferos Fiscales, 1984); Geología Regional Argentina (Academia Nacional de Ciencias, 1980); Hoja Geológica 2366 – IV. Libertador General San Martín escala 1:250.000 (SEGEMAR); Características Geológicas de la Subcuenca del Río San Francisco. Provincias de Jujuy y Salta” (INCYTH, 1985); Distribución de las localidades hidrotermales de la Provincia de Jujuy y Salta (Arias, et. al., 1986); Geology and Termal Features of El Ramal Area, Jujuy Province, Argentina (Miranda and Johanis, 2000); Caracteres Hidrogeoquímicos de las Aguas Subterráneas de la Zona de Estudio de la Subcuenca del Río San Francisco (INCYTH, 1987) y de Los Recursos Hídricos Subterráneos del Sector Valles Intermontanos de la Provincia de Jujuy (García, Rocha Fasola y Moya Ruiz, 2008).

3.2. INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES

Para esta etapa del trabajo se consultaron las imágenes satelitales Landsat 7 231/76 bandas 741 del año 2000 y las imágenes Quick Bird (0,6 metros) de la zona del Yacimiento Caimancito, provistas por Pluspetrol S.A. La fotointerpretación fue realizada en la Cátedra de Fotogeología de la Escuela de Geología de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Salta, a través de un Servicio Repetitivo y a cargo del Dr. Omar Viera, Profesor Asociado de la mencionada unidad académica. Sobre esta base se interpretó la hidrografía de la región, las principales unidades geomorfológicas y la infraestructura.

3.3. INTERPRETACIÓN DE LÍNEAS SÍSMICAS Y LOGS DE POZOS

Con los datos de coordenadas de los pozos y líneas sísmicas provistas por Pluspetrol S.A., se realizó un mapa base donde se observa la posición de estos elementos. También y una vez georreferenciada la imagen satelital, se integró con la información de infraestructura (caminos, ferrocarril, puentes, etc.), de ríos y arroyos y toda otra información que se consideró de interés para los fines del presente trabajo. Las líneas sísmicas utilizadas (formato SGY) fueron: 2b (sl), 3c, 4c, 5c, 6c, 7c, 8c, 9c, 10c, 11c, 13c, 15c, 2066, 2068, 2070, 2133, 21091, 21096, 21102, 29200, 29201, 29205, 30052, 36003 y 36041. Los perfiles geofísicos (formato LAS) de los pozos consultados fueron: YPF.J.Ca.x-1 (Well0100), YPF.J.Ca.xp-2 (Well0102), YPF.J.Ca.e-3 (Well0103), YPF.J.Ca.xp-4 (Well0104), YPF.J.Ca-6 (Well0106), YPF.J.Ca-7 (Well0107), YPF.J.Ca-8 (Well0108), YPF.J.Ca-9 (Well0109), YPF.J.Ca-14 (Well0114), YPF.J.Ca-17 (Well0117), YPF.J.Ca-18 (Well0118), YPF.J.Ca-19 (Well0119), YPF.J.Ca-23 (Well0123), YPF.J.Ca-24 (Well0124), YPF.J.Ca.a-26 (Well0126), YPF.J.Ca.a-29 (Well0129), YPF.J.Ca.a-32 (Well0132), YPF.J.Ca-37 (Well0137), YPF.J.Ca-38 (Well0138) y YPF.J.Ca-40 (Well0140).

En una primera etapa se trabajó exclusivamente con el sustento digital de las líneas sísmicas 2D existentes en formato SEG Y (24 líneas en total), que fueron provistas por Pluspetrol S.A. La superficie aproximada que abarca este proyecto es algo más de 600 km² y aunque se desconoce la fuente de energía utilizada en la adquisición de estas líneas, deben ser mediante explosivos.

Con respecto a la calidad de la información sísmica de “2D” en general, es de regular a mala, donde la relación señal/ruido es muy baja, adjudicándole esta situación a la época de registración donde la suma del dato no era superior a 1200 o 2400 %; los algoritmos, de baja competencia, filtros deficientes y ausencia total de migración del dato sísmico.

Además, es muy posible que el grupo de líneas hayan sido registradas en distintas épocas y procesadas por distintos centros o distintos procesadores que inciden negativamente en la calidad, por utilizar conceptos y flujos distintos en su confección. Por ser líneas 2D, cada una es tratada individualmente en el proceso.

En una primera instancia, la planimetría y el rumbo de las líneas sísmicas fueron extraídas de los archivos SEG Y, en el cual no figura ni la clase sísmica ni el plano de referencia en la aplicación de las correcciones estáticas. Tampoco se podía realizar el control de que la información sea correcta al carecer del sustento en papel de cada línea. Este último comentario se refiere a que no se tenía la absoluta certeza de que las pendientes de los reflectores sean concordantes con la pendiente de la estructura verdadera (esto debería ser especialmente cierto en las líneas con rumbo norte – sur). También se encontró relaciones estacas-CDP disímiles. Si bien la mayoría de las líneas tienen CDP/2; se encontraron algunas que tienen relación CDP/4, lo que es muy sospechoso o por lo menos, llamativo.

La línea 8c tiene una longitud de +11 Km, mientras que la línea 29200 tiene una longitud en superficie de apenas 2 Km. Si se comparan ambas, se observa claramente que la imagen de la segunda supera ampliamente a la primera, situación que obliga a pensar en una situación de error puesto que la imagen estructural son casi idénticas.

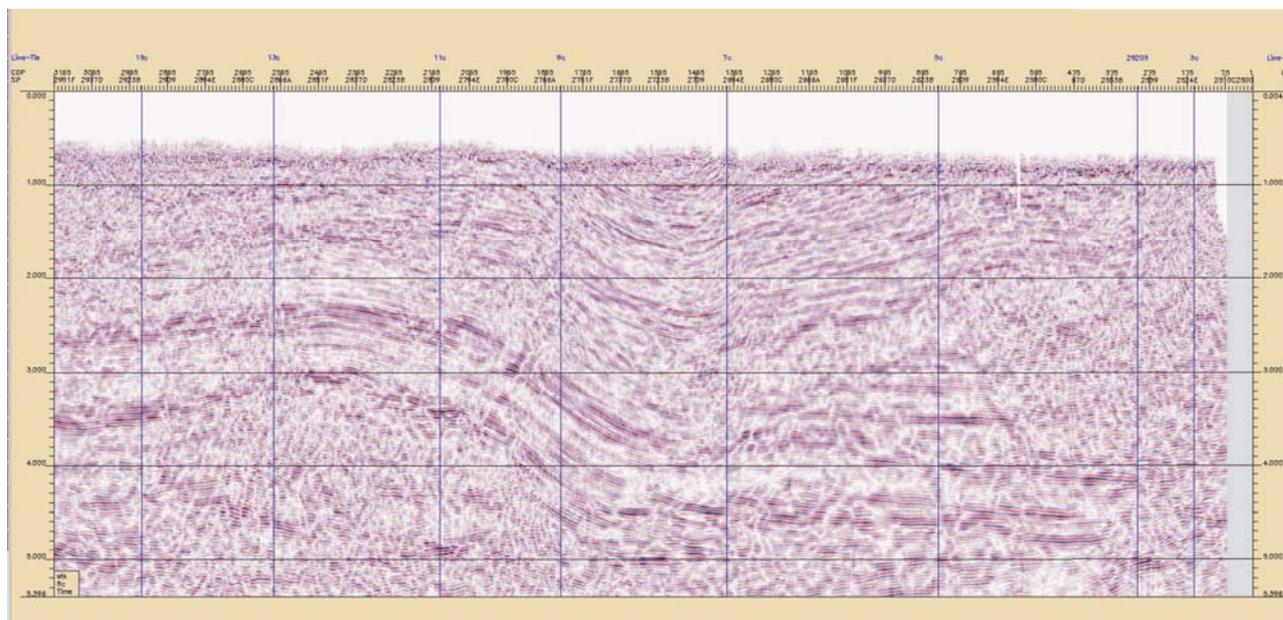


Ilustración 1: Línea 8 c.

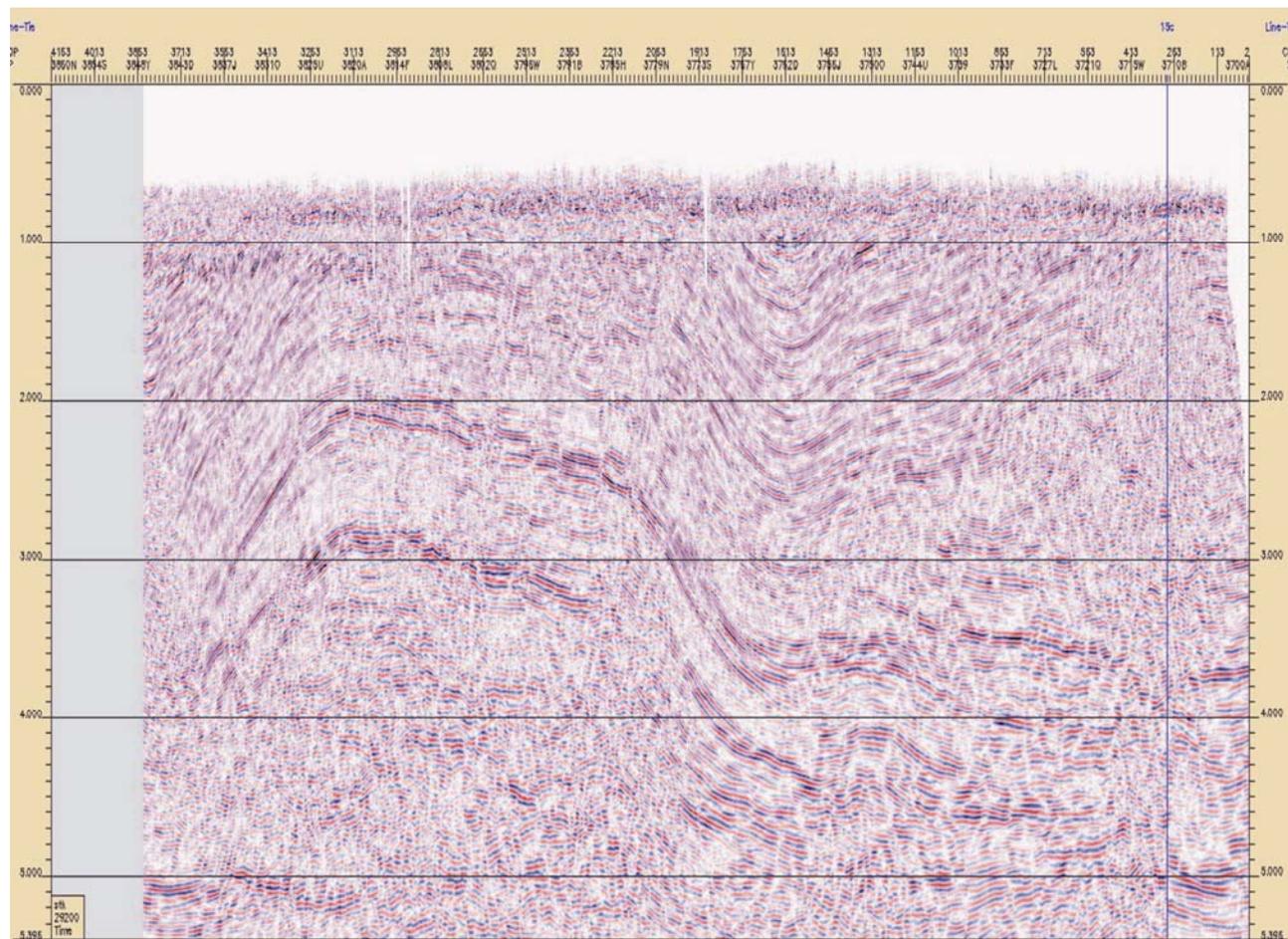


Ilustración 2: Línea 29200.

Otra incertidumbre es la visualización entre las líneas con orientación este-oeste al norte del proyecto: línea 29205 y 3c tienen un trazo casi paralelo (y en su cruce se encuentra el Pozo J.Ca.e-3). En este caso es llamativo que sus imágenes no tengan cierta similitud y por el contrario, sean diferentes.

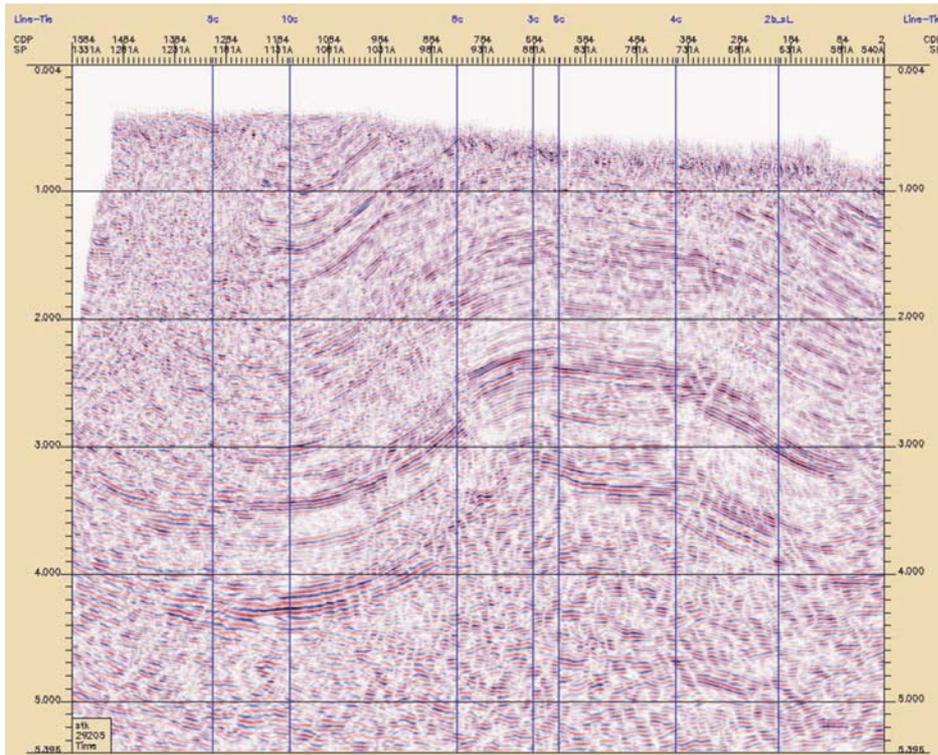


Ilustración 3: Línea 29205.

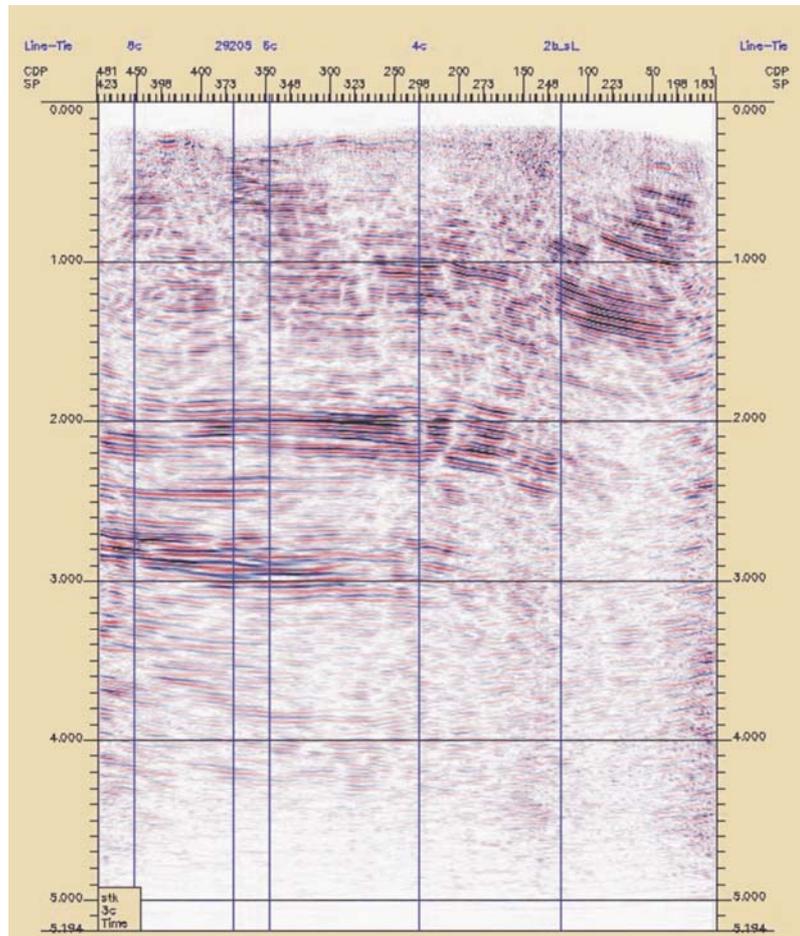


Ilustración 4: Línea 3c.

Debido a los aspectos mencionados y a la incertidumbre generada, se decidió digitalizar desde un plano de ubicación de Líneas Sísmicas generado en el ex - Distrito Geofísico de Y.P.F en la Ciudad de San Pedro de Jujuy. Este plano, a escala 1:50.000, señala claramente la ubicación planimétrica y geográfica de las líneas existentes en el Yacimiento Caimancito y alrededores. También se cuenta como antecedente (y que muestra exacta coincidencia) con el "Rio Colorado Exploration Block – Geological Map", escala 1:100.000 de la Compañía General de Combustible S.A.

Por otra parte, se solicitó a Pluspetrol S.A., el envío en soporte papel de las líneas sísmicas involucradas en el proyecto, sobre las cuales se trabajó siguiendo la metodología usual y tradicional donde se identificaron reflectores característicos que tengan correspondencia con unidades formacionales (Formación Yacoraite y Formación Lumbrera, por ejemplo), con la finalidad de obtener posteriormente un plano isocrónico de uno o más niveles guías más superficiales (Terciario Subandino) y que tengan relevancia desde el punto de vista de la inyección de efluentes.

3.4. PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

Con el objetivo de complementar la información obtenida a través de las investigaciones anteriores, se efectuó un estudio de prospección geoelectrica. Se realizaron 46 sondeos eléctricos verticales con el fin de determinar el espesor de los sedimentos permeables y las condiciones estructurales del subsuelo. La prospección geoelectrica se llevó a cabo por el método del SEV (sondeo eléctrico vertical), con un dispositivo electródico tetrapolar Schlumberger de constante geométrica $K = \pi \cdot ((AM \cdot AN) / MN)$. Las longitudes entre los electrodos de corriente fueron variables, hasta distancias máximas de 2.000 metros. Las separaciones entre los electrodos de potencial, MN, variaron entre 1 y 200 metros.

Como fuente de energía se utilizaron baterías de 9 voltios que interconectadas, alcanzan un valor máximo de 540 voltios (en caso de ser necesario se utilizará un grupo generador con rectificador de corriente para minimizar “ruidos” y obtener mayor penetración de corriente).

La curva de campo se grafica en *tiempo real* en el monitor del equipo observando y controlando cada vez las resistencias de contacto de los electrodos de corriente y la autocompensación de los electrodos de potencial. La interpretación se realiza con programas de computación específicos.

Puesto que con el registro de la resistividad aparente en el campo para cada distancia de OA, se obtiene también los valores de Potencial Inducido (IP) se puede construir la curva de Cargabilidad, expresada en %. De esta manera, posteriormente, es posible presentar el modelo de resistividad verdadera de las distintas capas involucradas en el circuito, como así también su cargabilidad.

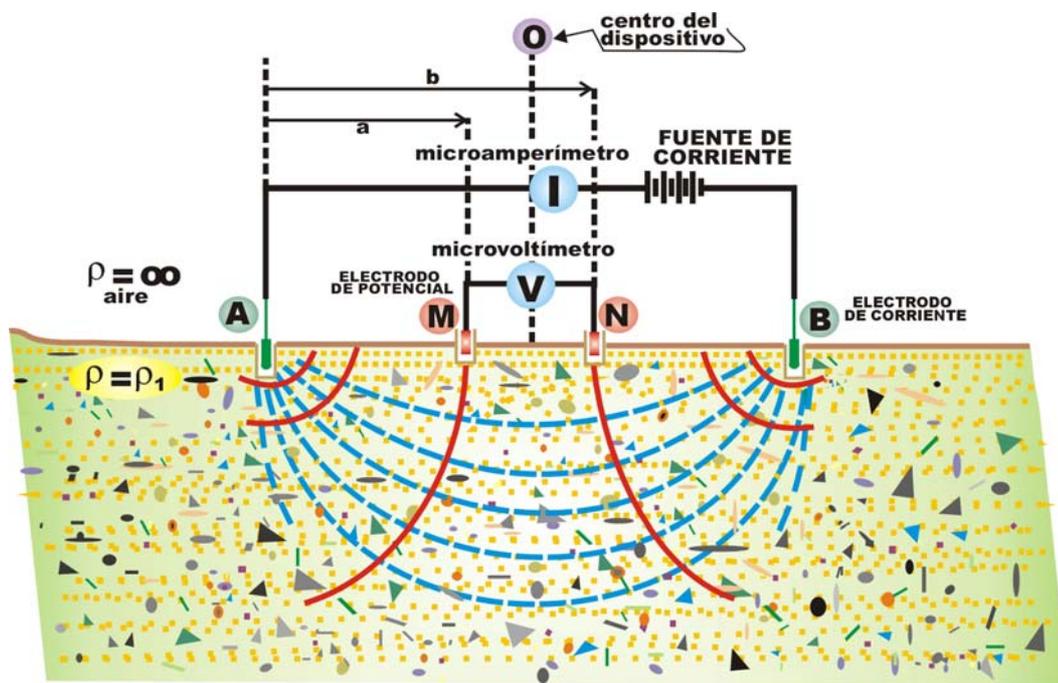


Gráfico 1: Dispositivo Schlumberger para prospección geoelectrica en corriente continua.



Foto 1: Equipo de geoelectrica en corriente continua.

La interpretación se realizó con programas de computación. El resultado final es un gráfico donde las marcas representan a los puntos de la curva de campo empalmada y la línea continua corresponde a la curva de interpretación optimizada que responde al modelo físico y matemático más ajustado.

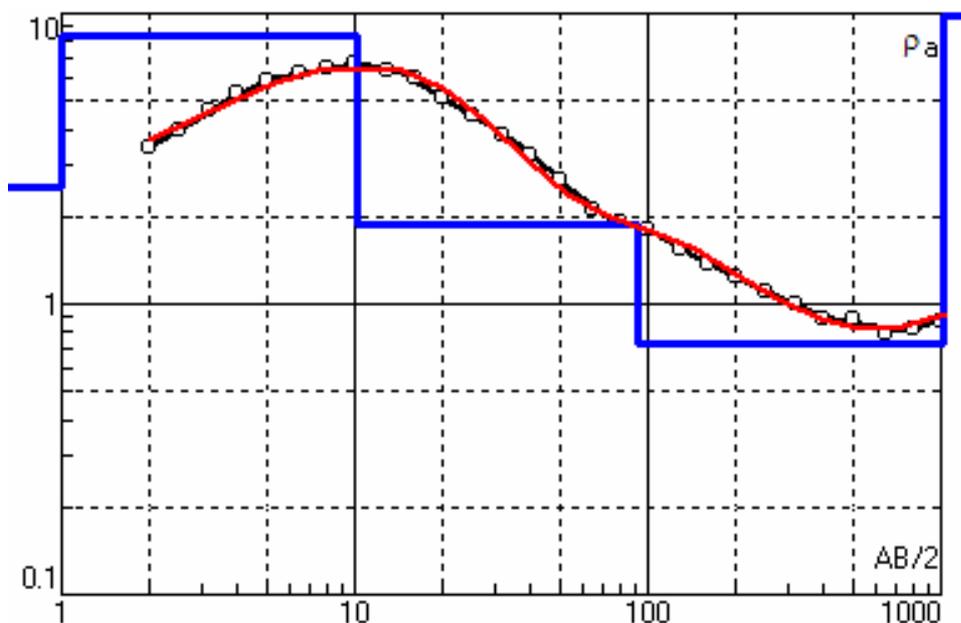
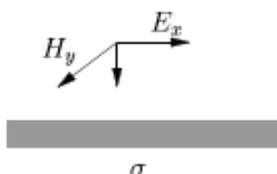


Gráfico 2: Representación de las curvas de campo empalmada (en negro) y de interpretación optimizada (en rojo). En azul se representa el modelo geoelectrico con las resistividades verdaderas y las profundidades.

Las distintas curvas de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) realizados en la zona de estudio, con su correspondiente corte geoelectrico, se adjuntan en Tomo 2.

3.5. PROSPECCIÓN MAGNETOTELÚRICA

En el método MT se utilizan mediciones de campos electromagnéticos (EM) naturales para estudiar la estructura de la conductividad del subsuelo. Las fuentes naturales de los campos MT son esencialmente originadas en la ionósfera y magnetósfera, solamente para las frecuencias más altas hay un efecto atmosférico relacionado con las tormentas eléctricas. En el método MT se asume que los campos en la superficie pueden ser considerados como ondas planas. La mayor parte de la energía es reflejada y una pequeña porción se propaga en el interior de la Tierra. Los campos EM que se generan en respuesta a las ondas primarias incidentes proveen información indirecta de las propiedades eléctricas de la Tierra a profundidades desde decenas de metros hasta cientos de kilómetros, dependiendo de la conductividad del suelo y del rango de frecuencias en el que se registra la señal. Distintas consideraciones pueden ser asumidas para evaluar la respuesta del subsuelo, la aproximación más simple que podemos analizar es la interacción de estos campos naturales con una Tierra perfectamente homogénea. La base de este método es esencialmente la observación de cómo se propaga una onda plana en un medio de conductividad (σ) uniforme. Para este caso la ecuación de propagación es obtenida de las ecuaciones de Maxwell:



$$\nabla_x \bar{E} = i\omega\mu_0 \bar{H} \quad y$$

$$\nabla^2 \bar{E} + i\omega\mu_0 \bar{E} = 0$$

donde no aparece el término de la corriente de desplazamiento porque se desprecia debido a que se satisface que $\varepsilon\omega^2 \ll \omega\sigma$

La solución para este caso es:

$$E_x = Ae^{-ikz}$$

$$H_y = A \frac{k}{\omega\mu} e^{-ikz}$$

siendo: x e y direcciones horizontales perpendiculares entre sí (indistinguibles para este caso) y

$$k = (-i\omega\mu\sigma)^{\frac{1}{2}} = \frac{1-i}{\delta}$$

La velocidad de fase está dada por:

$$V = \omega\delta \quad y \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

Donde ω es la frecuencia en Hz, ε es la constante dieléctrica en F/m, σ es la conductividad en S/m, μ es la permeabilidad magnética en H/m y δ es la longitud de penetración de la onda en metros que disminuye al aumentar la conductividad del medio y la frecuencia de la onda incidente, esta profundidad de penetración ("skin depth") es la que se utiliza para estimar una penetración

promedio de la señal, de tal manera que para obtener información más profunda se necesita procesar periodos más largos y mayor tiempo de medición por sitio.

Dado que los campos medidos en superficie contienen la contribución del campo incidente y aprovechando la simplificación que brinda la hipótesis de onda plana, se define la impedancia Z (o tensor de impedancia magnetotelúrico), que depende de las características del subsuelo. Para evitar la dependencia con la amplitud del campo incidente se define la impedancia como el tensor que resulta del cociente entre los campos eléctrico y magnético de forma tal que:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = (1-i)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad \text{y} \quad Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} = (1-i)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (1)$$

Siendo $Z_{xy} = Z_{yx}$ para el caso homogéneo. O equivalentemente definimos la resistividad aparente como:

$$\rho_{xy} = \frac{Z_{xy}Z_{xy}^*}{\mu\omega} \quad \text{y} \quad \rho_{yx} = \frac{Z_{yx}Z_{yx}^*}{\mu\omega} \quad (2)$$

Donde el * indica que se ha tomado el complejo conjugado y en el caso homogéneo es simplemente $\rho = 1/\sigma$. Es una práctica usual referirse a resistividad aparente (ρ) y fase (φ) en lugar de impedancia. La fase de la impedancia es la diferencia de fase entre E y H. Se utilizan ρ_{xy} y ρ_{yx} , para dos ejes horizontales perpendiculares (x, y) orientando los sensores de E y H en lo posible en las direcciones geomagnéticas NS y EO. En el caso que el subsuelo puede ser

considerado como homogéneo φ será de $\frac{\pi}{4}$ y los valores de ρ_{xy} y ρ_{yx} serán coincidentes y las respectivas fases con una diferencia de π .

Si el subsuelo se interpreta como un conjunto de capas horizontales de diferente conductividad y espesor se tendrá una interpretación 1D de tal manera que la resistividad aparente y fase variarán con la frecuencia de acuerdo a los valores de resistividad y espesor de las sucesivas capas. La componente vertical del campo magnético es cero y la capacidad de inferir las propiedades de cada capa, más allá de la no unicidad de los modelos, es muy dependiente de los contrastes de conductividad y del espesor de las mismas. Cuando existe variación lateral de la resistividad y una dirección de simetría de la estructura, el subsuelo se considerará 2D y el tensor de impedancia se rota de manera tal que una componente del campo E sea paralela a esta dirección y otra perpendicular. En el caso 2D, también se mide otra función transferencia, entre las componentes vertical y horizontal de H, a la que usualmente se refiere como vector de inducción.

La onda incidente en la superficie de la Tierra lo hace con un ángulo de 90° (incidencia normal), a partir de un cálculo simple utilizando la ley de Snell se puede inferir que la onda transmitida será también aproximadamente normal a la superficie.

DINÁMICA DEL TRABAJO MT

En el campo:

- ✓ Diagramación de campaña, número de estaciones, separación etc.
- ✓ Elección de lugares y obtención de permisos para la ubicación de las estaciones MT.
- ✓ Instalación de estaciones MT.
- ✓ Control de los datos in-situ, bajar datos a notebook y procesado en el campo.

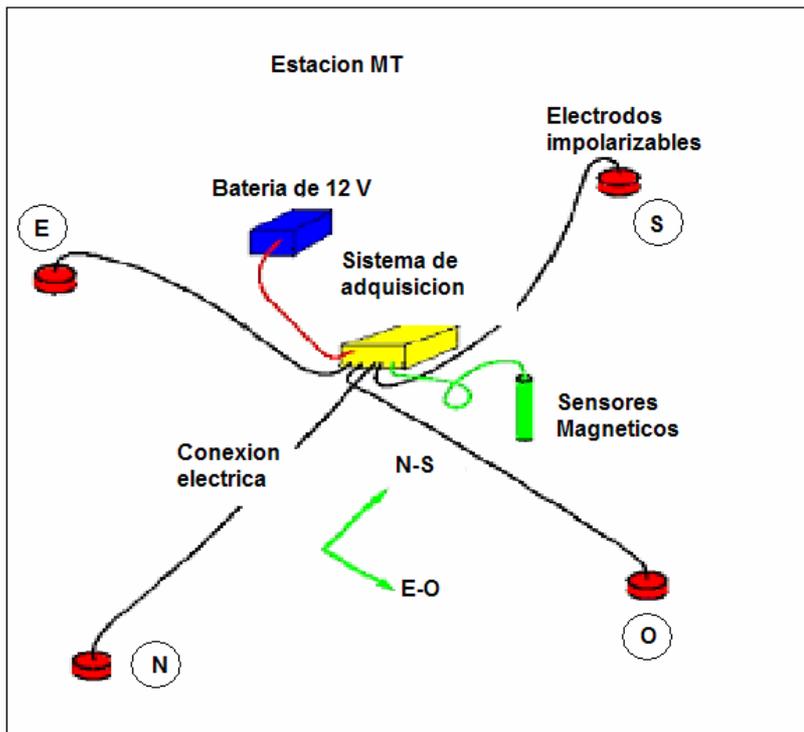


Gráfico 3: Esquema general de un dispositivo de campo para el registro MT.



Foto 2: Instalación de Estación MT en inmediaciones de La Lucrecia.



Foto 3: Sensor magnético X conectado al equipo receptor.



Foto 4: Equipo receptor EMI.

En el gabinete:

- ✓ Procesamiento de datos.
- ✓ Inversión de datos.
- ✓ Comparación de los modelos con la geología y los datos de pozos.

PROCESAMIENTO

Hay un gran número de técnicas para el procesamiento de los datos de MT, donde se pretende transformar las series temporales en información espectral en el dominio de la frecuencia. Si bien el resultado de todos los métodos converge en dar las componentes de Fourier del registro, en la práctica hay diferencias importantes que se deben considerar debido a la característica de la de la señal y la naturaleza de los datos.

Los campos eléctricos y magnéticos naturales entre 10^{-4} y 10^3 Hz son procesos estocásticos. Los registros son series temporales de los cuales se toman muestras (segmentos de la serie). En general, para representar el registro temporal en el dominio de la frecuencia se utiliza el análisis armónico de Fourier. La hipótesis fundamental es que para una serie de longitud T_0 se supone que la señal es periódica de periodo fundamental T_0 lo cual impone una restricción sobre el espaciamiento entre armónicos y presupone una buena representación utilizando un numero finito de los mismos.

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} X_k e^{-ik\omega_0 t} \quad \text{con} \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

Donde X_k está dado por:

$$X_k = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) e^{-ik\omega_0 t} dt$$

Donde se obtiene la amplitud de las distintas frecuencias a través de los coeficientes X_k , dado que el rango de frecuencias estará determinado por el largo de la serie N y el intervalo de muestreo

Δt de tal forma que el intervalo de frecuencias estará comprendido en $\left[\frac{1}{N\Delta t}, \frac{1}{2\Delta t} \right]$ el máximo armónico será $k_{MAX} = (N-1)/2$

Dado que en los registros hay ruido con la señal lo que se debe hacer es tomar muchos segmentos para establecer un comportamiento promedio que reduzca el efecto del mismo. Las series tienen un comportamiento estocástico y consecuentemente su promedio irá a cero, por lo tanto se prefiere el uso del espectro de potencia donde los coeficientes se multiplican por el conjugado.

$$\overline{X_{ij} X_{ij}^*} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M X_{ij} X_{ij}^*$$

Como primer paso, es muy importante el preparado de las series, cada segmento deberá ser observado y su longitud determinada dependiendo de la banda.

Cada segmento de los campos eléctrico y magnético es convertidos al dominio de la frecuencia utilizando algún método que maneja FFT (en general decimación en cascada es la técnica más

usada) y se obtienen preferentemente unos 6 -10 periodos por década en intervalos equiespaciados en escala logarítmica y $(N-1)/2$ frecuencias como máximo, la frecuencia mínima depende de la longitud de la serie elegida y la frecuencia máxima depende del intervalo de muestreo. El espectro final es esencialmente suavizado promediando con los vecinos con la función de Parzen los espectros de potencia de cada segmento se almacenan.

El espectro de potencia no brinda información de la fase, pero si se puede hallar la expresión del modulo de Z y la resistividad aparente.

$$|Z|^2 = \frac{EE^*}{HH^*} \quad \text{y} \quad \rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E}{H} \right|^2$$

También se debe recordar que cada serie tiene ruido, de tal forma que:

$$E\tau = E + \eta e \quad \text{y} \quad H\tau = H + \eta h \quad , \text{ donde los errores son independientes entre si.}$$

El espectro de potencia cruzado será entonces:

$$\overline{E\tau H^* \tau} = \overline{(E + \eta e)(H + \eta h)^*} = \overline{EH^*} + \overline{E\eta h^* \eta e H^*} + \overline{\eta e \eta h^*}$$

por lo tanto

$$\overline{E\tau H^* \tau} = \overline{EH^*} \quad ,$$

donde la barra significa promedio. Dado que casi siempre se satisface que los ruidos no son correlacionados entre si, pero la potencia cruzada tiene una diferencia de fase.

La normalización de esta cantidad lleva a la definición de coherencia:

$$COH(E, H) = \frac{\overline{EH^*}}{\sqrt{\overline{EE^*} \overline{HH^*}}} \quad (3)$$

Lo cual si no hay ruido es estrictamente 1. Entonces recalculamos el valor de Z de manera tal que

$$Z = \frac{\overline{EH^*}}{\overline{HH^*}}$$

El sistema de ecuaciones a resolver resulta ser:

$$E_x = Z_{xx} B_x + Z_{xy} B_y$$

$$E_y = Z_{yx} B_x + Z_{yy} B_y$$

$$B_z = T_{xz} B_x + T_{zy} B_y$$

(4)

La solución de este sistema requiere al menos 2 segmentos independientes de observaciones para determinar las componentes de las funciones MT. Sin embargo para mejorar la relación señal ruido es necesario tener más segmentos. Después de multiplicar las ecuaciones (4) por los conjugados de los campos magnéticos horizontales se obtienen 6 ecuaciones.

Una manera de escribir las componentes del tensor es en función de las coherencias (Swift, 1967).

$$\begin{aligned}
 Z_{XX} &= \frac{|E_X|}{|H_X|} \left[\frac{\text{coh}E_X H_X - \text{coh}E_X H_Y \text{coh}H_Y H_X}{1 - |\text{coh}H_X H_Y|^2} \right] \\
 Z_{XY} &= \frac{|E_X|}{|H_Y|} \left[\frac{\text{coh}E_X H_Y - \text{coh}E_X H_X \text{coh}H_X H_Y}{1 - |\text{coh}H_X H_Y|^2} \right] \\
 Z_{YX} &= \frac{|E_Y|}{|H_X|} \left[\frac{\text{coh}E_Y H_X - \text{coh}E_Y H_Y \text{coh}H_Y H_X}{1 - |\text{coh}H_X H_Y|^2} \right] \\
 Z_{YY} &= \frac{|E_Y|}{|H_Y|} \left[\frac{\text{coh}E_Y H_Y - \text{coh}E_Y H_X \text{coh}H_X H_Y}{1 - |\text{coh}H_X H_Y|^2} \right]
 \end{aligned} \tag{5}$$

La coherencia entre Hx y Hy debe ser baja para lograr una buena estimación.

La resolución de este sistema permite obtener parte real e imaginaria de las cuatro componentes del tensor de impedancia. Este sistema, que esta sobreestimado ya que para cada segmento se satisfacen estas ecuaciones, se puede resolver por cuadrados mínimos. En este caso, la influencia de los errores se hace más notable cuando la estadística es menor.

La inclusión de un análisis robusto con peso basado en los errores, y la introducción de una “función de pérdida” la cual reduce el efecto de “outliers” (puntos ajenos al problema de estudio) (Egbert & Booker, 1986). El análisis robusto mejora significativamente la determinación del tensor de impedancia en casi todos los casos.

Una de las cosas fundamentales para un buen resultado en el procesamiento tiene que ver con la presencia de ruido de diferente origen, para lo cual se deben tener en cuenta los siguientes pasos: Primeramente el editado de la serie temporal, remover los segmentos contaminados por el ruido. Muchos problemas son ocasionados por determinado tipo de ruido que es fácil de detectar a simple vista. Por lo tanto se puede limpiar la serie de estas zonas donde se sospecha contaminación. En segundo lugar el “stacking”, donde el espectro de potencia para segmentos de datos independientes son en general obtenidos con FFT (Algoritmo de Transformadas de Fourier rápida) generalmente de 512-4096 puntos por muestra son sumados o “stacked” para mejorar la relación señal-ruido. Un procedimiento común es adicionar varios cientos de segmentos para altas frecuencias.

Por último, la referencia remota, que utiliza datos adquiridos de manera simultánea en dos sitios que pueden estar separados varios kilómetros. Los campos de un sitio se procesan utilizando el campo magnético del otro sitio como referencia remota. Evita el “bias” debido al ruido. Una vez procesadas las series temporales, se obtienen las resistividades aparentes y fases en el dominio de la frecuencia, se calcula la coherencia entre ellas lo cual permite corregir problemas derivados

de la calibración de los instrumentos. Pomposiello et. al., 2004, utilizaron este método para resolver los resultados sesgados (bias) en los datos MT cuando no es posible establecer una referencia remota (dos estaciones registrando simultáneamente).

El método MT permite hallar modelos donde la conductividad del suelo presenta contrastes. Es más sensible a la detección de conductores que aislantes y la resolución dependerá de la resistividad eléctrica y la profundidad de investigación. En general se puede probar en el laboratorio que hay un rango de resistividades asociado a cada tipo de rocas pero en la realidad el sistema es mucho más complejo y estas resistividades pueden ser incrementadas por el contenido de agua, el tipo de sales, la porosidad, temperatura del agua, etc.

INVERSIÓN DE DATOS MT

INVERSIÓN 1D

Se interpreta la distribución de resistividades del suelo como capas de distinta resistividad o sea la resistividad depende de la profundidad z , $\rho(z)$. En este caso, los elementos diagonales del tensor de impedancia son cero y los no diagonales son iguales y de signo opuesto. Por lo tanto:

$$\rho_{XY}(z, \omega) = \rho_{YX}(z, \omega)$$

y

$$\varphi_{XY}(\omega) = \varphi_{YX}(\omega) - \pi$$

Los vectores de inducción son nulos ya que se asume una incidencia perpendicular a la superficie terrestre y no se modifica cuando las interfases son horizontales. Si bien los modelos no son únicos en ningún caso, en el caso 1D tiene mayores inconvenientes ya que si se encuentra una capa de mucha mayor conductividad esta apantalla la estructura que está por debajo. En tal caso, si bien la estructura por debajo contribuye a la respuesta la sensibilidad a ella es muy baja e imposible la descripción de la estructura de profundidades mayores (Parker, 1983). En este trabajo se utilizó el programa ipi2win_MT (v. 2.0) para realizar las inversiones 1D (Bobatchev, 2002). En general siempre se realizan las interpretaciones 1D pero también se requiere de las 2D.

INVERSIÓN 2D

La interpretación 2D corresponde a un modelo de tierra donde la resistividad es constante en una dirección horizontal mientras varía en la otra y verticalmente. La dirección a lo largo de la cual la resistividad es constante se llama strike. Si la dirección del strike es por ejemplo, paralela al eje x , de manera que las variaciones en la resistividad serán a lo largo del eje z y el eje y , entonces se tiene $\rho(y, z)$. En estos casos hay un campo vertical inducido y las ecuaciones de Maxwell pueden ser desacopladas en 2 modos, cada uno relacionando tres componentes de los campos: TE (Transverso Eléctrico) con corrientes paralelas al strike que involucra EX BY BZ.

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_x}{\partial z} &= -i\omega B_y \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -i\omega B_z \\ \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} &= \mu_0 \sigma E_x\end{aligned}\tag{6}$$

TM (Transverso Magnético) con corrientes perpendiculares al strike que involucra EY BX EZ.

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial z} &= i\omega B_x \\ \frac{\partial B_x}{\partial y} &= \mu_0 \sigma E_y \\ \frac{\partial B_x}{\partial y} &= -\mu_0 \sigma E_z\end{aligned}\tag{7}$$

El tensor MT en este caso es estrictamente No-Diagonal y puede expresarse como:

$$Z_{2D} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix}$$

Donde Zxy depende de Ex/By y Zyx de Ey/Bx, los cuales son resultados de las ecuaciones de los modos TE y TM respectivamente y por lo general tienen signos opuestos lo cual indica que las fases de los distintos modos caen en diferentes cuadrantes (1° y 3°).

En el caso 2D también se debe considerar función transferencia entre el campo magnético vertical y los horizontales:

$$B_z(\omega) = \begin{bmatrix} T_x(\omega) & T_y(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x(\omega) \\ B_y(\omega) \end{bmatrix}$$

en el caso 2D esta vinculado al modo TE y resulta ser:

$$T_{2D} = (0, T_y) = (0, B_z/B_y)$$

T tiene parte real e imaginaria, en una estructura bidimensional estos vectores apuntan en la dirección perpendicular al strike, este tipo de vectores tienen 2 orientaciones posibles, los de Parkinson que señalan hacia los cuerpos conductores y los de Wiese en la forma opuesta.

Una vez que se comprueba que la estructura puede considerarse 2D, se utiliza un método de inversión para obtener el modelo. El algoritmo que se utilizó ampliamente en los últimos años, es el método RRI (rapid relaxation inversion) desarrollado por Smith and Booker (1991). Este método es muy rápido debido que es iterativo y aproxima las derivadas horizontales de los campos eléctricos y magnéticos con los correspondientes valores de las iteraciones previas.

El problema inverso de cada sitio es esencialmente un desacoplado 1D usando la interpolación de los sitios vecinos calculados anteriormente con el método directo 2D para la próxima iteración. Esta técnica encuentra un modelo suave que ajusta los datos experimentales minimizando el cuadrado mínimo de una función que involucra el Laplaciano bidimensional del logaritmo de la

conductividad. Este método permite invertir los datos MT (resistividad aparente y fase) correspondientes a los dos modos TM y TE, aunque también es posible invertir cada modo por separado. Los datos de entrada del programa son la grilla, modelo inicial las frecuencias, las posiciones de los sitios, y los datos MT.

La Grilla se construye con 'ny' nodos en la horizontal y 'nz' en la vertical (profundidad). La ubicación de los nodos horizontales se ha sugerido coincidan con los sitios con algunos pocos nodos intercalados entre ellos y que el espaciamiento fuera de los sitios aumenten por un factor 1,5 hasta alcanzar una distancia mayor a la profundidad total del modelo. La ubicación de los nodos verticales se construye de la siguiente forma: el primer espaciamiento se calcula como $1/5$ 'skin depth' obtenida con la frecuencia más alta y la resistividad más baja a esa frecuencia, se va incrementado 1,1 hasta alcanzar una profundidad igual a 2 "skin depth" obtenida para la frecuencia más baja y la resistividad más alta correspondiente.

El Modelo Inicial, puede ser un semiespacio de resistividad constante o se puede especificar discontinuidades que describen aspectos geológicos tales como fallas, interfases, cuerpos resistivos o conductores, etc. También varios nodos del modelo pueden congelarse al valor inicial.

Las Frecuencias, el programa necesita conocer cuantas frecuencias se utilizaran en la inversión y deben ordenarse monótonamente decreciente y en Hz.

Los Sitios, el programa requiere conocer cuantos sitios corresponden al perfil MT y su posición en metros, los que se ordenan monótonamente en forma creciente.

Los Datos MT, consisten en bloques de la frecuencia seguida del dato de cada sitio en el mismo orden que el que se especifico en el comando de sitios. Esto se repita para la próxima frecuencia hasta el final. Cada bloque comienza con la frecuencia más alta y prosigue hasta la más baja.

El tipo de datos son los siguientes:

- ✓ Resistividad en ohm-m.
- ✓ Fase (en el primer cuadrante (0-90°)).
- ✓ Error (error absoluto en ohm-m para la resistividad aparente y grados para la fase).

Los Resultados, son el modelo final que es una matriz de 'nyxnz', los datos predichos por el modelo, tanto resistividad aparente y fase para los modos.

En el caso que los valores de Hz sean significativos, se puede usar el código 2D de Rodi & Mackie que permite invertir la componente vertical del campo magnético.

3.6. CENSO DE PUNTOS DE AGUA

Luego de analizar los escasos antecedentes de pozos destinados a la explotación de agua subterránea existentes en la región, se realizó la ubicación geográfica en campaña. Para este trabajo se utilizó un sistema de posicionamiento satelital portátil (GPS), midiéndose en el campo las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de cada pozo. Posteriormente, en gabinete, se convirtieron estas unidades a coordenadas planas (Gauss - Krüger).

Durante el relevamiento se obtuvieron, en los casos en que fue posible, niveles estáticos, niveles dinámicos y caudales de producción. Posteriormente, se compararon estos datos con los legajos originales (cuando existían) a fin de establecer variaciones en los regímenes de explotación y/o en las propiedades acuíferas de los reservorios involucrados.

3.7. AMBIENTE HIDROGEOLÓGICO

En los aprovechamientos de aguas superficiales las etapas de investigación, estudio previo, anteproyecto y proyecto, construcción y explotación, suelen ser sucesivas y están, por lo general, claramente separadas (Custodio & Llamas, 1996). En cambio, la exploración de los recursos hídricos subterráneos pocas veces es aceptablemente completa hasta que no se observa la reacción del reservorio durante un cierto tiempo ante una explotación controlada. Como norma general la exploración de aguas subterráneas suele ser más compleja y más costosa que para el estudio de aguas superficiales; en cambio, las inversiones necesarias para su explotación suelen ser mucho más reducidas.

Al efectuar el estudio hidrogeológico de una región, se encuentra un campo muy amplio de investigación, ya que la Hidrogeología utiliza una gran cantidad de información proveniente de otras disciplinas. Por abarcar un espectro tan amplio de especialidades, la mayoría de los datos que se integran para llegar a comprender los procesos involucrados en la circulación hídrica subterránea, son insuficientes y difíciles de valorar, ya que han sido obtenidos en forma no planificada o bien no orientada a la evaluación hidrogeológica. Esto es especialmente válido para la información de subsuelo proveniente de los legajos de perforaciones, pero también respecto a las series de mediciones climáticas y de afloramientos de cursos superficiales. Los estudios hidrogeológicos son de carácter iterativo, especialmente debido a dos razones:

- ❖ *El objeto de estudio (el agua subterránea) cambia muy rápidamente con el tiempo, en función de cambios climáticos recientes o actuales y sobre todo por la utilización intensiva del agua subterránea y por las modificaciones en su quimismo, introducidas por la acción antrópica.*
- ❖ *A medida que se perforan más pozos se obtiene información complementaria que permite ajustar o modificar las hipótesis de trabajo y los modelos conceptuales.*

Un ambiente hidrogeológico es un modelo conceptual de los parámetros morfológicos, geológicos y climáticos que determinan los atributos principales de un régimen del agua subterránea en un área determinada (Tóth, 1970). Los seis atributos o parámetros principales que definen un régimen del agua subterránea son:

- ✓ el contenido de agua de las rocas,
- ✓ la geometría del sistema de flujo,
- ✓ la descarga específica,
- ✓ la composición química del agua,
- ✓ la temperatura y,
- ✓ la variación temporal de todos los anteriores.

El efecto controlador del ambiente hidrogeológico sobre el régimen del agua subterránea se manifiesta claramente cuando se consideran los papeles de los componentes individualmente. Los factores climáticos determinan la magnitud y la distribución espacial del agua suministrada a cada región. La topografía determina la cantidad de energía y su distribución zonal de que dispone el agua para su movimiento en una cuenca determinada y conforma los contornos del sistema de flujo. Finalmente, la geología proporciona las zonas en las que puede circular el agua, controlando las magnitudes y el esquema del flujo, así como el volumen y la distribución del agua almacenada. La geología también determina la hidroquímica de las aguas.

Un ambiente hidrogeológico puede definirse como el resultado de la interacción de componentes biológicos, geológicos, geomorfológicos y climáticos que condicionan variables físico - químicas que interrelacionan entre sí en una forma característica lo que otorga a una determinada región un comportamiento hidrogeológico particular.

3.8. HIDROQUÍMICA

La calidad física y química del agua subterránea está en función del quimismo del agua que se infiltra y de los efectos modificadores que se producen en el reservorio por el contacto entre el fluido y la trama sólida del acuífero y la zona no saturada.

Con el propósito de efectuar primero, una caracterización hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas del entorno al Yacimiento Caimancito, se extrajeron muestras de distintos lugares para su posterior análisis físico y químico. Estos lugares incluyen a los arroyos y ríos más inmediatos al yacimiento, pero también a cursos fluviales más alejados como el río San Francisco. De igual manera, se extrajeron muestras de pozos que explotan agua subterránea de sectores cercanos al yacimiento (Pueblo de Caimancito) y otros alejados (Pueblo de Yuto) con la finalidad de establecer las características actuales más sobresalientes del agua.

En todos los casos, durante el muestreo, se determinaron en el campo la conductividad eléctrica en microsiemens/centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y la temperatura (en grados centígrados) de cada muestra. A cada muestra se le efectuó el análisis normal de determinación de iones mayoritarios, consistente en mediciones de temperatura, conductividad eléctrica, pH, Residuo Seco; Residuo Sólidos Totales, Alcalinidad Total, Bicarbonatos, Calcio, Magnesio, Sulfatos, Cloruros, Sodio, Potasio, Nitratos, Nitritos, Amonio, Amoníaco, Manganeso e Hierro.

Para el análisis hidroquímico de las aguas actualmente explotadas, se realizó el tratamiento estadístico de los datos físicos y químicos obtenidos de los protocolos enviados por el Laboratorio de Estudios Ambientales (LEA) de la Universidad Nacional de Salta.

El tratamiento de los datos químicos se realizó teniendo en cuenta el concepto de error de balance primeramente y luego se clasificaron las aguas desde el punto de vista de la calidad según su uso y geoquímico.

Desde esta manera las aguas se clasificaron primeramente como Potables o No Potables de acuerdo a las especificaciones señaladas en el Código Alimentario Argentino (CAA). Posteriormente, se clasificaron desde el punto de vista geoquímico utilizando el diagrama triangular de Piper. En este último tipo de representación, el tipo de agua queda determinado por el anión que se presenta en mayor concentración mientras que el calificativo surge del catión predominante. Así quedan definidos los siguientes tipos de aguas: Aguas bicarbonatadas cálcicas; Aguas bicarbonatadas sódicas; Aguas bicarbonatadas magnésicas; Aguas sulfatadas cálcicas; Aguas sulfatadas sódicas; Aguas sulfatadas magnésicas; Aguas cloruradas cálcicas; Aguas cloruradas sódicas y Aguas cloruradas magnésicas. Esta clasificación permite hacer interpretaciones respecto al origen y a la evolución de las aguas subterráneas.

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL AREA DE ESTUDIO

4.1.1. CLIMA

En el Noroeste Argentino, la presencia de cadenas montañosas de rumbo predominante norte - sur, con alturas progresivamente mayores a medida que se avanza hacia el oeste, provocan la inestabilidad del aire por un movimiento convectivo ascendente o por el calentamiento desigual de las laderas y las tierras bajas circundantes. Cuando estos cordones montañosos enfrentan a los vientos provenientes del este, se produce la elevación de la masa de aire, dando como resultado un aumento de la precipitación frontal. Los valles fluviales longitudinales, situados entre los sistemas montañosos, reciben generalmente una mayor o menor tasa de precipitación anual, en función de la altura del macizo orográfico que se interponga.

Sobre la vecina Llanura Chaqueña, localizada inmediatamente al este del sistema subandino, se registran lluvias del orden de 550 mm anuales; esta “cantidad máxima básica” de precipitaciones se incrementa notoriamente hacia el oeste por efecto orográfico (Bianchi y Yañez, 1992).

En sierras de aproximadamente 3.000 metros de altura sobre el nivel medio del mar y que no ofrecen un frente continuo que pueda constituir una verdadera barrera climática, tal como ocurre con el sistema subandino de Calilegua, los aumentos de precipitaciones se producen sobre las laderas de barlovento (de donde viene el viento); mientras que a sotavento las lluvias no son todavía muy inferiores a la “cantidad básica” aportada por la circulación general de la atmósfera (Bianchi y Yañez, 1992). En el norte del país se produce un amplio campo de altas precipitaciones con una máxima de 2.284 mm anuales en Alarache, sobre el río Bermejo y en las serranías de Calilegua, con una precipitación media de 1.400 mm anuales.

Los registros pluviométricos para la localidad de Caimancito para el ciclo 1.935 – 1.990 indican una precipitación media anual de 896 mm, con máximos de 1.505 mm en el año 1.981 y un mínimo de 278 mm en el año 1.936. El mes más lluvioso corresponde a enero; mientras que entre los meses junio a septiembre se producen las menores precipitaciones.

Tabla 1: Precipitaciones medias mensuales para el ciclo 1.935 – 1.990 en la Estación Caimancito.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	186	183	153	83	16	8	4	5	5	32	82	136

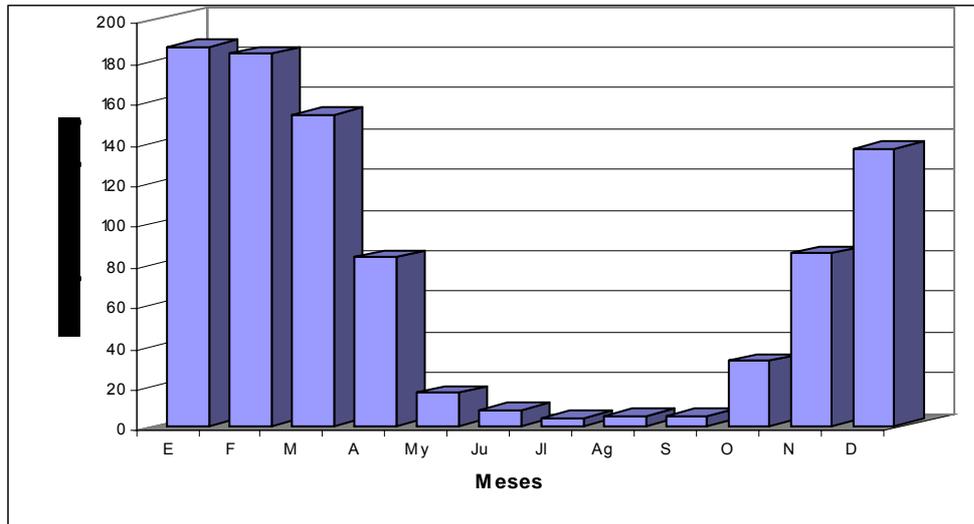


Gráfico 4: Pluviograma Estación Caimancito.

Los registros termométricos estimados para la localidad se resumen a continuación.

Tabla 2: Registros termométricos estimados para la para la Estación Caimancito.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura (°C)	25.6	24.7	23.3	20.3	17.6	14.5	14.3	16.1	18.8	22.4	24.0	25.3

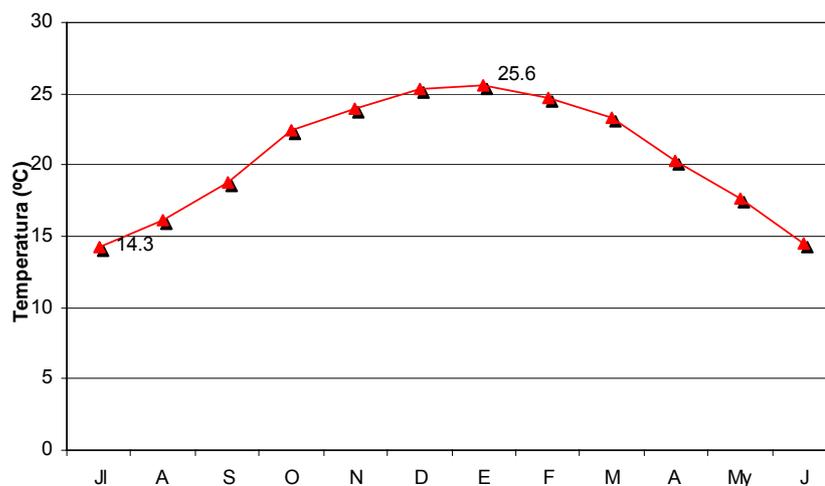


Gráfico 5: Termograma de la Estación Caimancito.

El índice de Gausson y su correspondiente Diagrama Ombrotérmico permite diferenciar el período interanual de sequía y definir si ésta ocurre en aquellos meses donde la precipitación es menor al doble de la temperatura media. De esta forma se aprecia que el período lluvioso se extiende entre los meses de noviembre a abril y el período de sequía el resto del año.

Tabla 3: Índice de Gausson.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	186	183	153	83	16	8	4	5	5	32	85	136
2 x Temperatura (°C)	51.2	49.4	46.6	40.6	35.2	29.0	28.6	32.2	37.6	44.8	48.0	50.6

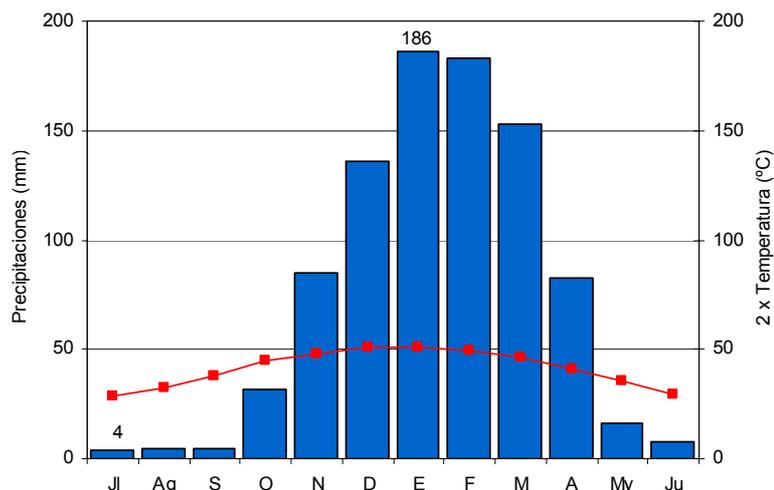


Gráfico 6: Índice de Gausson para la Estación Caimancito.

Los registros pluviométricos para la localidad de Yuto para el ciclo 1.934 – 1.990 indican una precipitación media anual de 863 mm, con máximos de 1.443 mm en el año 1.977 y un mínimo de 332 mm en el año 1.936. El mes más lluvioso corresponde a enero; mientras que entre los meses junio a septiembre se producen las menores precipitaciones.

Tabla 4: Precipitaciones medias mensuales para el ciclo 1.934 – 1.990 en la Estación Yuto.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	191	167	148	74	19	6	4	6	5	34	75	133

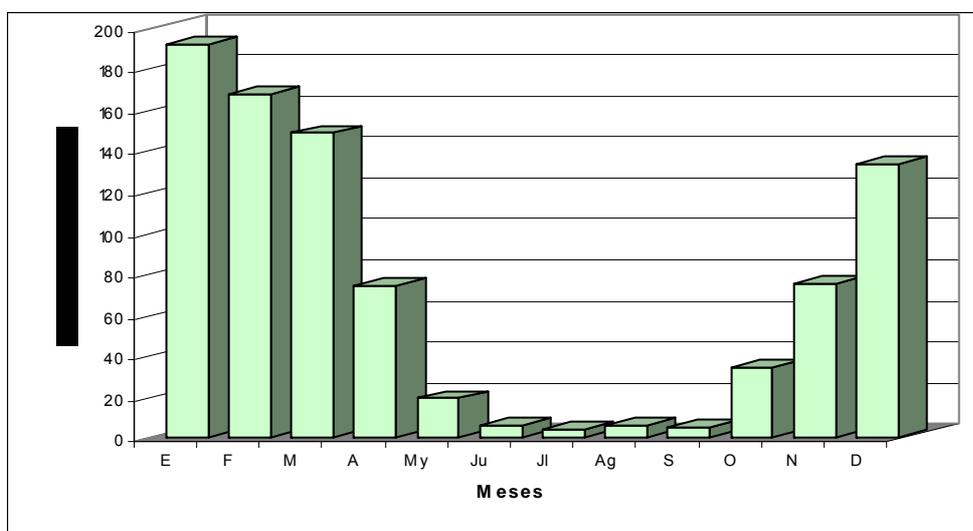


Gráfico 7: Pluviograma Estación Yuto.

Los registros termométricos estimados para la localidad se resumen a continuación.

Tabla 5: Registros termométricos estimados para la para la Estación Yuto.

Temperatura (°C)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	25.8	24.8	23.4	20.4	17.8	14.6	14.5	16.2	19.0	22.6	24.2	25.5

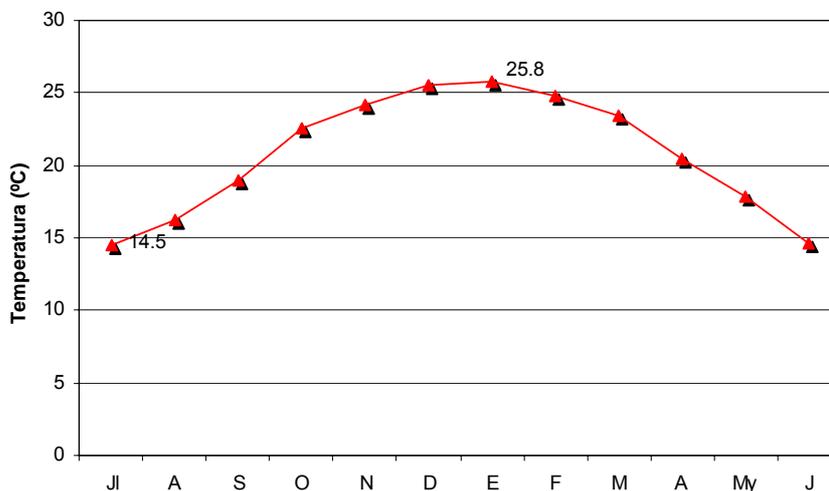


Gráfico 8: Termograma de la Estación Yuto.

El índice de Gausen y su correspondiente Diagrama Ombrotérmico permite diferenciar el período interanual de sequía y definir si ésta ocurre en aquellos meses donde la precipitación es menor al doble de la temperatura media. De esta forma se aprecia que el período lluvioso se extiende entre los meses de noviembre a abril y el período de sequía el resto del año.

Tabla 6: Índice de Gausen.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	191	167	148	74	19	6	4	6	5	34	75	133
2 x Temperatura (°C)	51.6	49.6	46.8	40.8	35.6	29.2	29.0	32.4	38.0	45.2	48.4	51.0

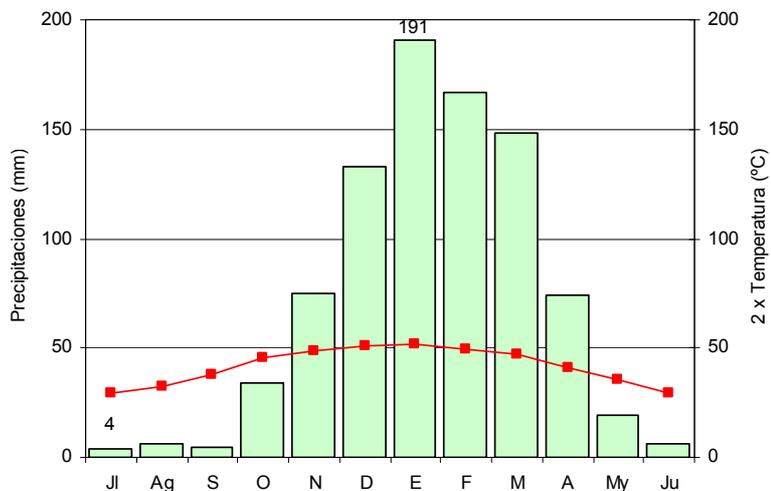


Gráfico 9: Índice de Gausen para la Estación Yuto.

Los registros pluviométricos para la localidad de Calilegua para el ciclo 1.935 – 1.990 indican una precipitación media anual de 808 mm, con máximos de 1.491 mm en el año 1.984 y un mínimo de 319 mm en el año 1.954. El mes más lluvioso corresponde a enero; mientras que entre los meses junio a septiembre se producen las menores precipitaciones.

Tabla 7: Precipitaciones medias mensuales para el ciclo 1.935 – 1.990 en la Estación Calilegua.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	174	165	156	71	17	8	4	3	3	25	61	122

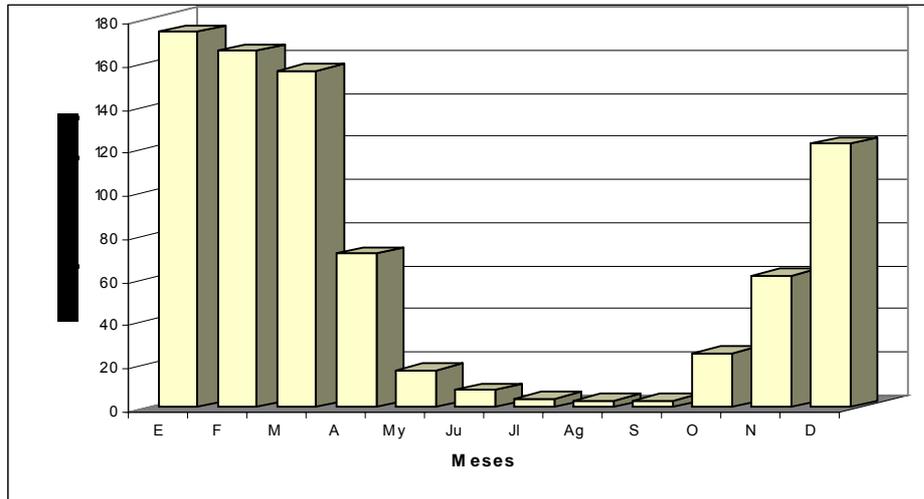


Gráfico 10: Pluviograma Estación Calilegua.

Los registros termométricos estimados para la localidad se resumen a continuación.

Tabla 8: Registros termométricos estimados para la para la Estación Calilegua.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura (°C)	25.3	24.4	23.0	20.0	17.3	14.1	14.0	15.8	18.5	22.1	23.8	25.0

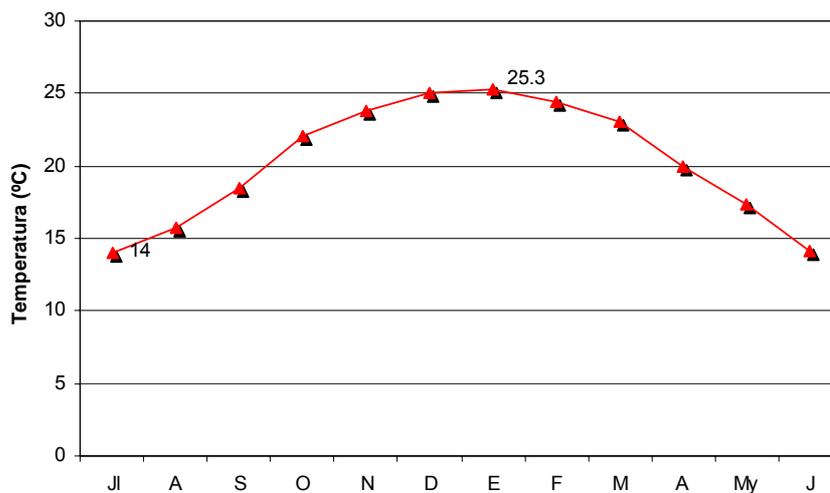


Gráfico 11: Termograma de la Estación Calilegua.

El índice de Gausson y su correspondiente Diagrama Ombrotérmico permite diferenciar el período interanual de sequía y definir si ésta ocurre en aquellos meses donde la precipitación es menor al doble de la temperatura media. De esta forma se aprecia que el período lluvioso se extiende entre los meses de noviembre a abril y el período de sequía el resto del año.

Tabla 9: Índice de Gausson.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación (mm)	174	165	156	71	17	8	4	3	3	25	61	122
2 x Temperatura (°C)	50.6	48.8	46.0	40.0	34.6	28.2	28.0	31.6	37.0	44.2	47.6	50.0

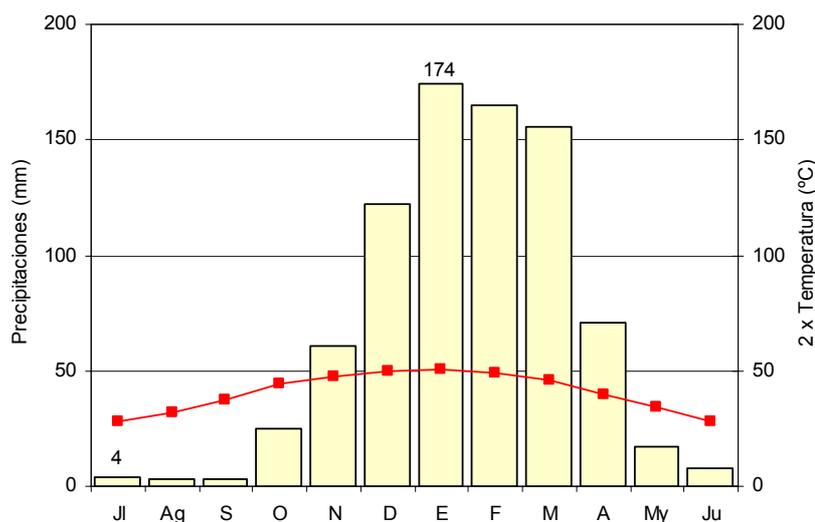


Gráfico 12: Índice de Gausson para la Estación Calilegua.

En casi todo el país y en especial en el Noroeste Argentino, existe un fuerte déficit de información respecto a las precipitaciones y otros parámetros como temperaturas, evapotranspiración, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, presión atmosférica, etc., lo que impide realizar estudios de detalle respecto a las características de los fenómenos externos. Sin embargo y sólo a modo ilustrativo, integrando datos correspondientes a la región, se puede reconstruir un mapa de isohietas anuales (Figura 2) donde es posible observar la distribución de las precipitaciones líquidas.

El plano que se presenta corresponde a la base realizada por Bianchi (1981) en su trabajo “Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino”, modificado posteriormente por Fuertes et. al., 1995; García et. al., 2000 y en este trabajo. La configuración de las curvas isohietas, si bien tienen en carácter de aproximadas, su forma y su distribución se ajustó empleando imágenes satelitales donde se identificaron aspectos relativos al posible control de la fisiografía sobre las lluvias.

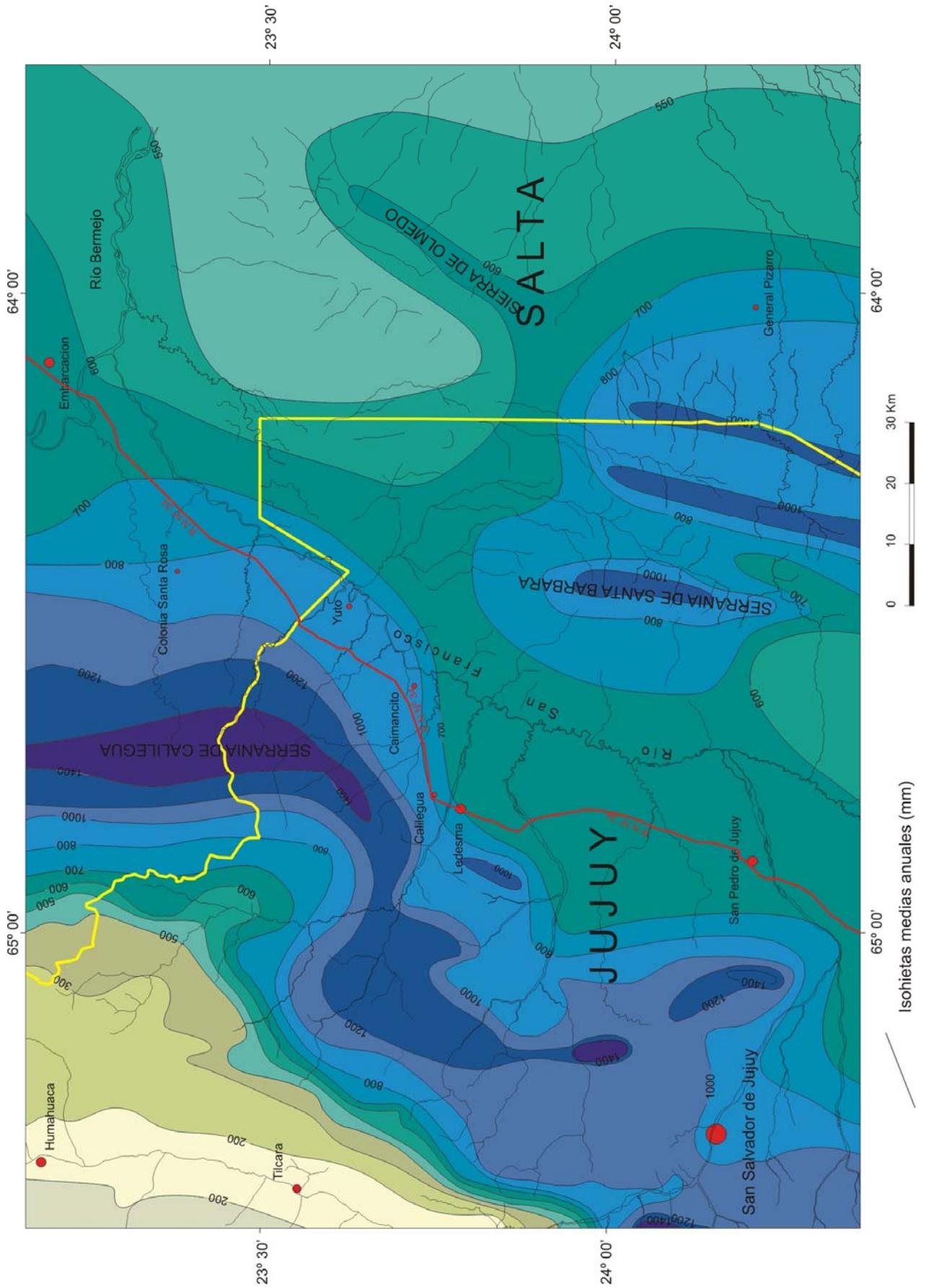


Figura 2: Mapa de Isoyetas anuales de la zona de estudio y áreas vecinas.

4.1.2. FISIOGRAFÍA

La zona de estudio se encuentra en una posición de transición entre el ambiente serrano al oeste y una suave llanura al este. La unidad fisiográfica conocida como Sierras Subandinas, conforma un sistema de orientación submeridiana que pierde altura progresivamente hacia el naciente. Normalmente, en esta región se encuentra una fisiografía de primer orden, es decir que los valles fluviales se corresponden con sinclinales y los altos con anticlinales. Este último caso se encuentra en la serranía del Socavón o sierra de Caimancito, que tiene correlato con un anticlinal asimétrico, buzante al sur – sudeste.

El sistema orográfico más sobresaliente del ambiente serrano está representado por la Serranía de Calilegua cuyas altas cumbres superan los 3.600 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Esta unidad y su extensión hacia el norte, los Cerros de Ovejería (3.099 m.s.n.m.), conforman la divisoria de agua de los principales cursos fluviales. Por el sur, la serranía del Socavón (de sentido este-oeste) y por el norte la Serranía de La Mesada (con orientación sudoeste - noreste), constituyen unidades fisiográficas que controlan al escurrimiento superficial y actúan como divisorias de las cuencas hídricas mencionadas, respecto a las del río San Lorenzo en el sector austral y río Santa Cruz, en el tramo boreal.

Entre la serranía del Socavón y el río San Francisco, la zona se caracteriza por un relieve colinado a suavemente colinado, perdiendo altura a medida que se avanza hacia el este. Este relieve en muchos lugares es fuertemente disectado por arroyos y ríos temporarios y permanentes, que escurren hacia el este – sudeste, tratando de alcanzar el nivel de base local (Figura 3).

El colector principal de la región es el río Bermejo. Este curso integra la gran cuenca del río de La Plata, que drena las aguas de casi la cuarta parte del continente sudamericano hacia el Océano Atlántico. El río Bermejo es un afluente del río Paraguay, el que a su vez desemboca en el río Paraná, que fluye hasta el Atlántico a través del río de la Plata. La alta cuenca del río Bermejo se halla situada en el extremo noroeste de la Argentina y sudeste de Bolivia. Abarca una superficie de aproximadamente 25.450 Km². Tiene la forma de una elipse con su eje mayor, de 430 km de largo, orientada de norte a sur (OEA, 1973). El río Bermejo abandona la alta cuenca en la junta de San Francisco, denominación dada a la confluencia de los ríos Bermejo y San Francisco, desde donde ingresa en la gran Llanura Chaqueña que constituye su cuenca media e inferior.

El río San Francisco nace luego de la confluencia de los ríos Grande de Jujuy y Lavayén; presenta una dirección de escurrimiento hacia el nordeste, recibiendo numerosos afluentes por su margen izquierda y casi ninguno por la derecha. Entre los cursos fluviales que aportan sus caudales se encuentran los ríos Ledesma, San Lorenzo y Los Berros y los arroyos Sauzalito y Yuto y río de las Piedras.



Foto 5: Río San Francisco. Vista hacia el norte desde la Estación de Aforos.

Hacia el este del río San Francisco las Sierras Subandinas se encuentran menos elevadas y consecuentemente menos disectadas por la acción fluvial. Estas elevaciones se las reconoce por conformar bloques asimétricos basculados (Lomas del Palmar y Lomas de San Ignacio) que podrían ser reflejo de una estructura anticlinal en crecimiento.



Foto 6: Vista panorámica hacia el este, desde el río San Francisco. Obsérvese las pequeñas lomadas de las Aguas Calientes.

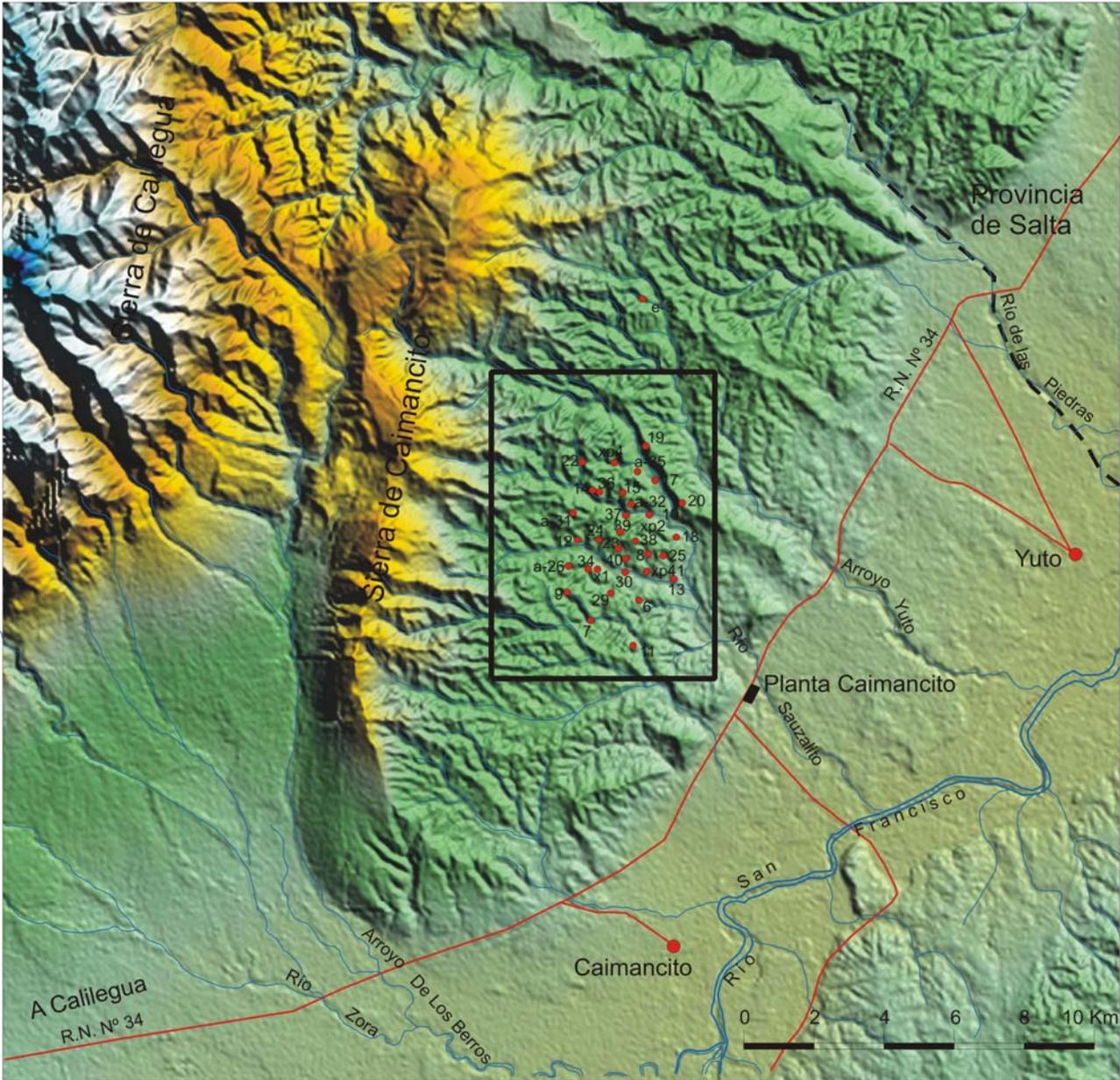


Figura 3: Configuración fisiográfica del Yacimiento Caimancito y alrededores.

4.1.3. GEOLOGÍA REGIONAL

Desde el punto de vista geológico, la zona de estudio se encuentra en la Provincia Geológica Sierras Subandinas. Las Sierras Subandinas conforman un tren estructural más o menos continuo, de rumbo submeridiano que se extiende en territorio argentino desde la latitud de la ciudad de San Miguel de Tucumán por el sur, hasta el límite con la República de Bolivia, en el norte. Esta unidad morfoestructural ha sido dividida, sobre la base de aspectos estructurales y estratigráficos, en Sierras Subandinas Boreales, Australes y Centrales. El área de estudio se localiza en esta última.

4.1.3.1. ESTRATIGRAFÍA

En el ambiente serrano afloran, desde abajo hacia arriba, unidades pertenecientes al Paleozoico, Cretácico, Terciario y Cuaternario.

Las secuencias paleozoicas están representadas por facies del Grupo Santa Victoria (Ordovícico), de las Formaciones Zapla y Lipeón (Silúrico) y las Formaciones Baritú, Porongal y Cerro Piedras, o sus equivalentes (Devónico).

Cretácico - Eoceno Medio

Grupo Salta (Brackebusch, 1891; nom. subst. Turner, 1959)

El Grupo Salta representa una secuencia constituida por un conjunto de unidades que integran un mismo ciclo sedimentario; de abajo hacia arriba está conformado por los Subgrupos Pirgua, Balbuena y Santa Bárbara.

Subgrupo Pirgua (Vilela, 1951; nom. transl. Reyes y Salfity, 1973)

Constituye un depósito de bancos rojos, acumulado en un ambiente continental. La unidad yace en neta discordancia angular sobre el Paleozoico. La sucesión comienza con la Formación La Yesera (Reyes y Salfity, 1973) integrada por conglomerados brechosos polimícticos y fanglomerados, que representarían facies de desarrollo fluvial. La Formación Las Curtiembres (Reyes y Salfity, 1973), está constituida por fangolitas, lutitas y arcilitas pardo rojizas oscuras, grises y verdes. Se superpone la Formación Los Blanquitos (Reyes y Salfity, 1973), con areniscas medianas a gruesas, rosado blanquecina, de estratificación gruesa. En algunas regiones del Noroeste Argentino, se intercalan efusiones basálticas.

Subgrupo Balbuena (Moreno, 1970)

Esta unidad involucra a tres formaciones, marinas y litorales, vinculadas parcialmente entre sí por variaciones de facies. La Formación Lecho (Turner, 1959) está constituida por areniscas de cuarzo, blanquecinas o amarillentas, comúnmente finas, calcáreas. En la base suele desarrollarse un conglomerado fino, lenticular. Se apoya sobre el Subgrupo Pirgua o, en ausencia de éste, sobre rocas paleozoicas en marcada discordancia. La Formación Yacoraite (Turner, 1959), está constituida por calizas a las que se asocian en menor proporción, areniscas, margas, limolitas, arcilitas y lutitas. La gama de color varía entre gris, amarillento, verde claro, rojo violáceo, gris oscuro, etc. La Formación Olmedo (Moreno, 1970), está formada principalmente por pelitas gris verdosas o negras, ricas en materia orgánica; en menor proporción se presentan areniscas grises y algunos estromatolitos. En algunos sectores de la cuenca y en subsuelo, se identifica una espesa sucesión de halita, anhidrita y yeso.

Subgrupo Santa Bárbara (Vilela, 1952; nom. transl. Moreno, 1970)

En posición distal de cuenca se distinguen tres unidades formacionales; Formación Mealla, Formación Maíz Gordo y Formación Lumbrera. En los sectores marginales, esta subdivisión no se puede mantener, por lo que se ha definido una nueva entidad, equivalente lateral de las tres unidades citadas anteriormente, conocida como Formación El Madrejón (Cazau et. al., 1975). La Formación Mealla (Moreno, 1970) está compuesta por fangolitas y limolitas y en menor cantidad, arcilitas y areniscas finas, en parte calcáreas, con intercalaciones de yeso, con un color de conjunto rojo. La Formación Maíz Gordo (Moreno, 1970) está constituida por una asociación de arcilitas color gris verdoso y yeso; pelitas verdes y rojas con yeso y arcilitas y margas verdes con intercalaciones de areniscas y calizas de color gris amarillento. La Formación Lumbrera (Moreno, 1970) está representada por fangolitas, arcilitas y areniscas finas de color rojo, con la presencia de un nivel de fangolitas y pelitas verdes en el tercio inferior.

Mioceno - Plioceno

Grupo Orán (Russo, 1972)

Russo (1972) estudió la estratigrafía terciaria y reunió a las Areniscas Superiores, Terciario Subandino y Jujeño de Bonarelli en el grupo que denominó Orán. Méndez et. al., (1979) cuestionan la denominación de grupo, debido a la presencia de una discordancia entre el Subgrupo Metán y el Subgrupo Jujuy. Las rocas del Grupo Orán se acumularon en una cuenca de antepaís (Jordan y Alonso, 1987; González y Marquillas, 1994). Según Galli y González (1995), los depósitos fueron acumulados en una cuenca cuya subsidencia fue producto de flexión por carga y elevada tasa de sedimentación. El inicio de la sedimentación del Grupo Orán comienza a los 16 Ma (Mioceno medio) con la reactivación tectónica de la Puna en una cuenca de intraarco. La depositación continuó hasta el Pleistoceno (250.000 años) con la presencia de tres hiatus que separa las distintas Megasecuencias.

Subgrupo Metán (Russo, 1972)

El Subgrupo Metán está limitado por discordancias. En su base está en contacto con el Grupo Salta, la superficie es paralela o de bajo ángulo; en cambio cuando se apoya sobre depósitos Paleozoicos o Precámbricos, la discordancia es marcadamente angular. En algunos sectores, el pase al Subgrupo Jujuy está representado por la presencia de una toba blanca. Russo y Serraiotto (1979) concluyen que las características del subgrupo cambian al pasar de un sector a otro adaptándose a condiciones locales de sedimentación. Esto generó muchos nombres formacionales. Las Formaciones Río Seco, Anta y Jesús María (definidas en la cuenca de Metán), se pierden hacia el norte, y son reemplazadas por unidades con características locales, de acuerdo a la cuenca. Las tobas del Subgrupo Metán probablemente provinieron del arco magmático contemporáneo en actividad en el territorio Chileno Hernández et. al., (1996) la correlaciona temporalmente con la Megasecuencia Calchaquense representada por depósitos fluviales y lacustres, sobre los que progresa un lóbulo efímero. El Subgrupo Metán corresponde a la Megasecuencia Calchaquense (16,4 – 12,8 Ma) del Mioceno medio. En la serranía de Calilegua, Cellini (1973) describe y define a la Formación Calilegua (compuesta por los Miembros; Valle Grande y San Lorenzo) y Formación Agua Negra. El Miembro Valle Grande corresponde a las Areniscas Superiores de Bonarelli (1913) y al Terciario Inferior de Hagermann (1933). En la descripción, Cellini (op. cit) la compara con las Areniscas de Casa Grande del área de Mal Paso (aunque aclara que no ha encontrado evidencias fósiles). Hacia el sur, se podría correlacionar con la Formación Río Seco. En la sección basal, Cellini señala una sucesión de areniscas cuarzosas, gris blanquecina, con matriz arenosa, bien seleccionadas, que continua con areniscas color pardo rojizo a rojo violáceo, con intercalaciones de arcilitas rojo oscuro, tabulares, y finos niveles de areniscas de grano grueso. La potencia en la zona donde fue definida se estima en 700 metros.

El Miembro San Lorenzo es correlacionado por Cellini (1973) con el Terciario Subandino Inferior de Hagermann (1933). Russo y Serraiotto (1978) lo correlacionan con las "Areniscas Garganta" de Schlagintweit (1938). En otras comarcas, podría correlacionarse con la Formación Anta. Cellini (op cit) las describe como areniscas pardo rojizas y rojo oscuro, cuarzosas, grano fino y escaso mediano, con buena proporción de matriz limosa. Se intercalan fangolitas y limolitas pardo rojizas y rojo oscuro. En este miembro son frecuentes los bancos de areniscas tabulares que presentan en su base conglomerados y brechas intraformacionales con fanglomerados subangulosos y planares con pelitas, englobados en una matriz arenosa. Hacia arriba se asocia a depósitos piroclásticos de tobas gris oscuro. No son raros ondulitas asimétricas y rellenas de grietas de desecación.

El Terciario Subandino Inferior (Zunnino, 1944) está constituido por una potente secuencia de areniscas y limolitas arenosas, de color rojizo pálido. Presenta una potencia de 1.000 a 1.500 metros. Su base es concordante con la Formación Tranquitas y el pase se evidencia por un cambio de color de ésta última, de rojo oscuro a rojo pálido, característico del Terciario Subandino Inferior. El techo de esta unidad coincide con la presencia de un grupo de tobas silicificadas, de color gris a negro.

La Formación Agua Negra es correlacionada por Cellini (1973) con el Terciario Subandino Medio de Hagermann (1933). En áreas más al sur, podría corresponderse a la Formación Jesús María. La sección tipo se halla en el flanco sudoriental de la serranía de Calilegua, en inmediaciones de la quebrada de San Isidro. Está compuesta por areniscas pardo rojizas, pardo grisácea, verdosas negruzcas, de grano mediano a grueso. Presenta niveles lentiformes de conglomerados polimícticos y areniscas sabulíticas a conglomerádicas de tonos grisáceos. Hacia el techo predominan fangolitas y limolitas, rojo violáceo, masivos y fragmentosas. En toda la unidad se intercalan niveles piroclásticos de tobas grises. Esta formación está representada por depósitos de sistemas fluviales efímeros.

El Terciario Subandino Medio (Zunnino, 1944) está compuesto por areniscas de color gris e intercalaciones de bancos de lutitas de la misma tonalidad. La secuencia culmina con conglomerados finos a gruesos. El espesor puede alcanzar los 1.500 metros. Hacia el contacto con la base del Terciario Subandino Superior aparecen tobas grises.

Subgrupo Jujuy (Russo, 1972)

El Subgrupo Jujuy está conformado a su vez por dos formaciones: Guanaco y Piquete. La Formación Guanaco es una espesa sucesión de conglomerados grises con intercalaciones de areniscas y de limolitas arenosas que supera los 1.800 metros de potencia. La característica más sobresaliente es la presencia de clastos de rocas volcánicas de distinta naturaleza dentro de los conglomerados. Es notable también la matriz que presentan los conglomerados: se trata de areniscas tobáceas medianas a gruesas, de color gris claro, formadas por material piroclástico y por material de alteración de los clastos de las vulcanitas (González, 2003). Los conglomerados son matriz sostén, pocas veces clasto sostén, con tamaño variable de fino a mediano. Los clastos presentan buena esfericidad y redondeamiento, con predominio de formas equidimensionales y tabulares, y en menor proporción laminares y proladas. Las areniscas que se disponen en el techo de los depósitos conglomerados son de granulometría fina a gruesa, de color gris claro a blanco y pardo rojizo claro. En la mayoría de los casos son macizas o con laminación paralela enmascarada por la erosión y algunas veces poseen entrecruzamiento planar tangencial simple. En el techo de las areniscas es frecuente observar bancos de limolitas y arcilitas de color rojo a pardo rojizo claro, macizas, muy pocas veces con estructuras sedimentarias. La Formación Piquete, al igual que la Formación Guanaco, consta de depósitos pardos y pardos rojizos que consisten en intercalaciones de conglomerados, areniscas, areniscas limosas y limolitas; y en donde la participación de areniscas limosas es importante. El espesor de la formación supera los 1.900 metros en algunos sectores de la cuenca.

La diferencia fundamental entre ambas formaciones radica en la composición de los conglomerados, lo que es debido a las distintas litologías de las áreas de aporte. La matriz generalmente es areno-limosa y el color más frecuente es el pardo rojizo claro a rojizo. Los contactos entre estratos son poco definidos. Además, los clastos de vulcanitas comunes en la Formación Guanaco, son escasos en la Formación Piquete y en esta última se observan mayor cantidad de niveles con nódulos de carbonatos, rizoconcreciones y estratos delgados de calizas.

En la zona de la sierra de Calilegua y alrededores, se encuentra la Formación Jujuy (Ruiz Huidobro, 1953). Cellini (1973) la correlaciona con el Terciario Subandino Superior y en otros sectores, se correspondería a las Formaciones Guanaco y Piquete. La Formación Jujuy se puede separar en una sección inferior representada mayoritariamente por areniscas entre las que se intercalan niveles piroclásticos y una superior con intercalaciones conglomerádicas. La sección inferior presenta areniscas pardas rojizas, cuarzosas finas, con matriz limosa y cemento calcáreo, con intercalaciones de arcilitas y fangolitas. En esta sección se intercalan niveles de tobas de 0,50 a 3 metros, de tonos blanquecinos, con poco contenido de biotita. La estratificación es tabular, entrecruzada. La sección superior está caracterizada por potentes conglomerados polimícticos con matriz arenosa. Se presenta en bancos tabulares y lentiformes masivos. Alternan a estos bancos de areniscas rojas. La edad de la Megasecuencia Jujeña es Plioceno - Pleistoceno temprano.

El Terciario Subandino Superior (Zunnino, 1944) se caracteriza por la abundancia de conglomerados gruesos dispuestos sobre las areniscas y lutitas arenosas, asociadas a tobas blancas presentes en la base de la unidad. El espesor de la secuencia puede alcanzar en algunos sectores de la cuenca los 3.500 metros.

Cuaternario

Los sedimentos cuaternarios están representados por una sucesión de gravas, arenas, limos y arcillas, preferentemente rojizas y pardo rojizas. Estas facies se distribuyen al pie del sistema serrano y se extienden por todo el ámbito de la planicie chaqueña, asentándose en aparente discordancia angular sobre las sedimentitas terciarias infrayacentes.

El aporte sedimentario principal proviene del área serrana occidental, con un claro predominio de procesos morfogenéticos fluviales. Las geoformas resultantes son abanicos y conos aluviales coalescentes que presentan una gradación granométrica caracterizada por aglomerados de bloques con matriz areno-limosa en los ápices, gravas gruesas intercaladas con arenas en la porción media y capas de limos y limo-arcillas hacia la parte distal, donde aumentan la presencia, el espesor y la continuidad areal de las intercalaciones de arcilla.

El Cuaternario del área de estudio, a pesar de estar asociado a un período de estabilidad estructural y tectónica, se caracteriza por presentar grandes variaciones faciales en cortas distancias, como consecuencia de los cambios de energía de transporte. Esto se hace más evidente en aquellas zonas donde se entrelazan los depósitos de canales de drenaje que han variado o migrado en su posición y dirección de escurrimiento.

4.1.3.2. ESTRUCTURA

El estilo estructural de esta región de las Sierras Subandinas se caracteriza por la presencia de pliegues asimétricos, fracturados en sus alas occidentales por fallas inclinadas hacia el este y que elevan términos no más bajos que Ordovícico (Baldis, et. al., 1976). La región tiene la particularidad de encontrarse en las inmediaciones del denominado Nudo Tectónico de Valle Grande, ubicado entre el río Ledesma y el río Santa Cruz, caracterizado por un conjunto de fracturas dispuestas en forma radial (NNE-SSO y ONO-ESE) a una comarca localizada en las inmediaciones de la localidad de Valle Grande (Baldis, et. al., 1976).

El Nudo Tectónico de Valle Grande, por sus características topográficas y estructurales se asemeja más al estilo de la Cordillera Oriental que al de las Sierras Subandinas. Corresponde a un gran anticlinorio, con dos o tres alineaciones anticlinales mayores que nacen algo al norte de los 23° sur, culminan a la latitud de Orán y se hunden en los anticlinales que forman las sierras de Calilegua y de Zapla/Puesto Viejo, respectivamente. El antepaís al este del Anticlinorio de Valle Grande, se destaca por su escasa a nula estructuración, siendo la única excepción el anticlinal de Caimancito (caracterizado por escasa expresión topográfica) que se localiza al este del anticlinal de Calilegua y que es considerado como una estructura invertida (Kley y Monaldi, 1999).

Fuertes et. al., (1969), cuando describen la estructura del Volcán Colorado comentan que en el río San Lorenzo se presentan fuertes buzamientos al SE en el Terciario Subandino Superior y a medida que bajan en estratigrafía, los valores van disminuyendo y rotando al sur, hasta llegar a un anticlinal asimétrico con fallas de acomodación. Continuando aguas arriba de esa estructura los buzamientos predominantes son SO y S pero con inclinación del orden de los 25°, para ir aumentando en forma gradual y tener la base de las Areniscas de la Formación Garganta. En el río Las Cañas y antes de llegar a la base de los sedimentos terciarios, Fuertes, et. al., (op. cit) observan una dislocación con rumbo aproximado E – W que evidencia un gran tectonismo. Mencionan también que al norte, aflora la Formación Yacoraite a más de 4000 m s.n.m. (Cerro Hermoso) como así también, en el Cerro Calilegua, el Grupo Santa Bárbara a 2900 m s.n.m. Estos valores los compararon con los obtenidos en el pozo YPF J.Ca-x1, donde el techo de la Formación Yacoraite se había encontrado a -3400 metros, calculando un resalto de aproximadamente 7500 metros.

4.1.4. HIDROGEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio pertenece a la cuenca del río Bermejo. En el Noroeste Argentino, el fuerte relieve andino y las cadenas antepuestas como la Cordillera Oriental y las Sierras Subandinas, ejercen un importante control sobre el clima y en especial sobre las precipitaciones. Debido a que la mayor parte de las precipitaciones ocurren durante la época estival, coincidiendo con elevados registros termométricos, la componente de evapotranspiración es significativa, por lo que es frecuente que exista un déficit hídrico en casi toda la región.

Debido a que los reservorios más importantes de agua subterránea se disponen al pie de un sistema serrano u ocupando una depresión intermontana, típico de la Provincia Hidrogeológica de Frente Montañoso (Issar y Passchier, 1990), la recarga a los Sistemas Acuíferos se produce, normalmente, fuera de los límites del reservorio principal. Esta situación, explicaría la presencia de recursos hídricos subterráneos en zonas donde el resultado del balance entre las precipitaciones y la evapotranspiración es nulo o bien existe déficit de agua. En el ámbito de la zona de estudio, las unidades geológicas presentes están representadas principalmente por secuencias pertenecientes al Grupo Orán (o sus equivalentes) y sedimentos del Cuaternario. Sin embargo y teniendo en cuenta que los antecedentes de perforaciones indican que la gran mayoría de los acuíferos actualmente explotados en la región se encuentran en sedimentos del Cuaternario y, excepcionalmente en sedimentitas del Grupo Orán, se ha dividido regionalmente al medio de circulación hídrico en dos grandes unidades: Sección Superior y Sección Inferior.

Sección Superior

Incluye a los depósitos del Cuaternario que poseen permeabilidades primarias. Esta sección conforma los potenciales reservorios más importantes de agua subterránea de la región y debe ser considerada como objetivo principal para la exploración hidrogeológica y explotación económica del recurso. Se incluye aquí a los depósitos aluviales actuales y subactuales, inconsolidados, de elevada porosidad y permeabilidad. Está compuesta por sedimentos heterométricos, normalmente muy gruesos a gruesos (bloques, gravas y arenas) con espesores que pueden superar los 300 metros y que se corresponden con las principales geoformas de interés hidrogeológico identificadas en la zona de estudio.

Sección Inferior

Incluye a los términos cuspidales del Terciario Medio - Superior, que presentan permeabilidad primaria en algunas unidades formacionales, y en otras, permeabilidad secundaria. Litológicamente, en la parte cuspidal de esta sección, dominan conglomerados y arenas; mientras que en profundidad gradan a arenas y limos. Debe tenerse presente que en algunos sectores de la región, la presencia de la Formación Anta (o sus equivalentes), con sus intercalaciones de niveles de calizas, pelitas y sobre todo, de capas, venas y nódulos de yeso, pueden condicionar la calidad física y química del recurso hídrico subterráneo.

SISTEMA ACUÍFERO SAN FRANCISCO – LAVAYÉN (SASFL)

El nombre de esta unidad resulta de la fusión del Sistema Acuífero Lavayén y del Sistema Acuífero San Francisco (Fuertes et. al., 1997).

La principal zona de recarga del SASFL está conformada por los aportes del Sistema Acuífero Grande – Mojotoro. Esta última unidad aporta al SASFL por el sur a través del Angosto de Aguas Calientes y a partir de allí, se canaliza por el valle del río Lavayén; por el norte recibe los aportes provenientes a través del Angosto de San Juancito. Otra importante área de recarga, se localiza en el flanco oriental de las sierras de Zapla y Calilegua, donde ocurren precipitaciones superiores a 1400

mm anuales. Al pie de estas unidades orográficas se adosan depósitos heterométricos, de bajada aluvial, con elevada capacidad de infiltración. Otra área de recarga, de menor importancia que las anteriores, se localiza en el flanco occidental de las sierras de Cresta del Gallo, Centinela y Santa Bárbara, donde se originan depósitos de bajada aluvial, formados por sedimentos heterométricos, con significativa capacidad de infiltración. (García, Rocha Fasola y Moya Ruiz, 2008)

Como casi toda la zona de alta montaña está conformada por unidades sedimentarias de porosidad secundaria y escasa permeabilidad, en esas áreas se produce una importante componente de escurrimiento superficial. A medida que se abandona el sistema serrano esta situación se modifica sustancialmente y los cursos de agua se infiltran rápidamente al encontrarse con facies sedimentarias (cuaternarias o terciarias) muy permeables que conforman el pie de monte adosado al sistema orográfico. Según García (1995), los cursos fluviales que en la zona serrana son de régimen permanente, pierden rápidamente sus caudales por infiltración al llegar al pie de esta unidad fisiográfica. De esta forma se puede advertir que la mayor parte de la recarga que recibe el SASFL es alóctona, ya que los volúmenes de agua que ingresan al reservorio se originan fuera del cuerpo. La única zona de recarga potencial importante está conformada por el flanco occidental de la sierra de la Cresta del Gallo y parte austral de la sierra de Santa Bárbara.

La zona de conducción del SASFL se inicia aguas abajo de la confluencia del río Mojotoro con el río Las Pavas y se extiende hasta las inmediaciones de la descarga del curso fluvial en el río Bermejo. La zona de conducción coincide con el valle fluvial del río Lavayén – San Francisco y su geometría es de tipo cilíndrico, mientras no reciba aportes laterales tal como sucede en la zona comprendida entre la ciudad de San Pedro de Jujuy y Puente Lavayén; entre la localidad de Chalicán y la confluencia entre el río Negro y San Francisco y entre Fraile Pintado y Calilegua.

La zona de descarga se produciría fuera del territorio jujeño, en inmediaciones de la Junta del río San Francisco y el río Bermejo.

Las unidades litológicas que tienen interés hidrogeológico están representadas por sedimentos del Cuaternario y algunas facies del Terciario Medio - Superior. El relleno moderno está compuesto por una capa de espesor medio de 10 metros de aglomerado, mediano a grueso, con rodados mayores de areniscas cuarcíticas y cuarcitas; matriz arenosa fina a limo-arcillosa, distribuidos en forma caótica. Infrayaciendo se localiza una capa de sedimentos preferentemente finos; arena fina a mediana, en parte limosa y arcillas, con espesores que varían entre 5 y 10 metros. Subyaciendo a la anterior, se encuentran facies de gravas y arenas gruesas a muy gruesas, con una importante participación de material pelítico. Este horizonte presenta una potencia máxima de 70 metros en el centro del valle, mientras que hacia los flancos disminuye progresivamente de espesor. De acuerdo a los datos aportados por los perfiles litológicos de los pozos y a los niveles piezométricos encontrados, este nivel constituye el acuífero libre a semiconfinado del Sistema Acuífero. Infrayaciendo, se encuentran sedimentos de distinta granulometría en forma de lentes y capas discontinuas, que alcanzan la mayor potencia y homogeneidad en la posición central del valle. Lateralmente, esta última unidad, limosa a limo-arcillosa, cambia gradualmente a arenas e incluso gravas hacia los flancos del valle fluvial.

Fuera de la zona de influencia del río Lavayén y principalmente en los depósitos de bajada aluvial adosados a la sierra de Santa Bárbara, se encuentran facies sedimentarias aptas para el almacenamiento de agua subterránea. Ello es especialmente cierto para la zona comprendida entre las localidades de El Piquete (al norte) y Arroyo del Medio (al sur), donde estudios geoelectrónicos (García, 1995) indican una potencia variable entre 100 y 10 metros de la cobertura moderna. Este autor, considera que por debajo de esta secuencia se localizan unidades pertenecientes al Terciario Alto (Formación Piquete) que se profundizan progresivamente hacia el oeste a la vez que, en el mismo sentido, se producirían cambios faciales hacia términos más arcillosos. Como hacia el poniente aumenta el espesor y frecuencia de las arcillas, se debe esperar que en esa dirección se encuentren acuíferos semiconfinados y confinados.

Más hacia el norte, el valle del río San Francisco se torna muy asimétrico en cuanto a espesor de sedimentos modernos se refiere. En efecto, aguas abajo de la confluencia de los ríos Lavayén y Grande de Jujuy, y hasta un poco más allá de la latitud del pueblo de Calilegua los mayores espesores de facies gruesas (arenas, gravas y rodados) se localizan en el sector occidental de la depresión. En toda esta área la secuencia litológica, normalmente, se inicia con una capa de rodados, arena y gravas media a gruesa en la parte más occidental de los depósitos de bajada adosados al sistema serrano de las sierras de Zapla y Calilegua. Esta unidad, presenta una potencia variable entre 10 y 30 metros, acuñándose hacia el oriente y disminuyendo de granometría en ese mismo sentido. A continuación, suele encontrarse una potente capa de rodados, gravas de todos los tamaños, arenas muy gruesas y gruesas, con escasas intercalaciones de arcilla y limo, que en algunos sectores superan los 250 metros de espesor (García, 1995; García, Rocha Fasola y Moya Ruiz, 2008).

En el flanco oriental del valle fluvial, especialmente al pie de las Lomas del Palmar y su continuación hacia el norte, los sedimentos de bajada aluvial son muy diferentes de los anteriores. En este lugar, predominan secuencias finas como arenas, limos y arcillas, que indicarían un área de aporte conformada por facies sedimentarias sustancialmente distintas a las aflorantes en flanco occidental del valle, muy posiblemente pertenecientes al Grupo Oran (García, Rocha Fasola y Moya Ruiz, 2008).

En el valle del río Lavayén los niveles piezométricos muestran que el sentido del flujo subterráneo coincide con la dirección del escurrimiento superficial. Los afloramientos que enmarcan el valle del río Lavayén, por sus permeabilidades relativamente bajas respecto al relleno moderno, determinan el contorno y la configuración de las líneas isopiezas. En el sector austral del valle, en inmediaciones del Angosto de Aguas Calientes se produce la mayor pendiente piezométrica del Sistema; mientras que en la parte distal se observa una pendiente muy suave. También y de acuerdo a la configuración de las curvas isopiezas, se puede advertir la influencia de un aporte lateral, proveniente de la ladera occidental de las sierras de la Cresta del Gallo - Santa Bárbara, que en el sector distal del Sistema Acuífero (zona de Santa Clara y alrededores) indica una componente de flujo prácticamente perpendicular a la existente en el valle fluvial. En este sector, los niveles estáticos se encuentran relativamente profundos en la zona apical (80 metros) pero a medida que se avanza hacia el oeste se produce un rápido ascenso de los niveles de agua, de tal forma que en la parte media se localiza a 60 metros de profundidad y en cercanías del valle del río Lavayén a menos de 10 metros (García, 1995). De acuerdo a Rocha Fasola (1998), los pozos brindan caudales de producción medios a elevados, entre 26 m³/h y 200 m³/h. Los caudales específicos de los niveles productivos localizados entre 70 y 200 metros de profundidad varían entre 0,9 y 82,5 m³/h/m, con un caudal medio de 31 m³/h/m. La transmisividad media es de 740 m²/día.

En el valle del río San Francisco los niveles piezométricos, reconstruidos a partir de los datos originales de los legajos de perforaciones, muestran que el sentido del flujo subterráneo coincide con la dirección del escurrimiento superficial. En el sector centro occidental, las curvas isopiezas muestran la influencia del flujo subsuperficial proveniente de los ríos Grande y Negro; mientras que más hacia el norte tienen tendencia a disponerse paralela a subparalelamente a los afloramientos orientales, lo que indicaría un aporte subterráneo con dirección transversal al curso fluvial. En el sector centro-oriental del Sistema Acuífero, los niveles estáticos del acuífero libre se localizan a una profundidad promedio de 12 a 15 metros y se profundizan notoriamente hacia el oeste y noroeste hasta alcanzar los 60 metros (localidad de Calilegua); mientras que se elevan progresivamente hacia el oriente (hasta 6 metros de profundidad) en inmediaciones de la confluencia del río San Lorenzo y San Francisco. Una característica sobresaliente de este sector del Sistema Acuífero son los elevados caudales específicos y altos caudales de explotación que, en zonas como Fraile Pintado, Chalicán, Arrayanal y Libertador General San Martín (Ledesma), pueden alcanzar los 75 m³/h/m y 500 m³/h, respectivamente. (García, Rocha Fasola y Moya Ruiz, 2008).

La calidad física y química del agua subterránea de este reservorio es variable. En el sector sur, a partir del Angosto de Aguas Calientes y ocupando la posición central del valle del río Lavayén, se encuentra una faja elongada coincidente con el eje del río, donde el agua subterránea presenta una

conductividad eléctrica entre 750 y 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En la parte apical-media de los sedimentos de bajada adosados a las sierras de la Cresta del Gallo y Santa Bárbara, la conductividad no supera los 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En este cuerpo se observa un incremento en la salinidad del recurso subterráneo a medida que se avanza hacia el oeste, es decir hacia el eje del valle del río Lavayén. Esta situación se observa claramente en los alrededores de la localidad de Santa Clara, puesto que en el sector oriental el agua explotada por los pozos presenta valores inferiores a 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$; en la parte media la conductividad del agua subterránea se encuentra entre 750 y 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y en el sector distal alcanza valores hasta de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En el sector occidental del valle del río Lavayén se observa una situación similar a la descrita anteriormente, distinguiéndose una extensa área donde se explota agua subterránea de baja mineralización que se corresponde con la zona de influencia del río Grande de Jujuy. La zonación en la calidad física del recurso responde a una situación normal en la evolución del agua subterránea, puesto que se produce un desmejoramiento en la calidad a medida que aumenta la distancia a la zona de recarga, indicando un mayor tiempo de permanencia en el medio de circulación. En la franja que ocupa la posición central del valle del río San Francisco, coincidente con el eje del curso, el agua subterránea presenta una conductividad media menor a 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En la parte apical-media de los sedimentos de bajada adosados a la sierra de Zapla, la conductividad eléctrica del agua explotada, se observa una pequeña faja donde los valores alcanzan y superan ligeramente los 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La zonación en la calidad física del recurso responde a una situación normal en la evolución del agua subterránea, puesto que se produce un desmejoramiento en la calidad a medida que aumenta la distancia a la zona de recarga, indicando un mayor tiempo de permanencia en el medio, por circulación regional. De acuerdo al diagrama de Piper, el agua explotada en la mayoría de los pozos que han puesto en producción distintos niveles acuíferos, se clasifica como bicarbonatadas cálcicas - magnésicas. El tipo de agua presente es indicativa de un período de permanencia relativamente corto y pone de manifiesto que en la zona existe una evolución geoquímica normal de las aguas subterráneas.

El potencial hidrogeológico del *SASFL* está comprobado en varios sectores. El gran número de pozos practicados en esta zona, sumado a los importantes caudales de producción y a la relativa buena calidad física y química, son indicativos de la importancia que tiene el recurso subterráneo como fuente de abastecimiento humano, agrícola y ganadero. Sin embargo, debe tenerse presente que existen áreas, localizadas, donde la calidad física y química puede condicionar el aprovechamiento del agua subterránea.

4.2. FOTOINTERPRETACIÓN DE LA COMARCA DEL YACIMIENTO

4.2.1. INTRODUCCIÓN

El área interpretada abarca una superficie de forma casi rectangular, comprendida entre los paralelos S 23° 33' y S 23° 43' y los meridianos W 64° 31' y W 64° 40', con una superficie de 314 Km². Las poblaciones más cercanas son Caimancito, ubicada al sudeste del área y Yuto, al noreste. El borde este está recorrido por la Ruta Nacional N° 34.

Se trata de una comarca de clima subtropical húmedo, con una densa cobertura arbórea que enmascara la geología, gran parte del escurrimiento de bajo orden y también la red de caminos y picadas que la recorren. Los principales cursos de agua que avenan el área son los arroyos Yuto y Sauzalito.

Se utilizaron cuatro imágenes del satélite Quick Bird:

- QB60_Ca1_07.img
- QB60_Ca2_07.img
- QB60_Ca3_07.img
- QB60_Ca4_07.img

La calidad de las imágenes está reducida por la presencia de franjas oblicuas en las cuales se ve reducido el contraste y el color vira hacia el celeste. Producen confusión porque asemejan sombras causadas por relieve. Se atribuyen a la presencia de un celaje de nubes tenues altas, de tipo cirro, presentes en la atmósfera en el momento de la toma.

La calidad también está comprometida por la falta de calidad de los colores, especialmente en la imagen QB60_Ca2_07.img, fuertemente virada al azul. Estas mismas imágenes también han sido incorporadas al software "Google Earth" donde lucen buen color y contraste a pesar de la nubosidad antes mencionada. Las imágenes están georeferenciadas de acuerdo a un sistema Transversal Mercator no convencional, no corresponde a ningún sistema reconocido.

4.2.2. TOPOGRAFÍA

Las curvas de nivel se generaron a partir de los modelos digitales de elevación SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), obtenidos por la NASA mediante el sistema de interferometría de radar, desde el trasbordador espacial Endeavour, en el año 2.000. Los datos para Latinoamérica estuvieron disponibles a partir del año 2.002. Estos datos consisten en una matriz regular de puntos con coordenadas x, y, z, separados entre sí por 3 segundos de arco (90 metros). El error planimétrico absoluto es de 9 metros, el error altimétrico absoluto es de 6,2 metros (con confianza del 90 %).

La experiencia lograda a través de múltiples aplicaciones permite valorizar a los modelos digitales de elevación como una herramienta cartográfica confiable que, convenientemente procesada, brinda una precisión equivalente a los levantamientos convencionales de escala 1:30.000, y supera generalmente a los de escalas más pequeñas (1: 50.000, 1: 100.000, etc.). Sus principales ventajas son:

- ✓ En una comarca con características selváticas el levantamiento con estación total está limitada a levantamientos poligonales por los principales cursos de agua, a un costo normalmente muy elevado.
- ✓ La metodología basada en GPS tiene fuertes limitaciones por la baja recepción de señal debajo de la fronda y la dificultad para transportar los receptores y lograr una densidad de puntos mínima aceptable y a un costo muy alto.
- ✓ La calidad de la información es constante porque los datos acotados tienen una distribución regular, los levantamientos terrestres ralean los puntos en lugares de difícil acceso.
- ✓ Los datos SRTM son mediciones sistemáticas que carecen de componentes subjetivas.
- ✓ El costo de sus productos es incomparablemente menor que cualquier levantamiento terrestre.

Los problemas y limitaciones de los datos SRTM son:

- ✓ En zonas de mucho relieve los valles muy angostos pueden producir datos que confunden a los algoritmos de interpolación (Kriging, nearest neighbor, minimum curvature, etc.) creando errores locales que deben ser corregidos. Esta dificultad es muy acusada en el área debida principalmente a la “rugosidad” impartida por la vegetación.
- ✓ En este caso el nivel de detalle de los datos SRTM (un punto cada 90 metros) no es compatible con la alta resolución de las imágenes Quick Bird (0.6 metros).
- ✓ La señal de radar del SRTM es reflejada por la copa de los árboles, por lo cual las curvas de nivel resultantes corresponden al techo arbóreo. Si se desea conocer con mayor aproximación la cota del suelo debe restarse entre 10 y 30 metros, dependiendo del porte de los árboles en cada lugar.
- ✓ La presencia de agua o nieve absorbe la señal de radar por lo que pueden aparecer puntos sin datos, los que deben ser corregidos por interpolación, no es el caso de esta área.
- ✓ Los datos de origen tienen el sistema de coordenadas Geográfico, con datum WGS-84, y fueron convertidos a Gauss-Krüger, faja 4 (aunque en rigor corresponde a la faja 3) con datum Campo Inchauspe.

4.2.3. INTERPRETACIÓN

A efectos de su interpretación y posterior carteo, las imágenes originales han sido reconvertidas del sistema cartográfico, como se explicó precedentemente y grabadas con formato .bmp, para su posterior inserción en un programa CAD, y renombradas como QB60_Ca1_07 en GK Z4 inch.bmp, etc. La interpretación se realizó visualmente y *no cuenta con comprobación de campo*.

La densa cubierta vegetal impide la observación de las rocas. Los únicos afloramientos corresponden a las ventanas dejadas por deslizamientos de terrenos, especialmente la capa edáfica, y la barranca en algunos meandros fluviales, en todos los casos de reducido tamaño. Consecuentemente la interpretación se ha basado, casi exclusivamente, en el análisis de rasgos geomorfológicos.

La única unidad estratigráfica presente en el área, según la Hoja Geológica 2366-IV, Libertador General San Martín (González, et. al.), es la Formación Jujuy. Esta unidad se puede separar en una sección inferior representada mayoritariamente por areniscas entre las que se intercalan niveles piroclásticos y una superior con intercalaciones conglomerádicas. La sección inferior

presenta arenisca parda rojiza, cuarzosa fina, con matriz limosa y cemento calcáreo, con intercalaciones de arcilitas y fangolitas. En esta sección se intercalan niveles de tobas de 0,50 a 3 metros de tonos blanquecinos, con muy poco contenido de biotita. La estratificación es tabular con estratificación entrecruzada. La sección superior está caracterizada por potentes conglomerados polimícticos con matriz arenosa. Se presenta en bancos tabulares y lentiformes masivos. Alternan a estos bancos de areniscas rojas. La edad de la Megasecuencia Jujeña es Plioceno - Pleistoceno temprano.”

Desde el punto de vista de la interpretación, se ha separado una sección superior y una inferior, sin que necesariamente esta diferenciación coincida con la descripción de la Formación Jujuy antes enunciada. La sección superior se destaca por su mayor resistencia a la erosión, de tal manera que la erosión diferencial permite que sobresalga nítidamente en el relieve, configurando un cordón que contornea la parte oeste, sur y parte del este de la comarca estudiada, donde pierde continuidad y se separa en un grupo de cerros que terminan por desaparecer a la latitud del arroyo Yuto.

El cordón muestra una morfología de pendientes estructurales que indican el buzamiento periclinal de las capas asociadas claramente a la presencia de un anticlinal buzante al sur. La sección superior posiblemente está constituida por conglomerados y areniscas en bancos potentes, muy cohesivos.

El criterio usado para marcar el contacto entre las secciones superior e inferior, ha sido el cambio en la pendiente de la escarpa correspondiente a la parte obsecuente, y no es un cambio brusco, sino más bien gradual, por lo que se infiere que el paso entre ambas es de tipo transicional.

La sección inferior, que ocupa la parte central del área estudiada, es notablemente monótona y su morfología, en especial el diseño del drenaje y la densidad del drenaje, sugieren un medio poco permeable y menos cohesivo que el anterior, se trataría de areniscas, conglomerados y también pelitas. La falta de “capas guía” no permite obtener mayor información del comportamiento estructural, en el seno de esta sección inferior.

Las terrazas fluviales adyacentes a los cursos de agua, así como distintos depósitos pedemontanos y la extensa planicie aluvial del río San Francisco, han sido indicados como cuaternario indiferenciado.

El área está dominada por un amplio anticlinal buzante al sur, con rumbo casi meridiano. Es asimétrico, con el plano axial inclinado al este.

Puede ser bien definido en su extremo sur, donde el cordón constituido por la sección superior de la Formación Jujuy muestra la nariz del pliegue. Su prolongación hacia el norte es inferida, ya que la sección inferior de esta formación no muestra indicaciones geomorfológicas que ayuden a definir el eje del pliegue.

En el extremo noroeste se identifica un eje sinclinal, también buzante hacia el suroeste. Tiene escasa expresión en el ámbito del área de trabajo, pero resulta evidente si se extiende el análisis a otras imágenes satelitarias más extensas.

En el extremo noreste se ha indicado un probable eje sinclinal de rumbo oeste - noroeste, buzante hacia el este - sureste. El único criterio que sugiere esta estructura es la presencia de un cordón de poca altura, que forma un arco que ha sido indicado en la fotointerpretación con una “línea guía” y que se interpreta como un banco resistente, correspondiente a la sección superior de la Formación Jujuy. Este cordón delimita una cuenca hídrica de forma ovalada, atípica y distinta a las otras cuencas del área.

Hay tres interpretaciones distintas para explicar lo descrito en el párrafo precedente:

- a) El cordón montañoso constituido por lo que aquí se denomina sección superior de la Formación Jujuy, tiene mayor altura y mayor grosor en el extremo noroeste del área. A partir de allí va disminuyendo progresivamente hacia el sur y en la parte este se discontinúa en morros cada vez menores. Es posible que se trate de un cambio facial que implique una menor cohesión y consecuentemente una menor respuesta a la erosión diferencial y que el leve cordón que contornea el sinclinal del noreste sea la misma sección superior de la Formación Jujuy, en una versión muy atenuada y similar, al menos en su cohesión, a la sección inferior. Abona esta interpretación la presencia de drenaje con diseño angular, por fracturación. El diseño de drenaje controlado por fracturación es característico de rocas cohesivas, y está ausente en entidades plásticas y poco cohesivas. En base a esta interpretación se ha mapeado la parte interna del sinclinal como sección superior.
- b) El cordón leve que contornea al sinclinal es solamente un banco más resistente intercalado en la sección inferior de la Formación Jujuy. En ese caso la parte interna del sinclinal sería sección inferior.
- c) Las tenues indicaciones morfológicas son frutos del azar y el pliegue sinclinal no existe.

El flanco oriental de la serranía termina abruptamente en una línea casi recta, que en términos generales coincide con la traza de la Ruta Nacional N° 34. Esto sugiere la presencia de una falla cubierta por los depósitos pedemontanos.

En la proximidad de la Planta Caimancito, el arrumbamiento general del cordón (sección superior de la Formación Jujuy) cambia levemente, lo que unido a un consistente lineamiento con azimut de 153 °, sugiere fuertemente la presencia de una o dos fallas oblicuas al eje del anticlinal. En este punto el desplazamiento aparente, siniestral, sería de 800 metros.

La condición climática cálida y húmeda ha dado origen a un suelo ácido, rico en materia orgánica, muy dependiente de la cobertura vegetal. Las pendientes y la alta pluviosidad de verano crean condiciones favorables para la generación de procesos de remoción en masa. Se observan numerosos deslizamientos, algunos originados por causas naturales y otros inducidos por los desmontes realizados para actividades petroleras o aperturas de picadas.

Los más grandes se encuentran en la vertiente obsecuente de las cumbres que culminan la serranía nor-occidental del área. Son principalmente deslizamientos de detritos (debris slide) y deslizamientos de rocas (rock slide), vinculados a pendientes que alcanzan hasta 39 °.

En la parte central del área estudiada se encuentran numerosos claros en la cobertura boscosa, cuyo tamaño pocas veces supera las 4 hectáreas, algunos de ellos producto de desmontes relacionados con pozos petroleros en producción, pero en la mayoría de los casos debidos a diversos mecanismos de remoción en masa que han transportado pendiente abajo a la capa superficial del terreno y su cobertura vegetal, dejando expuesta a la roca subyacente.

Los procesos más activos se repiten anualmente, otros se detienen y permiten que el clima propicio regenere rápidamente la capa edáfica y la cobertura vegetal, de manera que se puede observar una sucesión de sectores, en forma de media luna o alargados en el sentido de la pendiente, ocupados por poblaciones arbóreas con distinto grado de crecimiento. Un examen minucioso del porte y tono de las copas arbóreas, permite identificar las zonas de suelos que han permanecido estables durante décadas, de las recientemente movilizadas. Estas últimas son muy numerosas, por lo que se puede inferir que el principal mecanismo de degradación del relieve no es solo la erosión fluvial, sino la remoción en masa, con una componente antrópica.

Los tipos más frecuentes son el flujo de suelo (earthflow), el flujo de detritos (debris flow / torrent track) y el deslizamiento de detritos (debris slide). Los deslizamientos rotacionales son poco frecuentes.

4.3. MODELO GEOLÓGICO LOCAL

4.3.1. GEOLOGÍA

Desde el punto de vista geológico, la serranía del Socavón o Caimancito se encuentra en la Provincia Geológica Sierras Subandinas. Local y superficialmente, esta unidad fisiográfica se resuelve en un pequeño anticlinal buzante hacia el sur, desarrollado enteramente en sedimentitas del Terciario Subandino.

Este anticlinal, en superficie, está afectado por una falla inversa de rumbo submeridiano en el flanco oriental, buzante al oeste y labio bajo hacia el este, que se encuentra cubierta en gran parte de su extensión. En la proximidad de la Planta Caimancito, el arrumbamiento general del cordón cambia levemente, lo que unido a un consistente lineamiento con azimut de 153 °, sugiere fuertemente la presencia de una o dos fallas oblicuas al eje del anticlinal (Figura 4).

Hacia el este de esta fractura, se inicia una planicie suavemente inclinada hacia el naciente y al sudeste y que finaliza aproximadamente en una línea coincidente con la posición geográfica del río San Francisco; un poco más al este, comienzan a aflorar secuencias de areniscas finas, limolitas y arcilitas del Terciario Subandino que conforman la prolongación más boreal de la nariz de la sierra de Santa Bárbara. En esta zona, en las inmediaciones de las Aguas Calientes de Caimancito y su prolongación austral de las Aguas Calientes de La Quinta, se encuentra una falla inversa de rumbo submeridiano, buzante al este y con labio bajo hacia el oeste.

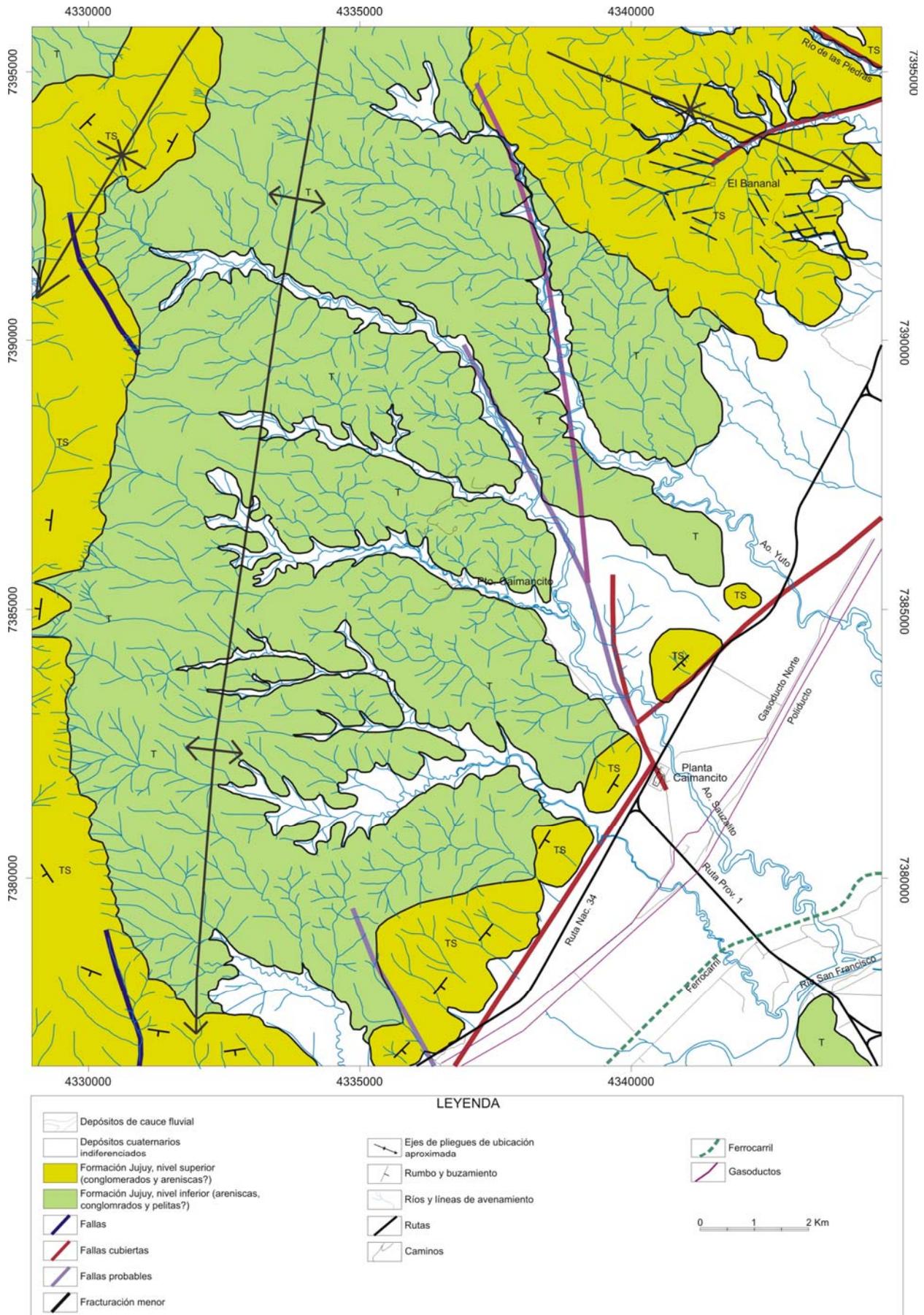


Figura 4: Fotogeología del Yacimiento de Caimancito y alrededores.

Como ya se expresó, al principio se dispuso de un total de 24 líneas sísmicas en formato de grabación SEGY, las que formaron el cuerpo inicial de un bosquejo sismo-estructural que se presentó a Pluspetrol S.A., como una primera entrega. Si bien este producto permitió definir con cierto grado de confianza la región donde se debería realizar las otras labores geofísicas (MT y Geoelectrónica), en ella quedaba en claro que un problema a resolver era fundamentalmente contar con datos del plano de referencia del dato sísmico.

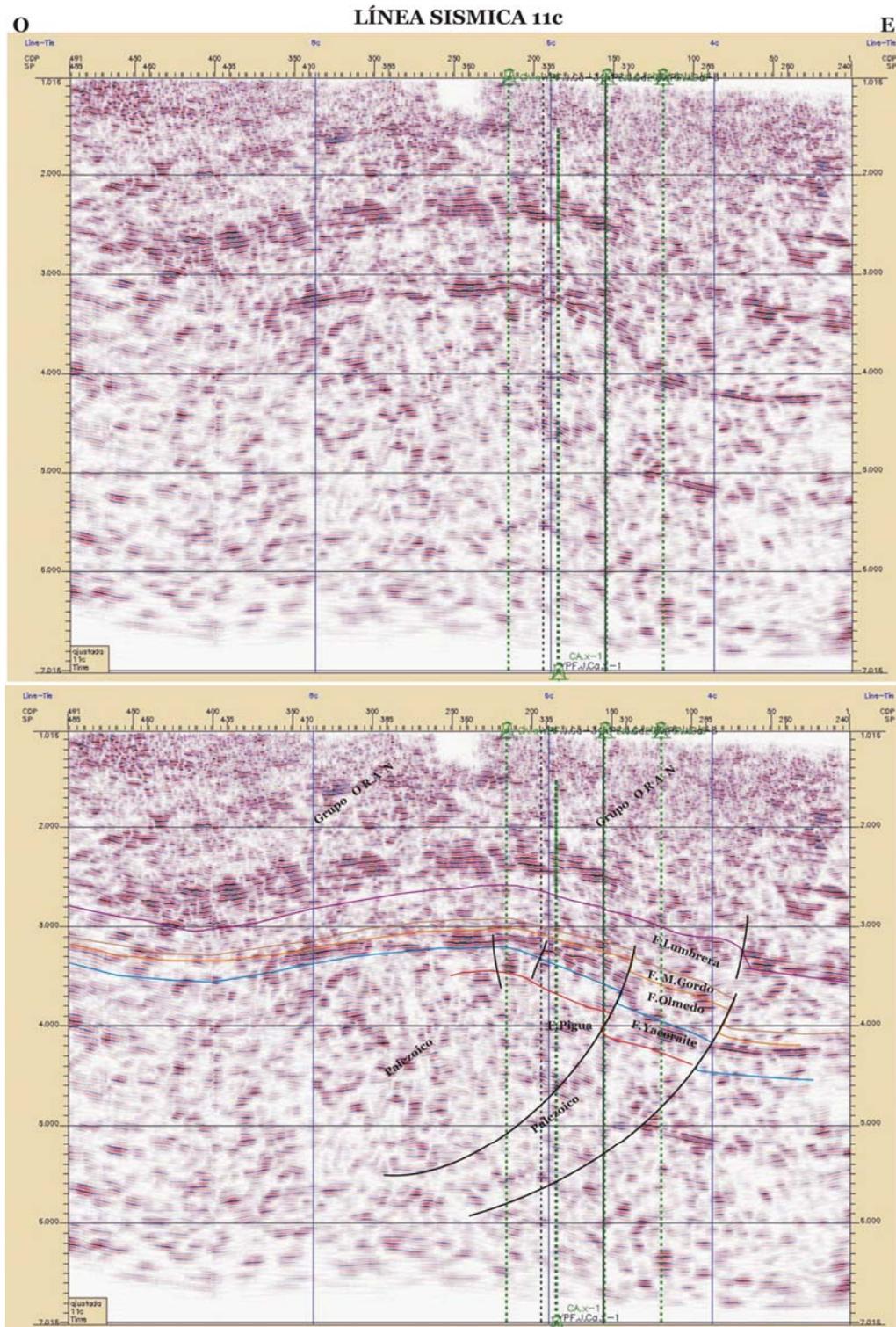


Ilustración 5: Línea sísmica 11c.

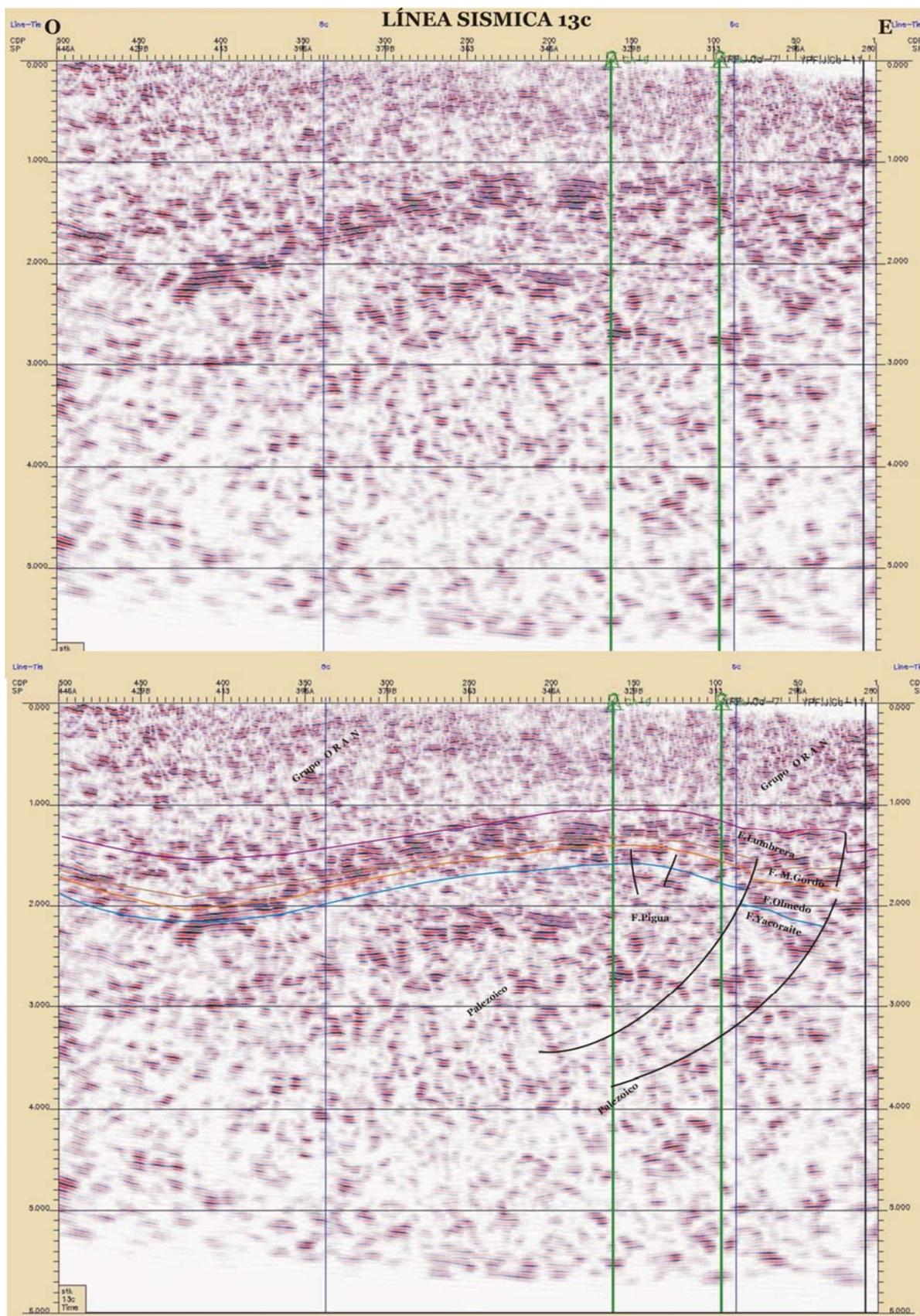


Ilustración 6: Línea sísmica 13c.

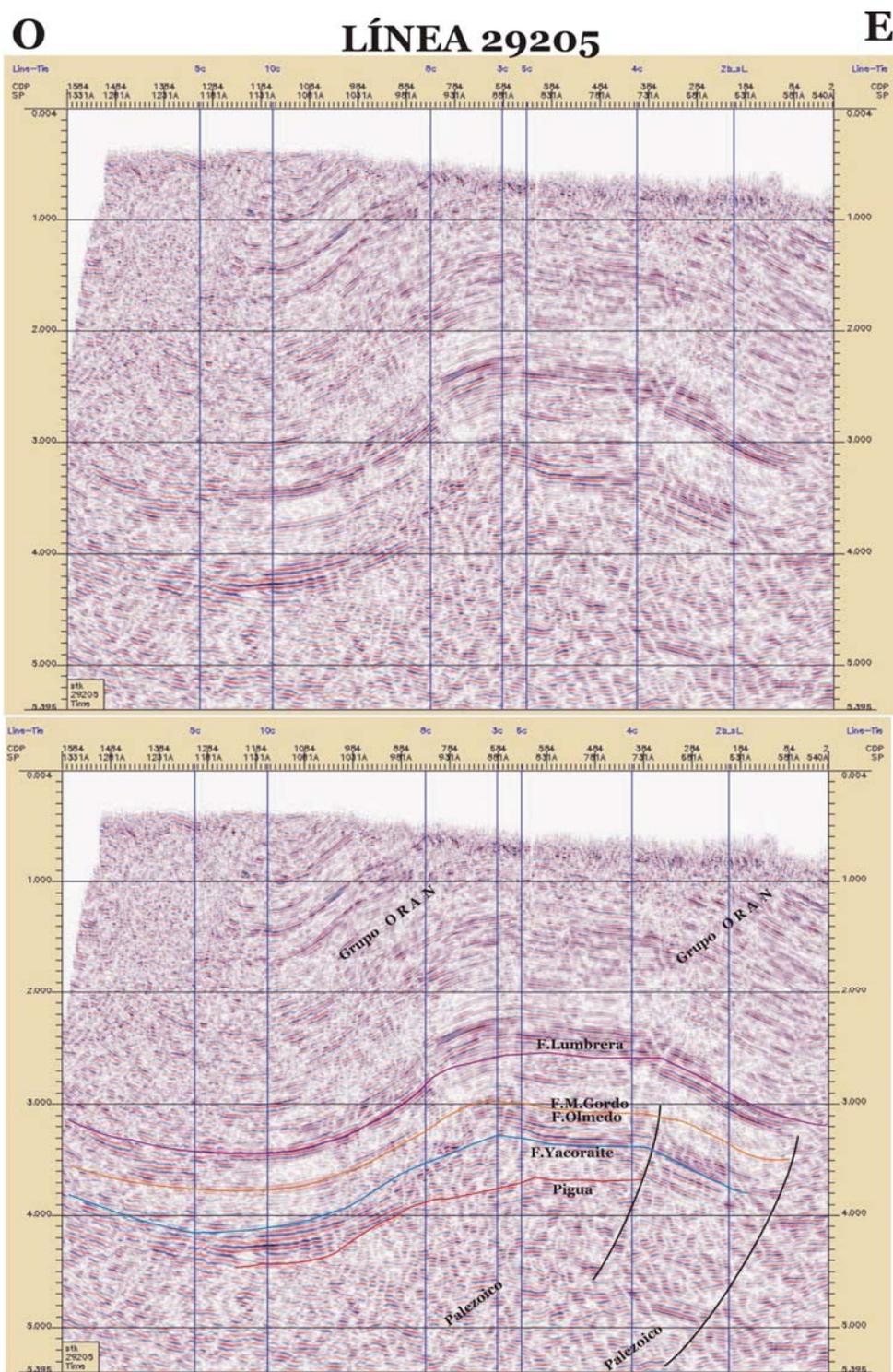


Ilustración 7: Línea sísmica 29205.

En esta etapa, se identificaron e interpretaron los reflectores sísmicos que coincidan con los topes de los subgrupos Santa Bárbara (en realidad la Formación Yacoraite) y del Subgrupo Balbuena (en realidad la Formación Lumbrera). Aún, con las limitaciones señaladas (falta de plano de referencia) se *obtuvo tentativamente* un plano isocrónico al tope de la Formación Yacoraite y un plano estructural al tope de la Formación Yacoraite, exigiendo en este caso, el amarre obligatorio de los datos geofísicos con los pases formacionales indicados en los pozos que conforman parte el Yacimiento Caimancito y que fueron oportunamente brindados por Pluspetrol S.A.

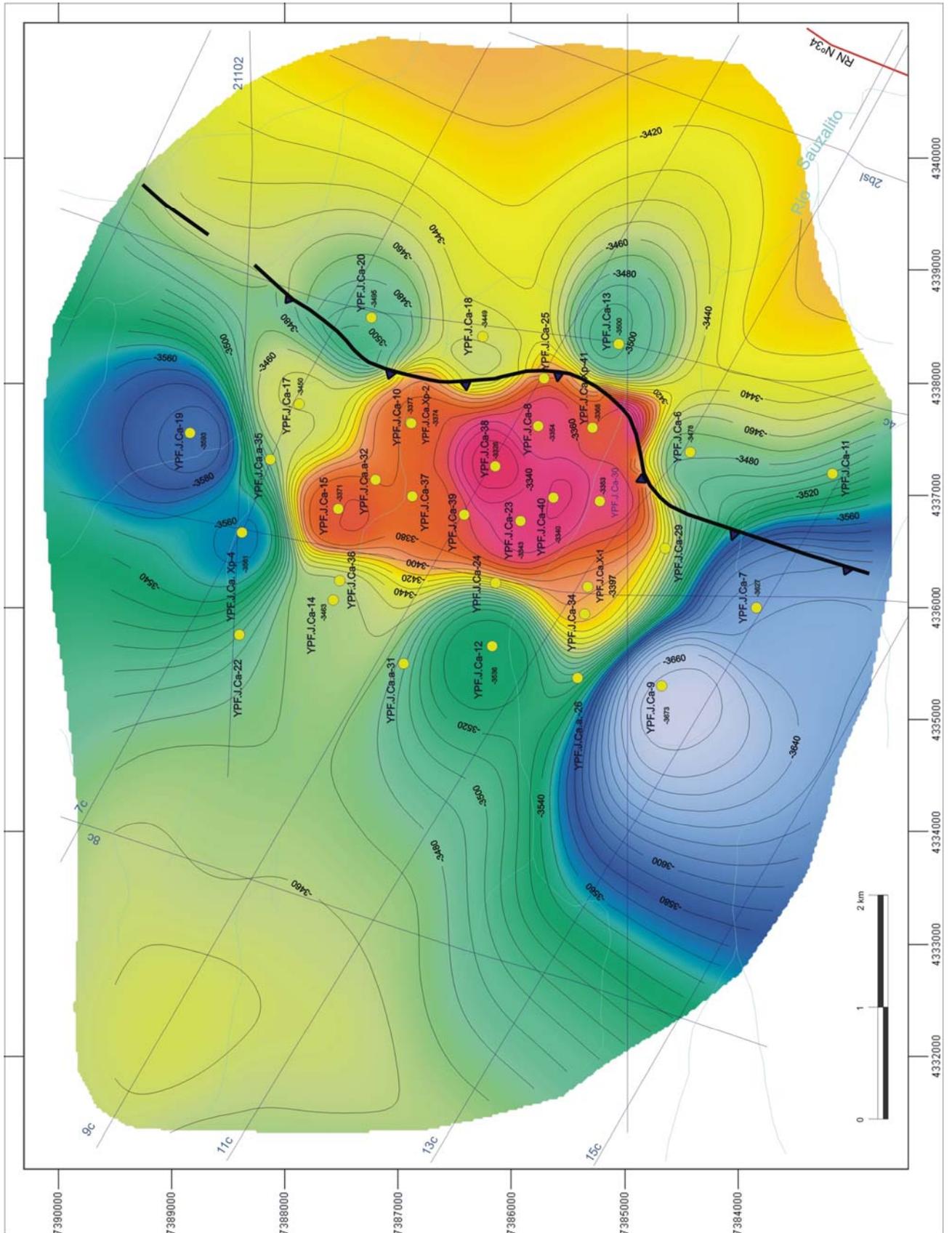


Figura 6: Mapa estructural al tope de la Formación Yacoraite.

Al contar con datos de las líneas sísmicas en copias heliográficas se realizó una segunda interpretación más ajustada y con mejor precisión. Haciendo un filtro de necesidad del objetivo planteado en este proyecto, se interpretaron sobre el papel un total de 11 líneas conformando algo más de 100 km lineales (3000 trazas), los que cubren 120 km². Lo importante de esta información es que cubre totalmente los límites del Yacimiento Caimancito. Estas líneas son: 29205; 3c; 21102; 7c; 11c, 36003; 15c; 8c; 6c; 4c; 2b_sl y 2068.

a) Registración

La campaña de adquisición del dato se realizó en 1979 y cuenta con el beneficio de haber utilizado parámetros comunes (equipamiento y geometría) tanto de registración y procesamiento. Esta particularidad permite tener una visión uniforme a un dato no del todo pretendido, ya que la relación señal/ruido es relativamente baja, asignadas a distintas causas; entre las geológicas puras y las técnicas del método sísmico (adquisición y procesamiento). Algunas de las razones que se pueden enumerar como posible responsable o suma de más de uno de ellos:

- ✓ Una topografía de serranías.
- ✓ Capas geológicas con distintos ambientes de sedimentación (continentales o marinos), con desiguales impedancias.
- ✓ Limitaciones por poco recubrimiento para la época actual.
- ✓ Cálculos en las correcciones estáticas.
- ✓ Instrumentos con cierta "perdida" de información por su mecánica.
- ✓ Muestreo digital del dato.
- ✓ Potencia de algoritmos de procesos.
- ✓ No aplicación de migración del dato en una zona estructurada.
- ✓ Estiramiento de la ondícula en reflexiones superficiales.
- ✓ Otros.

Los parámetros principales de esta registración:

- ✓ Sismógrafo: MDS 10 de 96 canales.
- ✓ Fuente: Explosivos (carga promedio por posición (10 a 20 Kg).
- ✓ Estaqueo: 50 metros.
- ✓ Puntos de explosión: 100 metros.
- ✓ Cobertura: 24 sumas.
- ✓ Tendido simétrico: Longitud 2350 m de ala y apartamiento de 50 a 100 metros.
- ✓ Longitud de reg.: 6 segundos.
- ✓ Muestreo: 4 milisegundos.
- ✓ Recep. Mult.: Mix-Max (20 elementos, peso variable, long. 95 metros).

b) Procesamiento

Debido a la homogeneidad de los parámetros, tanto en la registración como en el procesamiento de los datos, se producen beneficios en la interpretación y en los resultados finales. El paquete mayoritario de líneas sísmicas (LS) ha sido procesado por una misma compañía (GEOSOURCE) en un mismo período de tiempo, utilizando una similar secuencia de procesamiento. Al procesar todas las líneas sísmicas como un solo conjunto se puede examinar todos los cruces entre líneas, se pueden utilizar las mismas o similares leyes de stack, se verifican y chequean que las correcciones estáticas sean las mismas en la intersección de líneas, se procede a la elección de un único plano de referencia, etc. Todos estos procedimientos facilitan un correcto "atado" de las líneas sísmicas sin saltos considerables entre cruces. Algunos datos del procesamiento son:

- ✓ Correcciones estáticas a un plano de referencia 350 metros.
- ✓ Velocidad de reemplazo 2000 m/s.
- ✓ Ausencia de migración del dato.

En general y resumiendo la información con la que se cuenta, es de poca coherencia (continuidad), dando una impresión visual de pobre alineamiento. Esto es acompañado en general (como este caso) de una correlación de desigual carácter con cambiante forma de pulsos, longitud de onda y amplitudes.

La sísmica convencional (2D) (dependiendo de lugares), generalmente está centrada en los 30 ciclos, a saber un poder de resolución vertical de aproximadamente 30 metros. Se define este poder de resolución como el espesor mínimo de un reservorio para el cual se puede levantar el mapa del techo y la base.

Cualquiera que sea la fuente utilizada: dinamita, vibraciones de alta frecuencia y otros; las ganancias en resolución son exiguos y ello se debe a la atenuación de las ondas sísmicas durante la propagación en el suelo.

En este caso se puede ensayar una operación de resolución vertical al horizonte reflector objetivo (interpretado en amarillo). Este objetivo fue elegido a raíz de observar en el legajo de Pozo YPF.Jj.Ca.x-1 en una profundidad de aproximadamente 1600 metros un paquete con cierta potencia de areniscas (60 metros) lo que podría constituir una posibilidad de estudio. En sísmica, como en óptica, el poder de resolución aumenta cuando la longitud de onda " λ " disminuye. Diferentes autores han propuesto valores optimistas $\lambda/12$ o $\lambda/8$ como la distancia más pequeña que separa dos reflectores marcables. Aquí se considera que $\lambda/4$ corresponde a un límite razonable cuando se quiere distinguir, y por consiguiente mapear, la base y el techo de una serie prospectiva sin ser disturbado por el fenómeno de tuning. Los datos para tener en cuenta sobre la traza del pozo son, un periodo de 45 milisegundos y una velocidad media de 2700 m/s a unos 1600 metros de profundidad.

$$\lambda/4 = 2700 \text{ m/s} / 4 \times 22 \text{ hz} = 30 \text{ metros}$$

Como la velocidad aumenta con la profundidad y además la frecuencia disminuye, es lógico que la resolución para definir tope y base de un paquete sedimentario a través de la ondícula sea de mayor espesor.

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

Incluso cuando este grado de resolución no es requerido para la elaboración de un mapa estructural, el estudio de las variaciones de amplitud vinculadas a la presencia de hidrocarburos (Bright Spot, Amplitude Offset... (AVO)) implica que las variaciones observadas representan cambios a nivel de un reservorio individualizado.

Lo más importante es que se cumplió con el objetivo planteado y se confeccionó un plano estructural en tiempo en la zona de interés y que sin duda ajustará cualquier incertidumbre a un trabajo futuro.

c) Mapa Isocrónico o Estructural en Tiempo

La interpretación se efectuó, como ya se expresó, en soporte papel tratando de individualizar un reflector sísmico subsuperficial que presente entre otras propiedades; continuidad areal y cierre estructural. Este nivel guía se encuentra cercano a un paquete principalmente arenoso que se encuentra entre los 1.550 a 1.610 m.b.b.p. (60 metros de potencia) señalado en la descripción de cutting del Pozo J.Ca.x-1. El plano de referencia utilizado es de 350 m.s.n.m, equidistancia de curvas isócronas de 20 ms. La presentación se realiza en escala 1:50.000 y puede observarse arealmente la distribución y el comportamiento de este nivel guía.

Identificado el nivel guía y transportado mediante la ley de velocidad del Pozo J.Ca.x-1, a la línea sísmica 11 c (cercano al pozo de referencia), se desarrolló en la grilla conformada por el cuerpo de líneas restantes. De esta manera se obtuvo un plano isocrónico o estructural en tiempo de este nivel. Construido las isolíneas se puede advertir una estructura anticlinal cerrada en las cuatro direcciones, en disposición braquianticlinal, con un frente de fractura inversa buzante al oeste y con labio bajo al este en el flanco oriental. Se puede inferir que las discontinuidades, los repentinos cambios de amplitud y la dificultad de correlación entre los reflectores superficiales, son la respuesta al paso de perturbaciones elásticas a través de depósitos fluvio – eólicos, típico del ambiente de depositación del Terciario Subandino.

La longitud en dirección meridiana de la estructura es de aproximadamente 10 kilómetros; mientras que en sentido perpendicular es de aproximadamente 7 kilómetros. Presenta un relieve estructural significativo entre la isócrona de 750 mseg y 900 mseg, que traducido con la ley de velocidad, representa aproximadamente unos 400 metros.

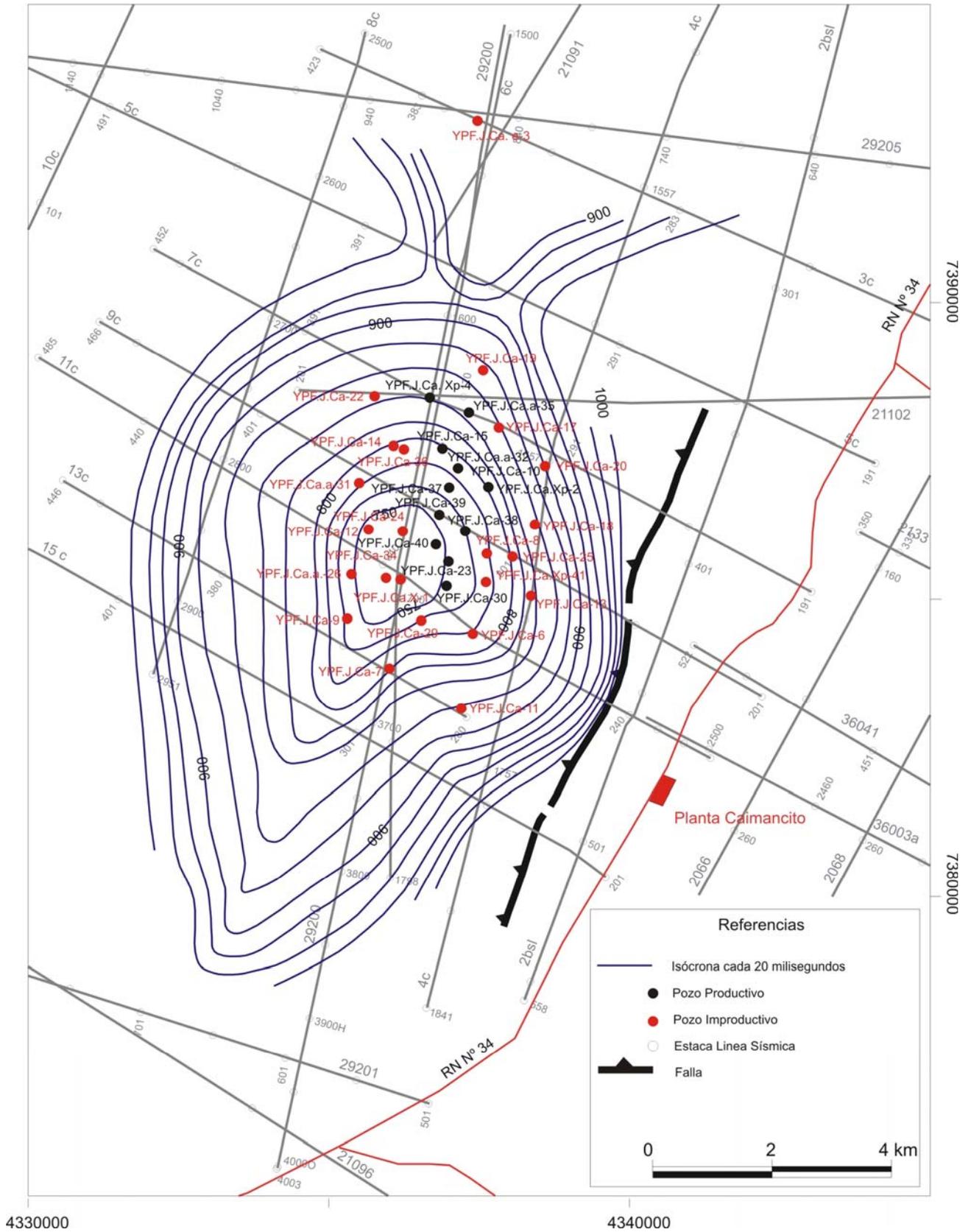


Figura 7: Mapa isocrónico del nivel reflectivo más superficial en Terciario Subandino.

4.3.2.2. INTERPRETACIÓN GEOFÍSICA DE POZOS

Los perfiles geofísicos (formato LAS) de los pozos consultados fueron: YPF.J.Ca.x-1 (Well0100), YPF.J.Ca.xp-2 (Well0102), YPF.J.Ca.e-3 (Well0103), YPF.J.Ca.xp-4 (Well0104), YPF.J.Ca-6 (Well0106), YPF.J.Ca-7 (Well0107), YPF.J.Ca-8 (Well0108), YPF.J.Ca-9 (Well0109), YPF.J.Ca-14 (Well0114), YPF.J.Ca-17 (Well0117), YPF.J.Ca-18 (Well0118), YPF.J.Ca-19 (Well0119), YPF.J.Ca-23 (Well0123), YPF.J.Ca-24 (Well0124), YPF.J.Ca.a-26 (Well0126), YPF.J.Ca.a-29 (Well0129), YPF.J.Ca.a-32 (Well0132), YPF.J.Ca-37 (Well0137), YPF.J.Ca-38 (Well0138) y YPF.J.Ca-40 (Well0140).

En formato papel se consultaron el log del Pozo J.Ca.x-1 desde 30 a 800 m.b.b.p; 1100 a 1550 m.b.b.p. y de 3.019,5 a 3.356,3 m.b.b.p. También se utilizó el legajo parcial del Pozo J.Ca.a-7 desde el intervalo de 855,5 a 3.173,6 m.b.b.p. Información parcial del Pozo J.Ca.xp2 entre el intervalo de 1.388,4 a 3.061,2 m.b.b.p. También se utilizó datos del log del pozo J.Ca-8, desde los 750 a 2.936,1 m.b.b.p.

El único pozo que cuenta con descripción completa de cutting e interpretación de perfil estratigráfico es el Pozo J.Ca.x-1, desde los 30 hasta los 4.010,5 m.b.b.p.

Los únicos pozos que cuentan con perfiles geofísicos (SP y Caliper) en formato LAS, a nivel de la profundidad de inyección de las secuencias pertenecientes al Terciario Subandino (menos de 2.000 metros de profundidad), son los pozos: YPF.J.Ca.x-1 (Well0100), YPF.J.Ca.xp-2 (Well0102), YPF.J.Ca.e-3 (Well0103), YPF.J.Ca.xp-4 (Well0104), YPF.J.Ca-6 (Well0106), YPF.J.Ca-7 (Well0107), YPF.J.Ca-8 (Well0108), YPF.J.Ca-9 (Well0109), YPF.J.Ca-14 (Well0114), YPF.J.Ca-17 (Well0117), YPF.J.Ca-18 (Well0118), YPF.J.Ca-19 (Well0119) y YPF.J.Ca-23.

En cada caso que fue posible (información digital o en papel) y donde existía registro de SP de las secuencias terciarias, se calcularon valores aproximado de resistividad del agua de formación. Para esta etapa del trabajo, además de la interpretación propiamente dicha, se utilizaron gráficos y ábacos de los manuales de Interpretación de Perfilajes de Dresser Atlas y Schlumberger. De esta manera se pudo determinar que hasta una profundidad promedio de 800 metros bajo boca de pozo, en parte del Yacimiento Caimancito, existen niveles acuíferos con valores de Residuo Seco menores a 3.000 mg/l, las que deben ser consideradas como potencialmente aptas para el consumo animal y humano. Entre los 800 y 1.200 metros de profundidad se encuentran aguas de formación salobres a saladas (3.000 mg/l a 10.000 mg/l de Residuo Seco). Sin embargo, por debajo de los 1.200 metros de profundidad, se observa claramente que los contenidos salinos de los niveles arenosos y limosos se incrementan notablemente, tanto que entre los 1.500 y 1.600 m.b.b.p., los niveles acuíferos presentarían salinidades equivalentes en CINA de hasta 30.000 ppm o conductividades eléctricas superiores a 40.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Este comportamiento, variable en cuanto a la salinidad de las aguas subterráneas, es típico de los reservorios de agua desarrollados en sedimentitas del Terciario Subandino del noroeste argentino (tanto en el ámbito de las sierras Subandinas como en el subsuelo del Chaco Salteño).

A modo de ejemplo y relativamente cercano al área de estudio, se puede citar que durante la construcción de un Pozo Inyector en la Planta de Shell CAPSA, localizada sobre el camino de acceso (unos 5 km al oeste de la ruta nacional N° 34) al Yacimiento Valle Morado, se ha encontrado agua dulce (800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en areniscas del Terciario Subandino hasta una profundidad de 700 metros. También se señala que entre los intervalos de 1.108 a 1.114 y 1.122 a 1.128 metros, el agua de formación tendría conductividades eléctricas de aproximadamente 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fuertes, et. al., 1999 Servicio de Prestación a Terceros – INASLA – Universidad Nacional de Salta).

Otro ejemplo reencuentra en la zona norte de la provincia de Salta, en la zona de Yacuy – Piquirenda, donde la Universidad Nacional de Salta. A través del INASLA (Instituto de Aguas Subterráneas Para Latinoamérica), efectuó en el año 2.000 un estudio de Prefactibilidad Para la Inyección de Salmueras de la Planta de Pan American Energy LLC, donde los autores determinan que hasta los 300 metros de profundidad existen recursos hídricos subterráneos comprobados en las sedimentitas del terciario Subandino que almacenan agua de buena calidad física y química, apta para el consumo humano, ganadería y riego de plantaciones. Los mismos autores, indican en el trabajo de referencia que la profundidad más segura para la inyección de salmueras es por debajo de los 1.500 metros ya que se pueden encontrar niveles acuíferos con agua apta para el consumo.

En la zona del Chaco Salteño, García (1998) ha identificado entre otras unidades hidrogeológicas, al Complejo Acuífero Terciario Subandino (CATSa) que conforma a un conjunto de acuíferos confinados, desarrollados enteramente en sedimentitas del Terciario Subandino y que abarca territorio salteño, chaqueño y formoseño en la república argentina y parte del chaco paraguayo y boliviano (unidad hidrogeológica conocida en la actualidad como Sistema Acuífero Toba-Yrendá-Tarijeño). Este complejo acuífero estudiado en detalle por García (1998), se caracteriza por presentar agua de formación variables entre 700 y 25.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dependiendo de la ubicación geográfica y de la profundidad. Un pozo realizado en la localidad de Capitán Pagé (límite entre Salta y Formosa) que alcanzó los 400 metros, puso en producción agua dulce proveniente de niveles arenosos y limo arenosos del Terciario Subandino.

En el Pozo J.Ca.x-1, tanto los registros de SP, resistividad y el perfil estratigráfico muestran entre los 1.550 a 1.610 m.b.b.p., una secuencia de arenas a las que le supra e infrayacen arcillas. En la descripción litológica se señala "Arenisca pardo claro, grano fino, subredondeada, semicompacta, en parte deleznable, blanda, con leve reacción al HCl. La arcilla superior (entre los 1.500 a 1.550 m.b.b.p.), se describe como compacta a semicompacta, fractura irregular, semidura. La arcilla inferior (1.610 a 1.660 m.b.b.p.), presenta características similares a la anterior. También se señala entre los 1.660 y 1.855 m.b.b.p una arenisca pardo claro, de grano fino, subredondeada, cemento arcillosos, blanda, algo deleznable, leve reacción al HCl; con intercalaciones de arcillas y arcillas arenosas, pardo grisácea, con un nivel de tobas gris y gris verdoso entre los 1775 a 1825 m.b.b.p. Otro nivel potencial para inyección se desarrolla entre los 2.220 a 2480 m.b.b.p., conformado por areniscas finas a mediana, levemente calcáreas, con intercalaciones de pequeños niveles de arcilitas y tobas arenosas. Por último, dentro de las secuencias asignadas al Terciario Subandino se encuentra un nivel entre los 2.570 a 2645 m.b.b.p., de areniscas finas a mediana, semicompacta, semidura, con pequeñas intercalaciones de limolitas, arcilitas y tobas gris verdosa.

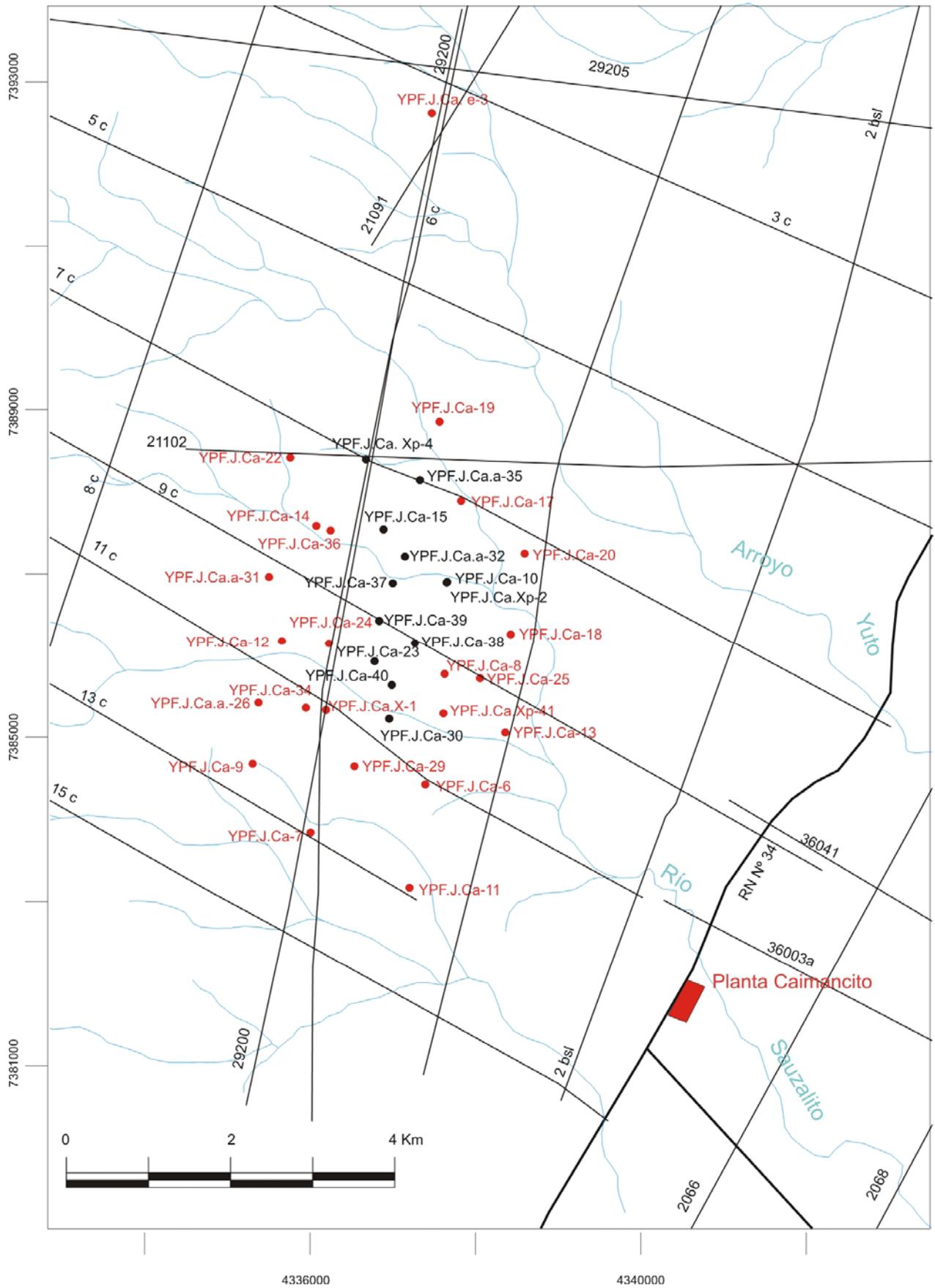


Figura 8: Mapa de ubicación de pozos en el Yacimiento Caimancito (en color negro, se han representado los pozos actualmente en producción).

4.3.2.3. INTERPETACIÓN DE PERFILES GEOELÉCTRICOS

De acuerdo a la distribución de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) realizados en el área de trabajo, se confeccionaron perfiles de correlación con la finalidad de establecer las principales características del subsuelo, tanto lateralmente como en profundidad. La interpretación de los sondeos, se efectuó teniendo en cuenta la configuración de curvas similares (familias de curvas), el ambiente geomorfológico de cada sector y datos de perforaciones cercanas. De esta forma se integraron los datos eléctricos y los geológico - geomorfológicos con el objetivo de ajustar la calidad de los perfiles realizados. Los perfiles poseen una exageración en la escala vertical tal que permite la visualización de la estructura en profundidad; por lo que en la mayoría de las reconstrucciones, las electrocapas más superficiales y de poco espesor han sido obviadas en las representaciones gráficas.

Sobre la base de las diferentes correlaciones, se han identificado unidades geoelectricas interpretadas como facies sedimentarias pertenecientes al Cuaternario y otras, asignadas a sedimentitas del Terciario Subandino.

Las resistividades de los sedimentos modernos reflejan los cambios litológicos propios de ambientes geomorfológicos como el que se presenta en la zona de estudio, con cauces temporarios y permanentes, llanuras de inundación, paleocauces, sedimentos de bajada aluvial, zonas de subafloramientos y afloramientos, etc.; pero la característica principal es que los sedimentos Cuaternarios (exceptuando las arcillas y limos), en general, se presentan con valores de resistividad verdadera mayores que las sedimentitas terciarias infrayacentes. Los perfiles que muestran las mayores variaciones faciales y de espesores en las secuencias modernas son los realizados en sentido oeste – este.

Los valores de resistividad asignados al Terciario Subandino son relativamente homogéneos y están representados normalmente por curvas tipo Q en los SEV. Esta situación es indicativa de que las facies sedimentarias más conspicuas de las secuencias terciarias son arcillas y limos; con niveles de arenas y algunos conglomerados intercalados.

A modo de simplificar la exposición y comprensión de las principales características de cada perfil geoelectrico, se han identificado tres grandes unidades que fueron denominadas Zona Superior; Zona Intermedia o de Interés Hidrogeológico y Zona Inferior o Basamento Conductivo. La primera normalmente incluye dos o tres electrocapas de espesor y resistividades variables, asignados en la mayoría de los casos a facies finas (limos y arcillas) y gruesas (arenas y gravas) que, de acuerdo a la posición geomorfológica del perfil, pueden representar a la Zona No Saturada o a una secuencia donde se encuentra un acuífero libre y uno o dos acuíferos semiconfinados. La segunda electrocapa o Zona Intermedia representa una unidad con valores de resistividad moderados y espesores variables que son interpretados como una secuencia alternante de arcillas y arenas (predominando las primeras) donde se encontrarían dos o más acuíferos confinados. La Zona Inferior se corresponde generalmente con valores de resistividad bajos y fueron interpretados como pertenecientes a las secuencias del Terciario Subandino que, en algunos sectores de la zona de estudio, incluirían varios niveles de acuíferos confinados.

Los datos completos de los SEV se encuentran en las planillas junto a las curvas y sus correspondientes interpretaciones geoelectricas (Tomo 2 - Anexos). A continuación se detallan los perfiles elaborados y se describen sus principales características.



Foto 7: Ejecución de Sondeo Eléctrico Vertical sobre la ruta provincial N° 1.



Foto 8: Sondeo Eléctrico Vertical en el camino de acceso al Yacimiento Caimancito.

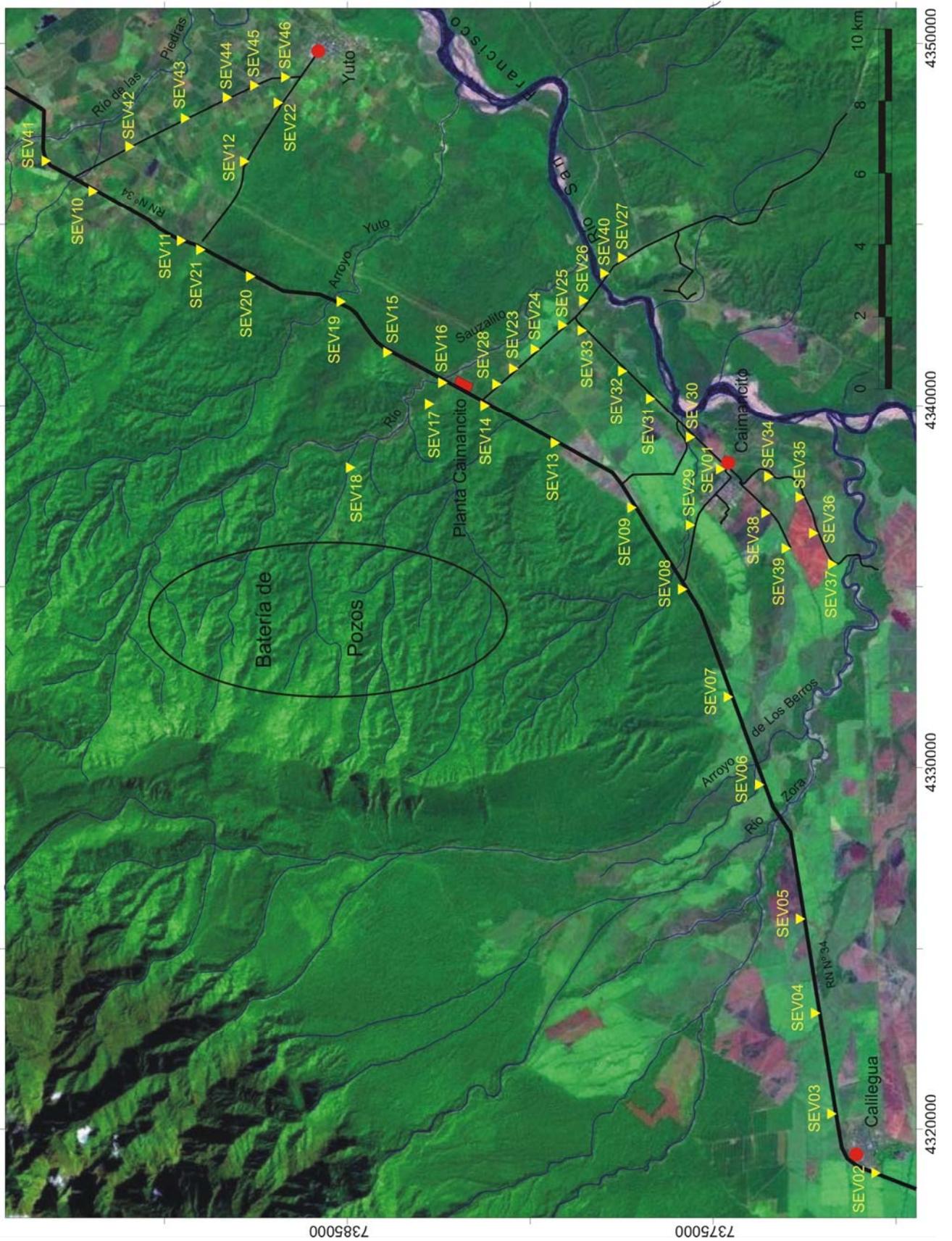


Figura 9: Mapa de ubicación de SEV.

Perfil Geoeléctrico Calilegua – Acceso Caimancito

Está realizado con los sondeos eléctricos verticales 02, 03, 04, 05, 06, 07 y 08; efectuados a la orilla de la ruta nacional N° 34. El SEV 02 se efectuó en inmediaciones de dos pozos que explotan agua subterránea en la zona de Calilegua; uno propiedad del Ingenio Ledesma y otro del Municipio. La escasa información obtenida de estas perforaciones fue utilizada para ajustar el modelo físico – matemático. Desde el punto de vista eléctrico se han identificado tres grandes unidades que, desde arriba hacia abajo se han denominado: Zona Superior; Zona Intermedia o de Interés Hidrogeológico y Zona Inferior o Basamento Conductivo.

La Zona Superior está conformada por dos o tres electrocapas de distintos espesores y resistividades. En general, se observa que la potencia de la Zona No Saturada disminuye hacia el noroeste, al mismo tiempo que los valores de resistividad se hacen más pequeños. Esta última situación es indicativa que en esa dirección se produce un enarcillamiento de la secuencia. Los valores resistivos encontrados en los alrededores de la localidad de Calilegua (625 a 693 Ohm.m) señalan la presencia de facies sedimentarias conformadas por rodados de todos los tamaños, gravas y arenas, situación coincidente con las descripciones de cutting de los pozos localizados en el sector noroeste de Ledesma y Calilegua. Más hacia el noreste, como ya se expresó, los valores de resistividad disminuyen (95 a 144 Ohm.m), indicando una disminución del grano de los sedimentos modernos (arenas, limos y arcillas). El espesor de esta electrocapa alcanza aproximadamente los 60 metros en la zona de Calilegua, disminuye aproximadamente a los 40 metros en el SEV 05; 22 metros en el SEV 06 y solamente 7 metros en el SEV 07.

La Zona Intermedia o de Interés Hidrogeológico está compuesta por una electrocapa resistiva a semiresistiva (232 a 58 Ohm.m) indicando la preponderancia de facies gruesas (rodados, gravas y arenas) sobre las finas (limos y arcillas). Esta unidad se caracteriza por presentar un importante espesor en el sector oeste (la base de la unidad se encuentra entre 590 a 690 metros); mientras que disminuye rápidamente hacia el noreste (220 a 100 metros). Se considera que esta unidad incluye un acuífero libre muy potente en las inmediaciones de Calilegua y Ledesma y uno o más acuíferos semiconfinados a medida que se avanza hacia el este. Entre los SEV 05 y 06, se interpreta la existencia de una falla o algún otro tipo de control estructural ya que es muy notoria la disminución del espesor de la unidad; tanto que en el SEV 05, la base se asienta en los 590 metros de profundidad aproximadamente, mientras que en el SEV 06 se localiza tan solo a los 220 metros y, más allá, en el SEV 07 la base se encuentra a los 100 metros de profundidad aproximadamente. En este último tramo (sondeos 06 y 07), se produce también una disminución de los valores de resistividad, señalando una mayor participación de facies finas como arenas, limos y arcillas.

La Zona Inferior o Basamento Conductivo, exceptuando el SEV 02, se detecta en todos los demás. La característica fundamental de esta unidad son los valores bajos de resistividad (24 a 65 Ohm.m), señalando la preponderancia de sedimentos finos como arenas, limos y arcillas. Se interpreta que esta unidad está conformada por secuencias pertenecientes al Terciario Subandino que aflora en los sistemas serranos cercanos. El techo de esta electrocapa, levanta progresivamente a medida que se avanza hacia el noreste y aflora en la sierra de Caimancito (690 metros en el SEV 03, 630 metros en el SEV 04; 590 metros en el SEV 05; 220 metros en el SEV 06 y 100 metros en el SEV 07.

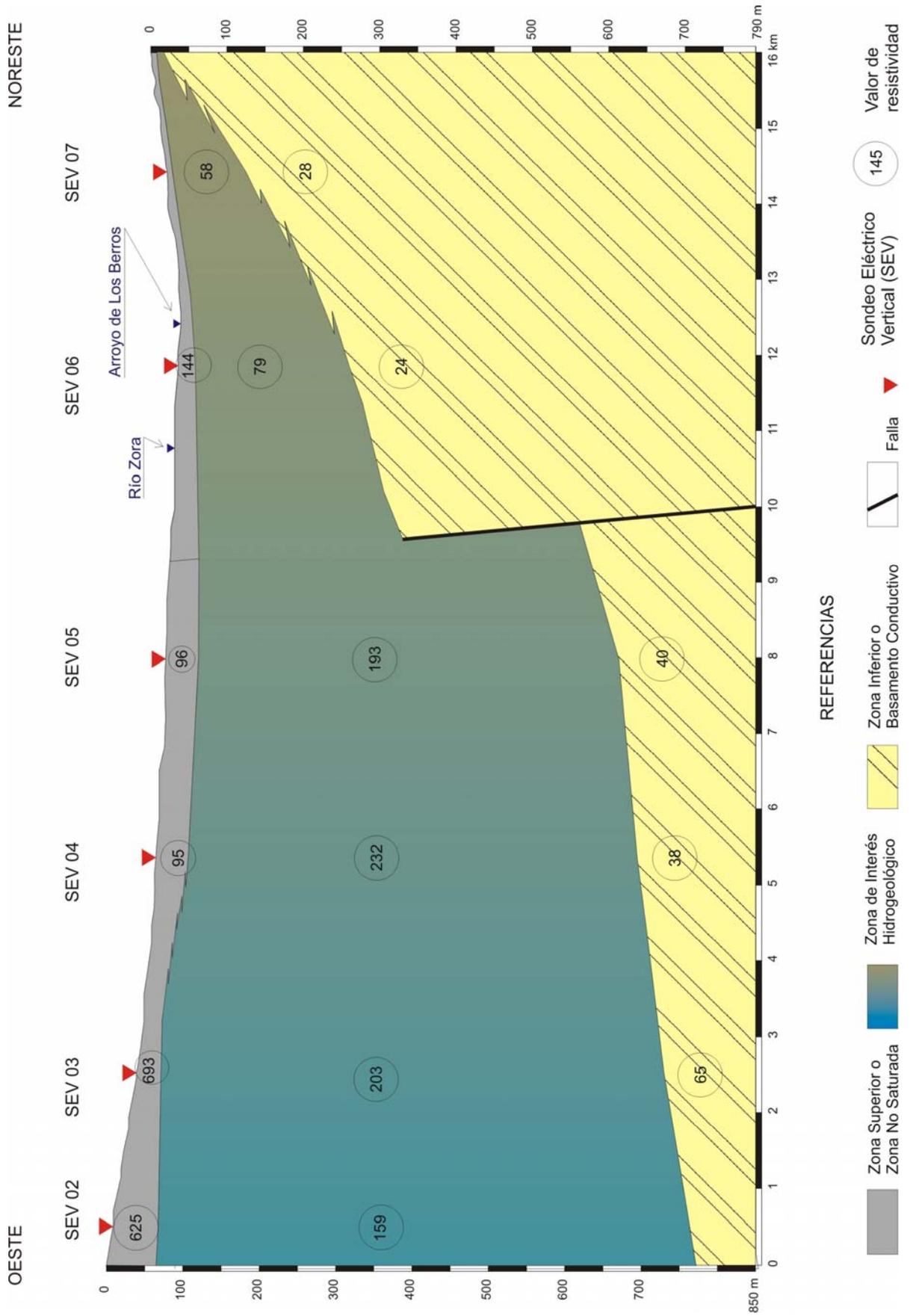


Figura 10: Perfil Geoeléctrico Calilegua – Caimancito.

Perfil Geoeléctrico Acceso Caimancito – Estación FFCC Pueblo Caimancito

Está realizado con los sondeos eléctricos verticales 08, 29 y 01; efectuados en el cruce de la ruta nacional N° 34 y el acceso a Caimancito; el SEV 29 en el tramo medio de la ruta de acceso al pueblo de Caimancito y el SEV 01 se efectuó en inmediaciones de la Estación de FFCC de la localidad. La escasa información obtenida de las dos perforaciones existentes en la Planta de Agua existente en la localidad fue utilizada para ajustar el modelo físico – matemático. Desde el punto de vista eléctrico se han identificado tres grandes unidades que, desde arriba hacia abajo se han denominado: Zona Superior; Zona Intermedia o de Interés Hidrogeológico y Zona Inferior o Basamento Conductivo.

La Zona Superior está conformada por dos o tres electrocapas de distintos espesores y resistividades. En general, se observa que la potencia de esta unidad es casi constante en todo el perfil (4 metros), exceptuando el SEV 29, donde alcanza unos 13 metros de espesor. Los valores de resistividad varían entre 6 y 78 Ohm.m, indicando la preponderancia de facies finas como arenas, limos y arcillas. En el SEV 29 se encuentran los valores más altos (78 Ohm.m) interpretados como facies de arenas y gravas, secas.

La Zona Intermedia o de Interés Hidrogeológico está compuesta por una electrocapa semiresistiva a semiconductiva (47 a 14 Ohm.m) indicando la preponderancia de facies gruesas (gravas y arenas) en la zona oeste y limosas a arcillosas en el sector este. La base de la unidad se localiza aproximadamente en los 70 metros en el SEV 08, 64 metros en el SEV 29 y 80 metros aproximadamente en el SEV 01. Se considera que esta unidad incluye un acuífero libre y uno o dos acuíferos semiconfinados. En los alrededores del pueblo de Caimancito y de acuerdo a la descripción del perfil geológico del pozo localizado en la Planta de Agua Potable, las facies sedimentarias presentes (alternancias de arenas y arcillas), son coincidentes con los valores de resistividad en el SEV 01.

La Zona Inferior o Basamento Conductivo, se detecta en todos los sondeos. La característica fundamental de esta unidad son los valores bajos de resistividad (15 a 20 Ohm.m), señalando la preponderancia de sedimentos finos como arenas, limos y arcillas. Se interpreta que esta unidad está conformada por secuencias pertenecientes al Terciario Subandino que aflora en los sistemas serranos cercanos. El techo de esta electrocapa, se localiza a los 69 metros en el SEV 08; 64 metros en el SEV 29 y 77 metros en el SEV 01.

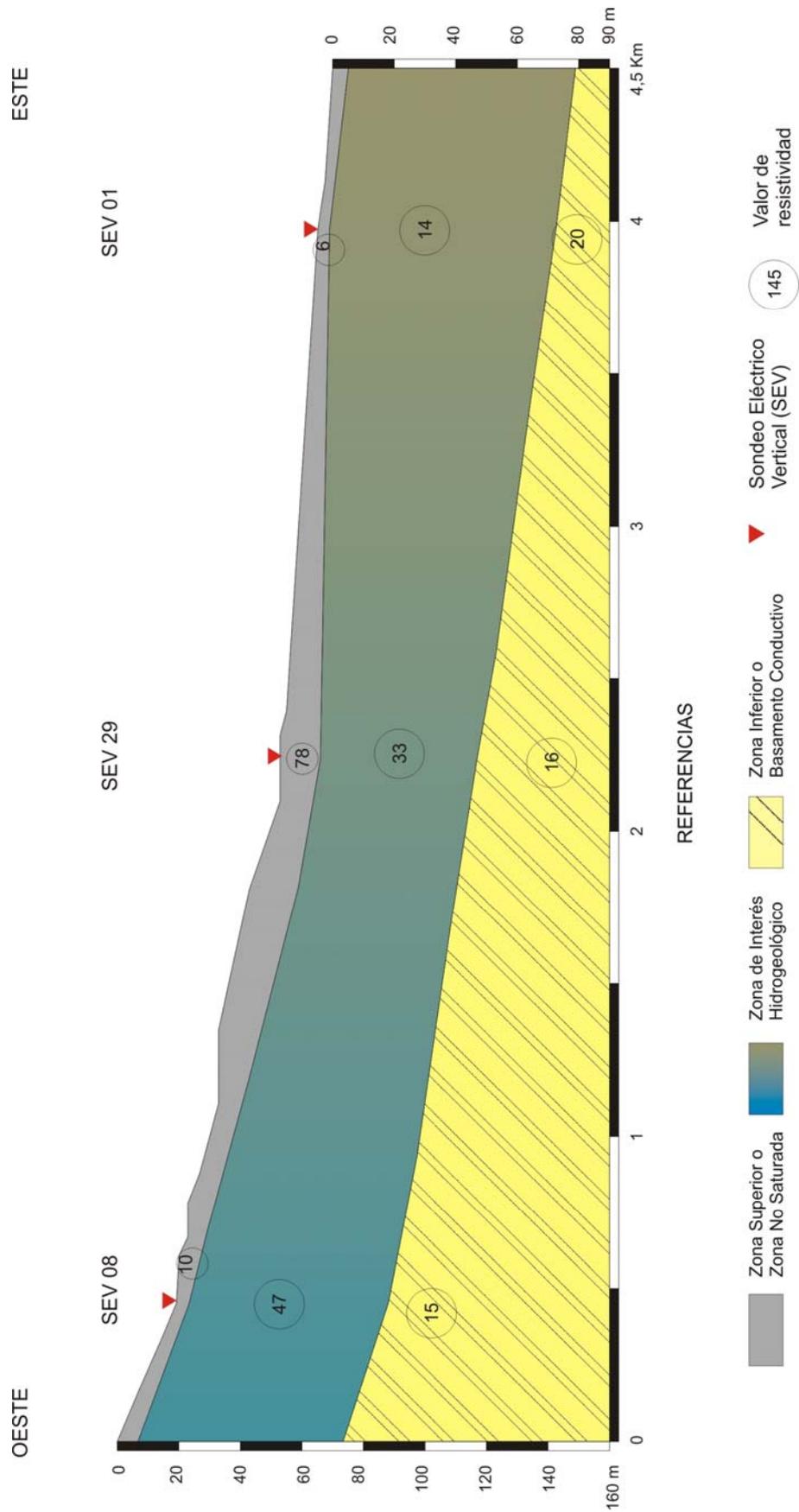


Figura 11: Perfil Geoeléctrico Acceso Caimancito – Estación FFCC Pueblo Caimancito.

Perfil Geoeléctrico Acceso Caimancito – Acceso Norte Yuto

Está realizado con los sondeos eléctricos verticales 08, 09, 13, 14, 16, 15, 19, 20, 21, 11 y 10; efectuados a la orilla de la ruta nacional N° 34. El SEV 11 se efectuó en inmediaciones de un pozo que explota agua subterránea en la zona de Yuto; propiedad del Sr. Monje. La escasa información obtenida de estas perforaciones fue utilizada para ajustar el modelo físico – matemático. Desde el punto de vista eléctrico se han identificado tres grandes unidades que, desde arriba hacia abajo se han denominado: Zona Superior; Zona Intermedia o de Interés Hidrogeológico y Zona Inferior o Basamento Conductivo.

La Zona Superior está conformada por dos o tres electrocapas de pequeño espesor y resistividades variables. En general, se observa que la potencia de la Zona No Saturada acompaña a las morfologías del relieve (lomadas y quebradas). El espesor de esta electrocapa no supera los 12 metros a lo largo de todo el perfil.

La Zona Intermedia o de Interés Hidrogeológico está compuesta por una electrocapa semiresistiva a semiconductiva (289 a 11 Ohm.m) indicando la variabilidad de los ambientes geomorfológicos atravesados por el perfil geoeléctrico. Normalmente, los mayores valores de resistividad de esta electrocapa están vinculados a la cercanía de un arroyo que atraviesan en forma perpendicular al perfil. La máxima expresión se observa en los SEV 10 y 41 donde se encuentran valores de resistividad de hasta 289 Ohm.m, con un significativo espesor (aproximadamente 100 metros) y que son interpretados como pertenecientes a la actividad fluvial actual y pasada del río de Las Piedras.

La Zona Inferior o Basamento Conductivo, se detecta en todos los sondeos. La característica fundamental de esta unidad son los valores bajos de resistividad (6 a 29 Ohm.m), señalando la preponderancia de sedimentos finos como arenas, limos y arcillas. Se interpreta que esta unidad está conformada por secuencias pertenecientes al Terciario Subandino que aflora en los sistemas serranos cercanos. El techo de esta electrocapa es irregular (al igual que el terreno) lo que sugiere que en este perfil la fisiografía es de primer orden. En el SEV 08 el techo de la unidad se encuentra a los 69 metros; en el SEV 09 a los 11 metros; en el SEV 13 a 34 metros; en el SEV 14 a los 102 metros; en el SEV 16 a 40 metros; en el SEV 15 a 72 metros; en el SEV 19 a 24 metros; en el SEV 20 a 8 metros; en el SEV 21 a 84 metros; en el SEV 11 a 98 metros; en el SEV 10 a 46 metros y en el SEV 41 a 96 metros.

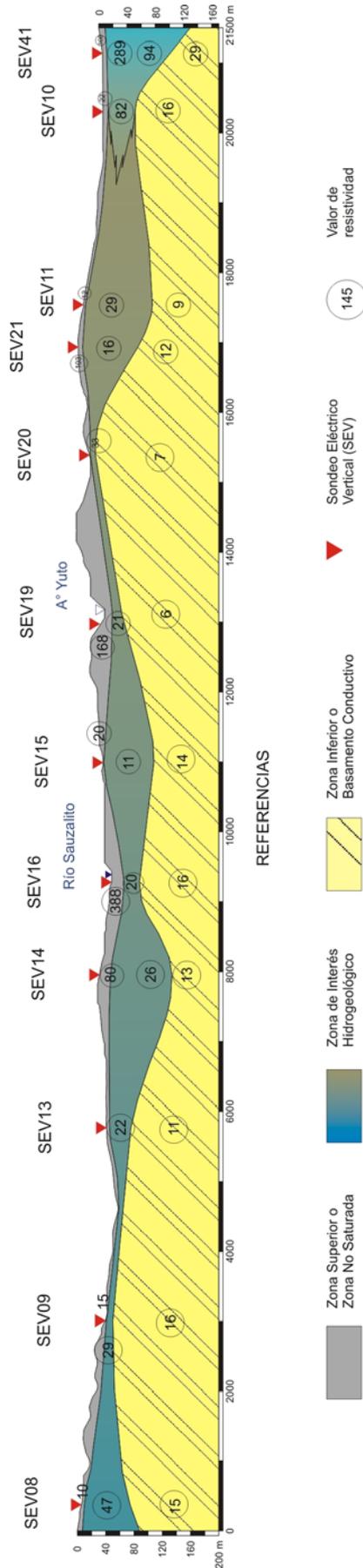


Figura 12: Perfil Geoeléctrico Acceso Caimancito – Acceso Norte Yuto.

Perfil Geoeléctrico Yacimiento – Ruta Nº 1 – Acceso A Vinalito

Está realizado con los sondeos eléctricos verticales 18, 17, 16, 14, 28, 23, 24, 25, 26, 40 y 27; efectuados en el camino de acceso al Yacimiento Caimancito, sobre la ruta nacional Nº 34 y la gran mayoría, a orillas de la ruta provincial Nº 1, hasta el acceso a la localidad de Vinalito y atravesando el río San Francisco. La escasa información obtenida de una perforación somera existente en la Estación de Aforos del río San Francisco y dos pozos excavados fue utilizada para ajustar el modelo físico – matemático. Desde el punto de vista eléctrico se han identificado tres grandes unidades que, desde arriba hacia abajo se han denominado: Zona Superior; Zona Intermedia y Zona Inferior o Basamento Conductivo.

La Zona Superior está conformada por dos o tres electrocapas de pequeño espesor y resistividades variables. En general, se observa que la potencia de la Zona Superior acompaña a la morfología del relieve. En el ámbito serrano (SEV 18 y 17) esta unidad incluye a facies sedimentarias de arcillas y arenas, secas, con una potencia que varía entre 24 y 35 metros aproximadamente. Hacia el este de la ruta nacional Nº 34, luego de la falla de pie de sierra, esta unidad presenta un espesor muy variable (entre 4 y 38 metros). En los SEV 16 y 28, presenta un espesor de 18 y 30 metros, respectivamente, con la presencia de una nivel semiresistivo en la base (65 Ohm.m en el SEV 28), muy posiblemente saturado. En los sondeos 23, 24 y 25, esta capa tiene valores de resistividad cada vez más bajos, señalando de esta manera un progresivo enarcillamiento a medida que se avanza hacia el este. En los SEV 26 y 40, la unidad vuelve a adquirir mayor espesor (26 y 38 metros, respectivamente), muy posiblemente debido a la influencia del río San Francisco. En este último sector, esta electrocapa incluiría el acuífero libre explotado por el pozo de la Estación de Aforos y un acuífero semiconfinado. Hacia el este del río San Francisco, en ambiente de subafloramientos, el SEV 27 muestra que esta zona tiene una potencia media de 15 metros y se presenta con valores conductivos, en clara concordancia con las secuencias limosas, saturadas con agua salobre, que se explotan en los dos pozos excavados, propiedad del Sr. Portal.

La Zona Intermedia está compuesta por una electrocapa semiconductiva a conductiva (19 a 7 Ohm.m). Esta unidad, cuya base se localiza a los 63 metros en el SEV 23, 66 metros en el SEV 24, 132 metros en el SEV 26 y 140 metros en el SEV 40, se interpreta como una secuencia preferentemente fina (arcillas y limos) con intercalaciones de niveles arenosos y de gravas que se encuentran saturados y conforman acuíferos semiconfinados y confinados.

La Zona Inferior o Basamento Conductivo, se detecta en todos los sondeos. La característica fundamental de esta unidad son los valores bajos de resistividad (5 a 32 Ohm.m), señalando la preponderancia de sedimentos finos como arenas, limos y arcillas. Se interpreta que esta unidad está conformada por secuencias pertenecientes al Terciario Subandino que aflora en los sistemas serranos cercanos. El techo de esta electrocapa es muy irregular y se detecta a partir de los 24 a 35 metros de profundidad en los SEV 18 y 17, respectivamente. En el SEV 16 se detecta a partir de los 18 metros; en el SEV 28 a partir de los 30 metros; en el SEV 23, a los 63 metros; en el SEV 24 a los 66 metros; en el SEV 26 a los 132 metros; en el SEV 40 a los 140 metros y en el SEV 27 a los 15 metros.

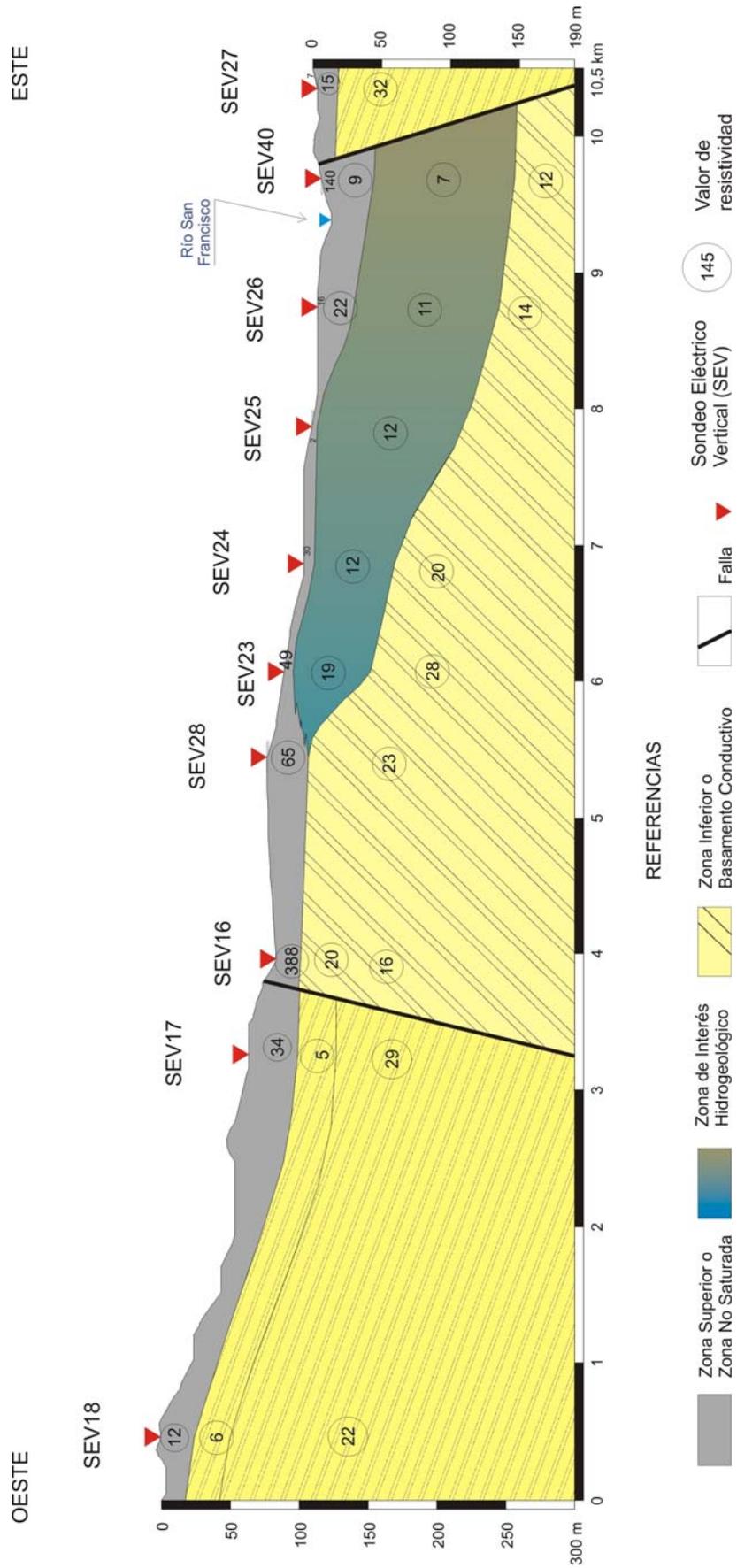


Figura 13: Perfil Geoelectrico Yacimiento – Ruta N° 1 – Acceso A Vinalito.

Perfil Geoeléctrico Ruta Provincial 84 – Caimancito – Río Zora

Está realizado con los sondeos eléctricos verticales 25, 33, 32, 31, 30, 01, 34, 35, 36 y 37; efectuados a la orilla de la ruta provincial N° 84. El SEV 25 se efectuó en el cruce de las rutas provinciales 1 y 84; el SEV 31 sobre la ruta provincial N° 84, pero en inmediaciones del arroyo Zanjón Seco; el SEV 01 en la Estación del FFCC de Caimancito. La información obtenida de los dos pozos que se encuentran en la Planta de Agua de Caimancito y algunos datos de un pozo del Ingenio Ledesma, fue utilizada para ajustar el modelo físico – matemático. Desde el punto de vista eléctrico se han identificado tres grandes unidades que, desde arriba hacia abajo se han denominado: Zona Superior; Zona Intermedia o de Interés Hidrogeológico y Zona Inferior o Basamento Conductivo.

La Zona Superior está conformada por dos o tres electrocapas de distintos espesores y resistividades. La potencia de la unidad varía entre 2 metros en los SEV 36 y 33, a 26 metros en los SEV 30 y 31. Los valores de resistividad son igualmente muy variables y señalan las importantes variaciones faciales de esta unidad debido a la presencia de derrames fluviales distales actuales y subactuales sobreimpuestos a la actividad fluvial de ríos y arroyos como el río San Francisco, el arroyo Zanjón Seco, río Zora, etc.

La Zona Intermedia o de Interés Hidrogeológico está compuesta por una electrocapa resistiva a semiconductiva (293 a 14 Ohm.m) indicando la variabilidad de ambientes geomorfológicos que incluye el perfil. Se considera que esta unidad incluye un acuífero libre y uno o dos acuíferos semiconfinados. En los alrededores del pueblo de Caimancito y de acuerdo a la descripción del perfil geológico del pozo localizado en la Planta de Agua Potable, las facies sedimentarias presentes (alternancias de arenas y arcillas), son coincidentes con los valores de resistividad en el SEV 01. El espesor aproximado en el SEV 37 es de 42 metros; 14 metros en el SEV 36; 7 metros en el SEV 35; 16 metros en el SEV 34; 78 metros en el SEV 01; 73 metros en el SEV 30; 94 metros en el SEV 94,; 80 metros en el SEV 32 y 87 metros en el SEV 33.

La Zona Inferior o Basamento Conductivo, se detecta en todos los sondeos. La característica fundamental de esta unidad son los valores bajos de resistividad (16 a 34 Ohm.m), señalando la preponderancia de sedimentos finos como arenas, limos y arcillas. Se interpreta que esta unidad está conformada por secuencias pertenecientes al Terciario Subandino que aflora en los sistemas serranos cercanos.

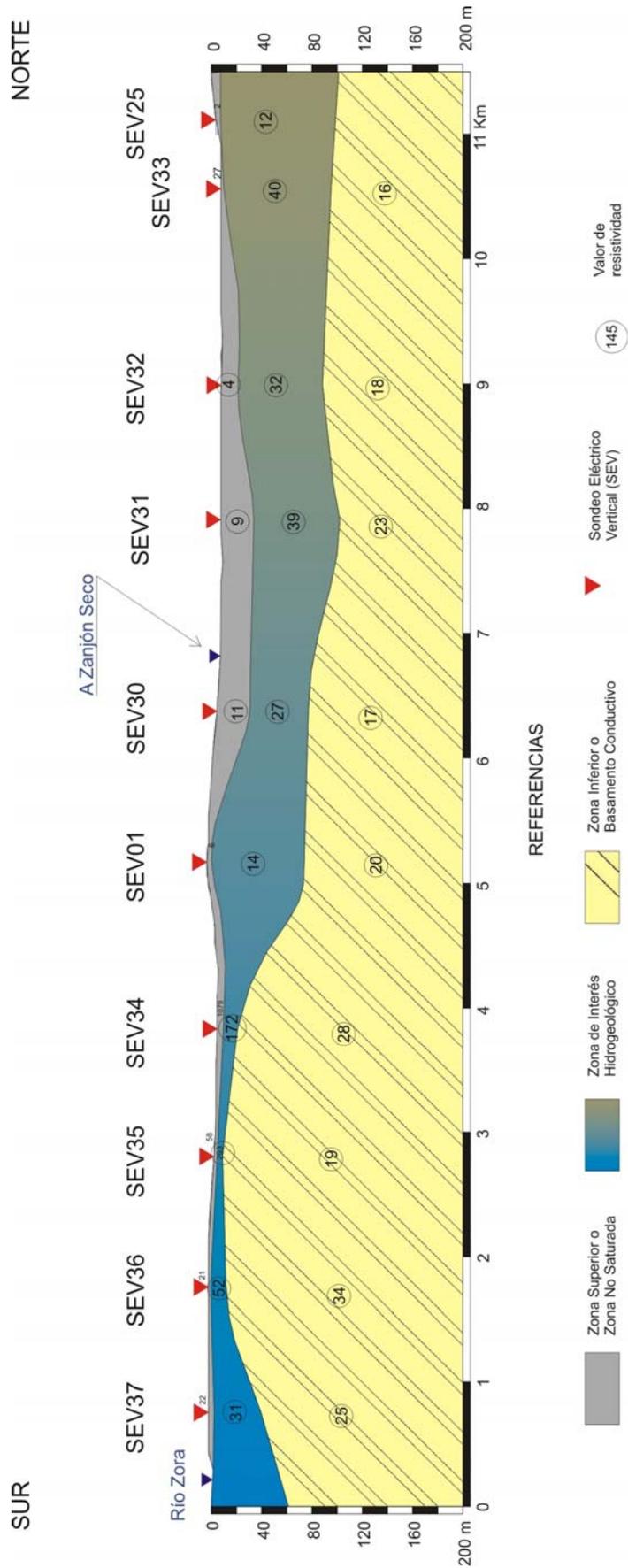


Figura 14: Perfil Geoeléctrico Ruta Provincial 84 – Caimancito – Río Zora.

4.3.2.4. INTERPRETACIÓN DEL PERFIL MAGNETOTELÚRICO

Se registraron 7 estaciones MT. La densidad de estaciones lograda estuvo limitada por las características de la zona, sobre todo en la parte afectada dentro de los límites del Parque Nacional Calilegua donde fue imposible registrar más estaciones y de éstas, la más cercana a la batería de pozos estuvo perturbada por las cañerías presentes en la zona de medición.

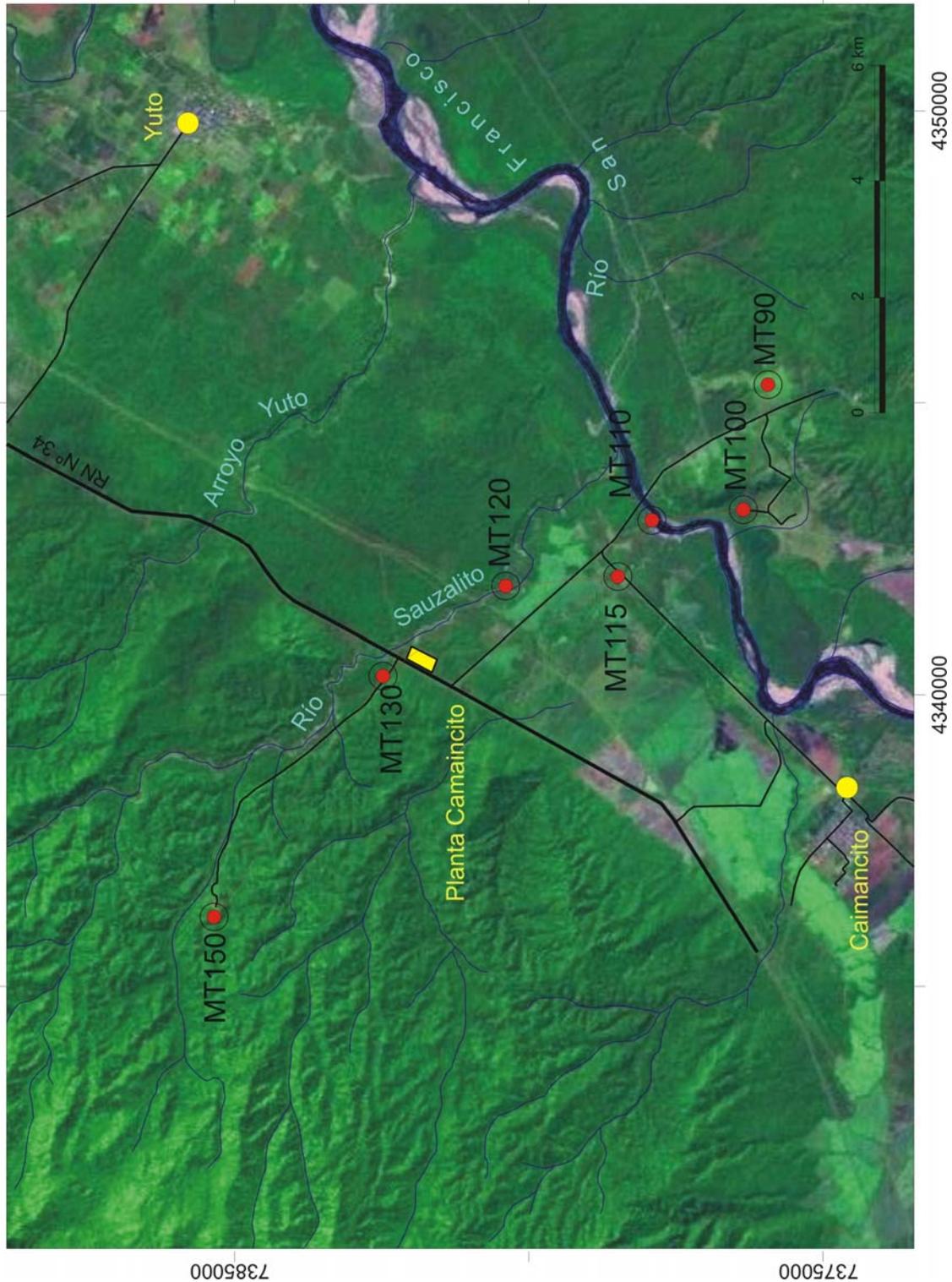


Figura 15: Mapa Ubicación de Estaciones MT.

Modelo 1D

Luego de la interpretación e inversión de cada estación, se puede observar que las estaciones MT 90, 100, 110, 115 y 120, realizadas al este de la sierra de Caimancito o Socavón, presentan características conductivas a muy conductivas hasta una profundidad promedio de 5.000 a 6.000 metros. Estos valores de resistividad son asignados a toda la secuencia del Terciario Subandino y parte superior y media del Grupo Salta. Por debajo de esta profundidad se encuentran valores claramente resistivos que bien podrían estar indicando la presencia de las facies gruesas del Subgrupo Pirgua y el basamento Paleozoico. Notoriamente, en las estaciones MT 130 y 150 (realizadas sobre afloramientos del Terciario Subandino) la zona resistiva profunda aparece alrededor de unos 2.000 metros más arriba que en las demás estaciones. Este notorio contraste entre las estaciones MT 130 y 150 con las estaciones MT 90, 100, 110, 115 y 120, podría interpretarse como que entre las estaciones 130 y 120 se encontraría una falla que provoca tal desplazamiento.

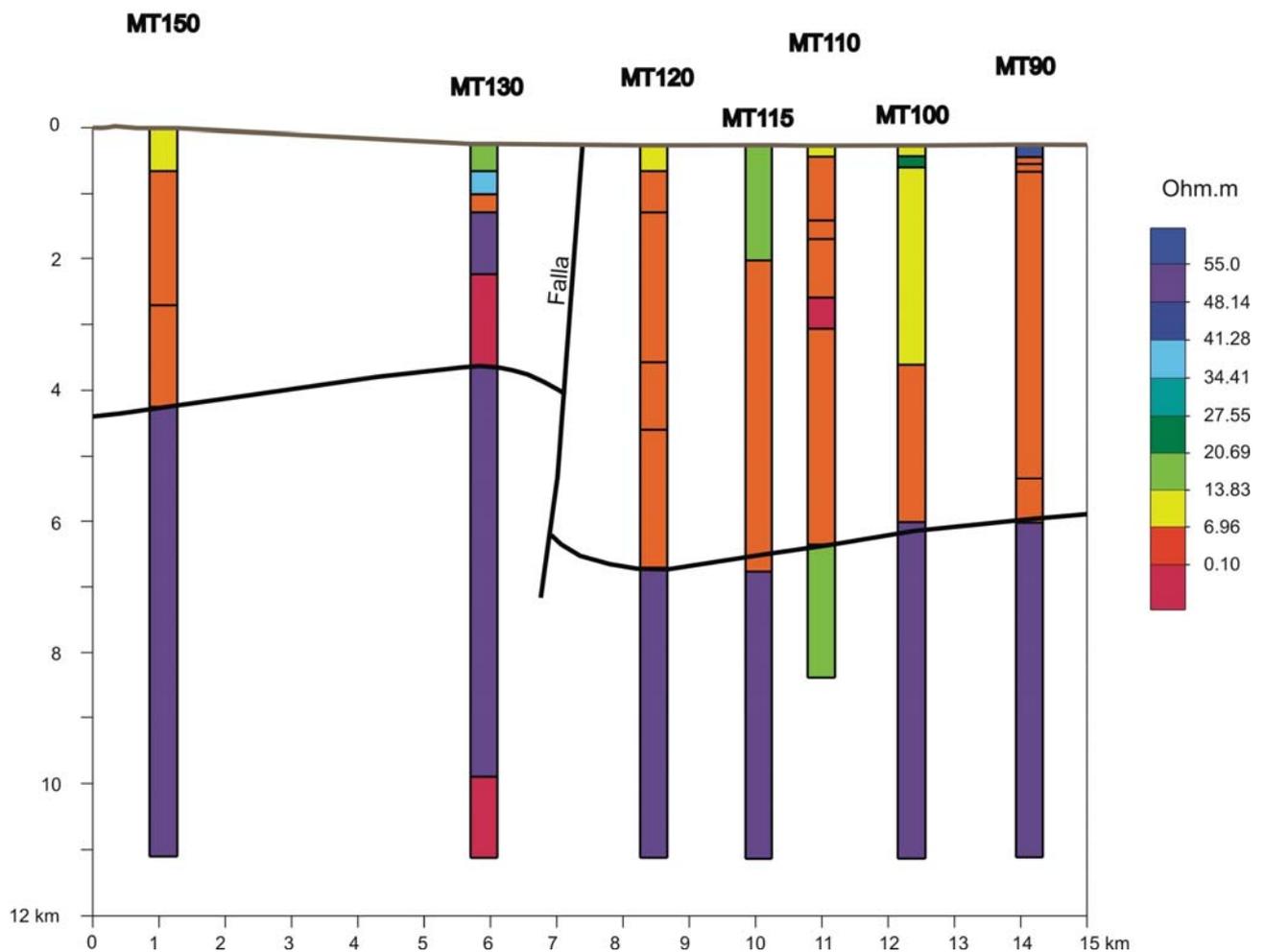


Figura 16: Correlación eléctrica tentativa empleando las secciones 1D de cada estación MT.

Modelo 2D

A partir de valores promedios de resistividad y utilizando las profundidades donde se produce el mayor contraste de resistividades, se realizó el modelo inicial de la inversión 2D. Lamentablemente, cuando se realiza la inversión 2D, no se obtiene una respuesta que permita visualizar un modelo estructural – eléctrico tan claro como en la correlación 1D. Esta situación podría explicarse por que tal vez se pretende forzar un modelo 2D, cuando el ambiente requiere de una resolución 3D por la estructura involucrada. Antecedentes de interpretación con modelos 2D de una estructura 3D compleja fueron discutidos por García (1999) quién comparó un modelado 3D y los correspondientes perfiles 2D en una región geológicamente compleja concluyendo que los resultados 2D podían ser muy cuestionables ya que presentaban alteraciones no presentes en el modelado 3D.

A modo de observar lo expuesto anteriormente, se adjunta igual un modelo de inversión 2D en modo TM con todas las estaciones MT involucradas.

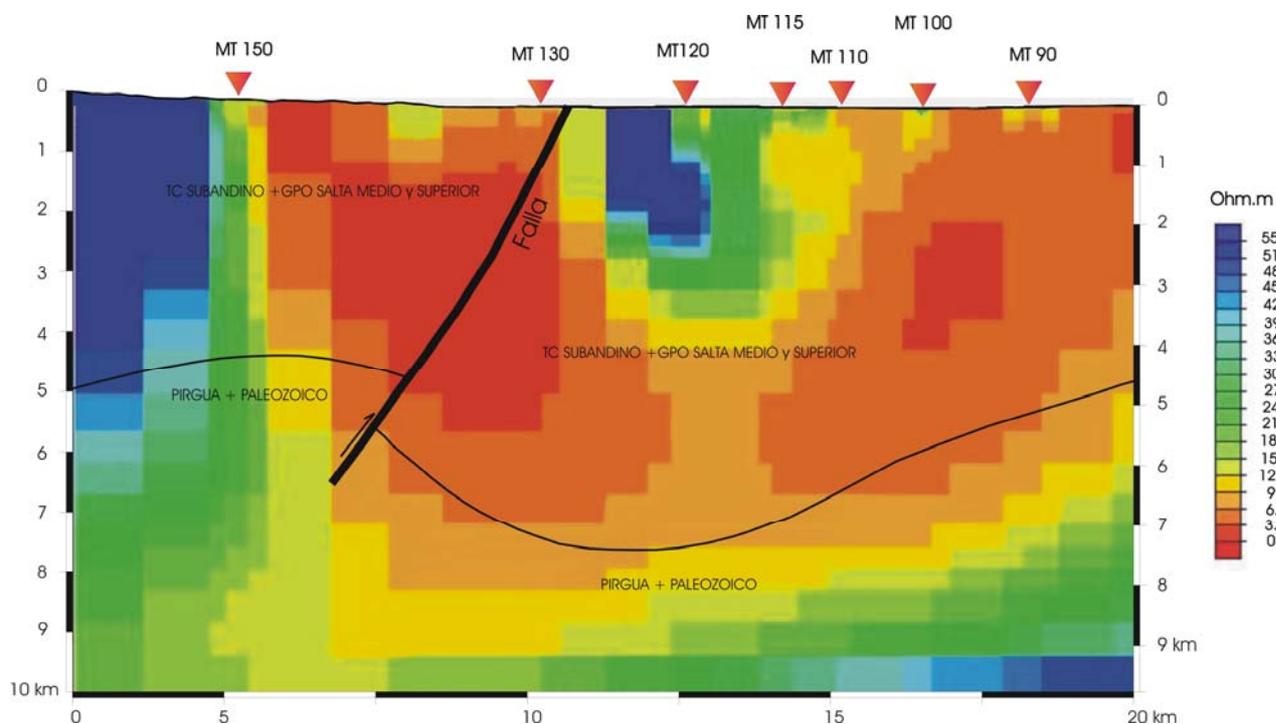


Ilustración 8: Modelo 2D en modo TM de las estaciones MT relevadas.

Puede observarse que el modelo 2D adquiere características conductoras en casi todo el perfil, debido fundamentalmente a que no existen demasiados contrastes eléctricos. Aún con las limitaciones y dudas expuestas, puede apreciarse que en la Estación MT 150 las facies resistivas aparecen unos 2.000 metros más arriba que las estaciones más cercanas. Sin embargo, en la estación MT 130, parece que el modelo 2D muestra mejor una zona de falla (todo conductor), que los contrastes de resistividades en profundidad que si aparecen en el modelo 1D. Hacia el este (estaciones MT 120, 115, 110, 100 y 90) se observa que las facies resistivas van “levantando” hacia el nacimiento. Para observar si existe o no correlación con el modelo geológico del área (obtenido de la reconstrucción geofísica) se ha superpuesto este esquema con el modelo eléctrico.

4.4. AMBIENTE HIDROGEOLOGICO

4.4.1. CENSO DE POZOS

Durante el trabajo de campo se relevaron los pozos más cercanos a la zona de estudio determinando, cuando las condiciones lo permitían, profundidad, nivel estático, conductividad eléctrica del agua explotada, caudal de producción, etc. En los casos en que los pozos existentes cuentan con legajos técnicos (casi ningún pozo está realizado con criterio hidrogeológico), se consultó y obtuvo de ellos datos constructivos tal como cañería utilizada, profundidad y tipo de filtros utilizados, ensayos de bombeo, caudales de producción, caudales específicos, etc.

Tabla 10: Pozos existentes en la zona de estudio.

Pozo	Profundidad (metros)	Nivel Estático (metros)	Caudal (m ³ /h)	Nivel Dinámico (metros)	Filtros (metros)	Caudal Específico (m ³ /h/m)	Conductividad Eléctrica (μS/cm)
Pozo Calilegua I (Terreno Ingenio Ledesma)	85	77	-	-	-	-	800
Pozo Calilegua II (Planta Agua Potable)	110	70	-	-	83.2-110	-	820
Pozo Caimancito I (Planta Potabilizadora)	160	9,28	100	40,95	88-94 98,5-103,5 108-112	3,16	1.170
Pozo Caimancito II (Planta Potabilizadora)	87	-	-	-	-	-	1.030
Pozo FFCC Caimancito	105,5	11	12	-	32,6-50,4	-	1.000
Pozo YPF Ca.Ag1 (Planta Almacenaje Caimancito) *	82	9	5	27	56,7-77,2	0,18	1.000
Pozo YPF Ca.Ag3 (Planta Almacenaje Caimancito) *	179	24	12	32	41,1-82,3 92,8-113,4	1,5	-
Pozo YPF Ca.Ag4 (Planta Almacenaje Caimancito) *	105	6	-	-	56-88	-	-
Pozo YPF Ca.Ag5 (Planta Almacenaje Caimancito) *	121	-	25	-	50,7-110,7	-	-
Pozo YPF Ca.Ag6 (Planta Almacenaje Caimancito) *	133	-	27	-	40,3-50,5 60,5-80,5 90,6-120,5	-	-
Pozo YPF Ca.Ag7 (Planta Almacenaje Caimancito) *	128	-	24	-	63,1-104,4 114,6-125,8	-	-
Pozo YPF Ca.Ag8 (Planta Almacenaje Caimancito) *	127	14	15	-	70-110	-	-
Pozo YPF Ca.Ag8 (Planta Gas del Estado)	26	1	-	-	2-11	-	-
Pozo Estación Aforos río San Francisco	6,90	4,29	-	-	-	-	1.800
Pozo Excavado I. Sr. Portal	8,69	6,74	-	-	-	-	1.370
Pozo Excavado II. Sr. Portal	8,70	7,40	-	-	-	-	2.660
Pozo El Bananal	70	25	-	-	-	-	700
Pozo Finca Sr. Monje.	120 ?	?	-	-	-	-	-
Pozo I Planta Potabilizadora Yuto	73,5	15,5	36	-	43,5 – 54,5	-	920
Pozo II Planta Potabilizadora Yuto	120	12	-	-	-	-	880
Pozo Planta Almacenaje Caimancito	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	800
Pozo La Lucrecia	150	5,65	30	36,66	85-87 103-105 116-118 131-134 136-137 139-141	0,97	692

Nota: Los pozos con asterisco (*) cuentan con legajos originales, pero no se pudo establecer la ubicación precisa, por falta de coordenadas o referencias.

4.4.2. HIDROGEOLOGÍA LOCAL

El marco hidrogeológico existente en la zona de estudio es aún poco conocido. Esta situación se debe fundamentalmente a la falta de datos hidráulicos, a la deficiencia en la calidad de antecedentes hidroestratigráficos e hidroquímicos y sobre todo a la mala práctica durante la etapa constructiva de los pozos, que en definitiva permiten obtener los datos básicos para comprender el funcionamiento de un acuífero o de una asociación de estos. A pesar de esta situación, luego de efectuados los estudios de campo (prospección geoelectrica, reconocimiento geológico, relevamiento de pozos, etc.) y su posterior interpretación, se distinguieron dos grandes unidades; una relacionada a los depósitos sedimentarios modernos y otra, vinculada a las sedimentitas del Terciario Subandino.

El nivel de conocimiento actual permite incluir a los distintos horizontes productivos de la región (acuíferos) en el Sistema Acuífero San Francisco – Lavayén (*SASF*). El valle del río San Francisco entre el río San Lorenzo (al sur) y el río de Las Piedras (al norte), conforma una depresión asimétrica, con el río San Francisco recostado sobre el borde oriental, al pie de afloramientos terciarios. Esta situación evidencia una configuración de cubeta de relleno también asimétrica, donde se esperan los mayores espesores al occidente y los menores, en el este. Efectivamente así ocurre, ya que en la zona de Libertador General San Martín – Calilegua se encuentran potentes secuencias de rodados y gravas que, paulatinamente disminuyen de espesor y frecuencia a medida que se avanza hacia el oriente. En este mismo sentido también se produce la elevación del nivel piezométrico de los distintos acuíferos puestos en producción por los pozos existentes en la región.

En la zona del Pueblo de Ledesma en una posición geográfica cercana a la ruta nacional N° 34, la información obtenida de dos pozos que alcanzaron los 170 metros de profundidad muestran una potente secuencia de canto rodados, gravas muy gruesa y gruesa de cuarcitas blanquecinas y cuarcitas rosado claro, areniscas pardo amarillenta y rosado claro, metamorfitas pardo verdoso, calizas amarillentas y ortocuarcitas moradas, rosado claro y pardo claro. La matriz, normalmente es arenosa gruesa, aunque se encuentran niveles con matriz de arena fina e incluso arena limosa. Un hecho muy notorio es que hasta la profundidad mencionada, solo se ha encontrado un pequeño nivel limo arcilloso entre los 20 a 25 metros y otro entre los 131 y 135 metros de profundidad. El nivel estático en estos pozos se localiza aproximadamente a los 89 metros. Hacia el norte, a medida que se avanza hacia la localidad de Calilegua, se encuentran secuencias similares a las descritas, pero a diferencia de la zona anterior, se produce un ascenso del nivel piezométrico ya que en el Pozo Calilegua II, se encuentra a aproximadamente 75 metros de profundidad aproximadamente. La interpretación de los sondeos eléctricos verticales realizados en inmediaciones de Calilegua, señalan que existen facies sedimentarias gruesas a muy gruesas, cuya potencia supera largamente los 400 metros.

Más hacia el este de la línea Ledesma – Calilegua, se produce un rápido ascenso del nivel piezométrico; se reduce la frecuencia y el tamaño de rodados y gravas y comienzan a producirse intercalaciones de capas de arenas y limos que se hacen cada vez más potentes y frecuentes; tanto que hacia la posición media del valle, los niveles de arenas superan a las capas de gravas. Si bien en esta zona del valle del río San Francisco no existen datos de perforaciones profundas; la información que brindan los sondeos eléctricos verticales efectuados en la región, señalan claramente un ambiente geomorfológico e hidrogeológico típico de una zona intermedia de sedimentos de bajada aluvial o cono aluvial, ya que se caracteriza por la presencia de intercalaciones de arenas y limos, rodados y gravas y por la aparición de capas continuas de arcillas. De acuerdo a los escasos datos relevados, el nivel piezométrico asciende progresivamente, de tal manera que en la parte media del valle del río San Francisco, se encuentran a una profundidad promedio de 20 metros. Otra característica de este ambiente es que se desarrolla un acuífero libre y uno o más acuíferos semiconfinados.

En el sector este del valle del río San Francisco, se encuentra el Pozo AJ256 perteneciente al Ingenio Ledesma (cerca de la confluencia del río Zora con el río San Francisco), donde el nivel estático se encuentra a unos 5 metros de profundidad. En este lugar, la secuencia litológica se inicia con arenas y limos arcillosos en los primeros 10 metros, luego arenas con gravas y gravas arenosas entre los 10 y 50 metros y conformando la base del pozo, se describen arcillas.

En esta misma posición geomorfológica, pero hacia el norte, predominan las facies sedimentarias finas como arenas, limos y arcillas sobre las gravas y cuando estas últimas se encuentran, se trata de gravas finas a media, con abundante matriz arenosa y limosa. El mejor ejemplo de esta situación se encuentra en el Pozo I localizado en la Planta Potabilizadora de Caimancito que alcanzó una profundidad final de 160 metros; donde se observa una sucesión de arcillas y limos desde 0,0 a 24,0 metros; luego aparece una capa de grava fina entre los 24,0 a 32,0; infrayaciendo se encuentra un nivel limo arcilloso entre los 32,0 a 52,0 metros; entre los 52,0 a 57,0 se encuentra una pequeña capa de grava mediana a gruesa con matriz arenosa; entre los 57,0 a 66,0 se localiza una arcilla limosa.

Hacia el noroeste de la localidad de Caimancito, en la ex - Planta de Almacenaje de YPF y en la ex - Planta de Gas del Estado, existirían perforaciones realizadas por Yacimientos Petrolíferos Fiscales entre los años 1969 a 1974. En efecto, en este lugar o área aledaña (si bien no se conoce con precisión la ubicación geográfica), se encuentran pozos que cuentan con perfiles litológicos de detalle, algunos con electroperfilajes y análisis físico - químico, que aportan una valiosa información para comprender el ambiente hidrogeológico.



Foto 9: Pozo para abastecimiento de agua existente en la Planta de Almacenaje Caimancito. No se cuenta con información antecedente de esta obra.

Por ejemplo, el Pozo Ca.Ag1 muestra de los 0,0 a 8,0 metros, arenas y conglomerados, secos; entre los 8,0 a 52,0 metros una secuencia de limolitas calcáreas, pardo rojizo, semidura a semicompacta; entre los 52,0 a 64,0 metros arenisca rojiza, mediana a fina, con conglomerados aislados y entre los 64,0 a 82,0 metros arcilla arenosas pardo rojizo. El Pozo Ca.Ag3 encontró entre los 0,0 a 42,0 metros una potente secuencia de limolitas a limoarcilitas, pardo rojizo, semicompacta, calcárea. Entre los 42,0 a 48,0 metros, limonita muy calcárea, con presencia de gravas cuarzosas, redondeadas a subredondeadas. Entre los 48,0 a 60,0 una limonita arenosa; entre 60,0 a 77,0 un nivel de conglomerados a conglomerado arenoso. Entre 77,0 a 84,0 metros una capa de limoarcilitas, pardo rojizo. Entre 84 a 111 metros, una secuencia de areniscas a areniscas finas, pardo rojizo claro. Entre 111 a 126, arenisca arcillosa, pardo rojizo. Entre 126 y 179 metros limonita a arcilita, pardo rojizo. En este pozo se puso en producción los niveles comprendidos entre 41,1 a 82,3 y 92,7 a 113,4 metros, con un nivel estático en 24 metros bajo boca de pozo.

Teniendo en cuenta el marco geológico existente y los resultados de la prospección geoelectrica, se considera que el río San Francisco, entre la localidad de Caimancito y Yuto, escurre controlado por una falla inversa, de rumbo submeridiano, que se localiza al pie del pequeño sistema de lomadas que afloran en la margen derecha del río San Francisco (en inmediaciones del puente carretero), en la zona de La Lucrecia, Aguas Calientes y La Quinta. Esta falla podría ser la responsable de que en la parte oriental del valle del río San Francisco, los sedimentos de bajada aluvial (predominantemente grueso y potente en la zona de Ledesma y Calilegua), disminuyan tan drásticamente su potencia y facies a medida que se avanza hacia la actual posición geográfica del curso fluvial. Como ya se ha mencionado, en la proximidad de la Planta de Almacenaje Caimancito, el arrumbamiento general del cordón cambia levemente, lo que unido a un consistente lineamiento con azimut de 153 °, sugiere fuertemente la presencia de una o dos fallas oblicuas al eje del anticlinal de Caimancito, con un desplazamiento aparente, siniestral, de aproximadamente 800 metros. A partir de la Planta de Almacenaje Caimancito hacia el norte (en la zona comprendida entre la ruta nacional N° 34 y el río San Francisco), se observa una morfología de relieve colinado a fuertemente colinado y se extiende como tal hasta las inmediaciones de la localidad de El Bananal hacia el norte y la localidad de Yuto en el este. Esta zona parece señalar claramente la presencia de afloramientos y subafloramientos del Terciario Subandino Superior, compuestos principalmente por una secuencia de arcilitas y limolitas, pardo rojizo, semicompactas a semiduras, muchas veces calcáreas, donde se intercalan bancos de areniscas, areniscas limosas y conglomerados finos a medianos.

De acuerdo a las características señaladas anteriormente, a antecedentes de trabajos anteriores (INCYTH, 1985 y García, 1995) y a los resultados de la prospección geoelectrica efectuada en esta región del área de estudio, la diferenciación entre las secuencias terciarias infrayacentes y el relleno moderno, es muy difícil de establecer ya que estos últimos están formados a expensas de los primeros y guardan similares características litológicas. Sin embargo, no existen mayores dudas en considerar que los pozos productivos que se encuentran entre la zona de El Bananal y Yuto, producirían agua desde niveles de rodados, gravas y arenas terciarias.

De acuerdo a la información brindada por el pozo existente en la Planta Potabilizadora de la localidad de Caimancito, a los resultados de los electroperfilajes efectuados en este pozo (perfiles de SP, Gamma, Resistividad Corta y Resistividad Larga), la descripción litológica de las secuencias atravesadas y la información obtenida de la prospección geoelectrica durante el presente trabajo, se interpreta que las facies que constituyen el relleno moderno en este lugar presentan un espesor de aproximadamente 40 metros y están conformadas por limos, arenas y pequeños niveles de gravas finas arenosas. Infrayaciendo se encuentran niveles alternantes de arcillas y arenas gravosas y gravas arenosas, asignadas al terciario. En esta región y alrededores, se considera que existe un acuífero libre a semiconfinado (asociado a los sedimentos modernos) desarrollado en arenas finas a limos arenosos que se extiende entre aproximadamente los 7 y 17 metros de profundidad y otro nivel de grava fina a arena gravosa, que se localiza entre los 24 y 32 metros.

Más hacia el este, en la zona de influencia con la actual llanura aluvial del río San Francisco, se estima que el primer nivel acuífero se encuentra cada vez más superficial, tanto que en cercanías de la confluencia de los arroyos Zanjón Seco y río Sauzalito, el nivel estático se localizaría a tan solo unos cinco metros de profundidad. En la Estación de Aforos sobre el río San Francisco se encuentra un pozo que habría alcanzado los 6,90 metros de profundidad, con el nivel estático en 4,29 metros y agua de 1.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Foto 10: Pozo en Estación de Aforos Río San Francisco. Constatando profundidad y midiendo nivel estático.

Hacia el norte, en la localidad de El Bananal (a orillas de la ruta nacional N° 34) existe un pozo cuya profundidad alcanzó los 70 metros. De acuerdo a los datos aportados por el legajo técnico de esta obra, la cubierta sedimentaria moderna se extendería hasta los 66 metros de profundidad y estaría conformada por una secuencia de arcillas, arcillas limosas y rodados desde los 0,0 a los 16 metros. Luego, por rodados grandes y arenas gruesa a muy gruesa, duro a extremadamente duro, entre los 16 y 45 metros, donde se desarrolla un acuífero libre. Entre los 66 metros y hasta fondo de pozo se localiza un nivel arcilloso, pardo rojizo, plástico, asignado al techo del terciario. El nivel estático combinado en esta obra se encuentra a los 25 metros de profundidad.

En la localidad de Yuto se encuentran dos pozos que se emplean para el abastecimiento de agua potable a la comunidad. El más nuevo habría alcanzado los 120 metros de profundidad y atravesó una secuencia de arenas y arcillas hasta los 5 metros de profundidad, luego arenas y gravas gruesas, con rodados hasta los 15 metros; posteriormente una potente capa de arcilla entre los 15 y 30 metros y nuevamente, entre los 30 y 50 metros de profundidad, gravas y arenas, con matriz arenosas fina. Entre los 50 y fondo de pozo se habrían atravesado arcillas y limos arcillosos, pardo rojizo, con intercalaciones de arenas y gravas arenosas. De acuerdo a los datos de resistividad obtenida de los sondeos eléctricos verticales efectuados en la zona, a partir de los 50 metros aproximadamente, se encuentran valores conductivos que se interpretan y asignan a facies sedimentarias del terciario. El nivel estático se encuentra aproximadamente a los 12 metros de profundidad.

Entre el pequeño afloramiento que se encuentra en la margen derecha del río san Francisco, sobre el puente carretero y la ruta provincial N° 1, se encuentran dos pozos excavados (propiedad del Sr. Portal) El Pozo I (localizado en el sector norte de la propiedad) habría alcanzado la profundidad de 8,69 metros; con nivel estático a los 6,74 metros de profundidad y agua de 1.370 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El Pozo II (ubicado en el sector sur de la propiedad) alcanzó la profundidad de 8,70 metros; con nivel estático en 7,40 metros y agua con conductividad eléctrica de 2.660 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Foto 11: Pozo excavado propiedad del Sr. Portal, localizado en inmediaciones de la ruta Provincial N° 1, en inmediaciones de la bifurcación del camino a Vinalito.

En la localidad de La Lucrecia (inmediaciones de la escuela) se encuentra un pozo que alcanzó una profundidad de 150 metros. De acuerdo a los datos del perfil litológico, perfiles eléctricos (SP, Resistividad Normal Corta y Resistividad Normal Larga), al ambiente donde se encuentra la obra y los datos aportados por prospección geoelectrónica, en este lugar el espesor de sedimentos modernos alcanzaría una potencia de aproximadamente 30 metros, conformado por un acuífero libre desarrollado en gravas mediana a gruesas y un acuífero semiconfinado a confinado que se extiende entre los 19 y 31 metros, constituido por arenas medianas a gruesas, con intercalaciones de gravas finas. A partir de los 31 metros de profundidad, la secuencia se vuelve preponderantemente arcillosa, con intercalaciones de niveles de arenas y arenas gravosas. Las arcillas son plásticas, de color pardo rojizo claro. El nivel estático de la obra se localizó a los 5,65 metros, con producción de agua de 690 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Actualmente este pozo se encuentra abandonado.



Foto 12: Pozo perforado (actualmente abandonado) en La Lucrecia.

Más hacia el este, en la zona conocida como Aguas Calientes, se produce la surgencia natural de aguas termales. Estas manifestaciones tendrían lugar a partir de la circulación profunda de aguas meteóricas que luego de infiltrarse en el sector occidental (al pie del sistema serrano de Calilegua), ascienden por medio de una zona de debilidad (falla) situada al pie de las lomadas de las Aguas Calientes – La Quinta (Miranda and Johanis, 2000).



Foto 13: Manantiales de aguas termales en Aguas Calientes. Obsérvese la capa buzante de limolitas y arcilitas y en el medio un nivel de gravas. Toda la secuencia es de edad terciaria. Las manchas oscuras son óxidos.

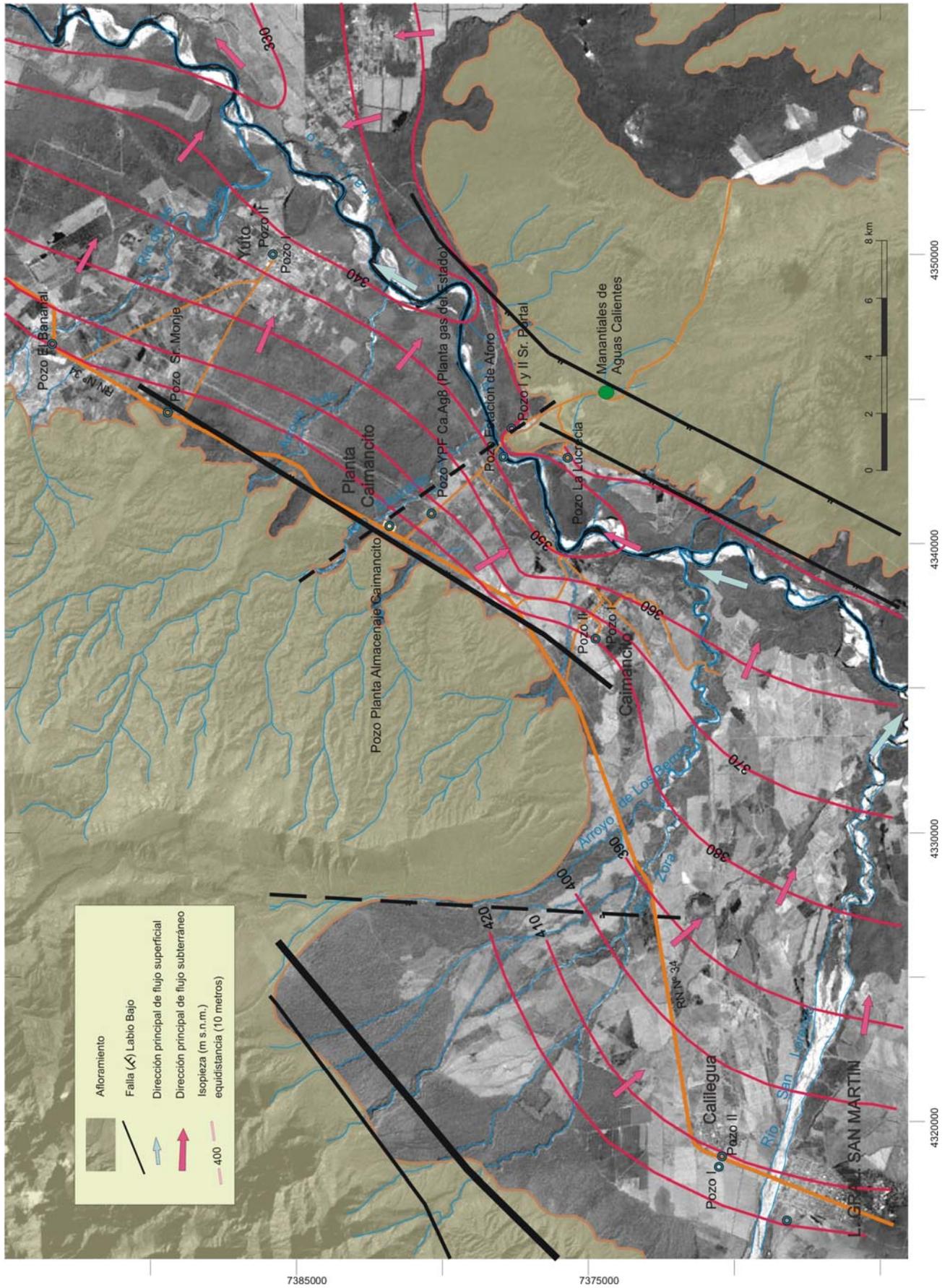


Figura 17: Mapa hidrogeológico de la zona de estudio.

4.5. CARACTERISTICAS HIDROGEOQUIMICAS

Como ya se expresó, se obtuvieron muestras de agua de arroyos, ríos y pozos de agua más cercanos al Yacimiento Caimancito a fin de observar la línea base de los distintos elementos y compuestos químicos que están presentes en el agua superficial y agua subterránea. En el campo, además de la identificación y ubicación con GPS de cada muestra, se determinó conductividad eléctrica y temperatura.

Tabla 11: Mediciones de conductividad eléctrica y temperatura en campo de muestras de agua.

Muestra	Ubicación Geográfica (Latitud y Longitud)	Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
M1 – Agua de Inyección	23° 38' 42,5" – 64° 36' 15,1"	> 20.000	-
M2 – Arroyo Zanjón Seco I	23° 42' 27,8" - 64° 33' 00,2"	480	24
M3 – Manantial Aguas Calientes II	23° 44' 41,9" – 64° 31' 09,0"	2.810	47
M4 – Manantial Aguas Calientes I	23° 44' 39,6" – 64° 31' 11,0"	1.850	56
M5 – Arroyo Salado	23° 46' 00,9" – 64° 30' 11,6"	5.370	24,8
M6 – Pozo La Lucrecia	23° 43' 54,7" – 64° 32' 24,2"	500	-
M7 – Pozo I. Sr. Portal	23° 42' 53,4" – 64° 31' 49,4"	1.370	26,5
M8 – Pozo II. Sr. Portal	23° 42' 56,8" – 64° 31' 51,6"	2.660	25,3
M9 – Pozo Estación Aforo	23° 42' 43,6" – 64° 32' 22,7"	1.800	26
M10 – Río San Francisco I	23° 42' 45,4" – 64° 32' 21,6"	830	25,6
M11 – Pozo II. Planta Potabilizadora Yuto	23° 38' 28,7" – 64° 28' 11,0"	880	28,2
M12 – Pozo II. Planta Potabilizadora Yuto	23° 38' 29,7" – 64° 28' 14,5"	920	25,4
M13 – Río de Las Piedras	23° 34' 25,9" – 64° 29' 39,5"	340	25
M14 – Pozo I. Planta Potabilizadora Caimancito	23° 44' 24,6" – 64° 36' 08,8"	1.170	20,4
M15 – Pozo II. Planta Potabilizadora Caimancito	23° 44' 24,3" – 64° 36' 07,9"	1.030	21,2
M16 – Río San Francisco II	23° 43' 25,4" – 64° 33' 36,1"	850	23,1
M17 – Canal de Riego	23° 43' 04,6" – 64° 35' 44,0"	270	20
M18 – Arroyo Zanjón Seco II	23° 41' 11,3" – 64° 34' 15,6"	960	21,1
M19 – Arroyo Sauzalito I	23° 40' 19,3" – 64° 33' 43,8"	870	20,6
M20 – Arroyo Yuto	23° 38' 40,0" – 64° 32' 24,2"	2.290	20,9
M21 – Arroyo Sauzalito II	23° 41' 11,1" – 64° 33' 10,9"	900	21,6
M22 – Arroyo sobre camino a batería	23° 39' 15,1" – 64° 34' 56,5"	2.740	20,3
M23 – Arroyo Sauzalito III	23° 38' 46,8" – 64° 35' 31,0"	1.380	21,1
M24 – Arroyo Tributario Derecho	23° 38' 42,4" – 64° 35' 57,9"	11.600	20,4
M25 – Arroyo Tributario Izquierdo	23° 38' 38,3" – 64° 35' 59,0"	700	20,5
M26 – Arroyo El 15	23° 37' 37,7" – 64° 35' 58,2"	740	20,8
M27 – Arroyo Los Berros	23° 44' 53,2" – 64° 40' 03,2"	300	20,1
M28 – Río Zora	23° 45' 11,6" – 64° 40' 52,2"	450	22,5
M29 – Pozo Calilegua	23° 46' 38,2" – 64° 46' 41,6"	820	23,5
M30 – Pozo Planta Caimancito	23° 40' 38,3" – 64° 33' 44,9"	900	21,2

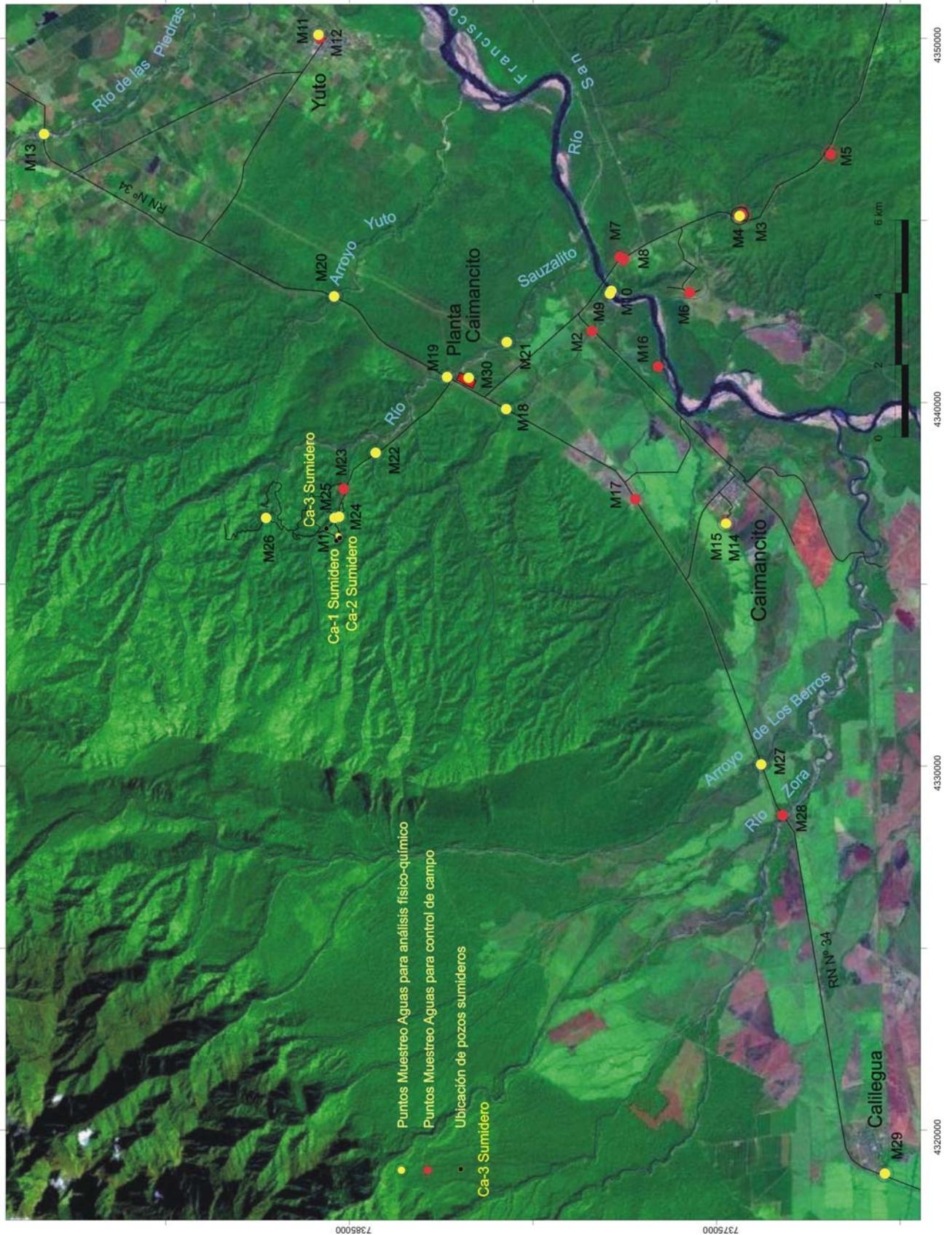


Figura 18: Ubicación de los puntos de muestreo de aguas superficiales y subterráneas para análisis físico – químico y puntos de control de campo donde se determinaron conductividad eléctrica y temperatura.



Foto 14: Río Sauzalito, en inmediaciones de la ruta nacional N° 34 (Muestra M19).



Foto 15: Arroyo Yuto, sobre ruta nacional N° 34 (Muestra M20).

En el laboratorio, se han efectuado la marcha normal de análisis, identificando los iones mayoritarios como Cloruro, Sulfato, Bicarbonato, Sodio, Calcio, Magnesio, Nitrato, Carbonato, Potasio, Hierro Total y Manganeseo. También se determinaron Color, Turbidez, Dureza Total, Alcalinidad, pH, Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales y Sólidos Totales Disueltos.

Los resultados analíticos se resumen y presentan a continuación.

Tabla 12: Determinaciones efectuadas a la muestra M1 (Muestra de Salmuera de Inyección).

Parámetro	Determinaciones	Especificaciones Agua de Bebida (CAA)
pH	7,2	6,5 – 8,5
Turbiedad (NTU)	98,3	≤ 3
Conductividad (μS/cm)	>20.000	-
Color (Unidades Pt-Co)	400	≤ 5
Sólidos Disueltos Totales (mg/l)	> 40.000	≤ 1.500
Sólidos totales – 105°C (mg/l)	83.293	-
Sólidos suspendidos (mg/l)	53	-
Alcalinidad total (mg/l de CaCO ₃)	427	≤ 400
Bicarbonatos (mg/l)	521	-
Dureza (mg/l de Ca y Mg como CaCO ₃)	17.251	≤ 400
Calcio (mg/l)	542,5	-
Magnesio (mg/l)	3.932	-
Nitrato (mg/l de NO ₃ ⁻)	10,1	≤ 45
Nitrito (mg/l de NO ₂ ⁻)	0,01	≤ 0,10
Amoníaco (mg/l de NH ₃ Nessler)	>20	≤ 0,20
Cloruro (mg/l)	> 80.000	≤ 350
Sulfatos (mg/l)	2.500	≤ 400
Sodio (mg/l)	25.000	-
Potasio (mg/l)	200	-
Manganeseo (mg/l)	0,39	≤ 0,10
Hierro Total (mg/l)	10,44	≤ 0,30

Nota: En rojo, parámetros que superan las especificaciones del CAA.

Como es de esperar, los valores determinados indican claramente que la muestra **M1** representa un agua de formación, con características de salmuera. El agua presenta elevados valores de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos; extrema dureza, excesos en calcio y magnesio, amoníaco, elevadísimas concentraciones de cloruros y sodio, potasio e hierro elevado. Es obvio que la muestra no es apta para consumo humano, animal o riego de plantaciones.

Tabla 13: Determinaciones efectuadas a las muestras M4, M9, M10, M11 y M13.

Parámetro	M4	M9	M10	M11	M13	Especificaciones Agua de Bebida (CAA)
pH	8,6	7,2	8,1	7,3	8,6	6,5 – 8,5
Turbiedad (NTU)	1,01	34,6	29,6	0,47	8,17	≤ 3
Conductividad (μS/cm)	1.370	1.444	681	707	282	-
Color (Unidades Pt-Co)	1	103	75	1	7	≤ 5
Sólidos Disueltos Totales (mg/l)	818	856	400	416	173	≤ 1.500
Sólidos totales – 105°C (mg/l)	970	1.034	546	816	212	-
Sólidos suspendidos (mg/l)	1	26	35	ND	9	-
Alcalinidad total (mg/l de CaCO ₃)	62,5	427	270,8	343,7	127,1	≤ 400
Bicarbonatos (mg/l)	55,9	521	330,4	419,3	134,7	-
Dureza (mg/l de Ca y Mg como CaCO ₃)	45,6	564	282,1	277,8	134,5	≤ 400
Calcio (mg/l)	16,5	151,9	71,2	62,5	39,9	-
Magnesio (mg/l)	1,07	45,6	25,8	30,1	8,6	-
Nitrato (mg/l de NO ₃ ⁻)	3,1	NDPi	ND	18,5	2,6	≤ 45
Nitrito (mg/l de NO ₂ ⁻)	0,04	< 0,01	0,05	0,01	<0,01	≤ 0,10
Amoníaco (mg/l de NH ₃ Nessler)	0,32	0,62	0,38	0,01	0,13	≤ 0,20
Cloruro (mg/l)	171	174,6	30,6	20,7	13,5	≤ 350
Sulfatos (mg/l)	600	275	140	105	32	≤ 400
Sodio (mg/l)	290	160	68	108	22	-
Potasio (mg/l)	1,62	6,2	4,8	3,3	2,6	-
Manganeso (mg/l)	< 0,01	1,3	0,15	0,01	0,03	≤ 0,10
Hierro Total (mg/l)	0,07	3,96	1,31	0,08	0,08	≤ 0,30
Carbonatos (mg/l)	10				10	

Nota: En rojo, parámetros que superan las especificaciones del CAA. NDPi: No detectado por interferencias. ND: No detectado.

La muestra **M4** (Aguas Calientes I), no es apta para el consumo humano ya que presenta excesos en el parámetro sulfatos. La muestra **M9** (Pozo Estación Aforos río San Francisco), no es apta para el consumo humano ya que presenta excesos en los parámetros color, alcalinidad total, dureza, amoníaco, manganeso e hierro total. La muestra **M10** (río San Francisco), no es apta para el consumo humano ya que presenta excesos en los parámetros color, amoníaco, hierro total y manganeso. La muestra **M11** (Pozo II Planta Potabilizadora Yuto), es apta para el consumo humano ya que no presenta excesos en los parámetros analizados. La muestra **M13** (río de Las Piedras), es apta para el consumo humano ya que únicamente presenta excesos en el parámetro color.

Tabla 14: Determinaciones efectuadas a las muestras M14, M18, M19 y M20.

Parámetro	M14	M18	M19	M20	Especificaciones Agua de Bebida (CAA)
pH	7,4	8,2	8,1	8,1	6,5 – 8,5
Turbiedad (NTU)	0,57	1,01	35,1	6,47	≤ 3
Conductividad (μS/cm)	750	852	723	1.824	-
Color (Unidades Pt-Co)	ND	8	52	14	≤ 5
Sólidos Disueltos Totales (mg/l)	550	483	421	1.140	≤ 1.500
Sólidos totales – 105°C (mg/l)	626	563	493	1.203	-
Sólidos suspendidos (mg/l)	5	4	31	1	-
Alcalinidad total (mg/l de CaCO ₃)	489,5	312,5	270,8	322,9	≤ 400
Bicarbonatos (mg/l)	597,2	381,2	330,4	393,9	-
Dureza (mg/l de Ca y Mg como CaCO ₃)	488,3	173,6	191	199,6	≤ 400
Calcio (mg/l)	52,1	43,4	39,9	49,5	-
Magnesio (mg/l)	88,6	16,1	22,5	18,8	-
Nitrato (mg/l de NO ₃ ⁻)	12,8	2,6	1,3	2,2	≤ 45
Nitrito (mg/l de NO ₂ ⁻)	0,01	0,01	<0,01	0,02	≤ 0,10
Amoníaco (mg/l de NH ₃ Nessler)	0,01	0,07	0,17	0,12	≤ 0,20
Cloruro (mg/l)	59,4	77,4	89,1	446,4	≤ 350
Sulfatos (mg/l)	84	74	24	70	≤ 400
Sodio (mg/l)	88	142	104	370	-
Potasio (mg/l)	3,8	5,7	4,7	2,3	-
Manganeso (mg/l)	0,02	<0,01	0,05	0,02	≤ 0,10
Hierro Total (mg/l)	0,08	0,08	0,34	0,1	≤ 0,30

Nota: En rojo, parámetros que superan las especificaciones del CAA.

La muestra **M14** (Pozo I Planta Potabilizadora Caimancito), no es apta para el consumo humano ya que presenta excesos en los parámetros alcalinidad total y dureza. La muestra **M18** (Arroyo Zanjón Seco II), es apta para el consumo humano ya que presenta excesos únicamente en el parámetro color. La muestra **M19** (Arroyo Sauzalito I), no es apta para el consumo humano ya que presenta excesos en los parámetros turbiedad, color e hierro total. La muestra **M20** (Arroyo Yuto), no es apta para el consumo humano ya que presenta excesos en los parámetros turbiedad, color, alcalinidad total y cloruros.

Tabla 15: Determinaciones efectuadas a las muestras M21, M22, M24 y M25.

Parámetro	M21	M22	M24	M25	Especificaciones Agua de Bebida (CAA)
pH	8,1	8,1	7,8	8,1	6,5 – 8,5
Turbiedad (NTU)	22,3	33,3	48,9	1,45	≤ 3
Conductividad (µS/cm)	733	2.290	9.500	579	-
Color (Unidades Pt-Co)	30	37	24	6	≤ 5
Sólidos Disueltos Totales (mg/l)	430	1.363	5.920	330	≤ 1.500
Sólidos totales – 105°C (mg/l)	491	1.679	6.982	385	-
Sólidos suspendidos (mg/l)	13	13	9	1	-
Alcalinidad total (mg/l de CaCO ₃)	281,2	718,6	583,2	316,6	≤ 400
Bicarbonatos (mg/l)	343,1	876,7	711,6	386,3	-
Dureza (mg/l de Ca y Mg como CaCO ₃)	197,5	386,3	911,4	247,4	≤ 400
Calcio (mg/l)	39,1	117,2	222,2	56,4	-
Magnesio (mg/l)	24,7	23,1	88	26,3	-
Nitrato (mg/l de NO ₃ ⁻)	0,8	ND	3,9	4,4	≤ 45
Nitrito (mg/l de NO ₂ ⁻)	0,02	0,09	0,04	0,02	≤ 0,10
Amoníaco (mg/l de NH ₃ Nessler)	0,18	0,36	0,63	0,04	≤ 0,20
Cloruro (mg/l)	100	436,5	3.712	18	≤ 350
Sulfatos (mg/l)	30	276	190	13	≤ 400
Sodio (mg/l)	130	620	2.610	100	-
Potasio (mg/l)	5,8	7,7	58	4,5	-
Manganeso (mg/l)	0,06	0,19	0,4	0,03	≤ 0,10
Hierro Total (mg/l)	0,25	0,36	1,2	0,11	≤ 0,30

Nota: En rojo, parámetros que superan las especificaciones del CAA. ND: No detectado.

La muestra **M21** (Arroyo Sauzalito II), presenta excesos únicamente en los parámetros turbiedad y color. La muestra **M22** (Arroyo sobre camino a batería), no es apta para el consumo humano ya que presenta excesos en los parámetros turbiedad, color, alcalinidad total, amoníaco, cloruros, hierro total y manganeso. La muestra **M24** (Arroyo Tributario), no es apta para el consumo humano ya que presenta excesos en los parámetros turbiedad, color, sólidos disueltos totales, alcalinidad total, dureza total, amoníaco, cloruros, manganeso e hierro total. La muestra **M25** (Arroyo Tributario Izquierdo), es apta para el consumo humano ya que no presenta excesos en los parámetros analizados.



Foto 16: Arroyo Sauzalito en punto de control de muestra M 23. Obsérvese restos de infraestructura en el cauce del río y en las márgenes del mismo.



Foto 17: Arroyo El 15, en la zona del puente de caño (Muestra M 26).

Tabla 16: Determinaciones efectuadas a las muestras M26, M27, M29 y M30.

Parámetro	M26	M27	M29	M30	Especificaciones Agua de Bebida (CAA)
pH	8,1	6,6	6,6	7,3	6,5 – 8,5
Turbiedad (NTU)	7,77	1,59	0,28	0,71	≤ 3
Conductividad (μS/cm)	624	277	677	774	-
Color (Unidades Pt-Co)	10	5	1	2	≤ 5
Sólidos Disueltos Totales (mg/l)	349	163	394	470	≤ 1.500
Sólidos totales – 105°C (mg/l)	451	194	496	536	-
Sólidos suspendidos (mg/l)	3	ND	ND	ND	-
Alcalinidad total (mg/l de CaCO ₃)	395,8	129,1	347,9	329,1	≤ 400
Bicarbonatos (mg/l)	482,8	157,6	424,4	401,5	-
Dureza (mg/l de Ca y Mg como CaCO ₃)	221,3	156,2	390,6	314,7	≤ 400
Calcio (mg/l)	50,3	43,4	92	74,6	-
Magnesio (mg/l)	23,6	11,8	39,7	31,7	-
Nitrato (mg/l de NO ₃ ⁻)	3,52	4,84	7,92	18,4	≤ 45
Nitrito (mg/l de NO ₂ ⁻)	0,02	0,06	0,01	<0,01	≤ 0,10
Amoníaco (mg/l de NH ₃ Nessler)	0,07	0,02	ND	ND	≤ 0,20
Cloruro (mg/l)	26,1	18	10,8	108	≤ 350
Sulfatos (mg/l)	19	28	90	26	≤ 400
Sodio (mg/l)	110	12	37	90	-
Potasio (mg/l)	6	0,8	3,8	5,8	-
Manganeso (mg/l)	0,05	0,02	0,02	0,02	≤ 0,10
Hierro Total (mg/l)	0,17	0,09	0,08	0,16	≤ 0,30

Nota: En rojo, parámetros que superan las especificaciones del CAA. ND: No detectado.

La muestra **M26** (Arroyo El 15), presenta excesos únicamente en los parámetros turbiedad y color. La muestra **M27** (Arroyo Los Berros), es apta para el consumo humano ya que no presenta excesos en los parámetros analizados. La muestra **M29** (Pozo Calilegua), es apta para el consumo humano ya que no presenta excesos en los parámetros analizados. La muestra **M30** (Pozo Planta Caimancito), es apta para el consumo humano ya que no presenta excesos en los parámetros analizados.

Desde el punto de vista geoquímico se han clasificado las aguas en diagramas Piper, separando por una parte a la muestra M1 (Salmuera de Inyección) ya que debido a su extrema supera demasiados cationes y aniones. También, se agrupó a las muestras según sean aguas superficiales o aguas subterráneas.

La muestra M1 (Salmuera de Inyección) es clasificada como Clorurada Sódica, que señala que el agua subterránea se encuentra en el último estado de su evolución, siendo coherente que se trate de agua de formación, ya que tienen elevados tiempo de contacto con la trama sólida de la roca que las almacena y muy altos tiempo de residencia.

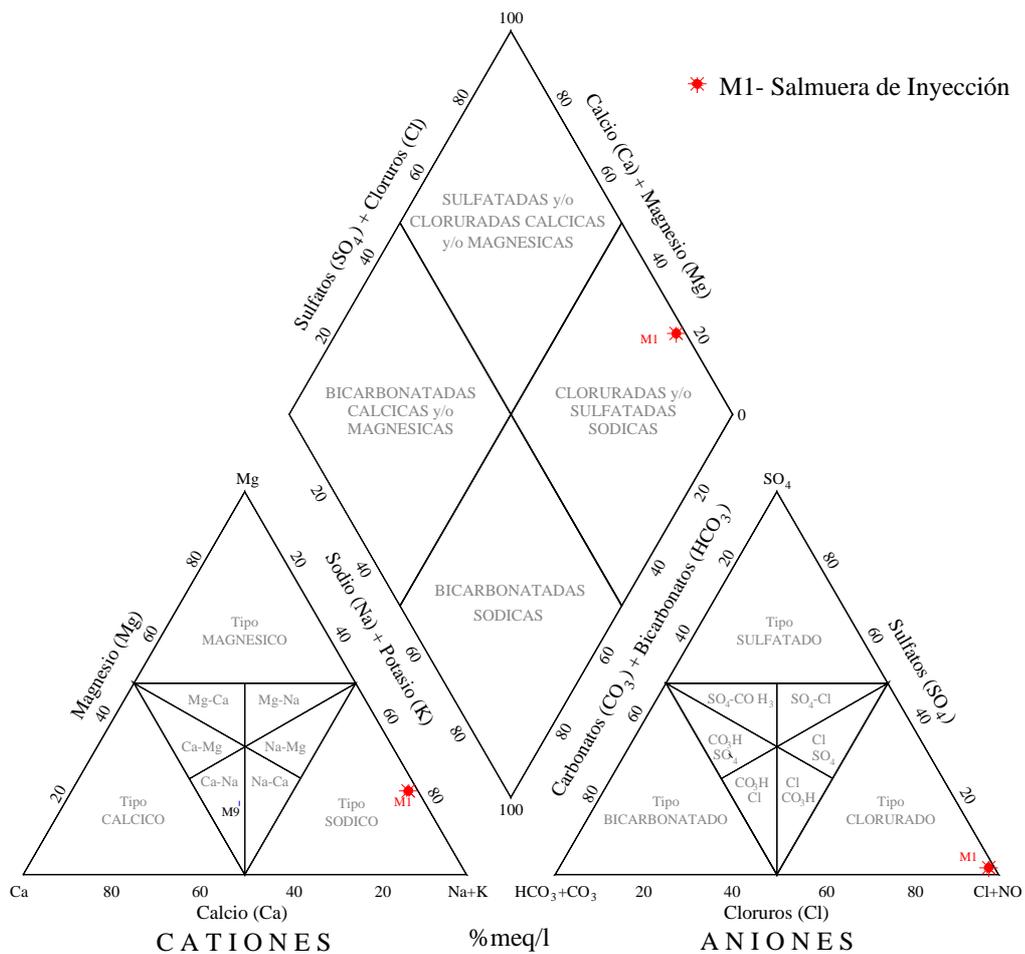


Gráfico 13: Diagrama Piper de la muestra M1- Salmuera de Inyección.

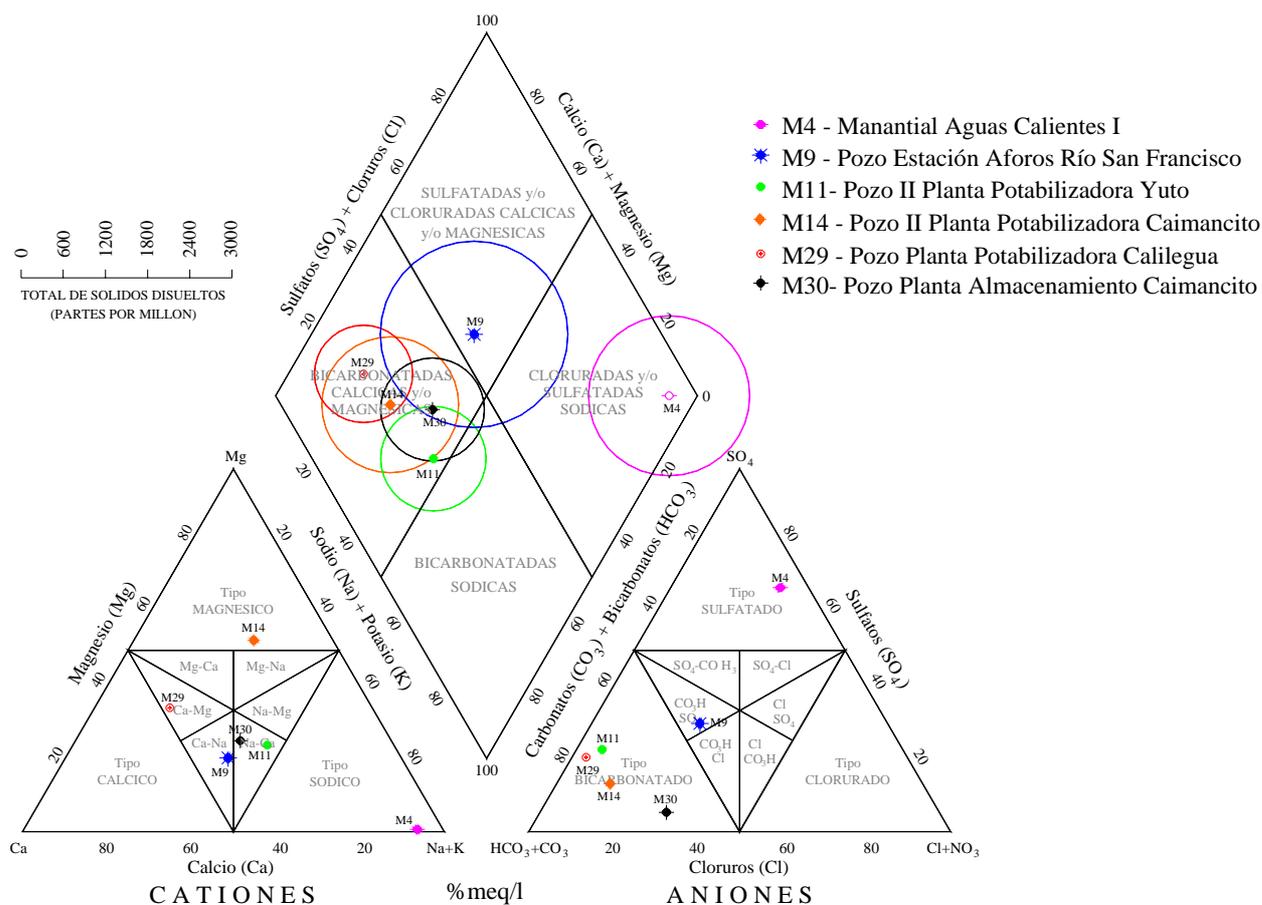


Gráfico 14: Diagrama Piper de muestras de aguas subterráneas del entorno al Yacimiento Caimancito.

De acuerdo a la clasificación Piper, la muestra M9 (obtenida del pozo somero existente en la Estación de Aforos del río San Francisco) es del tipo Bicarbonatada a Sulfatada Cállica – Sódica, lo que sugiere que existe mezcla de aguas subterráneas y superficiales.

La muestra M3 (Manantial de Aguas Calientes I) es claramente Sulfatada Sódica, que señala un estado avanzado en la evolución del agua subterránea y coincide con el concepto de que estas manifestaciones de aguas subterráneas en esta región provienen de la infiltración de aguas de lluvias al pie de la sierras de Calilegua y luego de viajar y circular profundamente, se manifiestan en superficie mediante una falla.

Las muestras M11, 14, 29 y 30 que explotan agua del Sistema Acuífero San Francisco – Lavayén, son del tipo Bicarbonatadas Cállicas, lo que indica un estado de evolución inicial de las aguas subterráneas. Este último grupo es claramente distinto a la muestra anterior y también es indicativo de que se trata de ambientes hidrogeológicos diferentes.

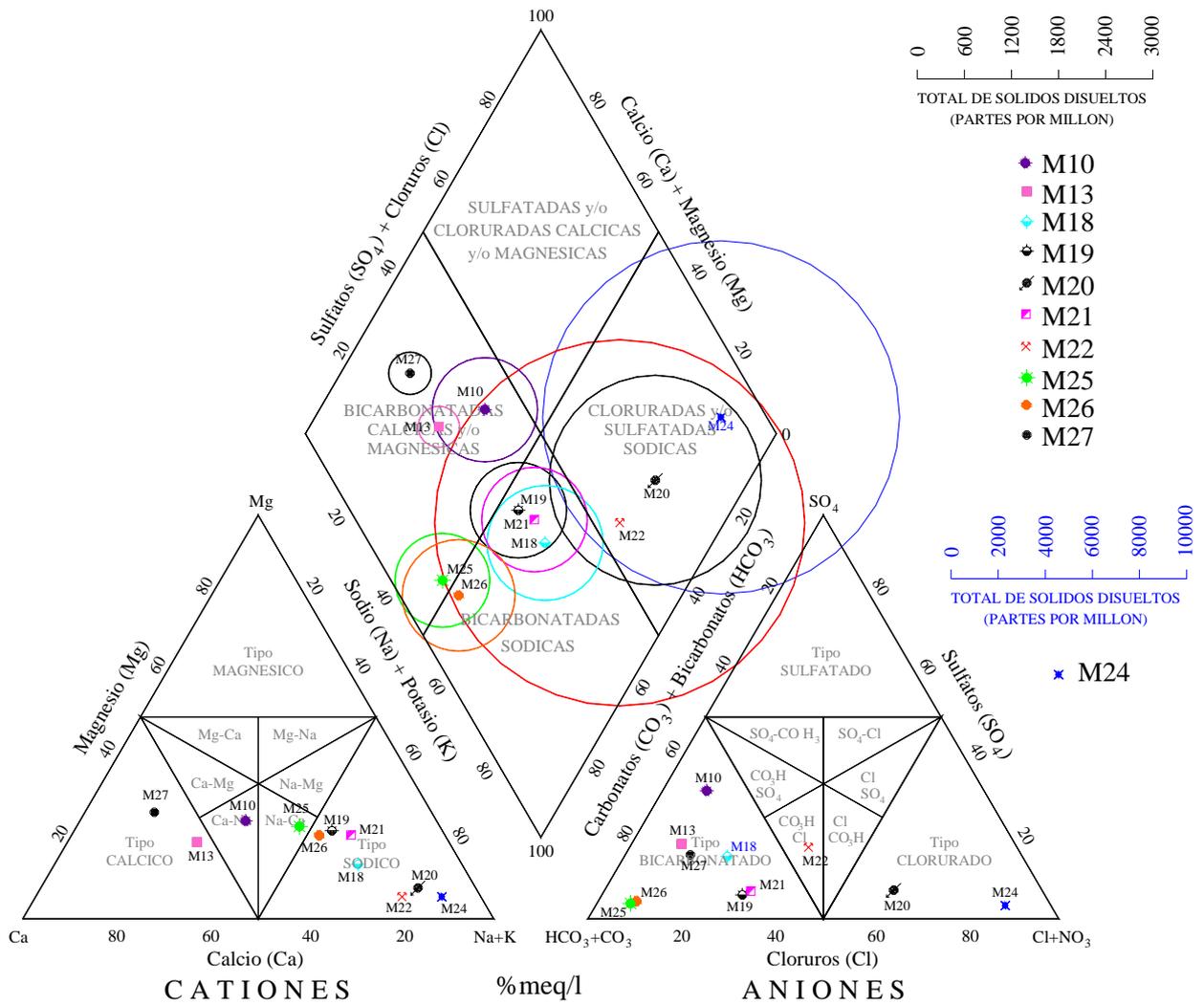


Gráfico 15: Diagrama Piper de muestras de aguas superficiales del entorno del Yacimiento Caimancito.

Como bien se aprecia, las muestras M4 (Arroyo Tributario Derecho), M20 (arroyo Yuto) y M22 (Arroyo sobre camino a Batería), son del tipo Cloruradas Sódicas.

Las muestras M27 (Arroyo de Los Berros), M10 (Río San Francisco) y M13 (Río de Las Piedras), son claramente Bicarbonatadas Cállicas.

Las muestras M18 (Arroyo Zanjón Seco), M19 (Río Sauzalito), M21 (Río Sauzalito), M25 (Río Sauzalito) y M 26 (Arroyo El 15), son Bicarbonatadas Sódicas.

La determinación de elementos y compuestos especiales (Demanda Química de Oxígeno, Nitrógeno Total, Grasas y Aceites, Bario, Cromo, Cadmio, Plomo, Mercurio y Sulfuros), que se planteo inicialmente efectuar a algunas muestras de agua (incluyendo la muestra de salmuera de inyección), se realizó con el objetivo de establecer si existe o no vinculación con el proceso de inyección que se efectúa en un sector del Yacimiento Caimancito.

Debido a esta razón se seleccionaron lugares de muestreo que por su cercanía a la zona de inyección de salmueras se consideraron sensibles (Arroyo Sauzalito y tributarios menores de este curso fluvial; Pozo Planta de Almacenaje Caimancito y Pozo Planta Potabilizadora Caimancito). De la misma manera, se han muestreado lugares considerados como “blancos” a fin de establecer valores de fondo regionales (Pozo Planta Potabilizadora Yuto y río San Francisco sobre el puente carretero de la ruta provincial N° 1).

La utilidad de este tipo de análisis está condicionada tanto por la técnica como por el instrumental utilizado. De esta manera no es suficiente con establecer presencia/ausencia de un elemento cualquiera, sino que los valores determinados de ese elemento puedan ser comparados con los señalados en las normativas vigentes, en este caso, con el Código Alimentario Argentino (CAA). Lamentablemente, los resultados informados por el laboratorio para este tipo de determinaciones no fue satisfactorio debido a que los valores informados, no permiten compararlos con los límites establecidos en el CAA. Debido a esta razón, se ha decidido efectuar un nuevo muestreo de los lugares citados anteriormente (M1; M10; M11; M14; M19; M24 y M30) y enviar las muestras a un laboratorio distinto.

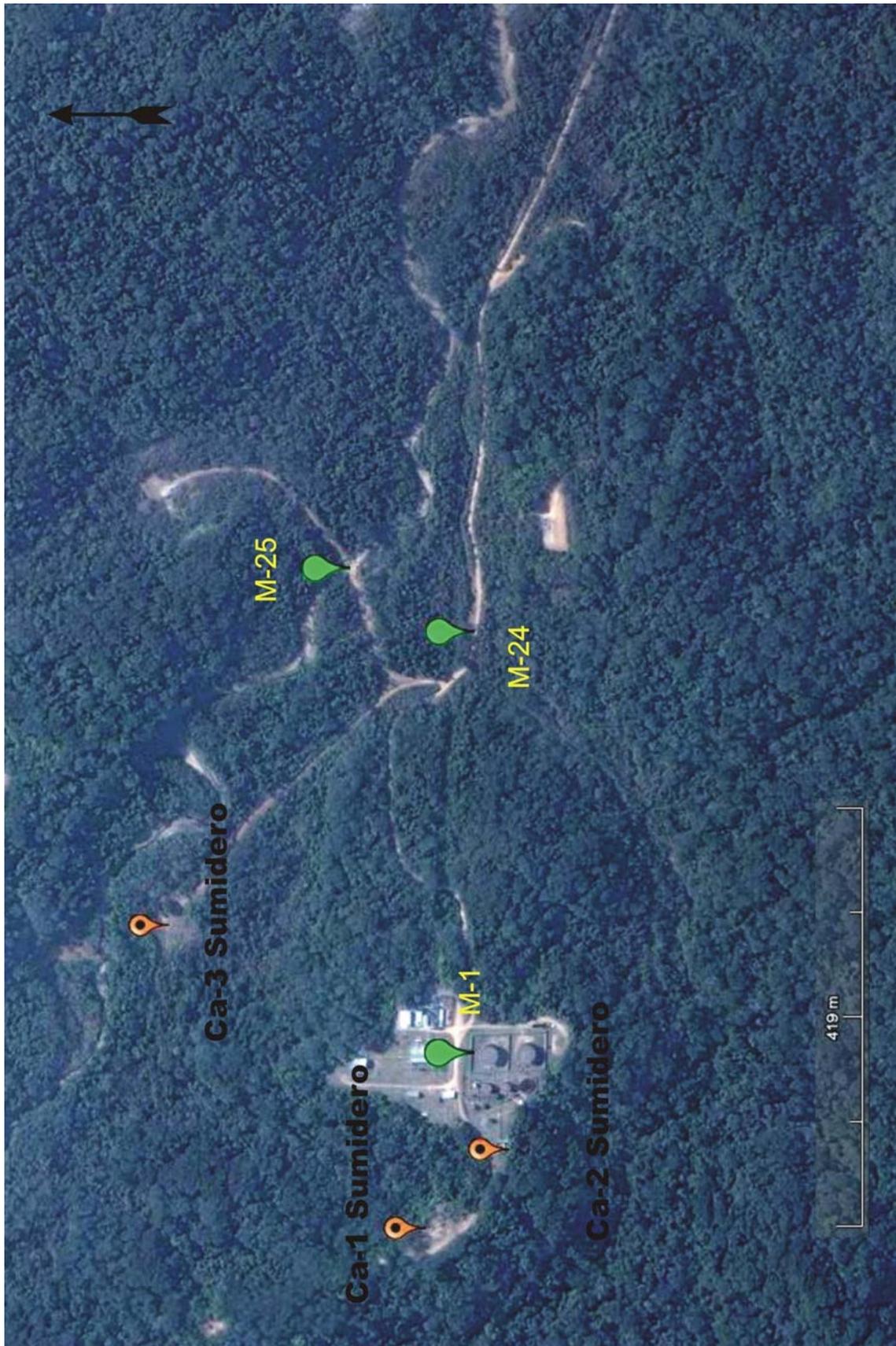


Figura 19: Ubicación de los pozos inyectoros 1, 2 y 3 utilizados por la anterior operadora del área. Puntos de muestreo para análisis físico - químico de aguas en la zona inmediata a los pozos inyectoros.

4.6. PREFACTIBILIDAD DE INYECCIÓN PROFUNDA

Los distintos estudios realizados durante el presente trabajo tienen como objetivo final elegir tanto la locación como la profundidad de un pozo inyector que permita disponer en forma ambientalmente segura salmueras procedentes de la explotación del Yacimiento Caimancito.

Las sedimentitas del Terciario Subandino en esta región de la cuenca del Grupo Orán y equivalentes, están constituidas por arcilitas, areniscas y limolitas de origen fluvial. La columna estratigráfica del Pozo J.Ca. x-1, registra entre los 30 y 1990 metros de profundidad, una secuencia alternante de las sedimentitas mencionadas, con una clara dominancia de las fracciones finas (arcillas y limos), sobre las más gruesas (arenas).

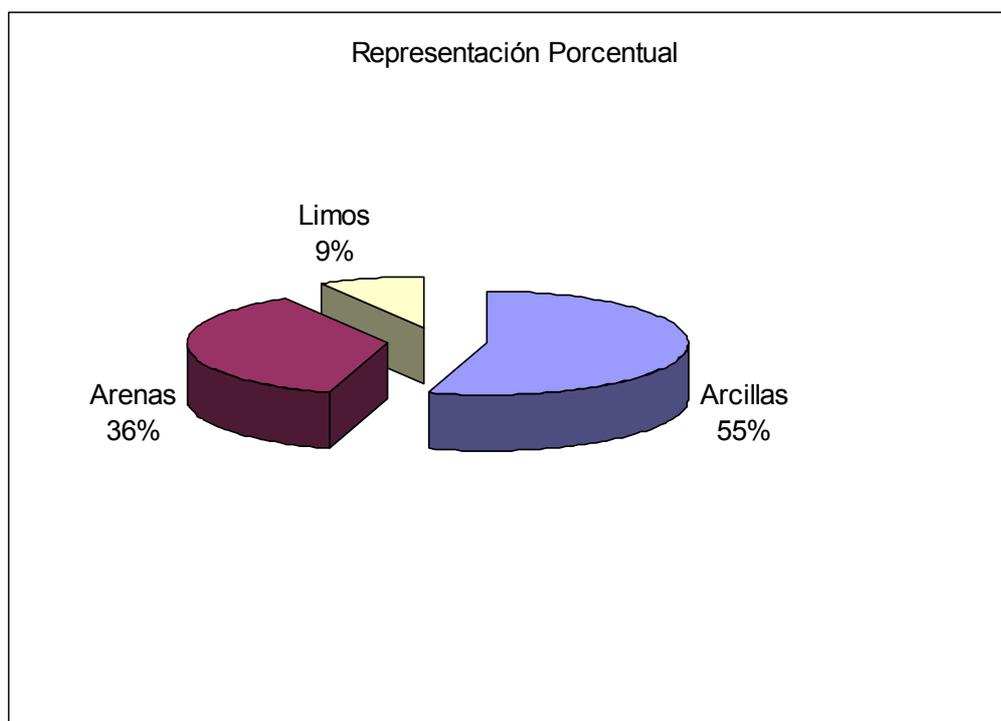


Gráfico 16: Porcentaje de arcillas, arenas y limos en las secuencias terciarias, desde 30 a 1990 metros de profundidad en el Pozo en J.Ca. X- 1.

En el Pozo J.Ca.x-1, el perfil estratigráfico muestran entre los 1.550 a 1.610 m.b.b.p., una secuencia de arenas a las que le supra e infrayacen arcillas. En la descripción litológica se señala "Arenisca pardo claro, grano fino, subredondeada, semicompacta, en parte deleznable, blanda, con leve reacción al HCl. La arcilla superior (entre los 1.500 a 1.550 m.b.b.p.), se describe como compacta a semicompacta, fractura irregular, semidura. La arcilla inferior (1.610 a 1.660 m.b.b.p.), presenta características similares a la anterior. También se señala entre los 1.660 y 1.855 m.b.b.p una arenisca pardo claro, de grano fino, subredondeada, cemento arcillosos, blanda, algo deleznable, leve reacción al HCl; con intercalaciones de arcillas y arcillas arenosas, pardo grisácea, con un nivel de tobas gris y gris verdoso entre los 1775 a 1185 m.b.b.p. Otro nivel potencial para inyección se desarrolla entre los 2.220 a 2.480 m.b.b.p., conformado por areniscas finas a mediana, levemente calcáreas, con intercalaciones de pequeños niveles de arcilitas y tobas arenosas. Por último, dentro de las secuencias asignadas al Terciario Subandino se encuentra un nivel entre los 2.570 a 2.645 m.b.b.p., de areniscas finas a mediana, semicompacta, semidura, con pequeñas intercalaciones de limolitas, arcilitas y tobas gris verdosa.

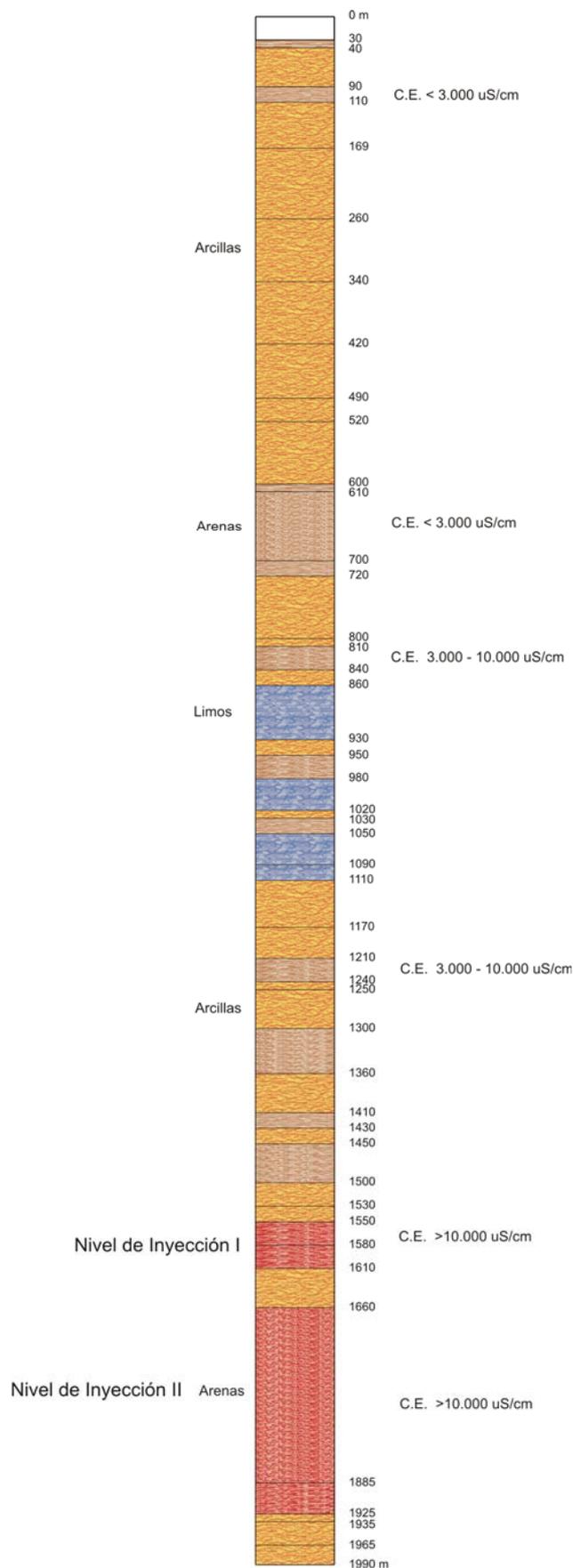


Ilustración 9: Columna estratigráfica sintetizada correspondiente al Pozo J.Ca. x – 1; desde 30 a 1990 metros bajo boca de pozo.

También se debe señalar que puede y debe considerarse como formación dipositora a la misma unidad que es productiva de hidrocarburos y salmueras; esto es la misma Formación Yacoraite. En este sector de la cuenca cretácica, la Formación Yacoraite se encuentra conformada por un paquete de calizas, calizas limosas, areniscas calcáreas y margas que se encontrarían fracturadas.

La reconstrucción del nivel reflectivo superficial correspondiente a la profundidad de 1.550 a 1.610 metros (Terciario Subandino), señala que las arenas presentarán continuidad areal y cierre estructural. Como ya se indicó, la longitud de la estructura es de aproximadamente 10 kilómetros en dirección meridiana; mientras que en sentido perpendicular es de unos 7 kilómetros. Es obvio que cualquier otro nivel arenoso que se encuentre por debajo de la profundidad señalada, ofrecerá las mismas bondades. Por otra parte y teniendo en cuenta que los porcentajes de arcillas son sustancialmente mayores a los de las arenas, es de esperar que exista suficiente sello superior e inferior, tanto vertical como lateralmente.

La información obtenida de los perfiles 1D de las Estaciones MT señala coherencia y compatibilidad entre los valores de resistividad encontrados y el modelo estructural existente en la zona de estudio. Como puede observarse en los modelos 1D, existen valores de resistividad bajos a muy bajos, lo que evidentemente señala la preponderancia de facies finas (arcillas y limos) sobre las gruesas (arenas y conglomerados). Estos valores bajos de resistividad son asignados al Terciario Subandino y a la parte media y superior del Grupo Salta; mientras que los valores más resistivos en profundidad son interpretados como facies sedimentarias pertenecientes al Subgrupo Pirgua y a sedimentitas paleozoicas.

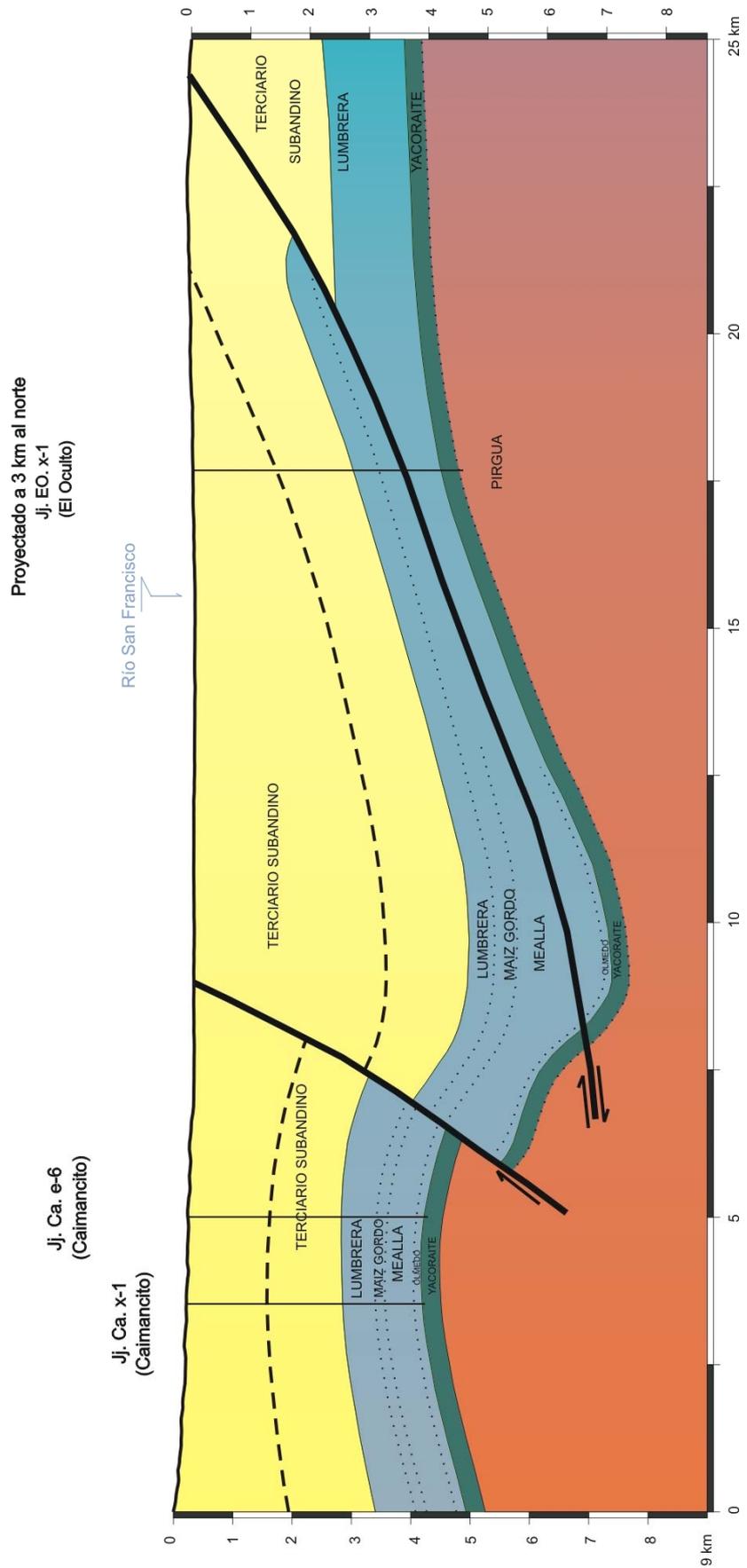


Figura 20: Perfil estructural transversal del Yacimiento Caimancito y alrededores, con el horizonte reflectivo superficial del Terciario Subandino.

En general, a medida que aumentan la profundidad y el tiempo de residencia del agua subterránea, se incrementa la salinidad de la misma. Sin embargo, desde el punto de vista regional, existen antecedentes de una gran heterogeneidad respecto al contenido salino de las capas acuíferas presentes en las sedimentitas de edad terciaria. Empleando los perfiles de SP de algunos pozos petroleros, se determinó que hasta una profundidad promedio de 800 metros bajo boca de pozo, en parte del Yacimiento Caimancito, existen niveles acuíferos con valores de Residuo Seco menores a 3.000 mg/l, las que deben ser consideradas como potencialmente aptas para el consumo animal y humano. Entre los 800 y 1.200 metros de profundidad se encuentran aguas de formación salobres a saladas (3.000 mg/l a 10.000 mg/l de Residuo Seco). Por debajo de los 1.200 metros de profundidad, se observa que los contenidos salinos de los niveles arenosos y limosos se incrementan notablemente, tanto que entre los 1.500 y 1.600 m.b.b.p., los niveles acuíferos presentarían salinidades equivalentes en ClNa de hasta 30.000 ppm o conductividades eléctricas superiores a 40.000 μ S/cm.

Los perfiles geoelectrónicos realizados en el entorno del Yacimiento Caimancito, muestran que en la zona comprendida por la falla al pie de la sierra de Caimancito (al oeste), el río San Francisco (al este), la localidad de Caimancito (al sur) y el pueblo de Yuto (al norte), existen dos grandes unidades con valores de resistividad contrastantes. La parte superior, generalmente resistiva a semiresistiva, asignada a sedimentos del cuaternario y una parte inferior, generalmente conductiva a semiconductiva, interpretada como perteneciente a facies sedimentarias del terciario. En este sector de la zona de estudio los espesores de sedimentos modernos no superarían los 50 metros y están conformados principalmente por rodados medianos a gruesos, gravas de todos los tamaños, arenas y arcillas. Las fracciones más gruesas se localizan en el sector oeste (al pie del sistema serrano de Caimancito) y disminuyen progresivamente de tamaño y frecuencia a medida que se avanza hacia el este (zona de influencia del río San Francisco). En estos sedimentos se desarrollarían dos tipos de acuíferos; uno libre y otro (cuando se encuentra) semiconfinado. A partir de los 50 metros de profundidad aproximadamente, se desarrollan secuencias sedimentarias (generalmente alternancias de arcillas y gravas o arenas gravosas) que, en la generalidad de los casos, se comportan como conductivas a semiconductivas y que son interpretadas como facies pertenecientes al terciario. En este tipo de medio de circulación, se desarrolla un sistema multicapa de acuíferos semiconfinados y confinados que, de acuerdo a los datos de sísmica y geoelectrónica, se encontrarían inclinados hacia el este.

Teniendo en cuenta que la factibilidad de inyección siempre estuvo restringida al Yacimiento Caimancito propiamente dicho, se considera que al efectuarse la disposición en la estructura anticlinal y hacia el oeste del plano de la falla inversa que recorre la región en forma paralela y casi coincidente con la posición de la ruta nacional N° 34, se estaría siempre en un ambiente estructural e hidrogeológico diferente al desarrollado entre esta falla y el río San Francisco. Esta situación de contorno permite señalar que existen condiciones favorables para la inyección profunda, empleando cualquiera de los pozos que actualmente son improductivos de hidrocarburos (buscando siempre el que se encuentre en mejor estado) y que a una profundidad superior a los 1.200 metros, siempre y cuando las arenas admitan, la disposición de salmueras estará contenida además del sello arcilloso supra e infrayacente, por el cierre estructural del nivel arenoso elegido para la inyección.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los estudios realizados y los antecedentes con que se cuenta permiten estimar que existe una elevada probabilidad de encontrar reservorios de agua apta para el consumo humano y animal (tanto en el concepto actual como futuro de la aptitud de uso para consumo humano y ganadero) hasta una profundidad de aproximadamente 800 metros.
2. Por debajo de los 1.200 metros de profundidad se encontrarían elevados contenidos salinos en los acuíferos; situación concordante con el concepto de que a medida que aumenta la profundidad y el tiempo de residencia es de esperar mayores concentraciones salinas. La interpretación de los perfiles de SP de algunos pozos petroleros, señalan claramente que los contenidos salinos de los niveles arenosos y limosos se incrementan notablemente por debajo de los 1.200 metros; tanto que entre los 1.500 y 1.600 m.b.b.p., los niveles acuíferos presentarían salinidades equivalentes en ClNa de 30.000 ppm o conductividades eléctricas superiores a 40.000 $\mu\text{S/cm}$.
3. En la zona donde se encuentra la batería de pozos, la columna estratigráfica está integrada por una cobertura de sedimentos modernos meno a los 30 metros y una potente secuencia de sedimentitas perteneciente al Terciario Subandino (aproximadamente 2.700 metros).
4. En el Pozo J.Ca.x-1, se han individualizado cuatro niveles arenosos que pueden actuar como formación dipositora localizados entre los 1.550 a 1.610 m.b.b.p; entre los 1.660 a 1.855 m.b.b.p; entre los 2.220 a 2.480 m.b.b.p y entre los 2.570 a 2.645 m.b.b.p., que corresponden a areniscas de grano fino, subredondeada, semicompacta, en parte deleznable y blanda.
5. La reconstrucción del nivel reflectivo más superficial mediante la interpretación sísmica correspondiente a la profundidad de 1.550 a 1.610 metros, señala que las arenas del Terciario Subandino presentarán continuidad areal y cierre estructural. Es obvio que cualquier otro nivel guía arenoso que se encuentre por debajo de la profundidad señalada, ofrecerá las mismas bondades.
6. Los estratos impermeables (que actúan como roca sello), suman aproximadamente el 55% de la columna estratigráfica entre los 30 y 1.990 metros de profundidad. La disposición estructural y continuidad areal les confiere una efectiva capacidad de atenuación de contaminantes en una distancia no inferior a los 10 km en dirección meridiana y unos 7 km en sentido este-oeste, de un pozo dipositor localizado en la estructura caimancito.
7. Se considera ambientalmente seguro realizar la inyección en niveles arenosos del Terciario Subandino que se encuentran por debajo de los 1.200 metros de profundidad. También se debe considerar como objetivo de inyección a la misma Formación Yacoraite que es productora de hidrocarburos y salmueras.
8. Puesto que la factibilidad de inyección ambientalmente más segura está restringida al Yacimiento Caimancito propiamente dicho, se considera que al efectuarse la disposición en la estructura anticlinal y hacia el oeste del plano de la falla inversa que recorre la región en forma paralela y casi coincidente con la posición de la ruta nacional N° 34, se estaría siempre en un ambiente estructural e hidrogeológico diferente al desarrollado entre esta falla y el río San Francisco.

9. Realizar la inyección en cualquiera de los pozos que actualmente son improductivos de hidrocarburos, buscando siempre el que se encuentre en mejor estado de conservación y en donde la intervención sea la menos agresiva al entorno, minimizando aspectos tales como obras que haya que construir, camino de acceso, etc.
10. Se considera que la inyección de efluentes salinos por debajo de los 1.200 metros en la zona de batería del Yacimiento Caimancito, implica un bajo riesgo de contaminación para los acuíferos actualmente explotados en la zona del Pueblo de Caimancito y áreas cercanas.
11. Las muestras M11, M27, M29, M30 y M25, son aptas para el consumo humano. Las Muestras M13, M18, M21 y M26 son aptas si se elimina color y turbiedad.
12. De acuerdo a los resultados de los análisis físico – químicos el agua subterránea explotada por la mayoría de los pozos profundos del Sistema Acuífero San Francisco – Lavayén es del tipo Bicarbonatadas Cálcidas. El agua del pozo somero existente en la Estación de Aforos del río San Francisco es del tipo Bicarbonatadas a Sulfatadas Cálcidas – Sódicas. El agua del Manantial de las Aguas Calientes es Sulfatada Sódica, señalando que este ambiente hidrogeológico es diferente del Sistema Acuífero San Francisco – Lavayén.
13. El agua superficial, de acuerdo a la clasificación de Piper, es del tipo Bicarbonatadas Cálcidas a Bicarbonatadas Sódicas. La excepción es el agua del arroyo Yuto y de dos pequeños arroyos tributarios del río Sauzalito, que se clasifican como Cloruradas Sódicas.

6. BIBLIOGRAFÍA

ALLER, L.; BENNETT T.; LEHR, J.; PETTY, R. y G. HACKETT, 1987. "DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings". Robert S Keer Environmental Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency, ADA, Oklahoma 74820. USA.

BAUDINO, G., A. FUERTES; N. VITULLI; V. ROCHA; B. HEIT; C. MANJARRÉS; E. GALLARDO y C. BASSI. 2000. Estudio de Prefactibilidad Para la Inyección Profunda de Efluentes Salinos en el Area de Yacuy – Piquirenda y Evaluación del Riesgo de Contaminación de Acuíferos. Departamento San Martín - Provincia de Salta. República Argentina. Contrato de Prestación de Servicios. Pan American Energy LLC - Universidad Nacional de Salta. INASLA.

BOBACHEV, A. 2002. User's Guide of Ipi2win_MT (v. 2.0) Software. Department of Geophysics. Geological Faculty. Moscow State University y Geoscan-M.Ltd.

CUSTODIO, E. y M. R. LLAMAS. 1983. Hidrología Subterránea. Editorial Omega S.A., Barcelona.

DAVIS, S. N. y R. DE WIEST. 1971. Hidrogeología. Editorial Ariel S.A., Barcelona.

EGBERT, G. and BOOKER, J., 1987. Robust estimation of geomagnetic transfer functions, Geophys. J. R. Astron. Soc. 87, 173-194.

ERVEN, 1998. Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas por actividades urbanísticas en la comunidad valenciana. SERIE: Publicaciones de divulgación técnica. COLECCION: Cartografía Temática. Nº 2.

FETTER, C. W. 1988. Applied Hydrogeology. Second Edition. Macmillan, New York.

FOSTER, S., 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of Soil and Groundwater Pollutants. TNO Committee on Hydrological Research Information Nº38. Ed. By W. Van Duijvenbooden and H. G. Van Waegenigh, The Hague:G9-86.

FUERTES, A.; R. F. GARCIA; G. A. BAUDINO y F. A. MOYA RUIZ. 1987. Proyecto CUHINOA Caracterización de las Cuencas y Regiones Hídricas del NOA (Primera Parte). Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta - Secretaría de Ciencia y Técnica (SECYT). Inédito.

FUERTES, A.; G. BAUDINO; M. V. ROCHA FASOLA; B. S. HEIT; C. MANJARRÉS y C. R. BASSI. 1999. Control Geológico y Ensayo de Inyectividad en el Pozo Exploratorio WDW 1 Planta de Tratamiento de Gas de Shell C.A.P.S.A. Colonia Santa Rosa. Departamento Oran – Provincia de Salta – Republica Argentina. Instituto de Aguas Subterráneas para Latinoamérica (INASLA). Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

FREZEE, R. A. y J. A. CHERRY. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewoods Cliffs, New Jersey.

GALLI, I. C., R. HERNÁNDEZ, y J. H. REYNOLD. 1996. Análisis paleoambiental y ubicación geocronológica del Subgrupo Metán (Grupo Orán, Neógeno) en el río Piedras, departamento Metán, Salta, Argentina. Boletín de Información Petrolera. p. 98-107. Junio de 1996.

GARCIA, R. F. 1993. Estudio de Fuentes de Provisión de Agua. Chalicán, Colonia Agrícola 8 de Septiembre, Fraile Pintado, Calilegua, La Lucrecia, El Bananal - Yuto. Zona Ramal Jujeño. Provincia de Jujuy. Consejo Federal de Inversiones. Programa APAPC (Agua Potable a Pequeñas Comunidades). Inédito.

GARCIA, R. F. 1995. Estudio de Fuentes de Provisión de Agua en el Departamento de Santa Bárbara, Provincia de Jujuy. Ojo de Agua, El Olvido, Las Vertientes, Cerro El Alumbre, Siete Aguas, El Canal – Puente Lavayén, Km 82, Km 83 y Km 84; Sauce Guacho – Las Paltas, El Molino, Madrejones, Punta de Agua y Las Moras – Bella Vista. Consejo Federal de Inversiones. Programa APAPC (Agua Potable a Pequeñas Comunidades). Inédito.

GARCIA, R.F. 1998. Hidrogeología del Chaco Boreal Salteño. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. Tesis Doctoral. Inédito.

GARCIA, R. F.; G. BAUDINO; A. FUERTES; N. CASSON y W. BAUMGARTNER. 2000. Estudio de Factibilidad Para La Inyección en Acuíferos Profundos, No Potables, del Agua de Producción del Yacimiento Valle Morado, Salta. García, R. F.; G. Baudino; A. Fuertes; N. Casson y W. Baumgartner. 4tas. Jornadas de Preservación de Agua, Aire y Suelo en la Industria del Petróleo y del Gas. Tomo II. (239-263). Salta.

GARCÍA, R. F.; M. V. ROCHA FASOLA Y F. A. MOYA RUIZ. 2008. Los Recursos Hídricos Subterráneos del Sector Valles Intermontanos de la Provincia de Jujuy. XVII Congreso Geológico Argentino. San Salvador de Jujuy. Provincia de Jujuy. República Argentina. En prensa.

GARCIA, X. 1999. 2D Inversion of 3D magnetotelluric data. Earth Planet & Space. 51,1135 .

GOMEZ OMIL, R. 1987. Geología de las Cuencas Petroleras de la Argentina. Cuenca Cretácica del Noroeste. Boletín de Información Petrolera. Yacimientos Petrolíferos Fiscales.

HERNANDEZ, R. M., REYNOLDS, J. y A. DISALVO. 1996. Análisis tectosedimentario y ubicación geocronológica del Grupo Orán en el Río Iruya. Dpto. Orán, Provincia de Salta. Boletín de Información Petrolera.

INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR. 1951. Hoja 2366-IV, Ciudad de General Libertador San Martín. Escala 1:250.000. Ejército Argentino. Buenos Aires.

INSTITUTO DE CIENCIAS Y TECNICAS HIDRICAS (INCYTH). 1985a. "Estudio Hidrometeorológico, Hidrológico e Hidrogeológico de la Subcuenca del río San Francisco. Inventario Hidrogeológico del Área de Estudios de Subcuenca del Río San Francisco en la Provincia de Jujuy. Juan Lago, Miguel Agostini y Roberto Meloni.

INSTITUTO DE CIENCIAS Y TECNICAS HIDRICAS (INCYTH). 1985b. "Estudio Hidrometeorológico, Hidrológico e Hidrogeológico de la Subcuenca del río San Francisco. Provincia de Jujuy. República Argentina.

INSTITUTO DE CIENCIAS Y TECNICAS HIDRICAS (INCYTH). 1985c. "Estudio Hidrometeorológico, Hidrológico e Hidrogeológico de la Subcuenca del río San Francisco. Estudio Geoeléctrico del Subsuelo de la Subcuenca del Río San Francisco en la Provincia de Jujuy. Juan Herrero Ducloux y Néstor Werner.

INSTITUTO DE CIENCIAS Y TECNICAS HIDRICAS (INCYTH). 1987. "Estudio Hidrometeorológico, Hidrológico e Hidrogeológico de la Subcuenca del río San Francisco. Caracteres Hidrogeoquímicos de las Aguas Subterráneas de la Zona de Estudios de la Subcuenca del Río San Francisco en la Provincia de Jujuy. Juan Lago, Miguel Agostini y Roberto Meloni.

ISSAR A y R. PASSCHIER, 1990. Regional hydrogeological concepts. En: Lerner D., A. Issar e I. Simmers. 1990. Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge. International contributions to Hydrogeology, Vol 8. International Association of Hydrogeologist Heisse. Hannover.

MARTINEZ, M.; P. DELGADO y V. FABREGAT, 1998. Aplicación del Método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente. Asociación Internacional de Hidrogeólogos - Grupo Español. Valencia.

MINGRAMM, A., A. RUSSO, A. POZO y L. CAZAU. 1979. Sierras Subandinas. Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Volumen I. Academia Nacional de Ciencias. Córdoba.

MIRANDA, F y p. JOHANIS. 2000. Geology and Termal Features of El Ramal Area, Jujuy Province, Argentina. World Geothermal Congress. Kyushu – Tohoku, Japan.

MORENO, J. 1970. Estratigrafía y paleogeografía del Cretácico Superior en la cuenca del noroeste argentino, con especial mención a los subgrupos Balbuena y santa Bárbara. Asociación Geológica Argentina, Revista 25 (1): 9-44, Buenos Aires

PARKER, R. L. 1983. The magnetotelluric inverse problem, Review paper for 6th Induction Workshop, Aug 1982, Univ. Of Victoria, Victoria, B. C. Canadá. Geophysical Surveys 8, 5-25.

POMPOSIELLO, M.C., BOOKER. J. and FAVETTO A. 2004. A discussion of bias in MT response, Geophysics, en prensa.

REYES, F. C. y J. SALFITY. 1973. Consideraciones sobre la estratigrafía del Cretácico (Subgrupo Pirgua) del noroeste argentino. Quinto Congreso Geológico Argentino, Actas 3:355-358, Buenos Aires.

RUSSO, A. y A. SERRAIOTO. 1979. Contribución al conocimiento de la estratigrafía terciaria del noroeste argentino: Actas VII Congreso Argentino, 1, p.715-730.

SMITH, J.T., BOOKER, J. 1991. Rapid inversion of two - and three dimensional magnetotelluric data. J. Geophys. Res. 96, 3905–3922.

STARCK, D., E. GALLARDO, y A. SCHULZ. 1991. Estratigrafía del Neopaleozoico de las Sierras Subandinas Occidentales y de la Cordillera Oriental de la República Argentina y Algunas Consideraciones Sobre los Bordes Australes de la Cuenca de Tarija.

SWIFT, C.M. 1967. A magnetotelluric investigation of electrical conductivity anomaly in the southwestern United States, 1967, PhD thesis, MIT, Cambridge, Massachusetts.

VAN DER VELPEN. 1988. RESIST. Version 1.0. ITC Msc. Research Project. Delft.

VAN DILLEWIJN, J.; I. MILLS; V. ROES; C. SCHENK; G. BAUDINO; A. FUERTES y R. F. GARCÍA. 2000. Drilling and Monitoring of a Water Disposal Well in the Colonia Santa Rosa/ Urundel Area. 4tas. Jornadas de Preservación de Agua, Aire y Suelo en la Industria del Petróleo y del Gas. Tomo II. (239-263). Salta.

VRBA, J. and A. ZAPOREZEC (Ed.), 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Contribution to Hydrogeology, Vol 16. International Association of Hydrogeologists. Ed. Heisse. Hannover.

ZAPOREZEC A., 1989. Hidrogeologic mapping for groundwater protection *en* Recent advances in groundwater hydrology (J.E. Moore *et. al.*, eds), Amer. Institute of Hydrology, Minneapolis, MN, p. 588-597.