



Facultad de Ciencias Exactas, Físico - Químicas y Naturales
Departamento de Geología

Tesis de licenciatura

***Hidrodinámica del acuífero freático en la zona Las Peñas
Sur, modelación numérica del flujo y relación con calidad
del agua subterránea.***

Lutri Verónica
Año 2013

Directora: Dra. Edel Matteoda

Codirectora: Dra. Mónica Blarasin

Capítulo 1 - Introducción y objetivos

1.1 - Antecedentes y fundamentación

1.2 - Hipótesis de trabajo

1.3 - Objetivos Generales

1.4 - Objetivos Específicos

1.5 - Ubicación del área de estudio

1.6 - Materiales y Métodos

1.6.1 - Etapa de gabinete inicial

1.6.2 - Etapa de campo

1.6.3 - Etapa de Laboratorio

1.6.4 - Etapa de gabinete final

Capítulo 2 - Geología y Geomorfología Regional

2.1 - Introducción

2.2 - Geología Regional

2.2.1 - Sierras Pampeanas de Córdoba

2.2.2 - Llanura Chacopampeana

2.2.3 - Características Geológico-Estratigráficas

2.2.3.1 - Principales sistemas de estructuras de la región

2.3 - Geomorfología Regional

Capítulo 3 - Geología y geomorfología local

3.1 - Geología

3.1.1 - Introducción

3.1.2 - Geología aflorante

3.1.2.1 - Sierra de Las Peñas

3.1.2.2 - Llanura agradacional pedemontana

3.1.2.2.1 - Geología de superficie: Perfiles sedimentarios.

3.1.3 - Geología del subsuelo

3.1.3.1 - Perfiles de perforación

3.1.3.2 - Sondeos eléctricos verticales (SEV)

3.1.3.3 - Perfiles geológicos esquemáticos

3.2 - Geomorfología

3.2.1 - Descripción Unidades Geomorfológicas

3.3 - Evolución geológica zona Las Peñas Sur

Capitulo 4 - Hidrometeorología

4.1 - Hidrometeorología Regional

4.1.1 - Clima

4.1.2 - Temperatura

4.1.3 - Vientos

4.1.4 - Precipitaciones

4.1.5 - Evapotranspiración Potencial

4.2 - Hidrometeorología local

4.2.1 - Análisis de precipitaciones

4.3 - Balance Hídrico Seriado

Capitulo 5 - Hidrología superficial y subterránea

5.1 - Hidrología Regional

5.1.1 - Hidrología superficial

5.1.2 - Hidrología subterránea

5.1.2.1 - Características hidrolíticas e hidroestratigráficas

5.1.2.1.1 - Acuíferos freáticos

5.1.2.1.2 - Acuíferos confinados

5.1.2.2 - Hidrodinámica subterránea regional

5.2 - Hidrología Local

5.2.1 - Hidrografía superficial

5.2.2 - Hidrología subterránea

5.2.2.1 - Acuífero freático zona Las Peñas Sur

5.2.2.1.1 - Hidrodinámica

5.2.2.1.1.1 - Profundidad del nivel freático

5.2.2.1.1.2 - Potenciales hidráulicos del acuífero freático

5.2.3 - Perfiles hidrolitológicos

5.3 - Modelación numérica del flujo

5.3.1 - Introducción

5.3.2 - Modelo numérico de la zona de estudio: Las Peñas Sur

Capítulo 6 - Hidrogeoquímica

6.1 - Introducción

6.2 - Hidrogeoquímica regional

6.3 - Hidrogeoquímica del acuífero freático de la zona Las peñas Sur

6.3.1 - Acuífero libre

6.3.2 - Acuífero confinado

6.3.3 - Elementos minoritarios y trazas: Nitratos, Arsénico y Flúor

6.4 - Tratamiento estadístico

6.4.1 - Análisis de correlación lineal simple.

6.4.2 - Análisis estadístico multivariado

Capítulo 7 - Conclusiones y Recomendaciones

7.1 - Conclusiones

7.2 Recomendaciones

Anexo

Bibliografía

A la Universidad Nacional de Rio Cuarto por darme la posibilidad de formarme profesionalmente y como persona.

A todos los docentes del departamento de Geología, a la Dra. Edel Matteoda, por su entera predisposición, sus oportunas correcciones e infinita paciencia, a la Dra. Mónica Blarasin, por ser una inagotable fuente de conocimientos, por su capacidad para guiar mis ideas y ser un ejemplo como docente.

A todas las "Chicas de Agua" por ayudarme en todo momento, Fati, Jesi, Luci, Adriana, Laurita.

A la Dra. Susana Degiovanni por su extrema predisposición y acertadas correcciones.

A Lucas, por ser mi Basamento, mi guía y apoyo incondicional, mi seguridad y futuro.

A mi familia, a mi mama Alicia por creer en mí y apoyarme eternamente, a mi hermana Karina por apoyarme siempre, a mi hermano Franco que tiene un corazón de oro y no lo sabe.

A mi familia adoptiva, Elbita y Pato que me enseñan a crecer y aprender de su infinita generosidad, a Mauro, Vale.H, Anahi, Ailin, Nehuen Vale I., Enri, Zoe, Clari, Chalo, Anita, Taniel, Amaru y Luna por estar siempre presentes.

A mi Papa por estar presente aún ausente y a Claudia por intentar mantener sus pies en la tierra y ofrecer su ayuda cada vez que la necesito.

A mis compañeros y amigos que con los que compartí desde este hermoso camino de vida en la Universidad, Magu, Mary, Debo, Jesi, Nati, Nico, Seba.

A mis amigas de siempre Vale, Lu.B, por soportar mis locuras y crecer conmigo.

A los pobladores de la zona Las Peñas Sur por la buena predisposición para permitirme llevar a cabo los trabajos de campo.

Capítulo 1

Introducción,
Objetivos,
Materiales y
Métodos

1.1 - Introducción

1.1.1 - Antecedentes y fundamentación

El estudio de los sistemas de aguas subterráneas es de suma importancia, dado el requerimiento de abastecimiento de comunidades urbanas y rurales en todo el mundo, teniendo en cuenta el crecimiento exponencial de las poblaciones y en consecuencia la mayor necesidad de conocer los recursos naturales existentes y su posterior explotación para satisfacer las necesidades básicas.

El Decenio Internacional para la Acción, «El agua, fuente de vida» (2005-2014) establecido por las Naciones Unidas, es una oportunidad excelente para que la comunidad internacional avance hacia un enfoque integral en la gestión del agua del planeta que garantice un uso sostenible para las generaciones futuras.

En Córdoba, el agua subterránea es de especial importancia, no sólo por encontrarse involucrada en múltiples fenómenos naturales, sino también porque es el recurso utilizado, casi con exclusividad en algunas regiones, para actividades domésticas, agropecuarias, mineras e industriales (Blarasin, 2003, Blarasin et al., 2005, Matteoda, 2012).

A pesar de la importancia que el agua subterránea posee, un problema fundamental es la falta de conocimiento de la geometría, características litológicas e hidráulicas de los acuíferos, especialmente los más profundos, y consecuentemente de las reservas de agua disponible. También es habitual un desconocimiento, a veces parcial, de la calidad del agua y sus aptitudes de uso para diferentes actividades humanas. Se suma a esto la falta de diseño adecuado de perforaciones para la explotación, algunas con tecnología muy obsoleta, haciéndose necesario definir, con base en las características del medio subterráneo, las profundidades, diámetros, filtros, etc. adecuados de estas explotaciones (Blarasin et al., 2005; Cabrera, 2009; Matteoda et al 2011; Matteoda, 2012).

En la provincia de Córdoba la interacción entre el hombre y el recurso hídrico, generó importantes problemas ambientales, muy sentidos por la comunidad regional. En relación a la calidad de agua y, si bien en algunos sectores hay aguas subterráneas de excelente calidad (Blarasin, 2003), un problema relevante en grandes áreas de la llanura cordobesa es la pobre calidad natural del agua alojada en acuíferos constituidos por

sedimentos finos (dominantemente loésicos), caracterizada por altos tenores de sales disueltas totales (SDT), sulfatos, cloruros, arsénico (tóxico de primer nivel) y flúor, que la convierten en no apta para consumo humano aunque, por falta de otros recursos, es igualmente utilizada, con el riesgo toxicológico que esto implica (Cabrera et al, 2005; Matteoda et. al., 2005, 2007, 2008; Matteoda, 2012).

En los ecosistemas agropecuarios que dominan la región, la explotación de acuíferos confinados y freáticos es cada vez más evidente. El riego se encuentra en aumento y en el caso de los acuíferos confinados (ubicados a profundidades variables), la actividad llevó a descensos de niveles piezométricos que afectaron el funcionamiento de los propios equipos de riego (Cabrera, 2009). Algunos niveles confinados, con aguas termales de excelente calidad, se utilizan para distintos fines, incluida la creación y mantenimiento de lagunas artificiales, práctica poco sustentable que debe ser evaluada dada la lenta reposición de aguas tan profundas (Blarasin y Cabrera, 2005, Cabrera, 2009).

El acuífero libre es el más impactado, particularmente por la llegada de contaminantes móviles y persistentes provenientes de la aplicación de agroquímicos (plaguicidas y especialmente, fertilizantes). Son también fuentes de polución, ya evaluadas en numerosos sitios, la práctica tambera, criaderos tradicionales de porcinos y vacunos y, en notorio crecimiento, la práctica de cría intensiva, sitios que pueden contaminar el agua subterránea con nitritos, nitratos, microorganismos e incluso metales pesados (Blarasin et al., 2005; Giuliano Albo et al, 2012; Matteoda et al, 2008, 2009; Matteoda, 2012, entre otros).

Por otro lado y desde el punto de vista de la movilidad del agua en el medio subterráneo, si bien en los últimos años se avanzó notoriamente en la definición de las propiedades hidrodinámicas de los acuíferos de la región y los cálculos de la recarga a partir de agua de precipitaciones (Blarasin, 2003; Blarasin et al, 2005; Cabrera et al., 2007; Cabrera, 2009; Matteoda et al. 2010; Matteoda, 2012, entre otros) restan aún muchos sectores en los que es necesario evaluar la dinámica del agua en los acuíferos y sus relaciones con factores naturales y antrópicos. En los últimos años, a los tradicionales estudios de caracterización se ha sumado como herramienta la simulación numérica de los modelos conceptuales de los acuíferos, para validar éstos y predecir escenarios futuros, tales como riego, drenaje, contaminación, etc.

En hidrogeología un modelo es cualquier aparato o diseño que represente una aproximación de la situación de campo. En el caso de la dinámica del agua subterránea un modelo matemático simula el flujo de agua indirectamente por medio de una ecuación que gobierna el proceso, pensada para representar los procesos físicos que ocurren en el sistema, junto a ecuaciones que describen las cargas hidráulicas o flujos a lo largo de los bordes o límites del modelo (condiciones de borde). Los modelos matemáticos pueden resolverse analítica o numéricamente, siendo este último procedimiento más útil para representar escenarios complejos (Anderson and Woessner, 2002). El set de comandos usado para resolver un modelo matemático en computadora constituye el código, que es genérico (programa que contiene un algoritmo que resuelve el modelo matemático numéricamente), mientras que el modelo incluye un conjunto de condiciones iniciales, de borde, una grilla y parámetros específicos de una zona, además de entradas y salidas de agua (balance de masas).

En el caso de los modelos de flujo de agua subterránea, se requiere buena información geológica e hidrológica de campo para ingresar los datos y para calibrar el modelo. Este último puede ser realizado, como se indicara, para validar el modelo conceptual hidrogeológico de un área, para mejorarlo o bien para realizar predicciones de futuros escenarios. Los modelos proveen, en general, un esquema de interés para sintetizar la información de campo y para testear ideas de cómo funciona el sistema.

El modelo más utilizado en todo el mundo es Modflow, código original creado por Mc Donald and Harbaugh (1988), con salidas visuales modernas elaboradas en los últimos años, en distintas versiones. Otros códigos de interés utilizados en numerosas ocasiones son Flowpath (Franz and Guguer, 1990), Path3D (Zheng, 1989), entre otros.

En Argentina la modelación comenzó a utilizarse en la última década, pudiendo citarse trabajos de interés correspondientes a Bocanegra et al. (2005), Albouy et al. (2005), Bocanegra (2008), Rodríguez (2007), Blarasin et al. (2009), Cabrera (2009) Matteoda et al. (2011), Matteoda (2012) entre otros, modelando acuíferos, interacción acuífero-oceáno en zonas costeras, interacciones río-acuífero, etc., en régimen permanente y/o transitorio usando el código Modflow.

En función del planteo realizado para las aguas subterráneas de la región, las hipótesis para el trabajo que aquí se presenta son las siguientes:

1.2 - Hipótesis de trabajo

✓ La dinámica del agua subterránea, y consecuentemente su calidad, además de la influencia litológica y climática, está fundamentalmente condicionada por las estructuras geológicas y el relieve.

✓ La calidad del agua subterránea puede modificarse localmente por actividad humana.

1.3 - Objetivos Generales

El presente plan tiene por objetivo elaborar el modelo conceptual del acuífero freático de la zona Las Peñas Sur y validar la dinámica del flujo de agua subterránea mediante la modelación numérica en régimen permanente, relacionando con aspectos de calidad de aguas.

1.4 - Objetivos Específicos

✓ Realizar un estudio geológico-geomorfológico del área de estudio identificando los principales rasgos del relieve y/o litologías que puedan influir en la dinámica y calidad del agua subterránea.

✓ Evaluar las actividades de uso del territorio e interpretar relaciones con factores del medio natural.

✓ Determinar características hidrometeorológicas del área y efectuar un balance hidrológico, que permita establecer relaciones con la dinámica y calidad del agua subterránea.

✓ Caracterizar la dinámica del agua subterránea, evaluando características locales del flujo del agua subterránea, definiendo el modelo conceptual.

✓ Elaboración del modelo numérico del flujo de agua subterránea del área de estudio.

- ✓ Caracterizar la composición físico-química del agua subterránea, tratando de dilucidar los condicionantes que inciden sobre el comportamiento hidroquímico.

1.5 - Ubicación del área de estudio

La zona de estudio se ubica en la provincia de Córdoba, en el Departamento Río Cuarto, Pedanía Las Peñas, a 100 Km al Norte de la ciudad de Río Cuarto (Fig.1.1). Se accede al mismo por la ruta nacional N°36, hasta la localidad de Elena, donde se sigue un camino de tierra hacia el Este, hasta la Sierra de Las Peñas.

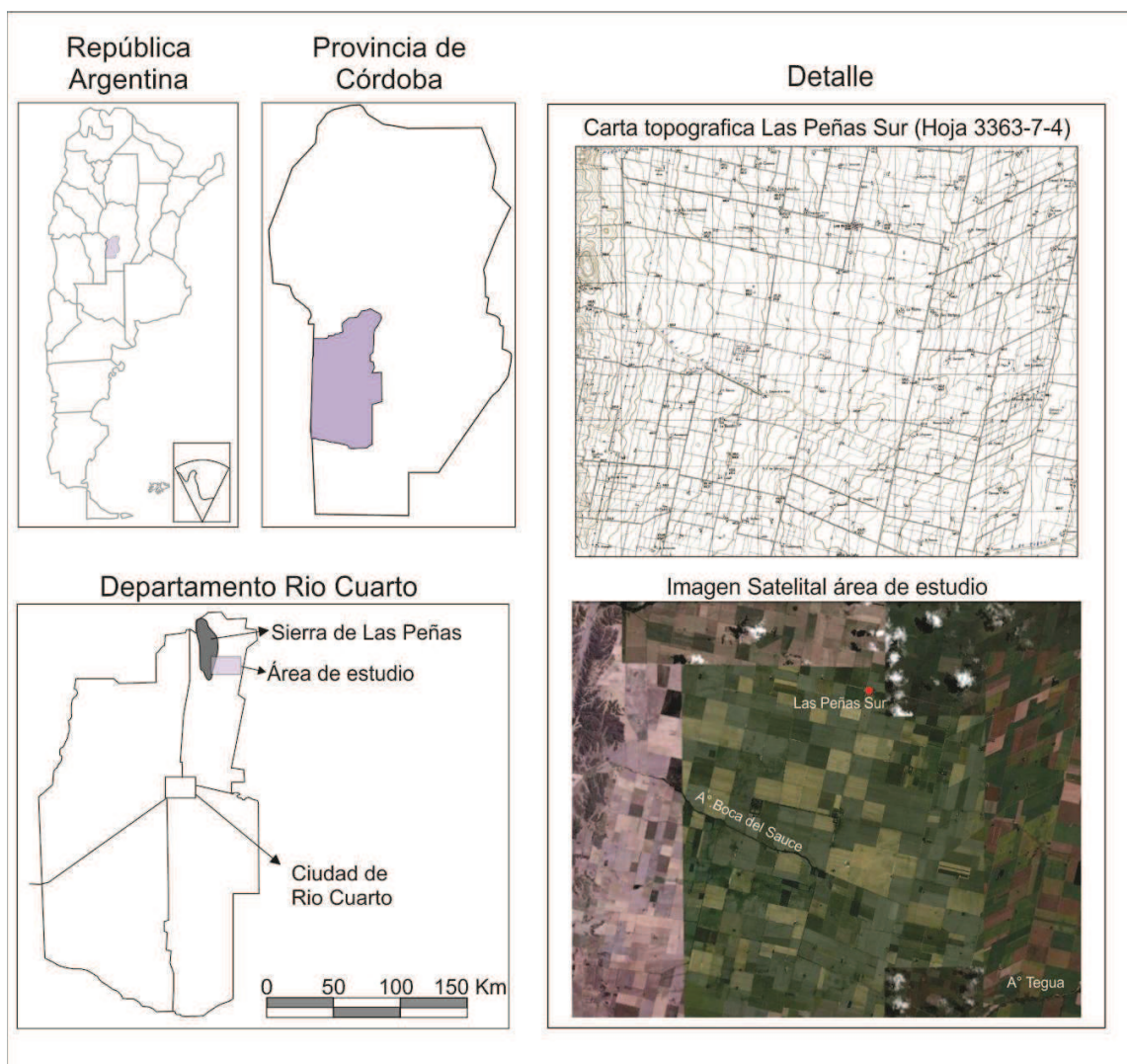


Figura 1.1 Ubicación del área de estudio

Abarca una superficie aproximada de 414 Km² y comprende la carta topográfica 3363-7-4 Las Peñas Sur con escala 1.50.000, del IGN (Instituto Geográfico Nacional) entre las coordenadas de Latitud Sur 32° 40' y 32°30' y Longitud Oeste 64° y 64°15'. Esta área es parte del sector pedemontano oriental de las Sierras de Las Peñas, limitando al Sur con Paso del Molle, al Este con Punta del Agua, y al Norte con Las Gamas

1.6 - Materiales y Métodos

1.6.1 - Etapa de gabinete inicial

Se recopilaron antecedentes (bibliográficos, cartográficos, hidrometeorológicos, etc.) del área y tema a investigar, se elaboró cartografía geológica-geomorfológica preliminar, sobre las base de cartas topográficas 1:50.000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN), y sub imágenes Landsat actualizadas, disponibles en el Dpto. de Geología e imágenes tomadas de Google Earth y se definió una red preliminar de inventario de pozos con densidad adecuada a la zona seleccionada, de 1 pozo cada 8-10 Km².

1.6.2 - Etapa de campo

Se realizó un control a campo de las principales características geológicas-geomorfológicas de la zona de trabajo, para la elaboración de la cartografía definitiva. Se relevaron las principales características del relieve definidas en gabinete, se levantaron y actualizaron perfiles aflorantes (descritos en barrancas de arroyos, cárcavas y en caminos vecinales profundizados) y se efectuaron registros de los procesos geomorfológicos activos.

Durante el relevamiento se adquirió información meteorológica procedente de particulares en los campos de la zona y en la localidad de las Peñas Sur.

Se relevaron las actividades de uso de la tierra, como prácticas de riego, uso de agroquímicos, ubicación de tambos y feed-lots, etc., para realizar interpretaciones en relación a la dinámica y calidad de agua.

Se relevaron los arroyos Tegua y Boca del Sauce en diferentes tramos en el sector correspondiente a la hoja topográfica estudiada. Se realizaron aforos del arroyo Tegua en

secciones hidrométricas de interés (con molinete y/o flotadores) para el posterior cálculo del caudal mediante el método de la sección media.

Se efectuó un relevamiento de pozos preexistentes (pozos, perforaciones), determinando in situ niveles estáticos del acuífero libre con sonda piezométrica de señal lumínica y sonora (Solinst). Cuando hubo posibilidades, se recabó información vinculada a litologías atravesadas, diseño de pozo (profundidad de captación, filtros, etc.) y carácter hidráulico del acuífero involucrado. Se realizaron mediciones de Temperatura, pH y conductividad eléctrica (CE) mediante la utilización de termómetro, peachímetro digital de campaña y conductímetro Hanna (escala hasta 200 mS/cm, con compensación automática de temperatura).

En todos los casos posibles se extrajeron muestras de agua para su posterior análisis físico-químico en laboratorio, asegurándose que la muestra fuera tomada cuando la calidad del agua se ha estabilizado dentro de la tubería de revestimiento después de que el pozo ha sido purgado correctamente.

1.6.3 - Etapa de Laboratorio

En esta etapa se llevaron a cabo los análisis físico-químicos del agua subterránea y superficial en el Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Geología.

En primer lugar, se verificaron las mediciones de campo de la conductividad eléctrica y las sales disueltas totales (SDT) con conductímetro Sprite y de pH mediante electrodo Orion 9104 y potenciómetro 710 A.

En el análisis físico-químico se determinaron los aniones ($\text{CO}_3^{=}$, CO_3H^- , $\text{SO}_4^{=}$, Cl^-) y cationes (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ y K^+) mayoritarios, así como elementos trazas, flúor (F), arsénico (As) y nitrato (NO_3^-).

La determinación de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, calcio y magnesio fue efectuada mediante titulación. Los cationes sodio y potasio se determinaron mediante el uso de un fotómetro de llama (Fotómetro Metrolab 315); los fluoruros y nitratos mediante electrodo de ion selectivo Orion y finalmente el arsénico mediante un test semicuantitativo colorimétrico Merck.

1.6.4 - Etapa de gabinete final

En esta etapa se trataron todos los datos obtenidos en las etapas de gabinete, campo y laboratorio.

Se elaboró la cartografía geológica de base definitiva a escala 1:50.000.

Se interpretó la información hidrometeorológica mediante análisis estadístico y se realizó el balance hídrico seriado correspondiente a la serie analizada (Pdimes, Ravelo, 1990).

Se caracterizaron e interpretaron los aspectos hidrolitológicos y su influencia en los procesos hidrodinámicos e hidroquímicos (espesor de zona no saturada, granulometría de los materiales, profundidad de basamento, etc.), así como las relaciones de los materiales con la probable magnitud de los parámetros hidráulicos (Brassington, 2007).

Se elaboró la cartografía hidrogeológica a la fecha del inventario realizado, constituida por los mapas de equipotencial del acuífero libre, de isoprofundidad de niveles estáticos, hidroquímicos (de isosalinidad o isoconductividad eléctrica, de isolíneas de relaciones iónicas, Diagramas de Stiff modificados), etc.

Todos los mapas fueron digitalizados por medio del programa Corel Draw. V.15.

Para la modelación numérica del flujo se empleó el Código Visual Modflow (Mc Donald and Harbaugh, 1988) en su versión Versión 2.8.1, basado en el método de las diferencias finitas. El mismo necesita como insumos, todo aquellos datos medidos, calculados o estimados con toda la información recolectada, que definen el modelo conceptual de geometría del acuífero y su distribución de cargas hidráulicas, su recarga efectiva anual promedio y valores de conductividad hidráulica.

Por último, en función de la información obtenida, se realizó la evaluación final de los resultados hallados no sólo en la modelación numérica del flujo, sino también en las relaciones de éste con la calidad del agua y de todos estos aspectos con las actividades humanas. De este modo se generó el informe final de Tesis de Licenciatura en Geología.

Capítulo 2

Geología y
Geomorfología
Regional

2.1 - Introducción

El área de estudio se encuentra al pie de la Sierras de Las Peñas, correspondiente a las terminaciones australes de la Sierra Chica y se caracteriza por comprender dos Provincias Geológicas de Argentina, como son la *Llanura Chacopampeana* y las Sierras Pampeanas Orientales, en particular el sector correspondiente a las *Sierras Pampeanas de Córdoba* (Fig. 2.1)

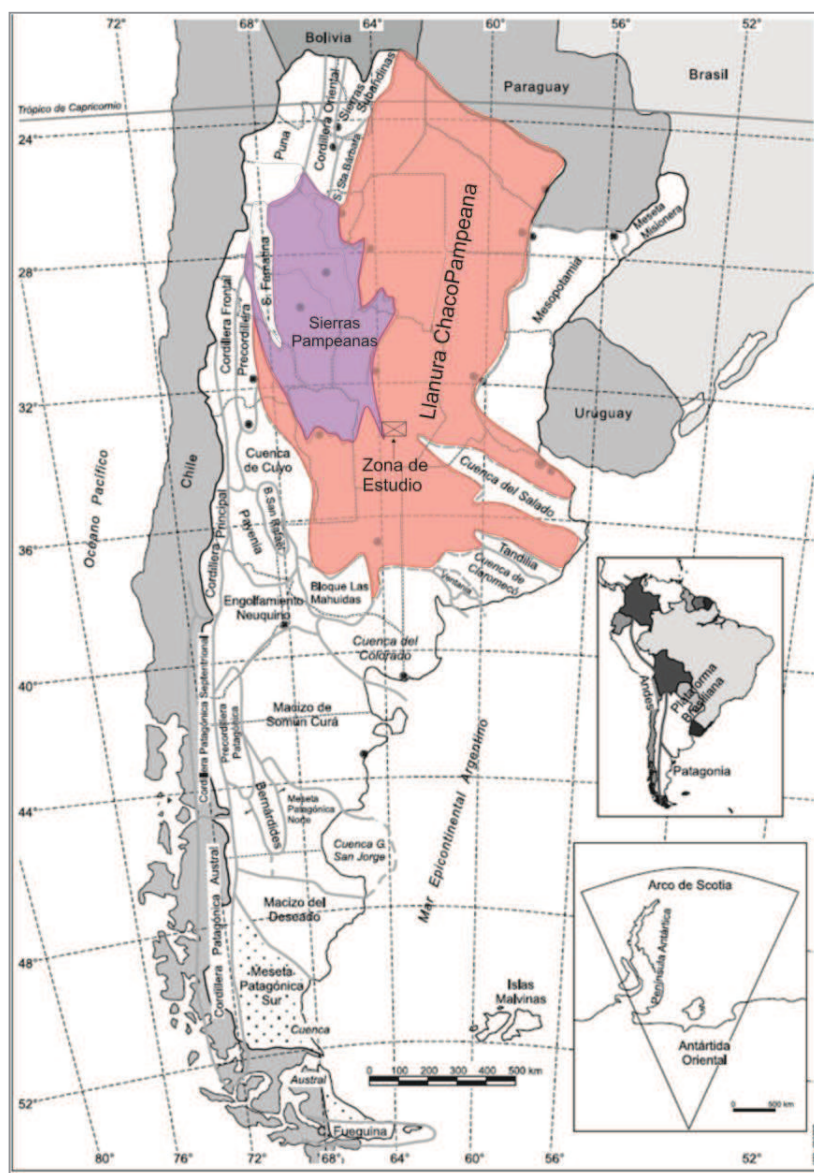


Figura 2.1: Provincias Geológicas de la Republica Argentina (Ramos ,1999)

2.2 - Geología Regional

2.2.1 - Sierras Pampeanas de Córdoba

Se distinguen tres grandes unidades orográficas tal como puede observarse en el mapa geológico de la Fig. 2.2: Sierra Norte- Sierra Chica-Sierra de las Peñas (cordón oriental), Sierra Grande (o Achala)-Sierras de Comechingones (cordón central) y Sierra de Pocho-Guasapampa - Serrezuela (Cordón occidental), formadas por bloques de basamento de edad Proterozoico superior-Cámbrico a Paleozoico superior (Rapela et al., 1998), elevados por fallas inversas, de rumbo aproximado norte-sur, con vergencia al Oeste. Las rocas de basamento están representadas por un complejo metamórfico migmatítico, cuyos protolitos son grauvacas y semipelitas, metamorizados en facies de anfibolita con transiciones a granulitas (Gordillo y Lencinas, 1979), con intrusiones de cuerpos graníticos, algunos de dimensiones batolíticas. Se reconocen entre los cuerpos intrusivos rocas máficas a ultramáficas, cuarzo-dioríticas y granitoides (Villar, 1975; Rabbia et al., 1993; Escayola et al., 1996 y Chincarini et al., 1998). Las depresiones tectónicas intermontanas están rellenas por sedimentos.

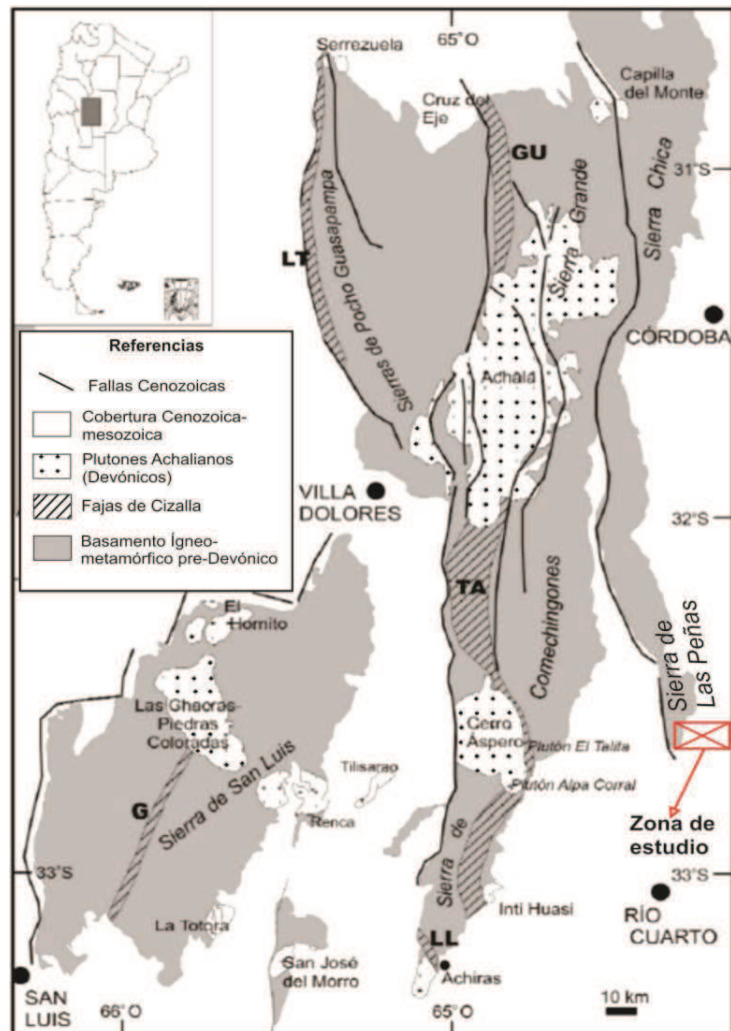


Figura 2.2: Mapa geológico de las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. Geuna et al. (2008)

2.2.2 - Llanura Chacopampeana

La Llanura Chaco – Pampeana forma parte de una unidad mucho más extensa que atraviesa todo el continente sudamericano, desde los llanos de Colombia y Venezuela al Norte, hasta las pampas de la República Argentina al Sur (Degiovanni, 2005), constituyendo un gran antepaís que recibió, desde el Mioceno, sedimentos provenientes del levantamiento andino y que hoy constituye el lugar de tránsito de esos sedimentos hacia la plataforma y talud continental atlánticos (Chebli et al., 1999). Coincide con una parte poco móvil de la corteza, de tendencia negativa, donde se han acumulado espesas series sedimentarias continentales y marinas desde el Cambro-Ordovícico hasta la actualidad. El espesor de la sucesión sedimentaria no es uniforme, sino que se reconocen diferentes cuencas separadas entre sí por altos y dorsales, aunque probablemente para los términos más antiguos el área se haya comportado como una única zona negativa (Russo et al., 1979).

2.2.3 - Características Geológico-Estratigráficas-Historia Geológica

Proterozoico y Paleozoico medio

Basamento cristalino

Las unidades reconocidas en las Sierras de Córdoba corresponden a una serie de rocas metamórficas derivadas de diferentes protolitos sedimentarios e ígneos. Las secuencias sedimentarias fueron intruídas por volcanismo máfico predominantemente tholeiítico antes de ser metamorfizadas (Rapela et al., 1998). Todo el paquete litológico experimentó condiciones de metamorfismo en facies de anfibolitas almandínica, y en algunos sectores se alcanzaron condiciones de facies de granulitas (Gordillo y Lencinas, 1979). Diversos autores, señalan que el evento metamórfico principal estaría ubicado entre los 540 y 700 Ma (Linares y Latorre, 1973; Cingolani y Varela, 1975; Linares y Cordani, 1976) considerando que el pico térmico con migmatización se produce a los 640 Ma.

Las rocas metamórficas más abundantes corresponden a gneises tonalíticos con plagioclasa, cuarzo y biotita, mientras que las variedades más aluminosas presentan además granate y/o silimanita y ocasionalmente muscovita (Bonalumi et al., 1999;

Gordillo, 1984; Martino, 1993); las rocas de alto grado metamórfico se encuentran presentes en todo el ámbito de sierras de Córdoba y se han reconocido gneises y migmatitas en facies de granulitas con la paragénesis feldespato potásico – cordierita – sillimanita – granate – biotita (Otamendi et al., 1999).

El complejo metamórfico fue intruído por rocas ígneas plutónicas intermedias y máficas, cuya edad más probable es de 575 Ma (Cingolani y Varela, 1975) y durante la orogenia Famatiniana (450 - 490 Ma) se intruyen cuerpos ígneos trondhjemíticos pequeños (Rapela et al., 1998).

Luego, durante el Devónico (aprox. 400 Ma) y cuando la secuencia cristalina ígnea-metamórfica había sido exhumada hasta niveles de corteza superior, se produce un magmatismo félsico aluminico-potásico que alcanza dimensiones batolíticas, correspondientes a *Batolito de Achala* (Rapela et. Al, 1982; Lira, 1985; Patiño y Patiño Douce, 1987), *Batolito Cerro Áspero* (Coniglio y Esparza, 1988; Pinotti et al, 2002) y *Granito Inti Huasi* (Otamendi et al., 2002).

Demichelis (1986) describe la geología de la *Sierra de Las Peñas*, correspondiente a las terminaciones australes de la Sierra Chica de Córdoba. Litológicamente, los afloramientos están integrados por rocas de basamento cristalino de edad precámbrica – paleozoica inferior, constituidos por complejos ígneo-metamórficos de granitoides, gneises, esquistos y migmatitas de composición variable y, en menor medida, por intercalaciones calcáreas dolomíticas, anfibolitas, cuarcitas y granulitas.

El “Complejo Las Peñas” está compuesto por rocas deformadas en diferentes grados e intruído por cuerpos ígneos con deformación escasa o nula, con composiciones que varían desde gabros hasta granitos (Demichelis, 1986). La estructura del complejo Las Peñas corresponde a un gran pliegue de escala kilométrica limitado por cizallas de orientaciones aproximadas N-S, con un plano axial subvertical y eje buzante al Sur (Demichelis, 1986). Durante el Paleozoico inferior a medio se produce el emplazamiento de intrusiones básicas, mesosilíceas y ácidas (Gordillo y Lencinas, 1979).

Según Otamendi et al., (1996) la evolución petrológica de estas serranías, y de gran parte de sierras Pampeanas, se produce durante el ciclo tectónico Pampeano, asignado por Dalla Salda (1984, 1987) al Proterozoico superior-Paleozoico inferior y reactivado durante el ciclo tectónico Famatiniano, asignado al Cambro- Ordovícico. Se produce luego una fase distensiva relacionada a un proceso poscolisional (Ramos, 1991; Astini,1996) que habría generado el magmatismo eocarbónico.

Paleozoico superior

Carbónico-pérmico

La secuencia se encuentra representada por depósitos de sedimentitas silicoclásticas continentales que en la provincia de Córdoba se denominan “*Paganzo*” y constituyen una estrecha faja en el borde Noroccidental y extremo Sur de las Sierras Pampeanas. Al respecto se han identificado dos unidades litoestratigráficas: la *Fm. Chancaní* (Hünicken y Pensa, 1980) y la *Fm. Los Ranqueles* (Azcué et al., 1987).

Formación Los Ranqueles: aflora en cerros residuales asociados a las últimas estribaciones de las sierras de Comechingones, tiene un espesor aproximado de 360 m, está cubierta discordantemente por depósitos loésicos cuaternarios y, aunque la base no aflora, se ha supuesto que yace en discordancia sobre el basamento.

Unidad sin denominación formal: En la perforación Ordoñez, cuenca de General Levalle y Laboulaye (Cba.), se alumbraron depósitos marinos discontinuos y de poco espesor. Chebli et al., (1999) citan, para esta perforación, las *Fm. Victoriano Rodríguez y Ordoñez* correspondientes a secuencias continentales presentes en al menos el sector oriental de Córdoba, aunque para la columna estratigráfica se las considera sedimentitas sin denominación formal.

Formación Ordoñez: integrada esencialmente por areniscas feldespáticas, micáceas y algo conglomerádicas y por pelitas grises, verdosas y negruzcas, en parte carbonosas, que contienen restos de vegetación carbonizados (Chebli et al., 1999).

Formación Victoriano Rodríguez: se compone de areniscas, limolitas y arcilitas de colores rojizos, grisáceos y morados; los tonos rojizos predominan en la parte superior. (Chebli et al., 1999).

Mesozoico

En el Mesozoico, la tectónica distensiva vinculada a la apertura del Atlántico, generó procesos de rifting, generando inversiones en las estructuras mayores y la

conformación de cuencas continentales de rumbo meridional, donde se depositaron secuencias clásticas que intercalan con vulcanitas traquibasálticas.

Cretácico

A lo largo del borde oriental de la Sierra Chica (Sierra del Pajarillo-Copacabana-Masa y Sierra de Los Cóndores) se encuentran aflorando sedimentos continentales del tipo estratos rojos compuestos por una sucesión de conglomerados, areniscas y en menor grado, pelitas intercaladas por vulcanitas, correspondientes a secuencias de abanicos aluviales, sistemas fluviales y de lago salino que se intercalan con coladas basálticas, constituyendo el relleno de una cuenca tipo rift (Poiré et al., 1989; Chebli et al., 1999). Al Oeste del área, y en las últimas estribaciones de la Sierra de Comechingones se identifican cerros aislados (Chaján, Madera, Garrapata) formados por basaltos y traquiandesitas de edad Cretácica.

Para el Sur de Córdoba y de acuerdo al informe realizado por la empresa Hunt Oil Co. y el trabajo de Chebli et al. (2006), la sección litoestratigráfica correspondiente estaría constituida por:

Formación General Levalle: La unidad fue definida (Webster et al., 2002, 2004) como una secuencia del Cretácico inferior, clástico-evaporítica de relleno de rift, perforada en el pozo General Levalle, con un espesor que excede los 3.134 metros. Chebli et al. (2006) describen nueve miembros componentes de esta formación: Mb Areniscas Superiores del rift, Mb Limolitas Yesíferas Superiores, Mb Areniscas Arcóscicas, Mb Limolitas Yesíferas Inferiores del rift, Mb Evaporítico, Mb Limolitas Inferiores del rift, Mb Areniscas Inferiores del rift, Mb Conglomerádico Inferior y Mb Limolitas Arenosas Inferiores.

Toda la formación representa un ciclo continuo de depositación, con una secuencia clástica gruesa en su tramo inferior, granodecreciente hacia el miembro evaporítico. Hacia arriba, también gradualmente, continúa la tendencia rematando en las areniscas gruesas superiores del rift.

Cretácico-Paleoceno

Formación Serra Geral (White, 1908): las coladas basálticas asignadas a esta formación han sido definidas aproximadamente a una profundidad de 1.100 a 1.200 m, y fueron muestreadas por primera vez en la perforación de Ordóñez (Cba). Recientemente, en la perforación de General Levalle, se atravesaron más de 800 m de basaltos intercalados con niveles clásticos, que son interpretados como típicos basaltos alcali-olivínicos de áreas de rift. El espesor de los mantos lávicos y niveles de areniscas y pelitas intercalados es variable, desde un par de metros hasta 30 o 50 m. Los basaltos, de color negro o gris oscuro y textura porfírica arrojaron edades radimétricas de 110 Ma., más jóvenes que los usuales de Serra Geral, que oscilan entre los 135-145 Ma.

Formación Tacuarembó (Falconier, 1931): son areniscas anaranjadas que según Padula y Mingramm (1963) pueden asociarse estrechamente a efusiones basálticas. En la perforación realizada en General Levalle se reconocieron aproximadamente 810 m de areniscas, arcósicas en el techo, con intercalaciones de limolitas arcillosas y arcilitas limolíticas rojas en la sección media.

Formación Mariano Boedo (Padula y Mingramm, 1968): corresponde a la culminación del ciclo Cretácico – Paleoceno. Está constituida por conglomerados, areniscas intercaladas con pelitas y rocas carbonáticas (Chebli et al., 1999).

Cenozoico

Con la Orogenia Andina (*Oligoceno-Mioceno / Plioceno-Pleistoceno*) (Criado Roqué et al., 1981) se reinstala un ambiente compresivo, y las sierras alcanzan su conformación actual, de bloques limitados por fracturas longitudinales (Bodenbender, 1905; Rasmus, 1916; Bedder, 1922), donde las estructuras principales son inversas, de alto ángulo, con inclinación (50°-70°) hacia el bloque elevado (Gordillo y Lencinas, 1979), dando la actual fisonomía de bloques fallados y basculados hacia el Este, que representan un perfil transversal con una suave pendiente al naciente y abrupta escarpa al poniente.

Para la provincia de Córdoba, las sedimentitas terciarias corresponden a depósitos clásticos continentales y marinos que se disponen discordantemente sobre el basamento cristalino o sobre los estratos rojos del Cretácico. Los afloramientos son escasos y por lo general están cubiertos por sedimentos cuaternarios.

Eoceno-Mioceno inferior

Formación Chaco (Russo et al., 1979): en el pozo de Ordóñez está constituida casi totalmente por arcilitas rosadas y castañas, con intercalaciones de yeso y anhidrita, mientras que en la cuenca de Levalle (90 m de espesor) consiste fundamentalmente de niveles areniscosos, limolíticos y arcilíticos de colores castaños medios. No se encontraron fósiles y por correlación con otras perforaciones, fue asignada al Eoceno-Mioceno inferior.

Mioceno medio-Plioceno superior

Formación Paraná (Irigoyen, 1968): según Fernández Garrasino y Vrba (2000), esta formación constituye el principal depósito marino del Neógeno para la región chacoparanaense y se extiende desde Chaco y Formosa hasta la cuenca del Salado. Fue reconocida en el Este de la provincia en varias perforaciones profundas para captación de agua (sintetizadas en Renz, 1993) o de exploración petrolífera (Ordóñez, General Levalle). Esta formación está constituida casi totalmente por arcilitas de colores verdosos, azulados o gris amarillentos con abundantes restos de polen y microfósiles calcáreos que le otorgan una edad Terciaria (Mioceno).

Formación Tigre Muerto (Blarasin et al., 2000): identificada en el subsuelo por correlación de perforaciones, corresponde a potentes bancos de limos, limos cementados y arcillas oscuras correspondientes a facies leníticas y palustres, y arcillas ocreas con intercalaciones de arenas y gravas pertenecientes a ambientes fluviales.

Cuaternario

El régimen compresivo en los períodos *Plioceno-Pleistoceno*, continúa hasta el presente, quedando evidenciado el neotectonismo por la ocurrencia en la región de

numerosos terremotos superficiales leves a moderados; modificaciones en las redes de drenaje (fallamiento de secuencias de abanicos aluviales pleistocenos, sentido de escurrimiento, ritmos de erosión lateral y vertical, cabalgamientos de bloques de basamento sobre materiales cuaternarios, (Cantú y Degiovanni, 1984; Mingorance, 1988; Degiovanni y Cantú, 1997; Sagripanti et al., 1998, 2001; Degiovanni et al., 2005; Sagripanti, 2006; Bettioli, 2012; entre otros).

Las formaciones más importantes reconocidas para estas épocas son:

Plio-Pleistoceno a Pleistoceno inferior

Formación Puelches (Doering, 1882; Santa Cruz, 1972): está constituida por areniscas friables, varicolores, de grano fino hasta grueso, ocasionalmente conglomerádicas y pobremente seleccionadas. Interestratificado en la secuencia aparecen algunos niveles de limolitas y arcilitas. Han sido especialmente reconocidas en el Norte de la provincia de Córdoba.

Formación Alpa Corral (Cantú, 1992): aflora en la base de la secuencia que constituye el abanico del río Alpa Corral-Seco, principal afluente del río Cuarto y fue reconocida en algunas perforaciones al Noreste de la ciudad de Río Cuarto. Son arenas finas con gravas dispersas, y arenas medias y gruesas con niveles de gravas intercaladas. Su génesis se describe como correspondiente a ambiente fluvial de moderada energía correspondiente a abanico medio-distal (Eric, 1986). Sobre la base de consideraciones geológicas Cantú (1992) la ubicó en el límite Plio-Pleistoceno.

Pleistoceno medio a superior

Formación Pampiano (Fidalgo et al., 1973; Cantú, 1992): Está constituida por sedimentos finos con distinto grado de cementación que corresponden a facies fluviales (sedimento limo y limo-arenosos muy finos) y eólicas (loess, con niveles de calcretos).

Formación Chocancharava (Cantú, 1992): Representa un ciclo fluvial con facies de canal, llanura de inundación y palustres. Está constituida por sedimentos clásticos

detríticos, de facies típicas de canal fluvial entrelazado, y facies de energía decreciente correspondientes a llanura de inundación.

Holoceno inferior

Formación La Invernada (Cantú, 1992): Está representada por un espeso manto de material limoso masivo (loess), de espesor variable, desde pocos centímetros hasta más de 20 metros.

Formación Río Cuarto (Blarasin et al., 2000): Corresponden a sedimentos fluviales de baja energía, para-conglomerados de matriz limo-arenosa y depósitos de ambientes con circulación de agua restringida.

Holoceno inferior-medio

Formación Arroyo Las Lajas (Cantú, 1992): Está representada por sedimentos clásticos cuya granulometría varía de gravas a arenas y limos. La génesis, es variable, desde fluvial-columial, en éste último caso vinculada a procesos de erosión hídrica, hasta depósitos de génesis fluvio lagunar.

Holoceno superior

Formación Laguna Oscura (Cantú, 1992): Son sedimentos eólicos arenosos muy finos y limosos en mantos cuyo espesor varía desde centímetros hasta 20 metros.

El resumen de las Formaciones se observan en la Fig.2.3 de Degiovanni et al., 2005.

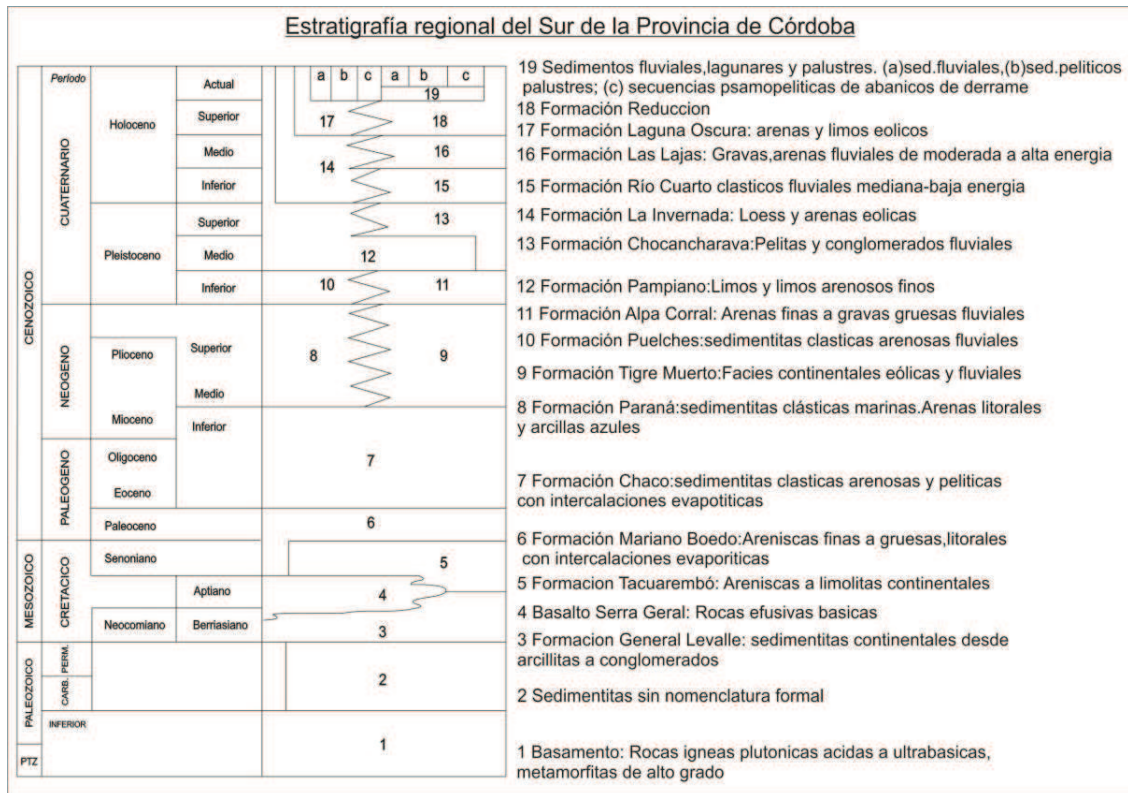


Figura 2.3: Cuadro estratigráfico Regional para el sur de la Provincia de Córdoba. Tomado de Degiovanni et al., 2005.

2.2.3.1 - Principales sistemas de estructuras de la región

Son numerosos los aportes al conocimiento de la estructura del Sur provincial realizados fundamentalmente en el Departamento de Geología de la UNRC, entre ellos: Cantú y Degiovanni (1983, 1984 y 1987), Degiovanni y Cantú (1993 y 1997), Fezzia (1996), Villegas (1999), Chiapero (1994), Cabrera (1995), Donadío (1995), Doffo y Degiovanni (1993), Lema (1999), Mingorance (1987), Rodríguez (1997), Sagripanti *et al.* (1998), Pagliero (1999), Cantú (1998).

Las principales estructuras de la región (Figura 2.4) pueden ser agrupadas en familias según su rumbo:

Sistema meridiano a submeridiano (N-S): constituye el sistema más importante, ya que durante la orogenia ándica ha definido los grandes bloques diferencialmente ascendidos y basculados característicos de las Sierras y Llanura Pampeana. Entre ellas

merecen citarse las fallas de Comechingones, Guacha Corral, Río de Los Sauces, Sierra Chica, Santa Catalina, San Basilio, del Tigre Muerto, Levalle, Reducción, Alejandro-Pampayasta y El Rastreador-Los Cisnes, entre otras.

✓ *Falla de Comechingones*: esta estructura inversa es la responsable del frente de levantamiento de las sierras homónimas, se trata de una importante faja de cizalla que puede continuarse hacia el Norte, acompañando todo el borde occidental de las Sas Grandes de Córdoba. Presenta deformaciones neotectónicas variables a lo largo de su recorrido, pero menores hacia el Sur (Costa, 1996 y Costa et al., 1999).

✓ *Falla de Santa Rosa-Las Peñas*: es la megatrazza inversa responsable del levantamiento principal de las Sas Chicas. En la región se la reconoce al pie de las escarpas de las sierras de Los Cóndores y Las Peñas. Más hacia el Norte, a la latitud de la localidad de Santa Rosa, evidencias estratigráficas ponen en evidencia su importante actividad cuaternaria (Martino et al., 1995).

✓ *Megatrazza Alejandro-Pampayasta* (San Francisco del Chañar-Hernando, Pasotti, 1974; Rayo Cortado-Pampayasta-Alejandro, Massabie, 1987), de carácter inverso, tiene centenares de kilómetros de longitud y según Pasotti (1974) separa la Pampa Elevada, al Oeste, de la Pampa Hundida, al Este. Existen evidencias de reactivaciones neógenas.

✓ *Falla del Tigre Muerto* (Degiovanni y Cantú, 1993) se infiere que su carácter es inverso con plano buzante al Este y labio hundido al Oeste. Podría continuarse hacia el Norte definiendo el límite oriental de la Sa. Las Peñas. Constituye el límite occidental del bloque Levalle, ejerce un importante control sobre el arroyo Santa Catalina y, en el labio hundido, se sitúan los Bañados del Tigre Muerto.

✓ *Falla Levalle* (Degiovanni y Cantú, 1982): se infiere que su carácter es inverso con plano buzante al Oeste, limita por el Este al bloque Levalle

Sistema E-W: Las fracturas de este rumbo, muchas de ellas de carácter normal, seccionan y escalonan a los megabloques meridianos y controlan la traza de varios cursos. Conforman el grupo, entre otras, las fallas de Elena, arroyo Boca del Sauce, El Cano, del Tegua, Santa Catalina, Río Cuarto, y un conjunto de fracturas que limitan bloques menores.

✓ *Falla Río Cuarto* (Villegas, 1999) o del arroyo Cipión (Cantú, 1998), controla al río homónimo hasta proximidades de la localidad de Reducción. Muy probablemente haya constituido el límite Norte de la cuenca cretácica de Levalle.

✓ *Falla del arroyo Santa Catalina*, condiciona el curso del arroyo Las Lajas a su salida de las sierras, el tramo medio del arroyo homónimo y el final del río Cuarto.

Sistema NW-SE: este sistema está muy bien representado en el extremo sur de las Sas de Comechingones y en las planicies occidentales. Estructuras con esta dirección provocan el descenso escalonado de los bloques serranos y controlan la mayoría de los cursos que tienen sus nacientes en este sector (Achiras, La Cruz, Cortaderas, Chaján, entre otros). Se destacan las fallas: Las Lajas-Sampacho, Alpa Corral, *Chaito-Chazón* (Degiovanni y Cantú, 1982).

✓ La *falla Las Lajas - Sampacho*, de carácter inverso, es una estructura de importancia regional, en las Sierras de Comechingones pone en contacto dos terrenos metamórficos diferentes y, al ingresar a la llanura controla gran parte del curso del arroyo del Gato. Ha tenido actividad neógena y es considerada sismogeneradora (Sagripanti et al., 1998).

Sistema NNE-SSW: Las más importantes de esta familia son las fallas del Saladillo y de Las Lagunas.

✓ *Falla del Saladillo* (Villegas, 1999), define, hacia el NW, una depresión donde se disponen los Bañados del Saladillo, el complejo lagunar La Chanchera-La Brava, entre otros y, hacia el E- SE al bloque elevado Viamonte-Laboulaye, que evidencia reactivaciones neógenas de la estructura, ya que anteriormente el escurrimiento de las redes pleistocenas continuaba hacia el Sudeste (Cantú y Degiovanni, 1984).

✓ *Falla Las Lagunas*, inversa y con probada actividad en el Cuaternario ya que tiene entre otras evidencias sismicidad asociada (Sagripanti et al., 1998).

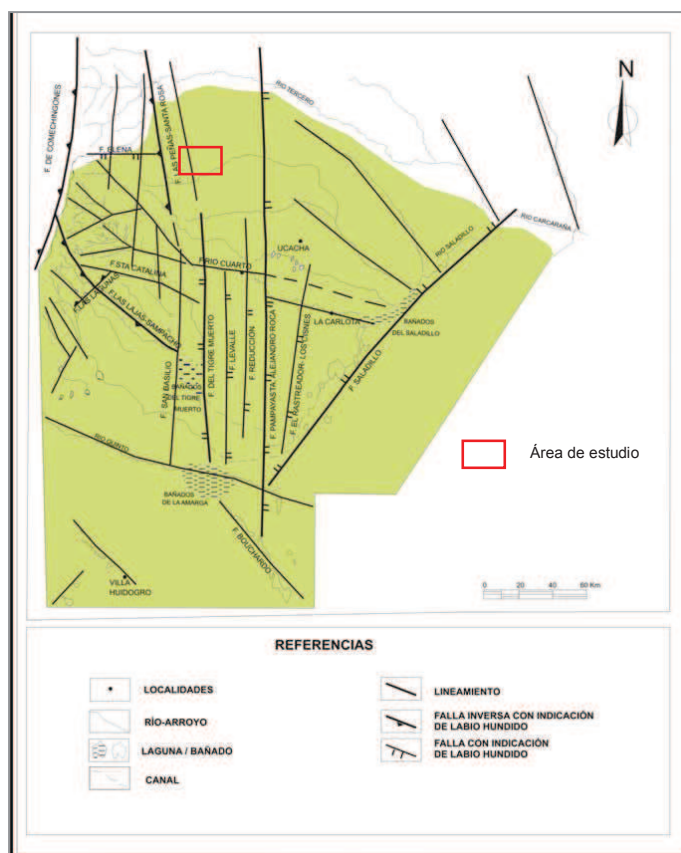


Figura 2.4: Mapa estructural del Sur de la provincia de Córdoba. Tomado de Degiovanni, 2008.

2.3 - Geomorfología Regional

A escala regional la geomorfología del Sur de la provincia de Córdoba está estrechamente vinculada a la estructura de bloques que caracterizan a las Sierras Pampeanas y Llanura Chaco-Pampeana, a las variaciones climáticas del Cuaternario y a eventos neotectónicos (Degiovanni, 2005).

Las Sierras Pampeanas forman una macrounidad morfoestructural que se reconoce en varias provincias del centro-oeste de la Argentina, están integradas por una sucesión de megabloques de basamento ígneo-metamórfico del Precámbrico-Paleozoico inferior, que presentan una marcada asimetría debido a la presencia de una importante escarpa de falla en el borde occidental, de rumbo meridiano a submeridiano. A su vez estos megabloques exhiben una morfología que refleja una larga y compleja historia denudativa (desde el Carbónico superior, según Carignano et al., 1999) modificada por la

orogenia ándica. En el Sur de la provincia de Córdoba este ambiente está representado por las Sierras de Comechingones, Los Cóndores y de Las Peñas que constituyen las estribaciones más australes de las Sierras Pampeanas de Córdoba.

La Llanura Chaco-Pampeana es una planicie predominantemente agradacional de pendiente general hacia el E-SE. Presenta un relieve suave a moderadamente ondulado, integrado por formas eólicas y subordinadamente fluviales y palustres.

Dentro de este sistema, Degiovanni et al. (2005(, definen los siguientes ambientes: *Sistema de Sierras Pampeanas (D)* y *Llanura Pampeana (A)* las cuales a su vez se encuentran subdivididas en unidades con características geomorfológicas propias (Fig. 2.5).

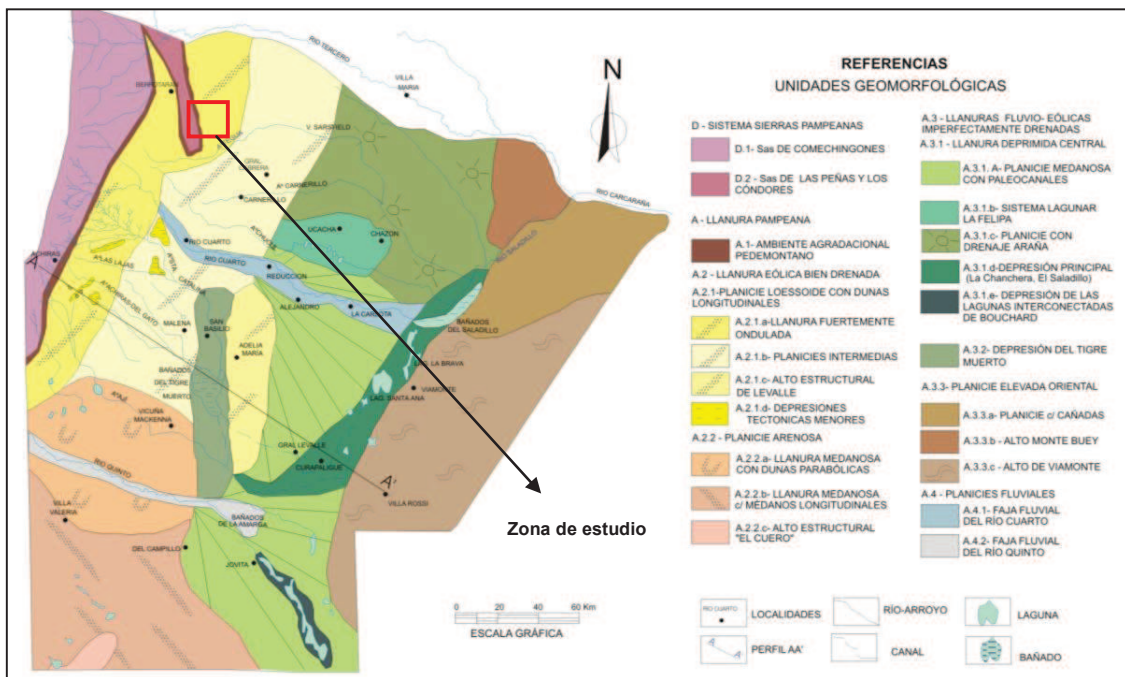


Figura 2.5: Mapa Geomorfológico del Sur de Córdoba. Degiovanni et.al. (2005)

D - Sistema de Sierras Pampeanas

✓ **D1-Sierras de Comechingones (Sierras Grandes):** Tienen un rumbo NNE-SSO y un ancho variable que se reduce hacia el Sur (desde 35 a 6 Km aproximadamente) al igual que su altitud, que desciende desde 2000 a 900 metros, conforme el rechazo de la falla de Comechingones disminuye y la escarpa queda

sepultada por depósitos cuaternarios. En sentido E-O, presentan la clásica asimetría de Pampeanas con máximas alturas en su borde occidental, que se hace menos notoria hacia el Sur donde la cubierta sedimentaria es más importante. En ambos sentidos, el descenso es escalonado, según megabloques definidos durante la orogenia ándica.

Con distinto grado de preservación estos bloques exhiben en sus partes cumbrales superficies de erosión antiguas (peneplanicie poligénica y diacrónica, Degiovanni et al., 2003), denominadas localmente *pampas de altura*, y cerros relícticos de variada morfología. Estas superficies suelen estar cubiertas por depósitos eólicos del Pleistoceno y Holoceno los que están afectados por procesos de carcavamiento.

La vertiente oriental de las Sierras de Comechingones es drenada por el sistema de los ríos Tercero, Cuarto y numerosos arroyos menores, que, en general, desarrollan una red de alta densidad, asimétrica y muy controlada por la estructura. En este ambiente se reconocen dos tipos de valles, algunos amplios con abundante relleno cuaternario donde los cursos se están reinstalando, caracterizan el sector Sur y, otros, encajonados en rocas, de alta pendiente, dominan el sector centro y Norte. Estos rasgos indican procesos de rejuvenecimiento en un sistema de drenaje antecedente a la orogenia ándica.

✓ **D2: Sierra de Las Peñas y Los Cóndores:** Constituyen las últimas estribaciones de la Sierras Chicas de Córdoba, con alturas que varían de aproximadamente 750 a 650 m de Norte a Sur, conforme la tasa de levantamiento disminuye y la escarpa de falla occidental pierde expresión.

La **Sierra de Los Cóndores** representa la inversión tectónica de un rift cretácico menor y está integrada por bloques de basamento (sector oriental y parte del occidental) y fundamentalmente, por bloques compuestos por una secuencia vulcano –sedimentaria con buzamiento monoclinal que favoreció el desarrollo, desde el Terciario, de relieves tabulares y tipo cuestras, que evidencian diferentes grado de evolución (Degiovanni et al., 2005).

La **Sierra de Las Peñas**, de muy baja altura, presenta un relieve de lomadas suaves constituidas por rocas de basamento, separadas por amplios valles. La escarpa occidental está muy evolucionada y exhibe superficies de pedimentación asociadas que comúnmente están cubiertas por depósitos del Cuaternario (Degiovanni y Cantú, 1997).

Segun Degiovanni et al. (2005), el relieve de estas serranías puede interpretarse como una peneplanicie poligénica (en el sentido de Klein, 1985) muy poco sustituida, que fue sepultada en algunos períodos del Cuaternario y que actualmente está en vías de exhumación.

El perfil transversal asimétrico de la sierra de las Peñas, con vertiente oriental larga y tendida puede observarse en la Figura 2.6

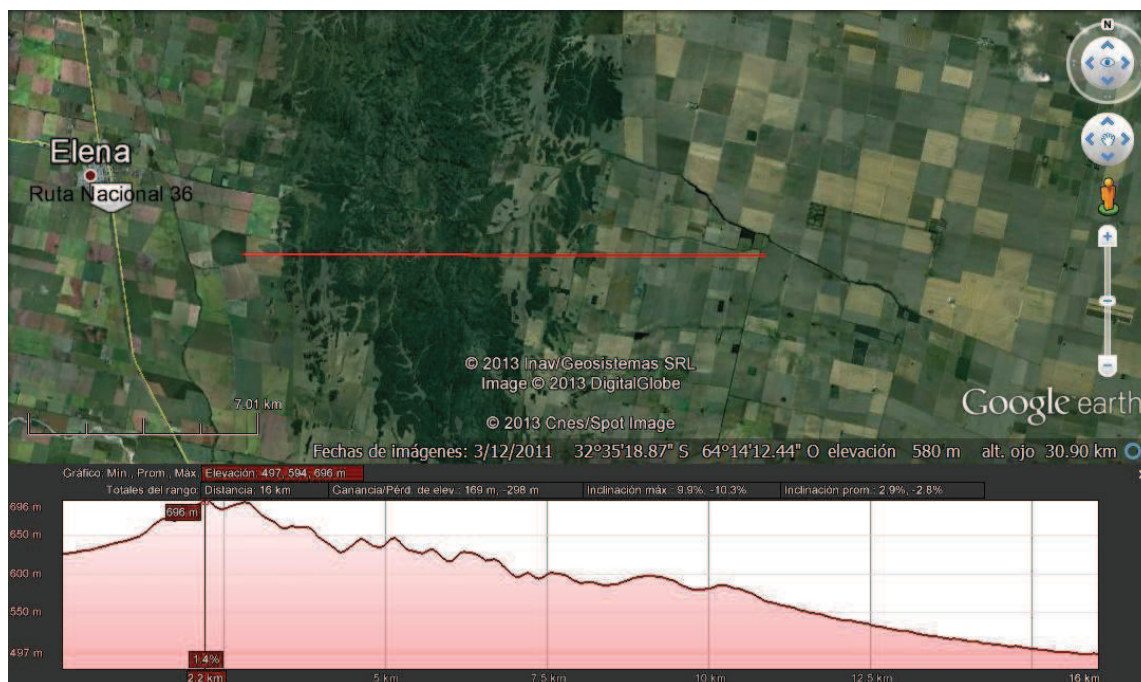


Figura 2.6: Perfil topográfico de la Sierra de Las Peñas y llanura periserrana, obtenido del programa Google Earth, 2013

En ambos cordones montañosos el paisaje presenta un grado de disección importante y la mayor parte de los valles tienen abundante relleno cuaternario. La red de drenaje actual, en algunos casos semipermanente, se integra a la cuenca del río Tercero o bien se infiltra en el valle de La Cruz, al Oeste, o en la llanura pampeana, al Este, siendo esta última, la condición presente en la zona de estudio.

B - Llanura Pampeana

B.1: Ambiente agradacional pedemontano: caracterizado por llanuras de moderadas a fuertemente onduladas que bordean las serranías. Aisladamente se

reconocen superficies de basamento de suave pendiente con calcretos en su techo. Las bajadas falladas y disectadas constituyen una sucesión de lomadas compuestas por secuencias de abanicos pleistocenos, separadas por valles con relleno holoceno y cubiertas por depósitos loésicos. (Degiovanni et al., 2005).

B.2: Llanura eólica bien drenada: comprende las planicies situadas al O de la falla Pampayasta-Alejandro Roca. Predominan llanuras loessoides que varían de fuertemente ondulados a planas hacia el E y presentan un buen drenaje con sistemas de escurrimiento superficiales bien desarrollados (Degiovanni et al., 2005).

✓ **B.2.1: Planicie loessoide con dunas longitudinales,** ampliamente representada en todo el centro-Sur de la provincia. Exhibe un relieve fuertemente ondulado bordeando las sierras y hacia el E se hace más suave. Los sedimentos que afloran son arenas finas de la Fm. Laguna Oscura (Cantú, 1992), constituyendo dunas longitudinales (NNE-SSO) discontinuas y disipadas, con algunos sectores reactivados, originadas en el Holoceno medio. Por debajo de estos sedimentos el relieve de la llanura refleja la tectónica de bloques de basamento, siendo el más importante el Alto Estructural de Levalle, bloque asimétrico asociado a la falla del Tigre Muerto.

✓ **B.2.2: Planicie arenosa,** caracterizada por un relieve ondulado generado por la sobreimposición de formas medanosas de distinto origen y edad. Este subambiente se divide en dos: la *Llanura con dunas parabólicas* y la *Llanura con médanos longitudinales*.

B.3: Llanuras fluvio-eólicas imperfectamente drenadas, forman parte de un ambiente deprimido mayor que constituye el sector oriental de la provincia de Córdoba. Representa el relleno de grandes depresiones tectónicas delimitadas por megaestructuras meridianas y segmentadas por otras transversales y oblicuas que generan bloques menores. Su relieve es suave a moderadamente ondulado, con pendiente hacia el SE. (Degiovanni et al., 2005).

✓ **B.3.1: La Llanura deprimida central,** comprende la gran depresión centro-oriental cordobesa y presenta un paleorelieve fluvial constituido por abanicos

aluviales coalescentes de los cursos que drenan la vertiente oriental y sur de las Sierras Pampeanas de Córdoba, cubiertos por sedimentos eólicos de la Formación Laguna Oscura con removilizaciones más modernas (Degiovanni et al., 2005).

✓ **B.3.2: La Depresión del Tigre Muerto**, con un nivel freático poco profundo o aflorante, se corresponde con el bloque hundido asociado a la falla del Tigre Muerto. Tiene rumbo submeridiano, una pendiente general hacia el SE-S y perfil transversal asimétrico. Incluye las fajas aluviales y derrames actuales de los arroyos Santa Catalina y del Gato.

✓ **B.3.3: Planicie elevada Oriental**, representa el bloque elevado asociado a la falla regional del Saladillo, el que está segmentado en otros menores que exhiben comportamientos diferentes.

B.4: Llanuras fluviales, que incluye, la **Faja fluvial del río Cuarto, y Faja fluvial del río Quinto**, donde dominan en diferente grado formas y sedimentos típicos de estos ambientes (terrazas, barras, meandros abandonados, etc) con notorias diferencias granulométricas entre ambas fajas, siendo más finas las del río Quinto. (Degiovanni et al., 2005).

Capítulo 3

Geología y
Geomorfología
Local

3.1 - Geología

3.1.1 - Introducción

La zona de estudio abarca parte del basamento plutónico-metamórfico aflorante de la Sierra de Las Peñas, y su piedemonte y llanura agradacional, asociada a la llanura Chacopampeana.

3.1.2 - Geología aflorante

3.1.2.1 - Sierra de Las Peñas

Como se indicara, la Sierra de Las Peñas se encuentra enmarcada en la provincia geológica de las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis, correspondiente a las terminaciones australes de la Sierra Chica, uno de los tres grandes sistemas orográficos descritos por Gordillo y Lencinas (1979).

Está compuesta por afloramientos del basamento cristalino de edad Precámbrica – Paleozoica inferior, constituido por complejos ígneos-metamórficos compuestos por rocas tales como granitoides, gneises, esquistos y migmatitas de composición variable y, en menor medida, por intercalaciones calcáreas dolomíticas generalmente de gran pureza, anfíbolitas, cuarcitas y granulitas (Demichelis, 1986)

La facies metamórfica bajo la cual se formaron es la de anfíbolita, variando hasta la facies de granulita.

La estructura del Complejo Las Peñas corresponde a un gran pliegue de escala kilométrica limitado por cizallas de orientaciones aproximadas N-S, con un plano axial subvertical y eje buzante al Sur. Durante el Paleozoico inferior a medio (Gordillo y Lencinas, 1979) se produce el emplazamiento de intrusiones básicas, mesosilíceas y ácidas.

La configuración del basamento metamórfico es en forma escalonada hacia la llanura, subyacente a los sedimentos cuaternarios de relleno.

3.1.2.2 - Llanura agradacional pedemontana

El relleno cuaternario que conforma la llanura agradacional se dispone discordantemente sobre el basamento cristalino, y se reconocen en los materiales aflorantes algunas de las formaciones descritas previamente por Cantú (1992) para el Sur de Córdoba (Ver capítulo 2 Fig.2.3: Cuadro estratigráfico) desde el Pleistoceno superior hasta la actualidad. Estas formaciones han sido descritas por numerosos autores en diferentes ámbitos del Sur cordobés (Blarasin, 2003; Degiovanni, 2008; Cabrera, 2009; Milicich, 2010). Las descripciones más cercanas a la zona de trabajo son las de Matteoda (2012) en la vertiente occidental de las Sierras de las Peñas.

El estudio de las diferentes características (profundidad, litología, etc) de los materiales geológicos que conforman la llanura se realizó a partir de la descripción de perfiles sedimentarios aflorantes y datos del subsuelo obtenidos de sondeos eléctricos verticales (SEV), y perfiles de pozos y/o perforación recolectados en el área de estudio, ubicados en la Fig. 3.1.

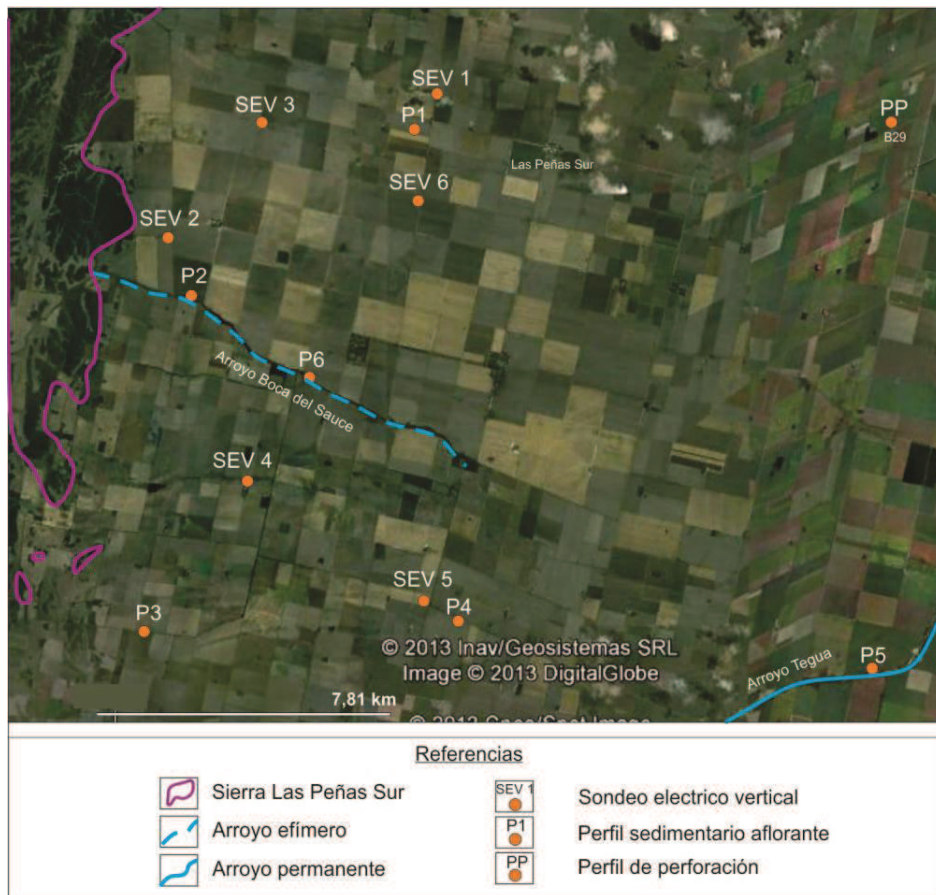


Figura 3.1: Ubicación de perfiles sedimentarios, de perforación, y sondeos eléctricos verticales en la imagen satelital de Las Peñas Sur, obtenida de Google Earth

3.1.2.2.1 – Descripción de perfiles sedimentarios.

Se describen a continuación cinco perfiles sedimentarios aflorantes en la zona de estudio, dos de los cuales se ubican en el piedemonte proximal, dos en el piedemonte distal, y uno expuesto en las barrancas del Arroyo Teguá.

✓ *Perfil sedimentario P1*

Se ubica en el área de piedemonte distal, aflora en un camino y presenta en general un aspecto muy homogéneo. Exhibe base cubierta, luego un espesor de aproximadamente 2,5 metros de sedimentos arenosos muy finos limosos de color pardo claro, con gravillas dispersas y angulares y clastos líticos de 2-3cm de eje mayor, aunque poco abundantes. En algunos sectores se observan láminas delgadas cementadas con carbonatos de calcio (calcretos o “tosca”), a veces pequeños clastos de tosca, indicando escurrimientos efímeros.

Se tomó una muestra representativa de la base y se realizó el análisis granulométrico por tamizado, obteniéndose así los porcentajes de los diferentes tamaños de granos; en este caso, más del 50% corresponde a arenas muy finas, y le siguen limos y arcillas, con un porcentaje levemente superior al 30%.(Fig.3.2)

En la parte superior del perfil se observan materiales arenosos finos con mayor contenido de materia orgánica (MO) de un espesor de 0,30 m (Fig.3.3).

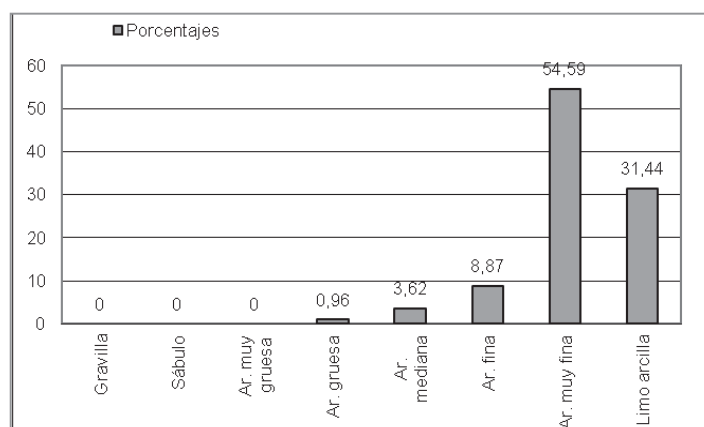


Figura 3.2: Porcentajes granulométricos de P1, correspondiente al piedemonte distal

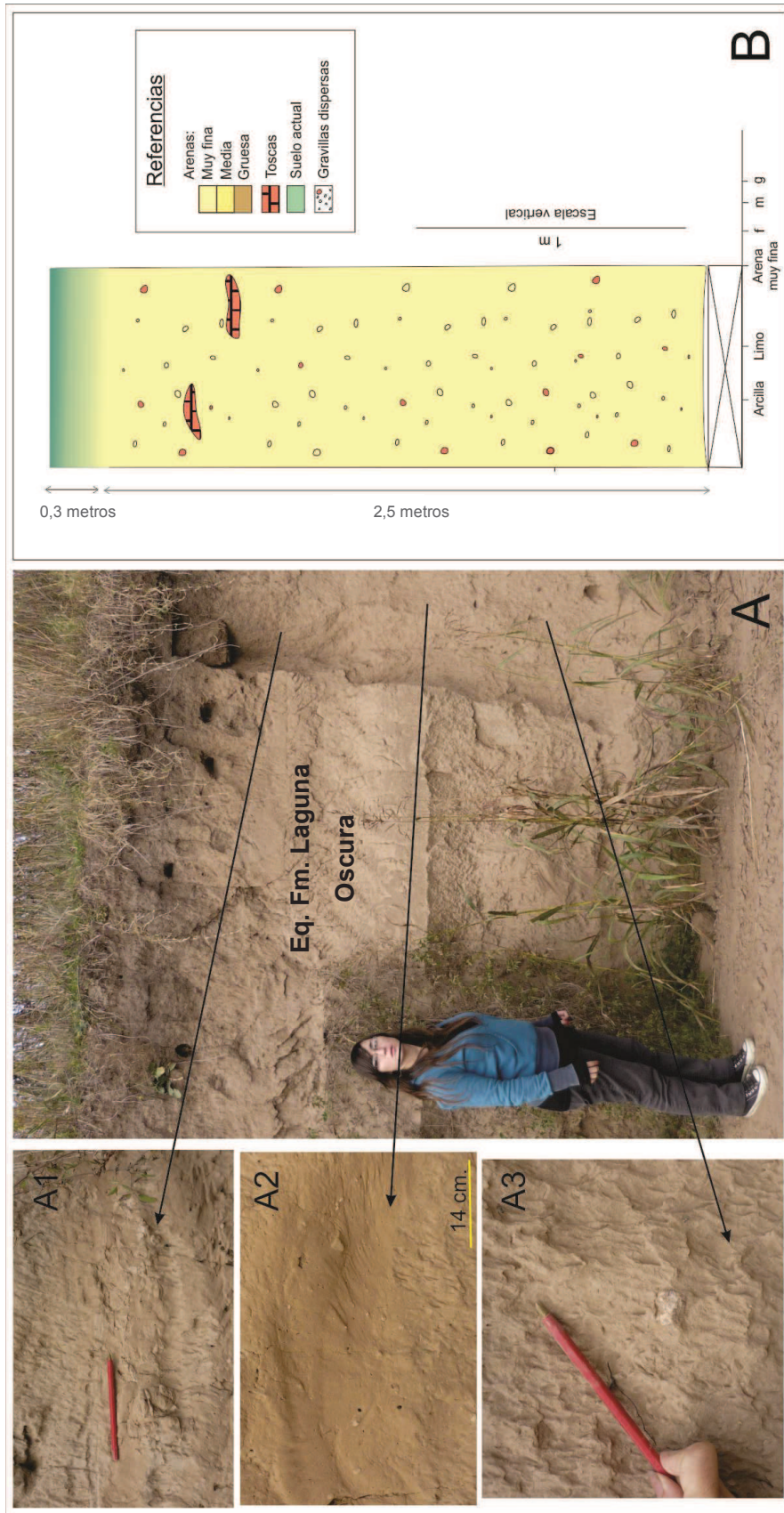


Figura 3.3 : **A-** Perfil sedimentario **P1**, correspondiente al piedemonte distal. **A1-** clastos y delgadas capas de calcretos. **A2 Y A3-** clastos líticos de diferente tamaño. **B-** Esquema perfil sedimentario **P1**

La descripción de campo y el análisis de la granulometría de los materiales de este perfil, permite definirlos como equivalentes a los sedimentos eólicos de la *Fm. Laguna Oscura* (Cantú, 1992), de edad Holocena superior, aunque por tratarse de una facie pedemontana, se observan las mencionadas gravillas dispersas debido a flujos densos y arroyadas difusas. Los materiales arenosos finos con mayor contenido de materia orgánica (MO) de la parte superior del perfil indican procesos de pedogénesis actual.

✓ **Perfil sedimentario P2**

Este perfil se encuentra en un camino ubicado en el piedemonte proximal. Posee base parcialmente cubierta por derrubios y vegetación. Desde la base hasta los 3 metros está constituido por un cuerpo tabular, en general homogéneo, de sedimentos areno-limosos de color pardo claro, con gravillas dispersas. El análisis granulométrico de una muestra representativa de este sedimento arrojó un contenido de arena gruesa del 26%, y semejante porcentaje (27%) de arcilla-limo, estando conformado el resto, por arenas muy finas a medias. (Fig.3.4).

Finalmente y por medio de un contacto erosivo ondulado, el cuerpo está separado de otro que yace por encima, de tipo tabular, de 0,50 m, con colores más oscuros, debido a un mayor contenido en materia orgánica, pero también predominantemente areno-limoso.

En la parte superior, se observa un aumento de MO y bioturbaciones en un cuerpo de 0,50 m.(Fig.3.5).

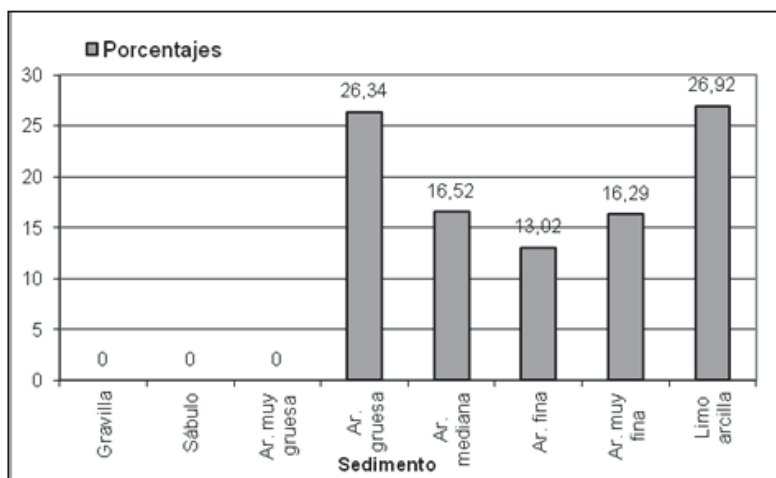


Figura 3.4: Porcentajes granulométricos de muestra representativa de la base de P2

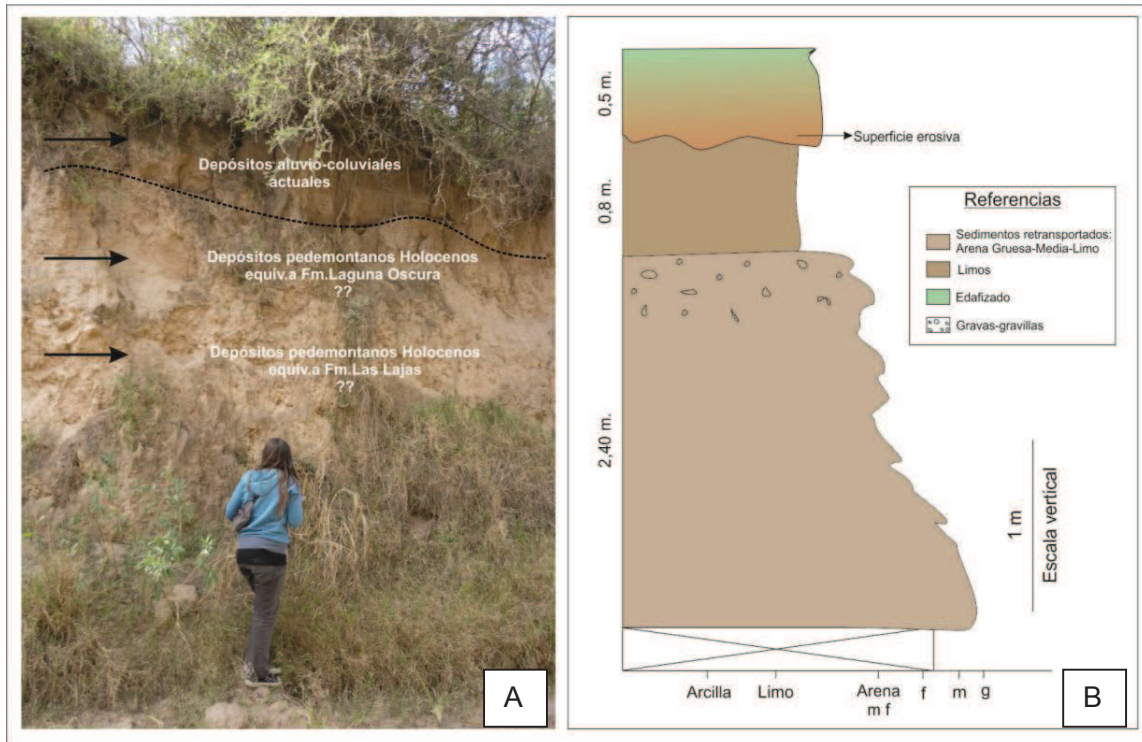


Figura 3.5: A- Foto Perfil sedimentario P2. B- Esquema perfil P2

Como se indica más adelante, este perfil se ubica dentro de la Unidad geomorfológica Paleoabanico Boca del Sauce (ver mapa geológico-geomorfológico Fig. 3.18). Estos depósitos periserranos involucran arenas-limos retransportados con gravillas y a veces estructuras de flujo, indicando que parte del loess serrano fue removido por procesos aluviales (en manto y encauzados) y gravitatorios. Estos sedimentos se asumen equivalentes a facies fluviales de la Fm Las Lajas, de edad holocena, correspondiente a un período más húmedo, desde la base hacia la parte media del perfil, donde se observan algunas capas con clastos más gruesos, mientras que la parte superior del cuerpo se correspondería con un aumento de granulometría finas equivalentes a la Fm. Laguna Oscura, un período más seco del Holoceno superior.

La parte superior del perfil se interpreta en general como constituido por sedimentos aluvio-coluviales históricos vinculados a la paleoactividad aluvial de la bajada periserrana, luego en proceso de edafización.

✓ **Perfil sedimentario P3**

Ubicado dentro del piedemonte proximal, constituye un perfil heterogéneo. La base está cubierta, observándose luego un paquete de 0,60 m de material arenoso fino, con gravillas dispersas de diferente tamaño y en el techo, separándolo de los materiales suprayacentes, una superficie erosiva irregular. De este paquete basal se realizó el análisis granulométrico de una muestra representativa, arrojando un contenido mayoritario de arena muy fina, seguido de materiales limo-arcillosos (Fig.3.6).

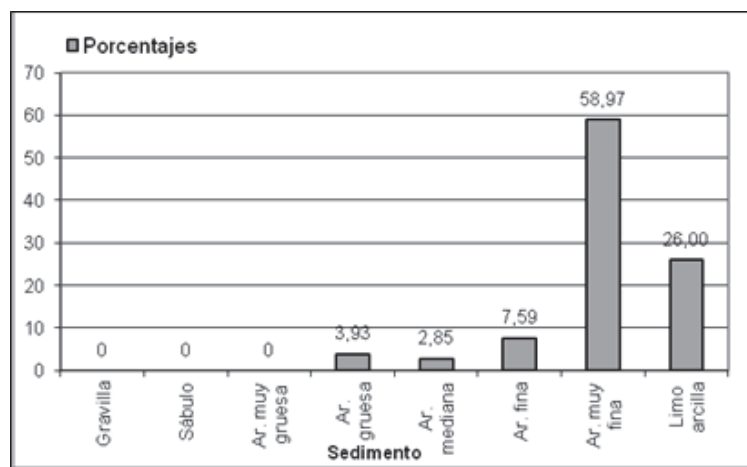


Figura 3.6: Porcentajes granulométricos de muestra representativa del perfil P3

A continuación, un paquete granodecreciente de 0,20 m de arenas gruesas a muy finas, con delgados bancos (6 cm) de materiales limo-arcillosos con laminación en la parte superior. Se suprayacen niveles con intercalaciones de arcillas y arenas medias a gruesas, estratificadas, con mayor contenido de materia orgánica. Hacia la parte superior del perfil se encuentra un paquete de arena muy fina y limo con estratificación entrecruzada (especialmente fuera del área de la foto Fig.3.7), sobre el cual existe un paquete sedimentario de 0,50 m de arenas muy finas con laminación, seguido de materiales arenosos finos con desarrollo edáfico de 0,20 m, en los materiales aluviales actuales(Fig.3.7).

Los materiales arenosos finos-limosos de la base del perfil, se asumen equivalentes a la Fm. Laguna Oscura, de edad holocena superior, que luego se encuentran separados, por una superficie erosiva, de los materiales actuales, aluviales de moderada energía, sobre los que se desarrolla el suelo actual.

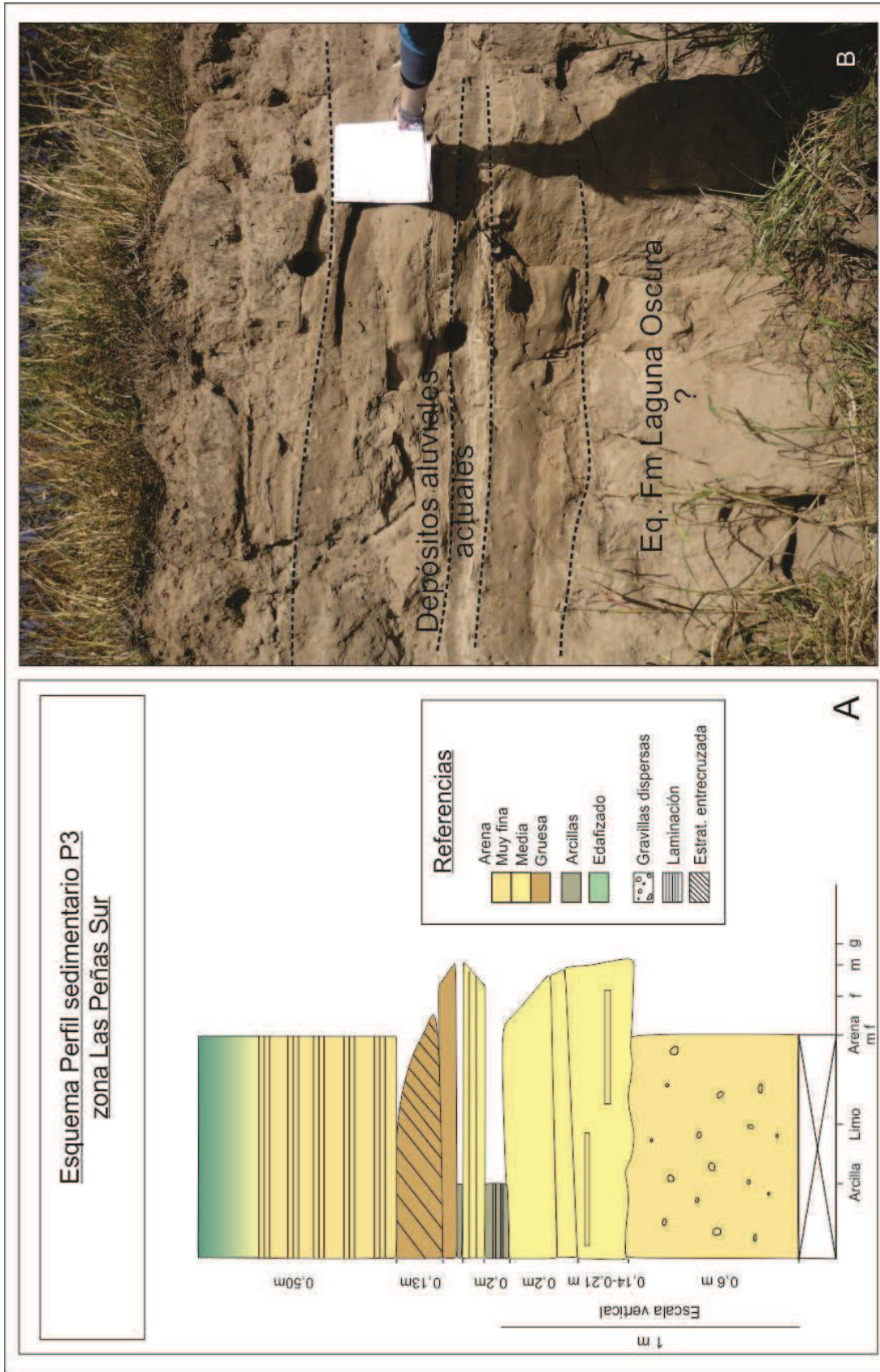


Figura 3.7: A-Esquema perfil sedimentario P3. B-Foto perfil completo P3

✓ **Perfil sedimentario P4**

Ubicado en el piedemonte distal, presenta base cubierta y un cuerpo tabular de material arenoso fino a muy fino, de 2,60 metros, sin estructuración, masivo, sin gravillas dispersas. El análisis granulométrico de este cuerpo se observa en la Fig. 3.8 y muestra una prevalencia de sedimentos arenosos muy finos (mayor al 57%), y en menor cantidad, materiales limo-arcillosos (36%)

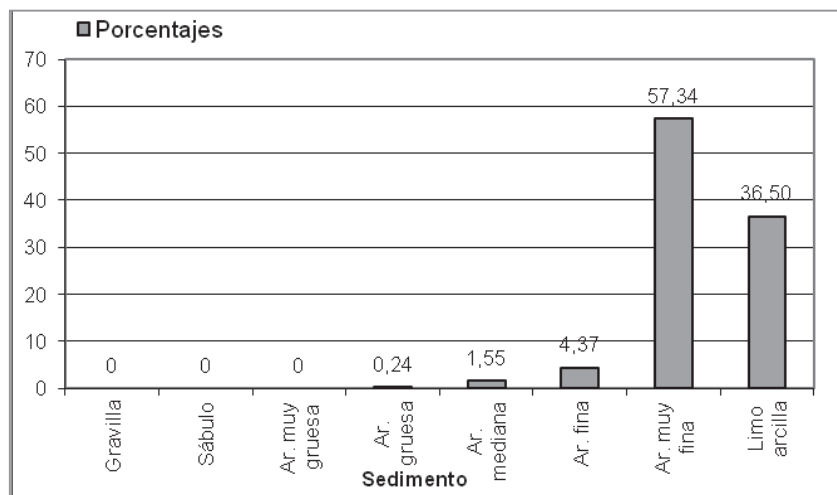


Figura 3.8: Porcentajes granulométricos de muestra representativa del perfil P4.

En la parte superior de este cuerpo se observa un aumento en el contenido de materia orgánica, con estructura de prismas redondeados de 0,25 m y, en el techo, una superficie erosiva, por sobre la cual se encuentran 0,80 m de material arenoso - limoso, laminado. (Fig. 3.9)

Los materiales presentes en la base del perfil se asumen equivalentes a la Fm. Laguna Oscura, de edad holocena, con un desarrollo de un paleosuelo en la parte superior que luego fue decapitado por procesos de erosión fluvial y cubierto por sedimentos aluviales que actualmente están sometidos a procesos de edafización incipientes.

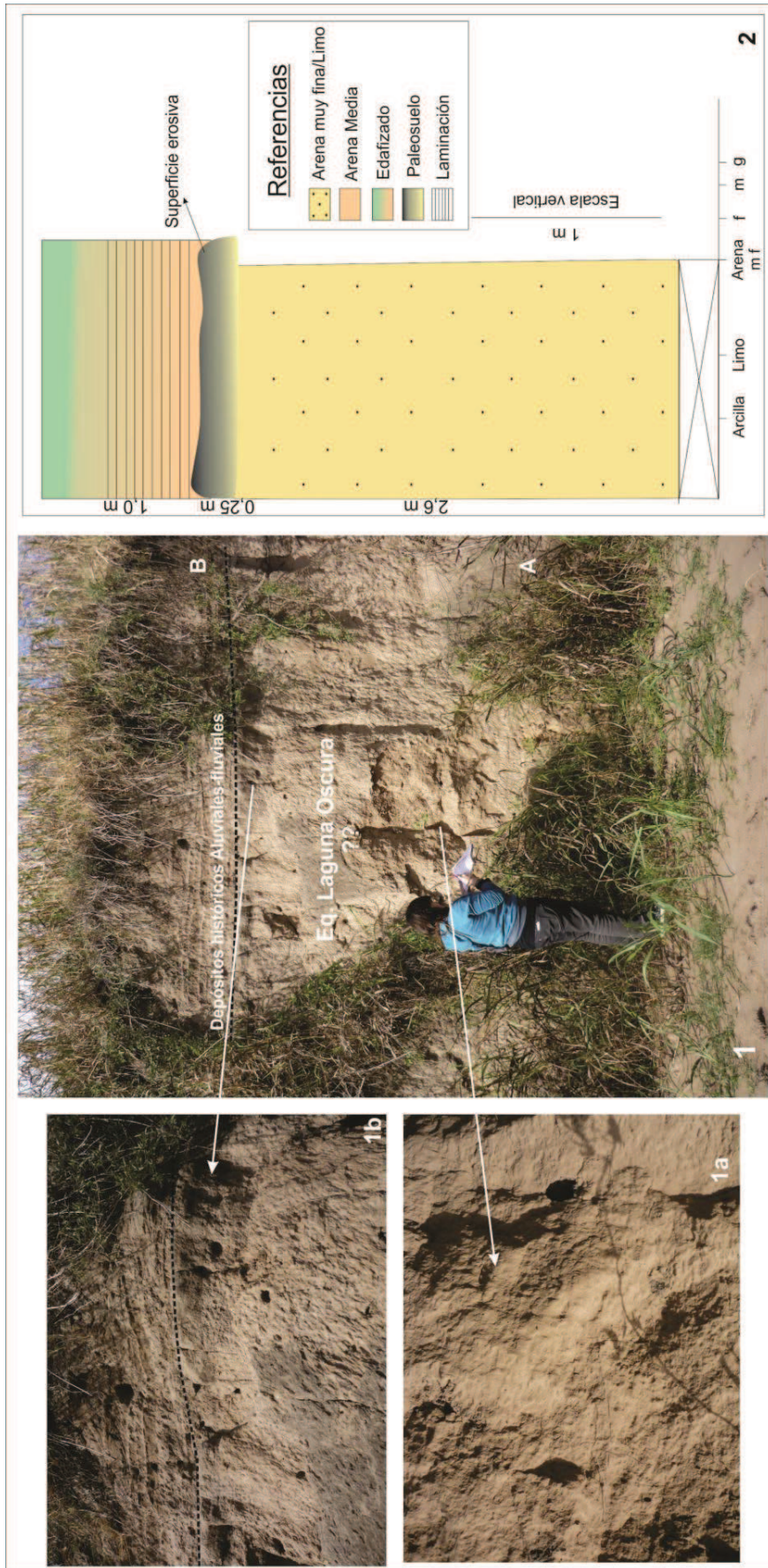


Figura 3.9: 1-Foto Perfil sedimentario P4. 1a-Detalle A: masivo. 1b- detalle paleosuelo. 2- Esquema perfil P4.

✓ **Perfil sedimentario P5**

Ubicado en las barrancas expuestas del Arroyo Tegua, presenta base cubierta y un cuerpo tabular de aproximadamente 4 metros, de material arenoso fino-limoso con bandeado de colores más rojizos. Sobre este paquete sedimentario se apoya en discontinuidad erosiva, un cuerpo tabular de 1,0 metro de espesor de materiales arenosos, con laminación muy marcada. Luego continúan 4 m de materiales arenosos muy finos limosos, con laminación menos evidente, hasta presentar masividad, en el metro superior, en donde se observa un material muy oscuro indicando la presencia de gran cantidad de materia orgánica, depósito en el que se preservan algunas laminaciones. Finalmente, la columna descrita aparece sepultada, mediante límite erosivo, por sedimentos levemente laminados (Fig. 3.10)

Si bien existen dudas de los materiales de la base del perfil y su origen, aspectos que tienen que ver con la dificultad de acceso para la descripción, a partir de las observaciones de campo, se asume que los materiales arenosos finos-limosos de la base del perfil serían fluviales equivalentes a la Formación Chocancharava, de edad pleistocena media-superior (Cantú 1992). Sobre la mencionada superficie erosiva, se depositaron sedimentos más gruesos, como arenas y gravas, equivalentes a la Formación Las Lajas (Cantú, 1992), de origen fluvial correspondiente al período húmedo del Holoceno inferior, que gradualmente va disminuyendo la energía y pasa a un depósito que podría interpretarse como correspondiente a la Fm Laguna Oscura (Cantú, 1992), de edad Holoceno superior. En este material se observa en la parte superior y con el advenimiento del clima actual materiales depositados en condiciones húmedas, que por el mayor contenido de materia orgánica y laminación incipiente, podrían interpretarse como de tipo palustres y finalmente se observa que fueron decapitados y soterrados por sedimentos históricos fluviales, depositados antes de la importante incisión que presenta este arroyo.

En el sector del perfil P5 se encuentran además, dentro de la faja fluvial actual del arroyo Tegua, las terrazas actuales, con depósitos de barras granodecrecientes (Fig.3.11), conformadas por arenas gruesas, sábulos y gravas; los de mayor tamaño corresponden a clastos líticos y clastos de sedimentos finos cementados (“tosca”).

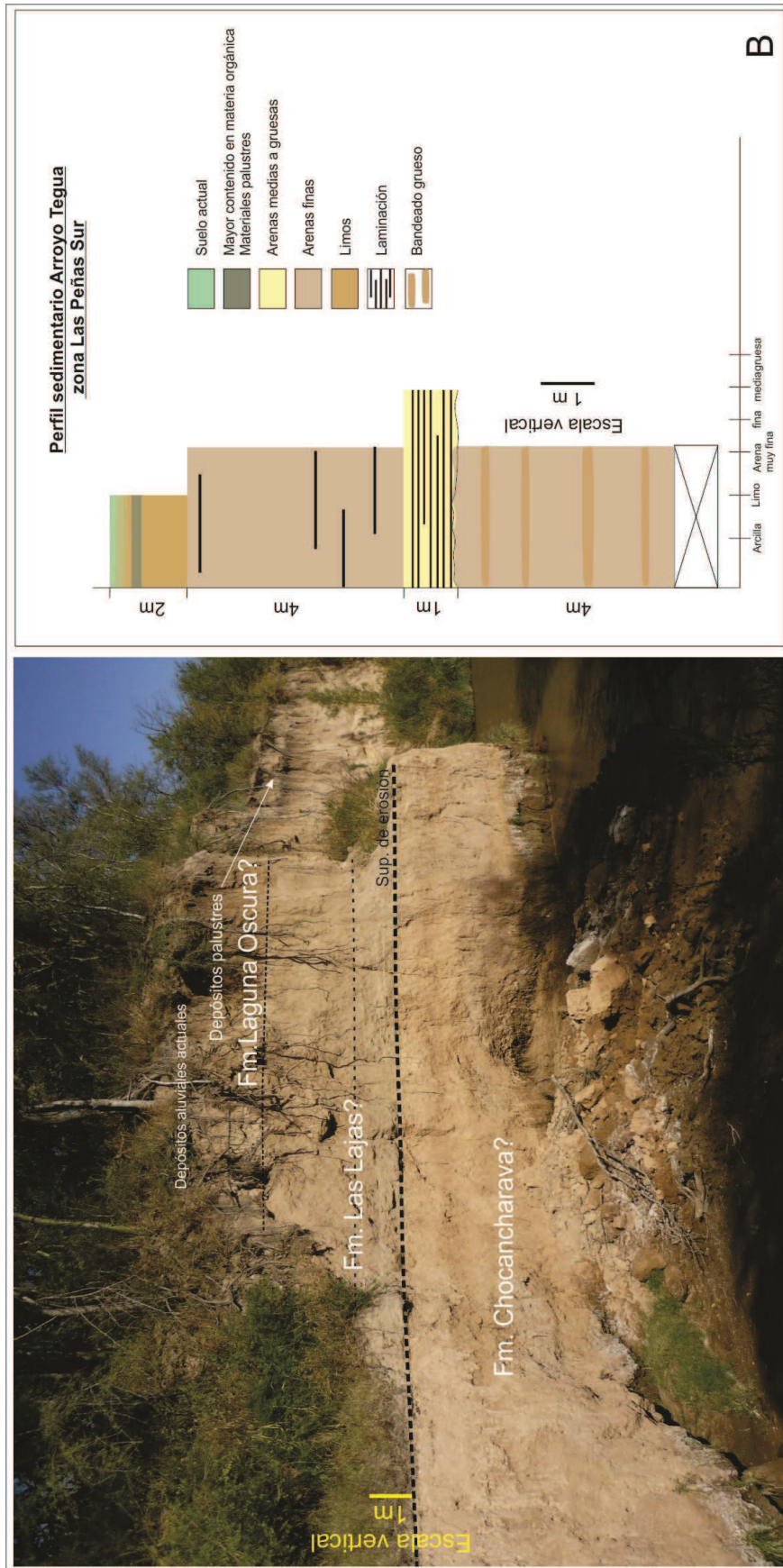


Figura 3.10: **A**- Foto Perfil sedimentario P5. **B**- Esquema perfil P5.



Figura 3.11: Material sedimentario de terrazas actuales y barras del Arroyo Tegua. A-B: sedimentos arenosos gruesos, gravas y conglomerados. C: Arenas. D: Canal y terraza actual.

Se realizó el estudio por tamizado de los materiales de las barras fluviales actuales, arrojando los porcentajes de cada granulometría encontrada (Fig. 3.12), donde se observa que predominan los materiales arenosos gruesos con 59,1 % y le siguen en cantidad los materiales tamaño sábulo, con un 44,9 %, y diferentes porcentajes de todas las granulometrías, desde gravas a sedimentos limo-arcillosos.

Los materiales actualmente transportados por el arroyo Tegua dan cuenta

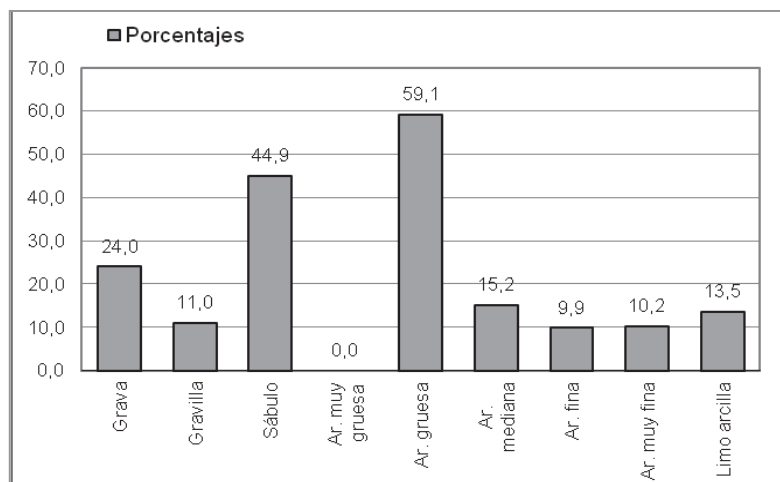


Figura 3.12: Porcentajes granulométricos de las barras actuales del Arroyo Tegua.

de los importantes procesos de erosión actual del arroyo y la alta capacidad que posee el flujo de agua para transportar sedimentos gruesos.

✓ **Perfil sedimentario P6: arroyo Boca del Sauce**

El arroyo Boca del Sauce posee barrancas de diferente altura en toda su longitud; el perfil analizado se ubica en la parte central del sistema fluvial, donde las alturas de las barrancas alcanzan valores de 4-5 metros.

Se trata de un perfil de sedimentos de aspecto en general homogéneo de aproximadamente 5 metros, presenta base cubierta y consiste de materiales arenosos finos-limosos masivos, con pocas gravillas dispersas. Hacia el techo de este paquete sedimentario mayor se observa un contacto erosivo por encima del cual yace un depósito de sedimentos areno-limosos con abundante materia orgánica en la parte superior. (Fig. 3.13)

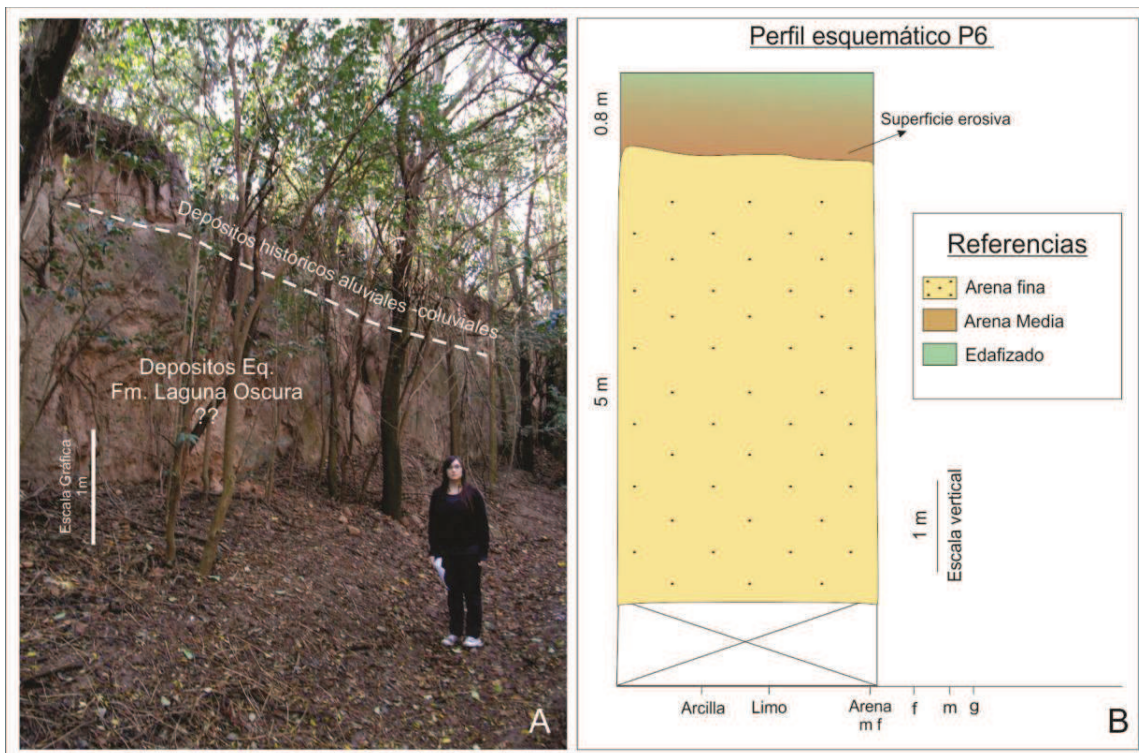


Figura 3.13: A- Foto Perfil P6. **B-** Perfil esquemático P6 sobre el arroyo Boca del Sauce

Los sedimentos de la base de este perfil se asumen equivalentes a los depósitos eólicos de la *Fm. Laguna Oscura* (Cantú, 1992), de edad holoceno superior, con el agregado de gravillas dispersas por encontrarse en la zona de piedemonte distal, por lo que probablemente estos depósitos no sean los típicos eólicos sino que tengan una importante participación de flujos densos vinculados a las cercanías de las sierras. La parte superior ubicada por encima de la discontinuidad son materiales aluviales-coluviales actuales con edafización incipiente, antes de que en las últimas décadas este arroyo comenzara su proceso de incisión.

3.1.3 - Geología del subsuelo

3.1.3.1 - Perfiles de perforación

Al realizarse el censo de pozos se denominó a cada perforación con las letras B2 a B36. En relación a los materiales atravesados, se observó una importante variabilidad de granulometrías, dominando los pozos que presentan limos-loess con diferente grado de cementación, aunque se encuentran también intercalaciones de arenas medias, gruesas y hasta arenas gravosas en sectores colindantes a la sierra. Estos niveles se interpretan como correspondientes a paleocauces procedentes del sistema serrano.

Las profundidades alcanzadas en los pozos censados varían desde los 30 a los 70 metros, además, se obtuvieron datos de una perforación que alcanza los 185 metros de profundidad, la cual se presenta a continuación (Tabla 3.1)

El perfil de esta perforación (Tabla 3.1), fue realizado por Pagliano Perforaciones, en el campo de M. Lioce, correspondiente al pozo B28 del censo de perforaciones. (Esquema Fig. 3.14)

Desde(m)	Hasta(m)	Espesor	Litología probable
0	35	35	Loess-Limo
35	50	15	Tosca c/int. Arena
59	70	11	Arena
74	77	3	Tosca c/int. Arena
83	85	2	Tosca
87	90	3	Tosca
92	94	2	Tosca
99	111	12	Tosca
113	116	3	Arena
119	121	2	Tosca
124	135	11	Arena
138	141	3	Arena
147	148,5	1,5	Arena fina
154,5	156,5	2	Tosca c/int. Arena
162	163,5	1,5	Arena limosa
169	175	6	Tosca
182	185	3	Arena media

Tabla 3.1: Datos obtenidos de la perforación para consumo B28

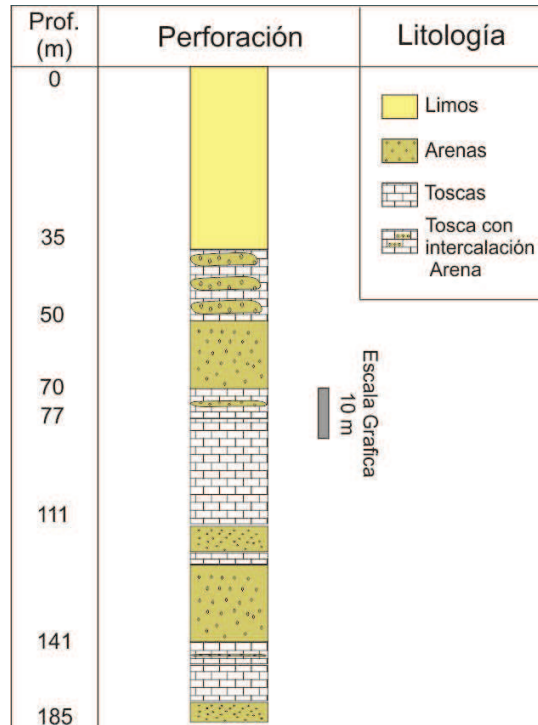


Figura 3.14: Esquema del perfil de perforación de B28

3.1.3.2 - Sondeos eléctricos verticales (SEV)

Se adquirió información sumamente útil de un trabajo realizado en el área de estudio (Quintana Salvat, 2000), quien efectuó 5 SEV en la zona de trabajo (Ver ubicación en Fig. 3.1). Los datos proporcionados por estos sondeos, fueron utilizados para reconocer en el área de estudio los materiales sedimentarios del subsuelo y la profundidad del basamento cristalino. Se destaca que al ser una metodología indirecta, la información no es absolutamente precisa, sino que brinda datos litológicos y profundidades con algún grado de incerteza.

✓ Sondeo eléctrico vertical N°1

Fue realizado en campos de la Estancia Las Peñas Sur, en el piedemonte distal. El sondeo eléctrico vertical indica la presencia de arenas gruesas y gravas los primero 29 metros, y luego una capa de arcilla/limo y arenas finas de 84 metros de potencia. El

basamento cristalino se infiere desde los 115 metros en adelante por los altos valores de resistividad obtenidos (Tabla 3.2).

Niveles	Espesores(m)	ρ real (Ω .m)	Litología
E1	2	120	Arenas aluviales
E2	20	12	Arenas aluviales húmedas
E3	9	42	Arena gruesa y grava
E4	84	6,8	Arcilla/Limo y/o arenas finas
T.E5	de 115 a mas	Valores altos	Basamento cristalino

Tabla 3.2: Sondeo Eléctrico vertical número 1.

✓ **Sondeo eléctrico vertical N°2**

Efectuado 500 metros al Norte del A° Boca del Sauce, a la salida del sector serrano. Este sondeo indica un espesor de alrededor de 32 metros de sedimentos gruesos limo arenosos, arenas y gravas; a partir de allí, se infiere el basamento cristalino por los altos valores de resistividad. (Tabla 3.3)

Niveles	Espesores(m)	ρ real (Ω .m)	Litología
E1	1	140	Limo arenoso y grava
E2	3,3	350	Gravas gruesas
E3	27,5	54	Arenas y gravas
T.E4	de 31,8 a mas	1350	Basamento cristalino

Tabla 3.3: Sondeo eléctrico vertical número 2

✓ **Sondeo eléctrico vertical N°3**

Efectuado en campos de la Ea. La Armada, este sondeo indica un espesor de 28 metros de arenas, gravas gruesas y cantos, que pueden corresponder a un paleocauce, por su ubicación próxima a la sierra de Las Peñas. Se observa luego un espesor de alrededor de 20 metros, que podría corresponder al basamento cristalino muy fisurado y/o alterado. A partir de los 48 metros de profundidad, se insinúa el basamento cristalino poco alterado, ya que la curva tiende a valores altos. (Quintana Salvat, 2000) (3.4).

Niveles	Espesores(m)	ρ real (Ω .m)	Litología
E1	3,5	90	Arenas y gravas
E2	24,5	450	Gravas gruesas
E3	20	90	Basamento descompuesto
T.E4	de 48 a mas	∞	Basamento cristalino

Tabla 3.4: Sondeo Eléctrico vertical número 3.

✓ **Sondeo eléctrico vertical N°4**

Realizado al Sur del A° Boca del Sauce, en el piedemonte proximal. El basamento cristalino se deduce a partir de los 81 metros de profundidad, puesto que a esa profundidad la resistividad tiende a valores infinitos, con una pendiente de la curva de 45°. (Quintana Salvat, 2000) (Tabla 3.5)

Niveles	Espesores(m)	ρ real (Ω .m)	Litología
E1	2	50	Limo arenoso
E2	10	500	Rodados gruesos
E3	69	54	Arenas finas
T.E4	de 81 a mas	∞	Basamento cristalino

Tabla 3.5: Sondeo Eléctrico vertical número 4.

✓ **Sondeo eléctrico vertical N°5**

Efectuado dentro del piedemonte distal, inmediatamente al Sur del A° Boca del Sauce. El basamento cristalino se insinúa a partir de los 105 metros de profundidad, por la tendencia de la curva a tomar progresivamente valores resistivos altos, con pendiente positiva hacia los 45° (Quintana Salvat, 2000) (Tabla 3.6).

Niveles	Espesores(m)	ρ real (Ω .m)	Litología
E1	6	70	Limo arenoso y arenas finas
E2	30	14	Limos-Loess y arenas finas
E3	14	25	Grava parcialmente cementada
E4	55	3,6	Arenas con frecuentes intercalaciones de niveles limo-arcillosos
T.E5	de 105 a mas	∞	Basamento cristalino

Tabla 3.6: Sondeo Eléctrico vertical número 5.

✓ **Sondeo eléctrico vertical n° 6**

Se obtiene este sondeo del grupo de trabajo de Hidrogeología de la UNRC. El gráfico de resistividades (Figura 3.15) permite distinguir 3 electrocapas. La primera, con un espesor de aproximadamente 6,6 m, corresponde a sedimentos sueltos y secos, posiblemente limos. La segunda, hasta los 73,28 m de profundidad, puede interpretarse como materiales finos con mayor contenido de humedad. La tercera, hasta los 73,28 m, podría corresponder a sedimentos muy finos, posiblemente arcillas.

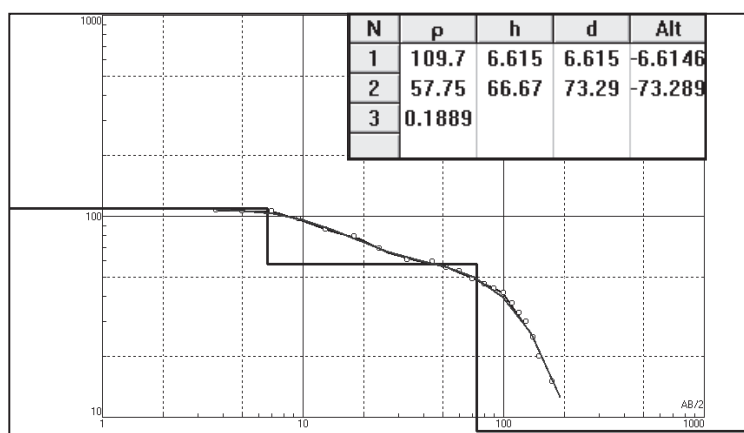


Figura 3.15: Sondeo Eléctrico vertical número 6.

3.1.3.3 Perfiles geológicos esquemáticos

A partir de la información recolectada de la geología del área, se realizaron perfiles esquemáticos en sentido O-E y NO-SE (Fig. 3.16 y 3.17). Su ubicación en el área de estudio se encuentra en la figura 3.18.

En ambos esquemas se puede observar las diferentes litologías del subsuelo del área de estudio. Dominan los materiales eólicos en la cubierta superior, aunque se encuentra abundante gravilla dispersa en cercanía al pedemonte. También se han detectado materiales más gruesos, aluviales a diferentes profundidades aunque, como se indicara previamente, las perforaciones con datos son escasas.

Además se observa que el área está afectada estructuralmente, por lo que se interpreta que el basamento posee una morfología de bloques descendentes hacia el

Este, aunque se requeriría de mayor información para su completa descripción y entendimiento.

En las secuencias aflorantes observadas los sedimentos más antiguos podrían corresponderse con materiales del Holoceno bajo o Pleistoceno superior (equivalentes a la Fm. Chocancharava), mientras que de los materiales más profundos se desconocen edades que puedan indicar si en este ámbito hay depósitos terciarios hasta la profundidad alumbrada, aunque es probable que pertenezcan a este período los materiales de la parte basal de la perforación B29 (Ver Fig. 3.14 y perfil Tegua, Fig. 3.10).

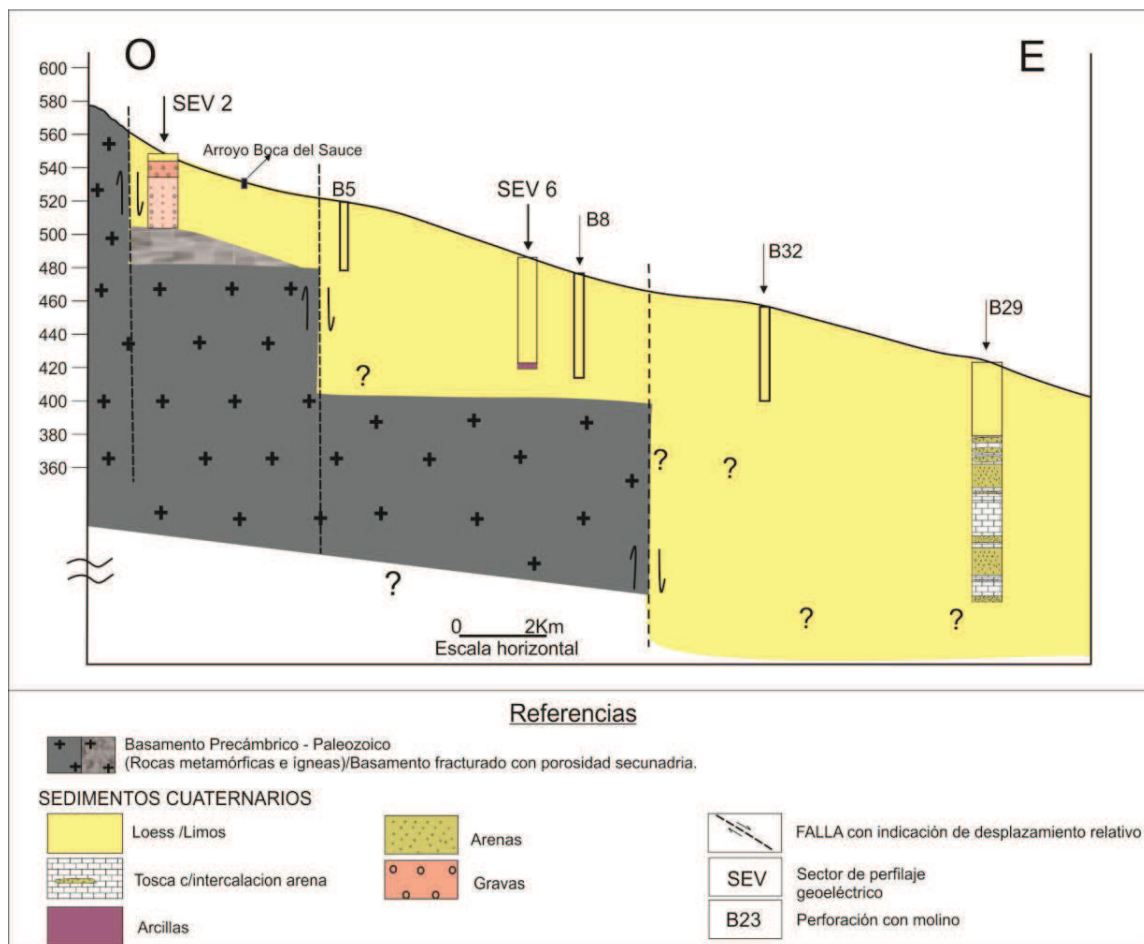


Figura 3.16: Perfil geológico esquemático E-O Las Peñas Sur.

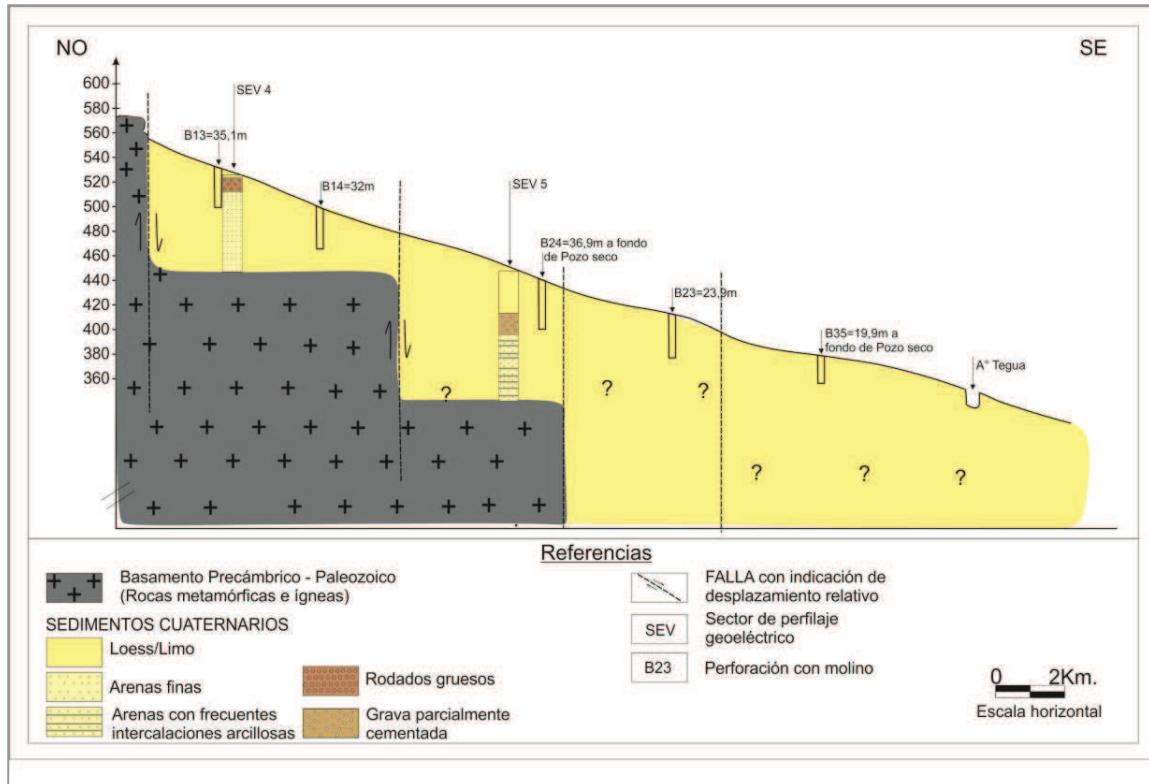


Figura 3.17 : Perfil geológico esquemático NO-SE Las Peñas Sur

3.2 Geomorfología

La zona de estudio se encuentra ubicada casi en su totalidad dentro de la unidad geomorfológica descrita por Degiovanni (2005), correspondiente a la *Llanura Pampeana* (específicamente al Ambiente agradacional pedemontano, Llanura eólica bien drenada, Planicie loessoide fuertemente ondulada) mientras que el sector occidental toma parte, como se indicara, de las Sa. de las Peñas, ambiente de Sierras Pampeanas (Ver Cap.2 Figura 2.5). El relieve se caracteriza por pendientes topográficas que poseen valores de 8 % en serranía, hasta 0,5 % en la llanura. En la ladera oriental de la Sierra de Las Peñas nacen los arroyos de Las Peñas, el Saucecito, y el Boca del Sauce, que se insumen a poco de salir al ambiente extraserrano (Fig. 3.18 Mapa Geológico – Geomorfológico).

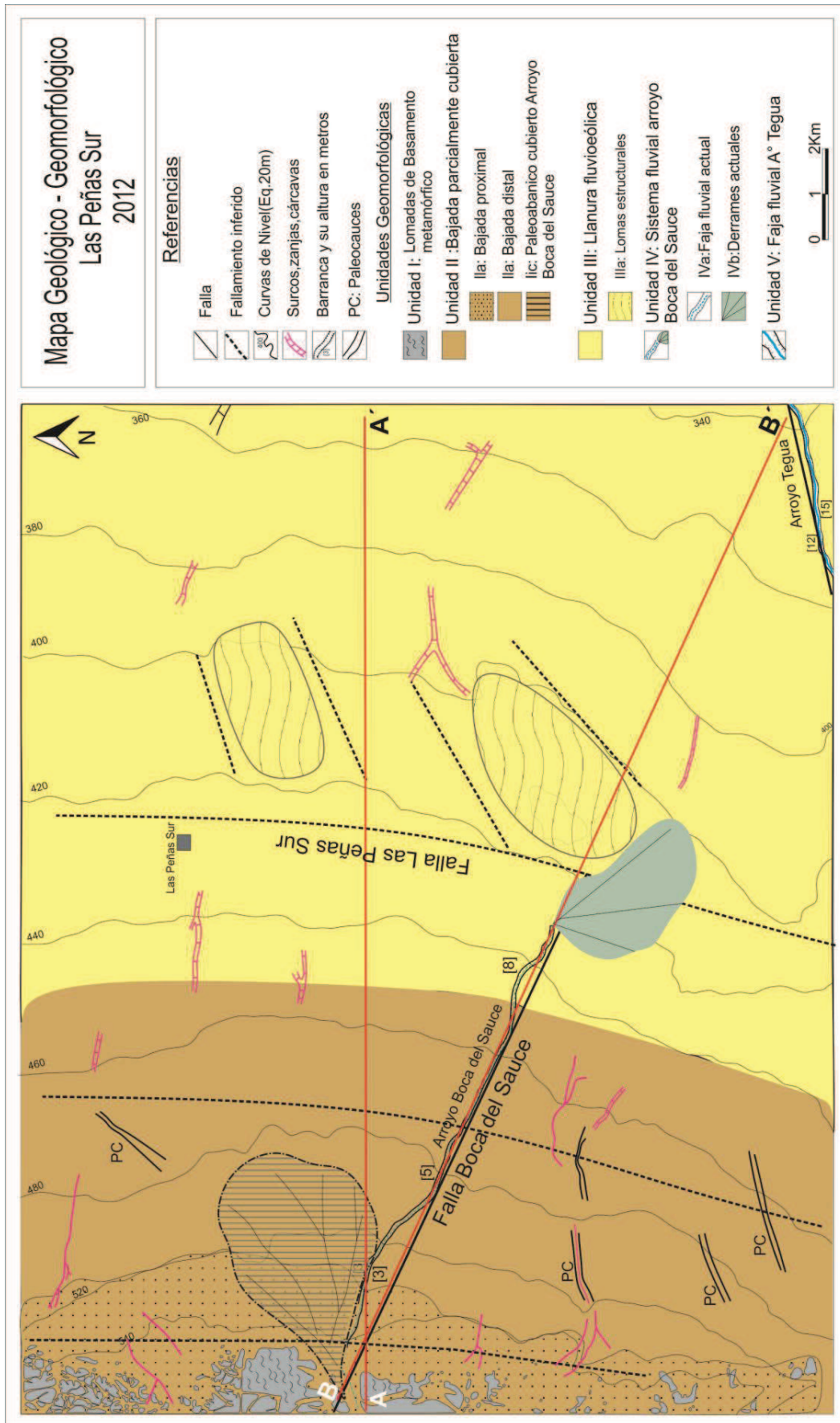


Figura 3.18: Mapa Geológico Geomorfológico zona Las Peñas Sur 2012

3.2.1 Descripción Unidades Geomorfológicas

✓ **Unidad I - Lomadas de Basamento**

La **Sierra de Las Peñas**, de muy baja altura, del orden de los 600-750 metros, y cota homogénea, presenta un relieve de lomadas suaves constituidas por rocas de basamento, separadas por amplios valles, con alto control estructural.

La sierra exhibe superficies de pedimentación que comúnmente están cubiertas por depósitos del Cuaternario (Degiovanni y Cantú, 1997). El relieve de esta serranía puede interpretarse como una peneplanicie poligénica (en el sentido de Klein, 1985) pre andino, muy poco sustituida, que fue sepultada en algunos períodos del Cuaternario y que actualmente está en vías de exhumación. (Degiovanni, 2005)(Fig.3.19).

Como se explicara, esta sierra posee una escarpa de mayor pendiente al Oeste y perfil más suave y tendido hacia el Este. La morfología actual de la sierra es resultado también de procesos erosivos fluviales - gravitacionales condicionados fundamentalmente por la litología y las estructuras y los sucesivos cambios climáticos.



Figura 3.19: Sierra de Las Peñas y su bajada proximal.

✓ **Unidad II-Bajada parcialmente cubierta**

Se trata de toda el área periserrana, cuyo relieve fue construido por los sucesivos procesos aluviales coluviales y eólicos que fueron acumulando materiales al pie de la sierra. El relieve es fuerte a moderadamente ondulado, con lomas anchas en sentido Oeste -Este y gradientes topográficos del orden de 6 al pie de la sierra y 0,6 % en la bajada distal. Se observan procesos activos de erosión hídrica, en toda esta unidad.

Se subdivide a su vez en dos unidades menores, denominadas Bajada proximal y distal:

- **Subunidad Bajada proximal (IIa)**

Al pie de la sierra, en una franja de alrededor de 0,8 y 1,5 km de ancho, se desarrolla la Bajada proximal fuertemente ondulada, con elevados valores de pendiente, del orden de 3,6 % a 1,6 % al Sur del Arroyo B. del Sauce, y 6 a 0,9 % en la parte norte. El relieve topográfico responde fundamentalmente a la presencia de bloques de basamento cercanos a la superficie y paleovalles cubiertos. Los materiales aflorantes son arenosos muy finos con gravillas dispersas y se observan algunos surcos y cárcavas.

- **Subunidad Bajada distal (IIb)**

Hacia el Este, se encuentra la Bajada distal, con características similares a la proximal, pero con menor grado de pendiente, presentando al Norte del arroyo Boca del Sauce, valores entre 0,6 % y 1,15 % y en la zona sur 2 a 1,1 %. Los materiales aflorantes son similares al ambiente anterior pero disminuyen hacia el Este las gravillas dispersas y afloran sedimentos eólicos más puros.

Esta zona presenta bajos topográficos elongados con procesos de erosión hídrica activa y dirección actual NW - SE, donde se han instalado sistemas de drenaje efímeros, generando cárcavas y surcos de gran envergadura. Se observan además numerosos paleocauces con dirección original SW – NE. Actualmente el desarrollo fluvial es en sentido Este al Norte del área, y hacia el SE, en el sector sur.

Se observan en toda el área de bajada importantes procesos activos de erosión hídrica encauzada (Fig. 3.20). Los rasgos al Sur del arroyo Boca del Sauce se desarrollan sobre un paleocauce con manifestación morfológica importante y relleno sedimentario

detectado en el SEV N°4, realizado por Quintana Salvat (2000) en el área, donde se encontró en este punto, un espesor de 10 metros de rodados gruesos.

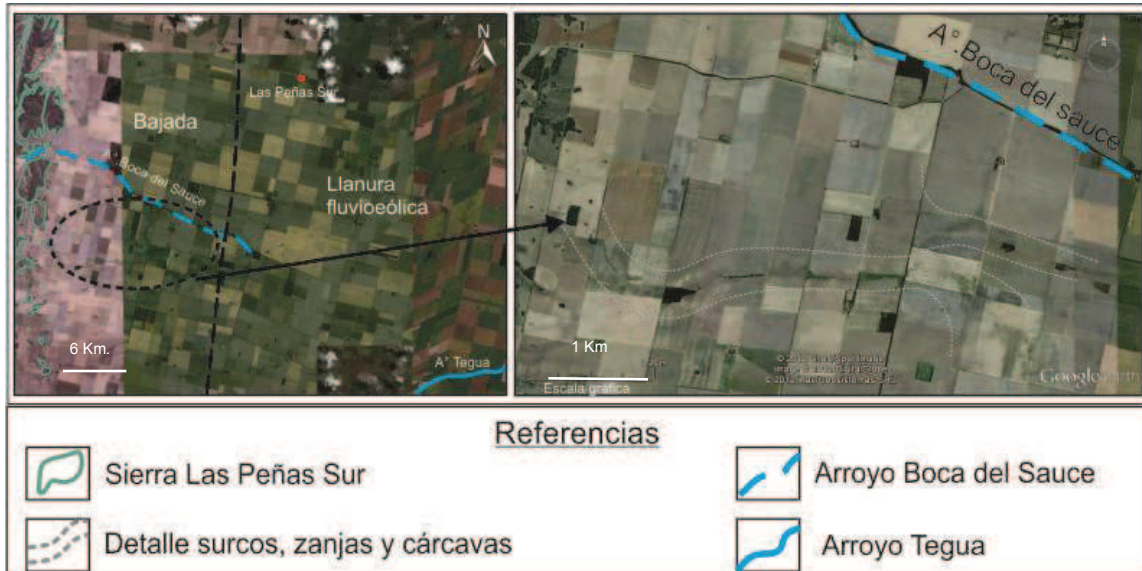


Figura 3.20: Erosión hídrica en la unidad geomorfológica Bajada parcialmente cubierta. Imágenes obtenidas de Google Earth 2013

- **Subunidad *paleoabanico cubierto Boca del Sauce (IIc)***

El paleoabanico cubierto del arroyo Boca del Sauce posee su ápice al pie de la Sierra de Las Peñas, y se desarrolla entre la bajada proximal y distal con una extensión de 7 Km aproximadamente (Fig.3.21).

Este paleosistema aluvial exhibe distributarios con sentido predominante NE, desarrolló entonces un abanico pequeño al pie de la sierra, parcialmente cubierto con depósitos modernos eólicos y aluvio-coluviales. Actualmente la salida de agua de la sierra se encuentra encauzada en el arroyo Boca del Sauce presentando una dirección hacia el SE.

Este abanico se originó en un periodo mas árido, cuando el arroyo Boca del Sauce poco incidido depositaba su carga al perder caudal y pendiente al pie de la sierra, colmatando su cauce, por lo que en sus próximas crecidas, al no poseer capacidad de conducción avulsionaba y generando un nuevo cauce en sucesivos eventos.



Figura 3.21: Paleoabanic Boca del Sauce. Imagen obtenida de Google Earth

✓ **Unidad III: Llanura fluvio eólica**

La llanura fluvio eólica, de relieve suavemente ondulado y pendiente hasta el E-SE, constituye la unidad de mayor expresión areal de la zona y está cubierta en su mayor parte por depósitos eólicos de tipo loésicos, con aporte de material procedente de escurrimientos superficiales efímeros especialmente más al Oeste. Presenta valores de pendiente topográfica entre 0,5-1% al Norte del área, y 0,5% 0,9% al sur del área, debiendo destacarse que se observa un leve aumento del gradiente en el sector oriental debido a la presencia inferida de la falla Las Peñas Sur.

En relación a los procesos activos se observó en toda el área erosión hídrica en manto y encauzada (Fig.3.22). La erosión se produce cuando la escorrentía superficial que se genera durante las lluvias, luego de la saturación del suelo, se mueve pendiente abajo en forma de “láminas” de agua muy delgadas que luego comienzan a concentrarse a partir de pequeñas irregularidades del terreno, formando surcos y luego cárcavas.

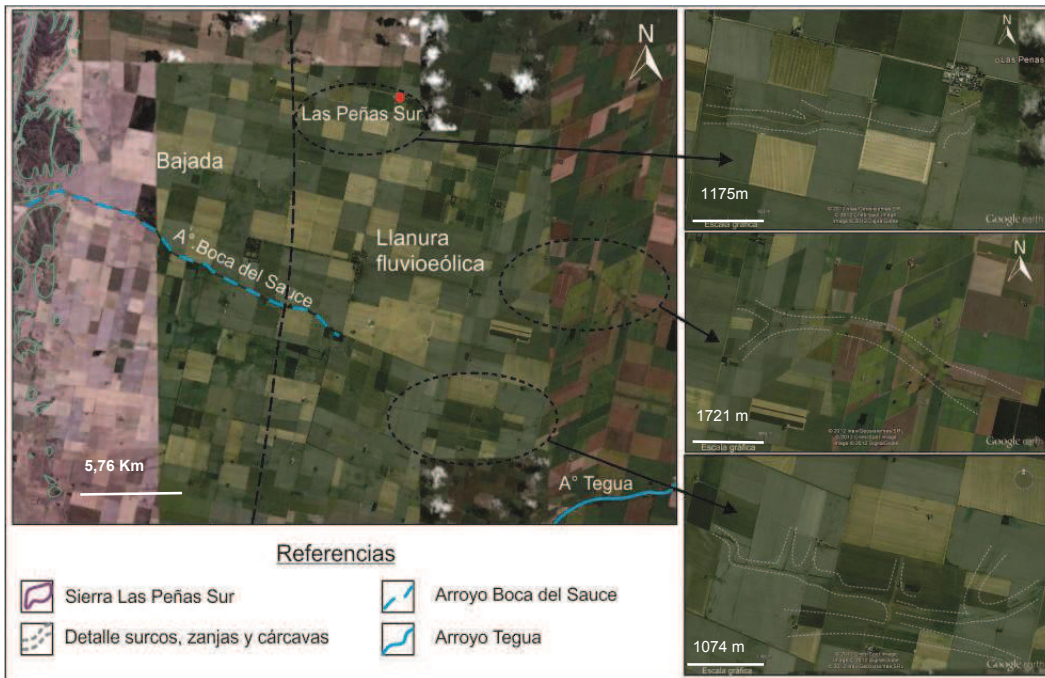


Figura 3.22: Erosión hídrica en la unidad Llanura fluvioeólica zona Las Peñas Sur. Formación de surcos, zanjas y cárcavas. Imágenes obtenidas de Google Earth 2013

También es importante la concentración de escorrentías superficiales en los caminos, generando una importante profundización de los mismos (Fig. 3.23).

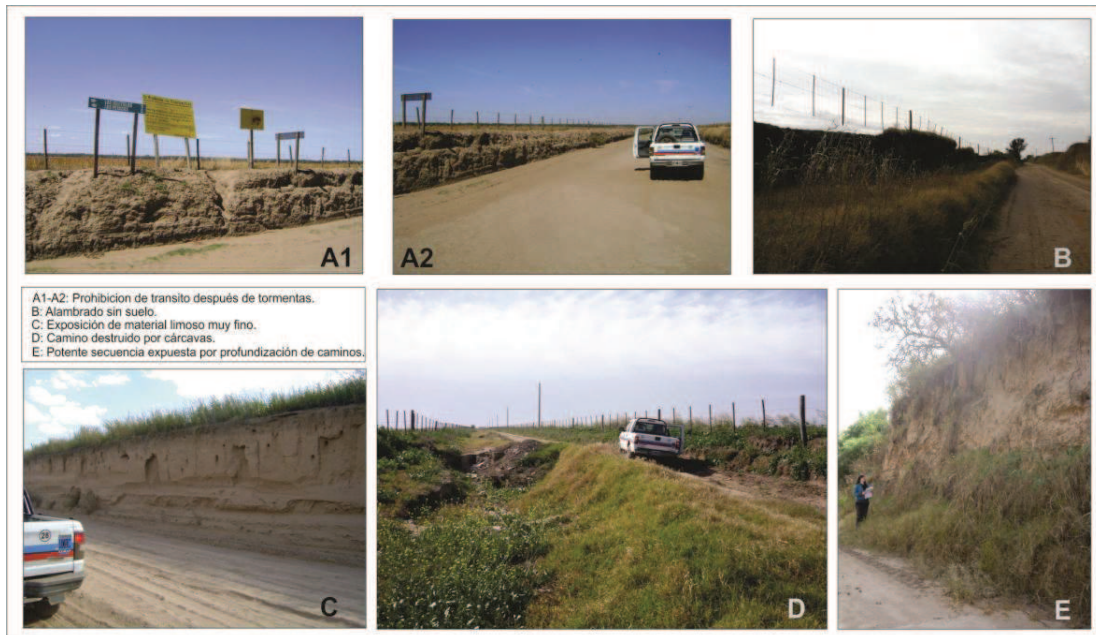


Figura 3.23: A1, A2, B,C E: Profundización de caminos. D- cárcavas por intensa erosión hídrica en zona Las Peñas Sur

Estos procesos de erosión se ven incrementados por la degradación de la vegetación natural como resultado del incremento de las actividades agrícola-ganaderas ocurrido en las últimas décadas, sin la debida aplicación de sistemas de conservación del suelo.

- **Subunidad Lomas estructurales (IIIa)**

El control estructural genera 2 pequeñas lomas, elongadas en sentido NE, generadas por la presencia de estructuras inferidas en sentido NE-SW- Los sedimentos son los ya descriptos para la unidad y los gradientes en inmediaciones de estas lomas son algo mayores (1,3 y 1,5 %). Se destaca que de estas dos lomas estructurales la más importante es la ubicada en el ámbito de descarga del arroyo Boca del Sauce y justamente es debido a la presencia de esta loma que en la actualidad el arroyo derrama hacia el SE.

- ✓ **Unidad IV: Sistema fluvial Boca del Sauce**

Esta unidad fue dividida en dos subunidades, la Faja fluvial actual (Subunidad Va) y los derrames actuales del arroyo Boca del Sauce (Subunidad Vb).

- **Subunidad faja fluvial actual (IVa)**

El arroyo Boca del Sauce, de carácter temporario, tiene su nacimiento en la Sierra de Las Peñas, y su faja actual presenta sentido SE, con un marcado trazado rectilíneo vinculado al control estructural de la falla inferida Boca del Sauce, a la pendiente del área y a que se trata de una incisión vertical reciente con escasa evolución.

La **faja fluvial actual** presenta un canal principal, activo en primavera – verano y durante las tormentas. El cauce tiene morfología de cárcava, poco evolucionada, posee aproximadamente 2-8 m metros de ancho, y barrancas de diferente altura, con valores entre 1,5 (al inicio de su trazado, en la bajada proximal), a 8 metros de altura al finalizar su trazado, generadas por las crecidas extraordinarias de las décadas de los 60´- 80´. Posteriormente a las mismas, se produjo la instalación y el crecimiento de árboles dentro del cauce, algunos superan ya con su porte la altura de las propias barrancas (Fig. 3.25).

En general se observa que los materiales transportados son removilizaciones de sedimentos finos, con gravillas dispersas.

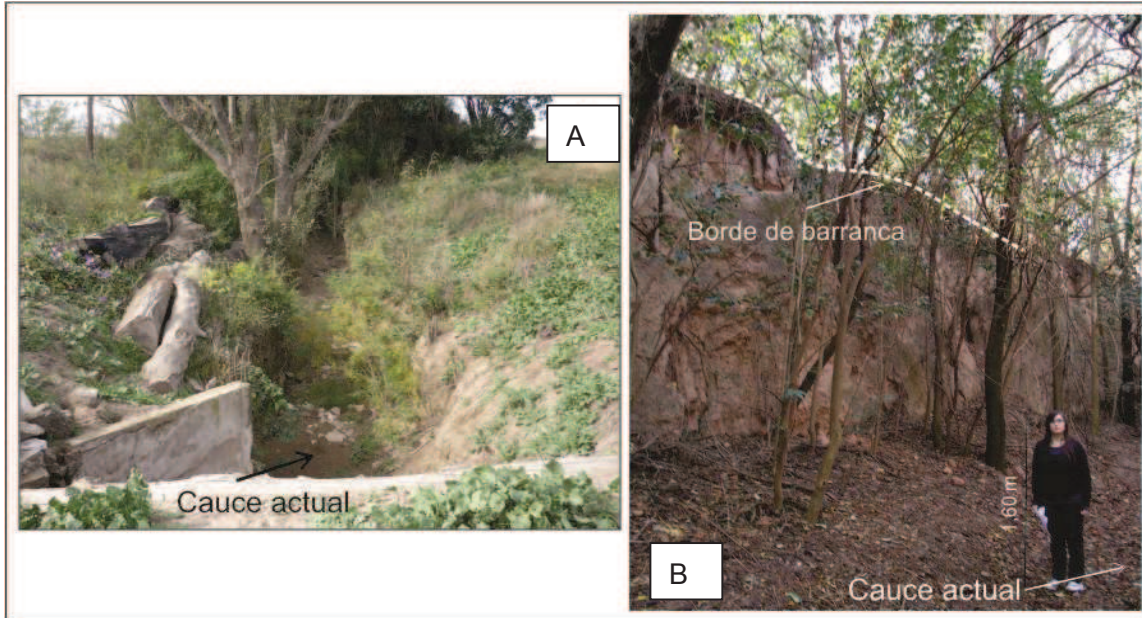


Figura 3.25 Barrancas observadas en el cauce del arroyo Boca del Sauce. **A**-Salida del ambiente serrano. **B**- En la llanura fluvioeólica, al final del trazado.

- **Subunidad Derrames Actuales (IVb)**

Los derrames actuales se ubican al final de trazado del arroyo Boca del Sauce y fueron generados en diversos períodos, hasta la actualidad. En la imagen satelitaria se observa una morfología de canales distributarios de poca expresión topográfica, de diferente coloración y trazado, así como surcos y cárcavas que muestran las distintas vías de derrame de agua y sedimento hacia el SE hacia el arroyo Tegua. (Figura 3.26). Los materiales derramados son los ya explicados transportados por el arroyo.



Figura 3.26: Derrames actuales del arroyo Boca del Sauce. Imagen obtenida de Google Earth

✓ **Unidad V: Faja fluvial actual del arroyo Tegua**

Un pequeño tramo del arroyo Tegua, de carácter permanente, se encuentra al SE del área de estudio. Este curso tiene su nacimiento en las Sierras de Comechingones y se incorpora a la cuenca de la Depresión del Saladillo. El arroyo Tegua posee morfología meandriforme en tramos, y presenta un alto control estructural, observado en las inflexiones del sistema fluvial en su recorrido a través de la llanura.

En el área estudiada es rectilíneo y desarrolla una faja fluvial entre 30 y 110 metros de ancho en los tramos mas sinuosos. En la zona de estudio posee barrancas de 12 a 15 metros de altura, indicando una alta tasa de incisión vertical (Fig. 3.27). Los materiales que actualmente transporta han sido mostrados en el capítulo anterior, y son en general más gruesos que los que se observan en las barrancas

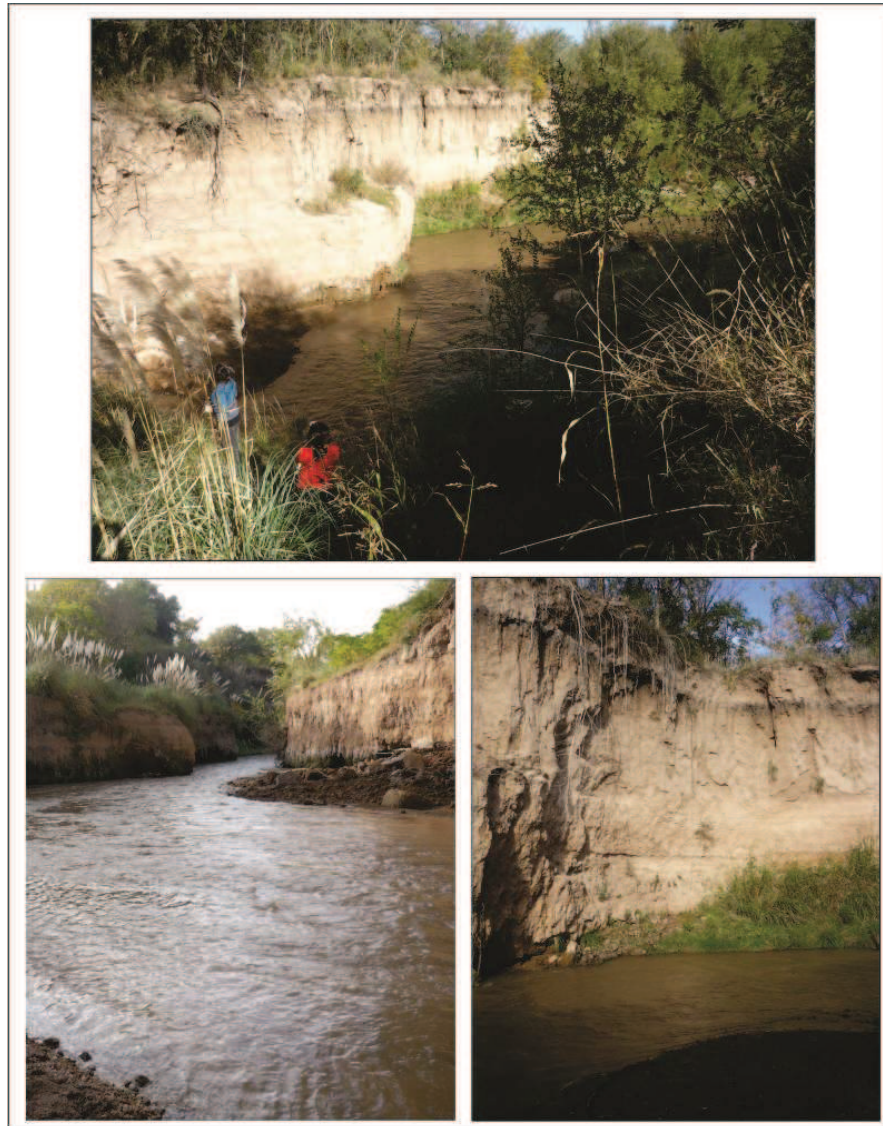


Figura 3.27: Barrancas del arroyo Tegua en la zona de estudio Las Peñas Sur

3.3 - Evolución geológica de la zona de estudio Las Peñas Sur en el marco regional

La historia geológica que se presenta a continuación está basada en las elaboradas por Demichelis (1986), Blarasin (2003), Degiovanni et al. (2005), Tibaldi (2006), Fagiano (2007), Degiovanni (2008), Matteoda (2012), a lo que se suman las evidencias resultantes del trabajo realizado en la presente oportunidad. .

La Sierra de Las Peñas está constituida por un basamento cristalino de edad **Precámbrica – Paleozoica inferior**, constituido principalmente por complejos ígneos-metamórficos (Demichelis, 1986), cuyos protolitos son grauvacas y semipelitas, metamorizadas en facies de anfibolita con transiciones a granulitas (Gordillo y Lencinas, 1979), con intrusiones de cuerpos graníticos y granitoides.

A finales del Paleozoico ya el basamento presentaba la rigidez actual, ocupando parte de la corteza continental elevada. De aquí en más, predominó la fracturación en bloques, originados por los esfuerzos deformantes que actuaban en la faja móvil cordillerana (Gordillo y Lencinas 1979).

Durante el **Mesozoico** existe una tectónica distensiva, vinculada a la apertura del Océano Atlántico que generó procesos de *rifting*, provocando inversiones en algunas estructuras mayores. No se observaron depósitos de esta edad en la zona estudiada.

Durante el **Cenozoico** las reactivaciones tectónicas del área, producto de esfuerzos de orientación principalmente Oeste – Este de la *Orogenia Andina (Oligoceno-Mioceno hasta el Plioceno-Pleistoceno*, Criado Roqué et al., 1981) reinstala un ambiente compresivo y las sierras alcanzan su conformación actual a través de la reactivación de viejas fracturas y generación de otras, dando como resultado una estructura de bloques fallados y basculados hacia el Este, que representan un perfil transversal con una suave pendiente al naciente y abrupta escarpa al poniente (Demichelis, 1986).

Durante el **Mioceno-Plioceno**, se produce la segmentación de los Andes y las suturas eopaleozoicas y las fallas normales **Paleozoicas-Mesozoicas** afectadas por la inversión tectónica se transforman, en su mayoría, en fallas inversas de alto ángulo buzantes al Este, en respuesta a la horizontalización de la placa oceánica de Nazca, a la latitud aproximada de 32° S, evidenciada por un menor engrosamiento cortical y acortamiento de los orogénos (Jordan y Almendinger, 1986). No se observaron depósitos aflorantes de esta edad en la zona relevada.

Durante el **Cuaternario**, la región sufre los efectos de los drásticos cambios climáticos acontecidos durante este período, en el cual dominaron la sucesión de climas áridos y semiáridos con desarrollo generalizado de procesos eólicos que intercalaron con climas húmedos que edafizaron los depósitos eólicos o que reinstalaron procesos fluviales.

Durante el **Pleistoceno medio a superior**, se deposita la Fm. Pampiano, cuyos cambios faciales señalan que transicionalmente las condiciones se fueron tornando más áridas hasta alcanzar un grado que permitió la cementación carbonática de los distintos materiales depositados (Cantú, 1992; Matteoda, 2012). Según Cantú (1992) el techo de la Formación Pampiano es una superficie de erosión de extensión regional. No fue identificado en la zona estudiada.

Por encima se disponen sedimentos pertenecientes al período húmedo del Pleistoceno Superior, representados por secuencias fluviales de distinta energía, pertenecientes a la Formación Chocancharava (Cantú, 1992) que en la zona de trabajo podrían asimilarse a los depósitos encontrados en la base del arroyo Tegua (Fig. 3.10).

Hacia el límite **Pleistoceno-Holoceno**, se instaló en la planicie argentina un ambiente muy árido que generó la depositación de una potente secuencia de materiales loésicos, de gran extensión regional, correspondiente a la Fm. La Invernada (Cantú 1992). Durante este período los sistemas fluviales menores de la zona se obliteraron mientras que algunos intermedios generaron importantes abanicos en la salida extraserrana. Si bien se asumen presentes en el área de estudio, al estar cubiertos por depósitos más nuevos y no ser muy potentes algunos perfiles, no se han observado aflorantes en la zona los típicos depósitos eólicos de este período.

En el **Holoceno bajo y medio** acaecieron condiciones más húmedas, que favorecieron la reinstalación de redes de drenaje (Cantú 1992). Las secuencias fluviales depositadas son de mediana a baja energía y granodecipientes (Fm. Las Lajas), la que se encuentra rellenando gran parte de los valles pleistocenos, indicando una tendencia a la menor disponibilidad de agua y aridización del clima (Cantú 1992). Los depósitos fluviales granodecipientes descritos en el perfil P5 del arroyo Tegua pueden interpretarse como pertenecientes a este período y, probablemente, las partes basales de algunos depósitos de tipo aluvio-coluvial detectado en la base de las barrancas del arroyo Boca del Sauce o en el perfil P2 de un camino (Figura 3.5) sean equivalentes a este período húmedo.

El **Holoceno Superior**, con condiciones climáticas secas y semiáridas, favorece la depositación de secuencias limo arenosas muy finas (Fm. Laguna Oscura). Según Iriondo (1999) este período seco se extendió entre los 3.500 a 1.400 años AP. Esta formación se observó en la mayoría de los perfiles de caminos y cárcavas (P1 P2 P3 P4, Fig. 3.3, 3.5, 3.7 y 3.9) y en el arroyo Boca del Sauce y Tegua (P5 y P6, Fig. 3.10 y 3.13), pero se

destaca que dada la cercanía a la sierra se observa, sobre todo en el ámbito de la unidad geomorfológica Bajada, numerosas gravillas dispersas, no pareciendo un eólico tan puro y típico. Sí adopta características más típicas de esta formación hacia el este aunque los espesores aflorantes son menos potentes.

Después de 1400 AP, se instalan las condiciones climáticas actuales, predominantemente húmedas. Esto favoreció la formación de suelos de mediano desarrollo (Hapludoles y Haplustoles dominantes) en los interfluvios y la reinstalación de las redes de drenaje actuales. Los materiales palustres del perfil del arroyo Tegua podrían corresponder a este periodo (Perfil P6, Fig. 3.13).

Este ciclo húmedo fue interrumpido en tiempos históricos, por condiciones más áridas asociadas a un nuevo avance glaciario, que se conoce internacionalmente como *Pequeña Edad de Hielo* (800-200 años AP, Iriondo 1999) (Degiovanni et al. 2005), cuya incidencia más importante en el relieve es la removilización de materiales eólicos formando médanos, que no se observan en el área de estudio. También el abanico serrano cubierto (unidad geomorfológica III, Fig. 3.2.1.C) podría corresponderse con la edad de Hielo, en la que, al haber menos disponibilidad de agua, derramó en cercanía de la sierra, aunque es una hipótesis que debería comprobarse con trabajos más específicos, ya que podría ser incluso más viejo.

Los sedimentos modernos corresponden a la parte superior del Holoceno, desde la instalación del clima Atlántico actual y cubren a los depósitos anteriores, están vinculados al funcionamiento de los sistemas eólicos y fluviales actualmente instalados. Son de escaso espesor y no han sido nominados formalmente (Blarasin, 2003). Se destaca que en toda la zona estudiada los perfiles muestran en la parte superior, una superficie erosiva y por encima depósitos aluviales actuales laminados (perfiles P2, P3, P4 y P6, Fig. 3.5, 3.7, 3.9 y 3.13). Con posterioridad y dado el comienzo de un marcado ciclo húmedo regional en la década del 70, los escurrimientos incidieron nuevamente, profundizando caminos y reinstalándose arroyos, en algunos casos en antiguos cauces, lo que se observa claramente en los arroyos.

Capítulo 4

Hidrometeorología

4.1 - Hidrometeorología Regional

4.1.1 - Clima

La provincia de Córdoba, debido a su latitud, se encuentra situada íntegramente dentro de la zona de climas templados de Argentina, con caracteres específicos de una provincia mediterránea. El clima está regido por cuatro centros de acción, permanentes o semipermanentes, dos de alta presión (el anticiclón del Atlántico y el del Pacífico) y dos de baja presión (los ciclones de las depresiones del Noroeste y de la extremidad Sur del país), (Capitanelli, 1979).

En función de variantes de relieve, procedencia de masas de aire y procesos meteorológicos es posible distinguir variaciones en las condiciones climáticas. En general, el Sur provincial se caracteriza por una gran uniformidad térmica y una concentración estival de las precipitaciones. El régimen térmico se caracteriza por un invierno riguroso y un verano medianamente cálido (Capitanelli, 1979).

4.1.2 - Temperatura

La distribución de temperaturas media, máxima y mínima en la llanura del Sur de Córdoba (Figura 4.1), presenta un comportamiento en general homogéneo, siendo los

valores inferiores a 17°C, 25°C y 10°C,

respectivamente.

En sierra, las temperaturas medias son del orden de 16°C,

las máximas de 20°C y las mínimas de 9°C, y decrecen hacia el nivel de las

altiplanicies

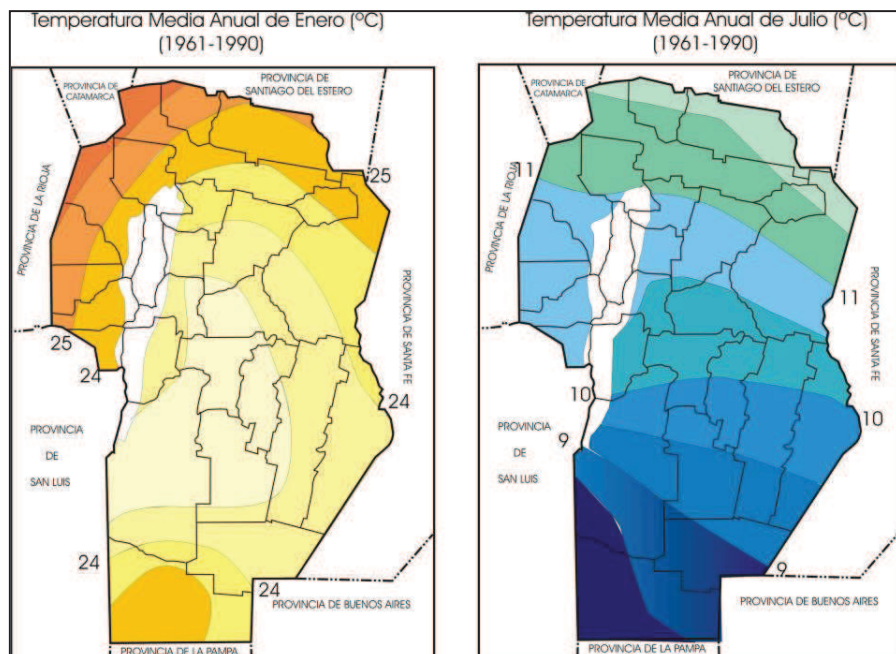


Figura 4.1. Temperaturas medias de los meses de Enero y Julio.

Fuente: Gorgas et al. 2003

(2.200 m aprox.) a 10°C, 14°C y 5°C, respectivamente (Capitanelli, 1979).

En todo el Sur provincial, el verano térmico (temperatura media de más de 20°C en verano) se extiende aproximadamente entre los meses de Octubre/Noviembre y Marzo/Abril y el invierno térmico (temperatura media inferior a 10°C en invierno) entre Junio y mediados de Agosto (Capitanelli, 1979). En general, en los ambientes de llanura se suelen registrar heladas desde el mes de Mayo hasta Septiembre, período que en las sierras se extiende desde Marzo/Abril hasta Octubre /Noviembre (Capitanelli, 1979).

4.1.3 - Vientos

En la región, más del 80% de los días son ventosos, con una concentración máxima a fines de invierno-primavera. Predominan los vientos provenientes de los cuadrantes N/NE-S/SE con velocidades medias que, en la mayoría de los meses, superan los 10 km/h, pudiendo producirse ráfagas en temporales de más de 100 km/h (Capitanelli, 1979).

4.1.4 - Precipitaciones

Según Capitanelli (1979), las precipitaciones en la provincia de Córdoba provienen principalmente del Anticiclón del Atlántico, correspondiendo el 70 % de la precipitación media anual de la provincia a los procesos frontales (Figura 4.2), es decir con la intervención de más de una masa de aire. El proceso frontal que más agua produce es el de frente caliente y le sigue el de frente frío, los procesos afectados por el relieve producen los porcentajes más bajos. Como valor promedio para la región, este mismo autor establece que del total de lluvia anual, el 82 % se concentra en primavera-verano, mientras que en otoño-invierno sólo precipita el 18 % restante.

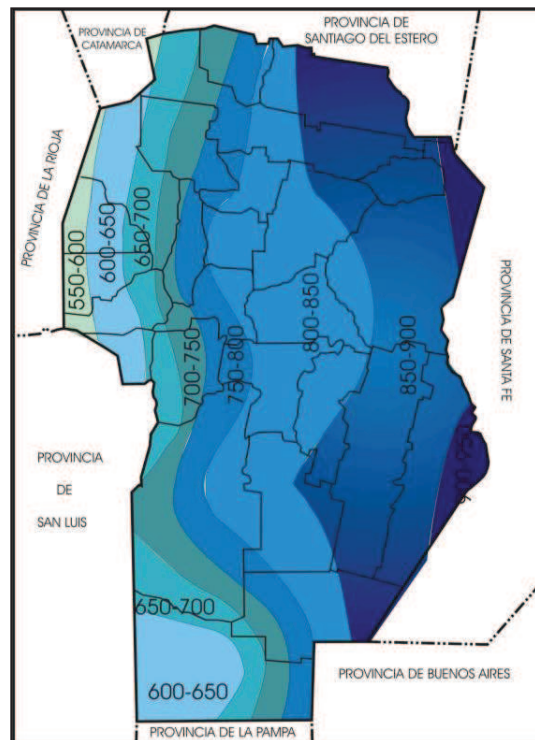


Figura 4.2 Precipitación Media Anual (mm). Serie 1961-1990. Provincia de Córdoba. Fuente: Gorgas et al. (2003).

Los resultados presentados por Blarasin (2003), Cantú (1998) y Fili, et al. (2000) al analizar series representativas de las distintas condiciones climáticas de la región muestran un notorio incremento de las precipitaciones en la segunda mitad del siglo pasado en relación al período anterior, fundamentalmente en los últimos 25 años.

4.1.5 - Evapotranspiración Potencial

La evapotranspiración potencial media anual para toda la llanura y piedemonte del Sur provincial es del orden de 820 mm (Capitanelli, 1979), excepto en la porción Sudoeste en donde las necesidades de agua superan los 850 mm (Figura 4.3) En las sierras, los valores obtenidos en función de las temperaturas registradas y de la variabilidad de factores geomorfológicos, de altitud y exposición, varía entre 688 y 794 mm. Se observa, en general, una disminución de dichos valores hacia las cumbres y altiplanicie.

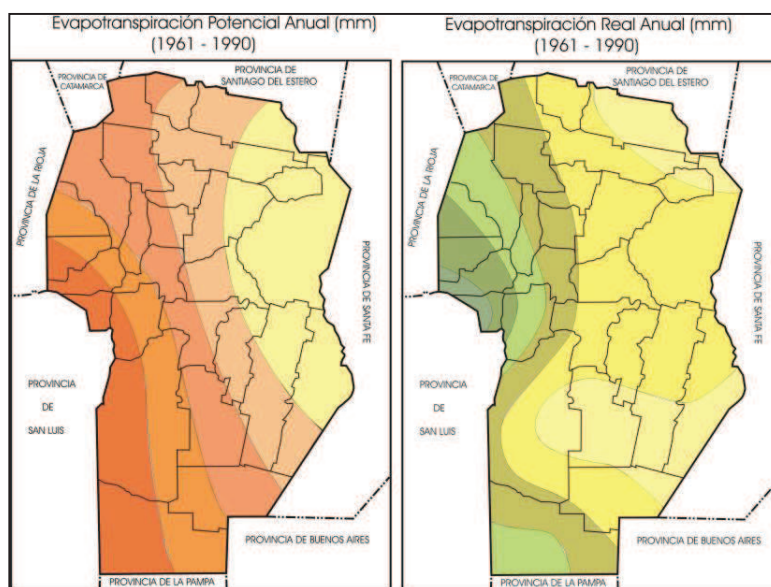


Figura 4.3 Evapotranspiración Potencial anual en la provincia de Córdoba. Fuente: Gorgas et al. 2003.

4.2 - Hidrometeorología local

Los datos usados para realizar los cálculos hidrometeorológicos, fueron provistos por un particular (Hortal Bianchi y CIA. S.A.) y abarca los años 1990-2012, con los cuales se realizaron los cálculos y gráficos hidrometeorológicos correspondientes.

No se obtuvieron datos de temperaturas en la zona, por lo que los valores de este parámetro, son tomados de la serie UNRC Río Cuarto, no sólo por la confiabilidad de los datos sino fundamentalmente por la uniformidad de las temperaturas medias en la región (Gorgas et al. 2003).

4.2.1 - Análisis de precipitaciones

La precipitación media anual (PMA) para el período de registros (Figura 4.4) es de 748,48 mm. En el gráfico se observa una sucesión de ciclos secos y húmedos, donde se destacan con posterioridad a un año muy seco (1990), 2 años húmedos (1991-92) por encima de la PMA que pasan a un ciclo seco prolongado. Se destaca el año 1994 como el más seco, con un valor anual de 593 mm, formando parte de un ciclo de 5 años por debajo de la PMA, desde 1993 a 1998. Esta fase es seguida de un ciclo húmedo correspondiente a 1999 y 2000, donde se registra para 1999 una precipitación de 1067 mm, siendo el valor más alto de la serie.

Luego durante los años 2001 a 2005 las precipitaciones se mantienen en general cercanas a la precipitación media anual, hasta los años 2006 a 2008 donde se observa un nuevo ciclo húmedo, con valores por encima de la PMA. Los años siguientes muestran una notable disminución de las precipitaciones, 2010 y 2011 con valores muy por debajo de la PMA y un incremento en el año 2012.

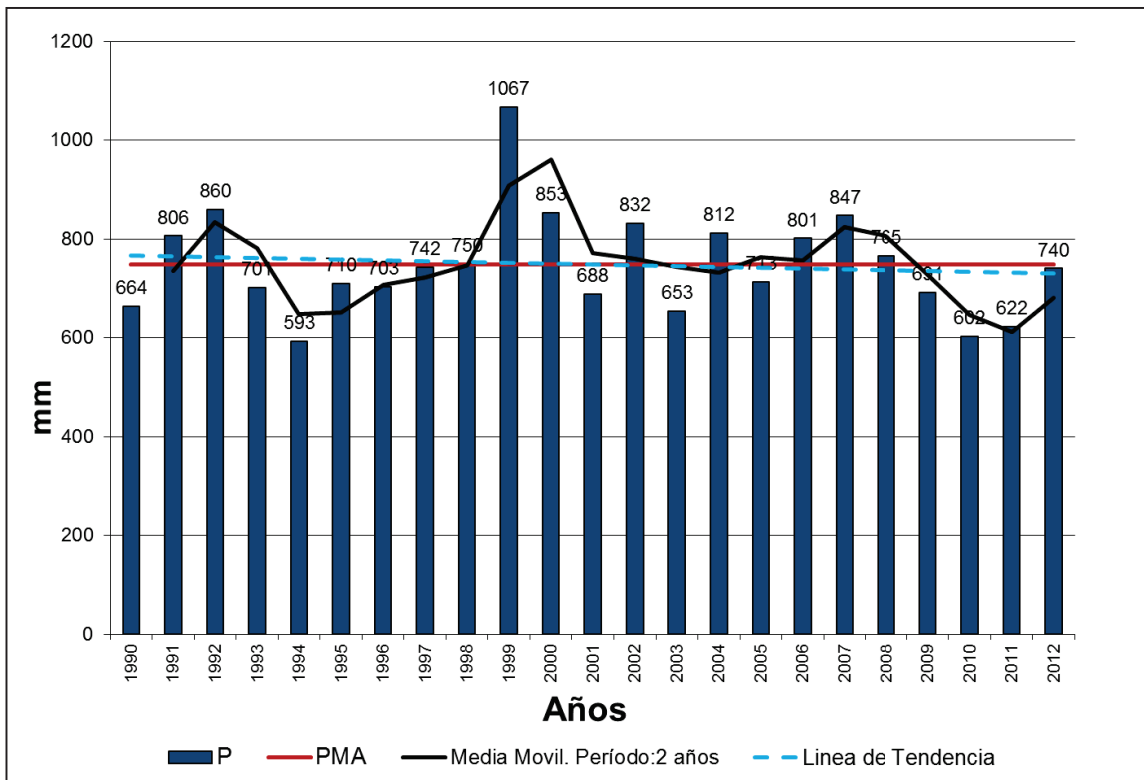


Figura 4.4: Grafico cronológico de precipitaciones medias anuales. Serie 1990-2012 Las Peñas Sur

La línea de tendencia es muy levemente decreciente, influenciada en gran parte por el descenso de las precipitaciones en el último período de 4 años.

En cuanto a la distribución de las precipitaciones a lo largo del año, se observa una concentración en

los meses de primavera-verano, con un porcentaje del 83%, y en los meses de otoño-invierno el 17% del total de precipitaciones anuales. El mes de Enero es el que presenta mayores precipitaciones (136,5 mm) en promedio y el mes de Junio es el de menor concentración de lluvias, con valor promedio de 4,9 mm (Fig. 4.5).

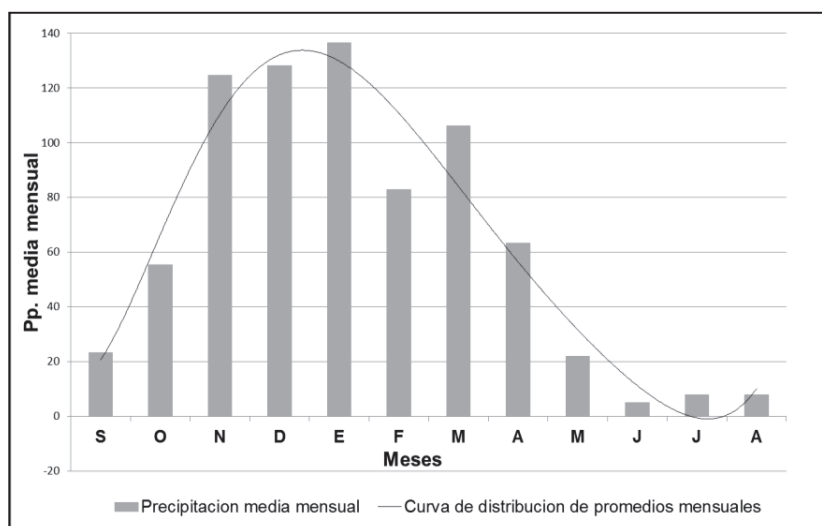


Figura 4.5: Precipitaciones medias mensuales Serie 1990-2012 Las Peñas Sur

4.3 Balance Hídrico Seriado

Para la realización de este Balance Hídrico Seriado edáfico se empleó el programa Pdimes (Ravelo, 1990). El mismo utiliza valores mensuales de precipitación y tiene en cuenta el contenido de agua útil en el suelo, con un valor de 150 mm (utilizado para suelos franco arenosos finos con profundidad de enraizamiento del orden de 1 m, según datos de las cátedras de Climatología y Fenología Agrícola de la UNRC).

Las variables de entrada, para realizar el cálculo, son la precipitación y la evapotranspiración potencial de cada mes y se obtienen la evapotranspiración real, los excesos y déficit hídricos. Los resultados del balance puede observarse en la Figura 4.6 A y B, mientras que las planillas obtenidas se presentan en el Anexo I. En términos generales, y como se observa en planillas y gráficos, las épocas de déficit hídrico corresponden al período de invierno mientras que las de excesos se dan principalmente durante el verano

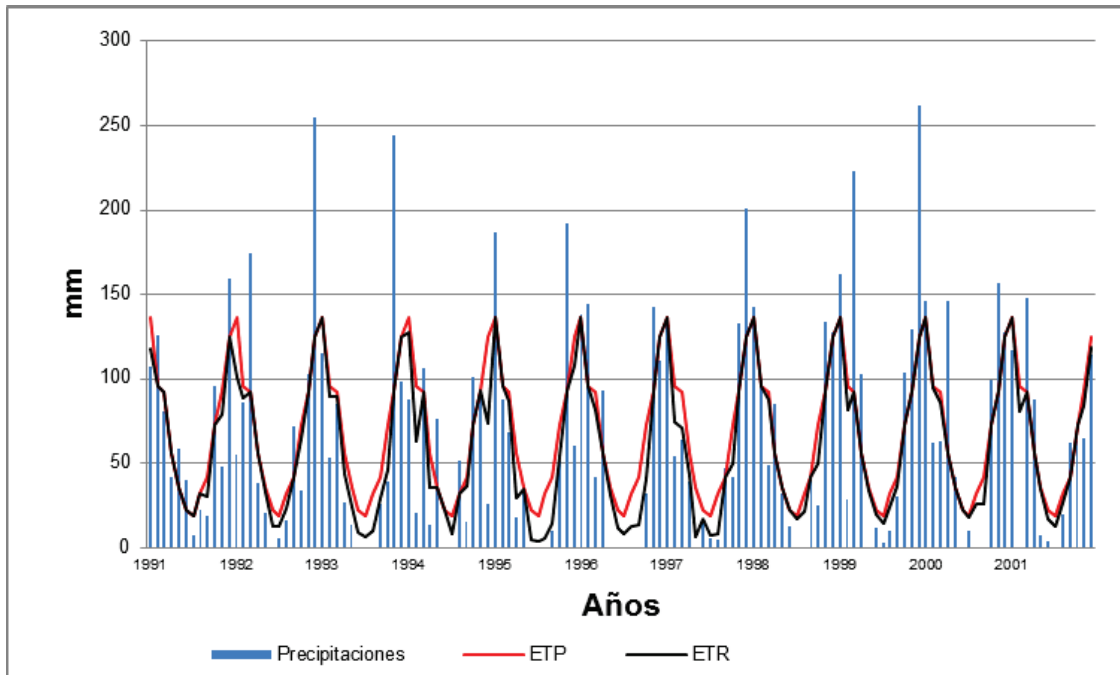


Figura 4.6.A Balance hídrico seriado periodo 1991-2001 las Peñas Sur

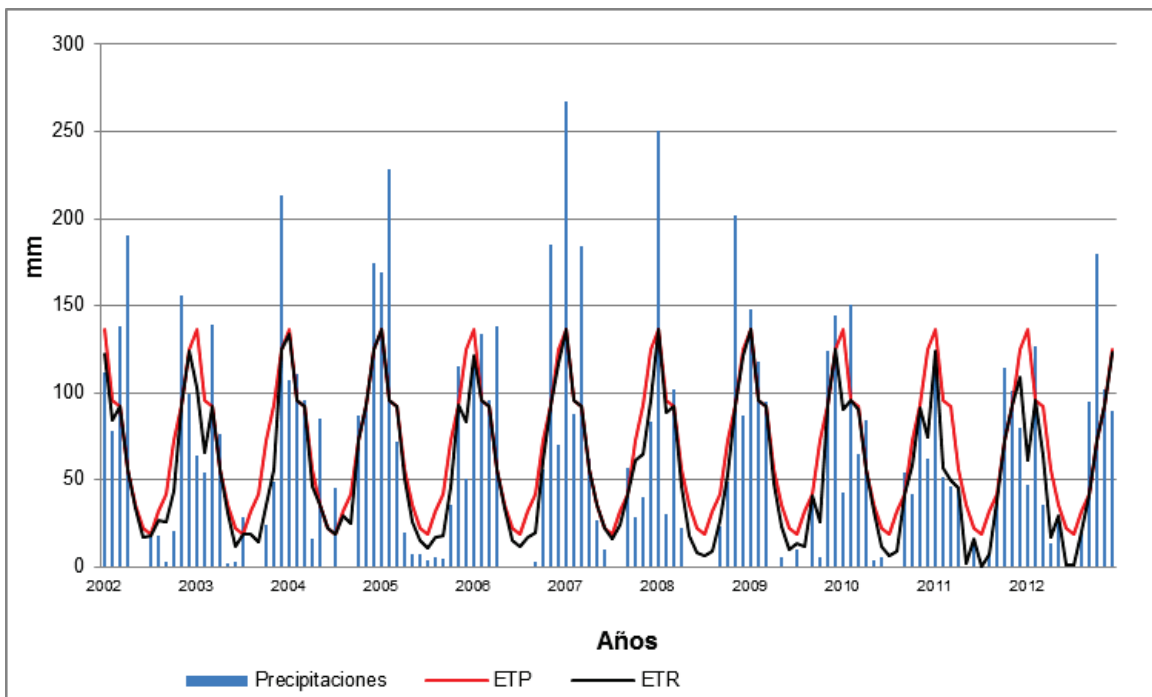


Figura 4.6.B Balance hídrico seriado periodo 2002-2012 Las Peñas Sur

Los excesos hídricos son de suma importancia ya que constituyen la fuente de agua de los escurrimientos superficiales y de los sistemas acuíferos, a través de la infiltración eficaz.

En la gráfica de excesos hídricos (Fig.4.7) se observa pocos excesos hídricos en los años analizados, concentrados en el periodo de 1993-1994, 1999 a 2001 y 2005-2007 y dados principalmente en los meses de primavera – verano

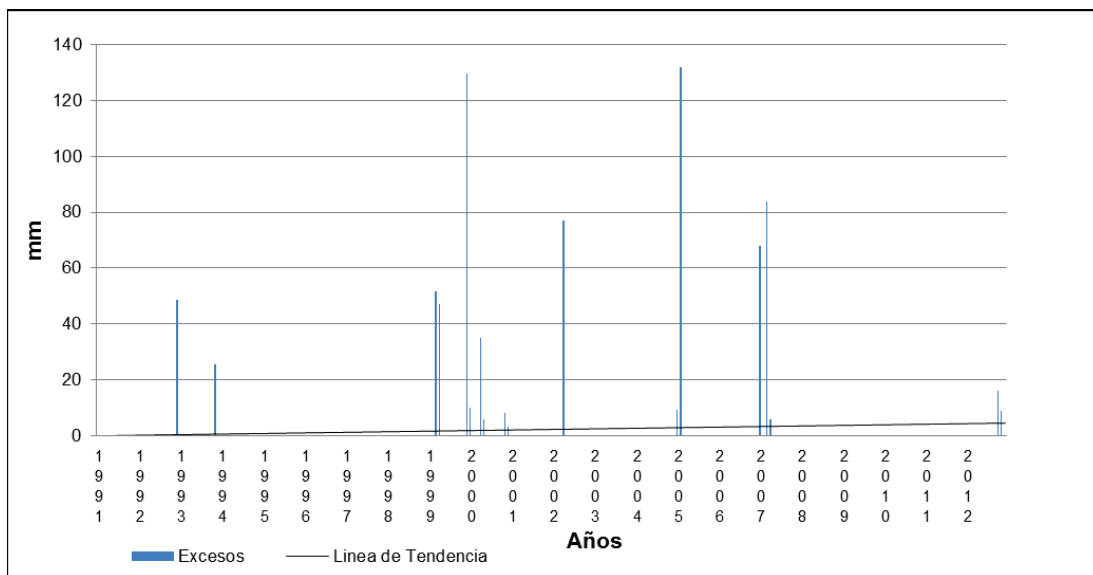


Figura 4.7: Excesos hidricos de la serie 1990-2012 de Las Peñas Sur

La línea de tendencia es muy levemente creciente, si bien en los últimos años se registra un descenso de las precipitaciones acorde a lo observado en otros sitios de la región (Blarasin et al., 2011).

En términos generales, esta tendencia ascendente en los excesos hídricos es coherente con el ascenso de niveles freáticos verificado a campo, ya que la mayoría de los pozos medidos tenían agua en el antepozo (en algunos importante cantidad y espesor), demostrando el ascenso en relación a algunas décadas atrás, cuando estos pozos fueron cavados. En principio y con los datos disponibles puede interpretarse que el principal responsable de esta situación es el período de excesos que se extiende entre 1999 y 2007. Sin embargo, en toda la región fue reconocido (Blarasin, 2003, Blarasin et al., 2005) que el aumento gradual de niveles freáticos fue causado por el constante incremento de excesos hídricos ocurrido durante las últimas 5 décadas.

Capítulo 5

Hidrología
superficial y
subterránea

5.1 - Hidrología Regional

5.1.1 - Hidrología superficial

La mayor parte de los cursos de agua del Sur de Córdoba poseen sus nacientes en las Sierras de Comechingones. En los tramos medios reciben el aporte freático por lo que adquieren carácter permanente. Algunos sistemas nacen en área de llanura por afloramiento del acuífero freático en áreas deprimidas, en general de origen tectónico (Fig. 5.1.)

Las precipitaciones, concentradas en los meses de primavera-verano, y la ocurrencia de tormentas de alta intensidad, generan que la mayor parte de los sistemas fluviales posean régimen torrencial lo cual se ve favorecido por las características geológicas y el modo de ocupación del territorio en los distintos ambientes (Blarasin et al., 2003).

En la región serrana, debido a la presencia de rocas de muy baja permeabilidad, las altas pendientes del terreno y el deterioro de la cubierta vegetal, por sobrepastoreo, quemas reiteradas, etc., se generan escurrimientos rápidos, concentrados en cortos períodos de tiempo, por lo que se producen crecidas muy importantes con alta carga de sólidos suspendidos. La mayoría de estas cuencas se resuelve en un único

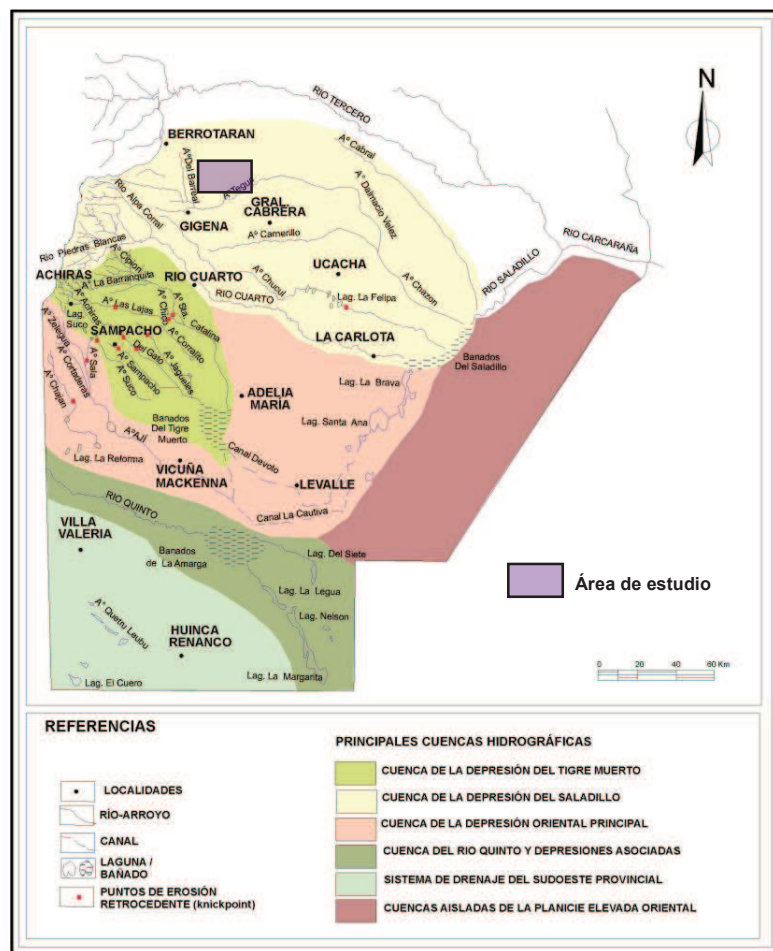


Figura 5.1-Mapa hidrográfico del Sur de Córdoba. Tomado de Degiovanni (2005).

colector a la salida de las sierras lo cual potencia el pico de las crecientes y sus consecuencias aguas abajo.

La mayor parte de los sistemas fluviales derraman sus aguas en las llanuras deprimidas del centro-Este de la provincia: los Bañados del Tigre Muerto, la depresión principal donde se aloja el sistema de lagunas La Chanchera - Santa Brava y los Bañados del Saladillo, el sistema lagunar La Felipa y la Depresión de las lagunas interconectadas de Bouchardo (Figura 5.1). Estas unidades morfotectónicas deprimidas se caracterizan por la presencia de gran número de lagunas y bañados que hasta hace poco tiempo constituían el nivel de base de los principales cursos superficiales. En la actualidad sólo conservan parcialmente su función de verdaderos humedales, receptoras de aguas y sedimentos, ya que integran redes de flujo en tránsito hacia depresiones mayores o ríos colectores, debido a que en la actualidad y con el afán de aumentar las tierras agrícolas, se encuentran canalizadas y por lo tanto aportan a la cuenca del río de La Plata, perdiendo de este modo el gran valor ecológico que implica el funcionamiento como humedales (Degiovanni y Blarasin, 2005).

Respecto a la calidad del agua de los ríos y arroyos del Sur de la provincia de Córdoba, la mayoría presentan buena calidad, con tenores salinos que varían entre 200 mg/L (sector serrano) y 1.500 mg/L (en áreas de desembocadura). Se trata en general de aguas bicarbonatadas desde sus nacientes a sus desembocaduras, aunque en cuencas medias y bajas aumentan los contenidos de sulfatos y cloruros, debido también a que reciben el aporte del agua freática, sin que por ello se produzcan cambios en el carácter geoquímico. En el área serrana son del tipo cálcicas haciéndose sódicas hacia los sectores más bajos de la llanura (Blarasin, 2003).

Las lagunas, de muy variado tamaño y volumen, contienen aguas de baja salinidad en las zonas medanosas (más saladas cuando están vinculadas al acuífero freático), hasta muy saladas al oriente provincial. Estas últimas son de régimen permanente por aporte freático y por sufrir procesos de evaporación, con aguas de tipo geoquímico sulfatado y/o cloruradas sódicas (Blarasin et al., 2003).

5.1.2 - Hidrología subterránea

5.1.2.1 - Características hidrolíticas e hidroestratigráficas

Las estructuras geológicas de carácter regional, por haber sido un condicionante fundamental en la evolución geológica cuaternaria y pre-cuaternaria y en la sedimentación tanto marina como continental de la región, han influido en la actual disposición del agua superficial y subterránea. Con el objetivo de definir la hidroestratigrafía de los depósitos aflorantes y de los materiales identificados hasta los 400 metros de profundidad, Blarasin et al. (2000) y Blarasin (2003) interpretaron numerosas perforaciones y elaboraron un modelo conceptual hidrogeológico a nivel regional (Fig. 5.2).

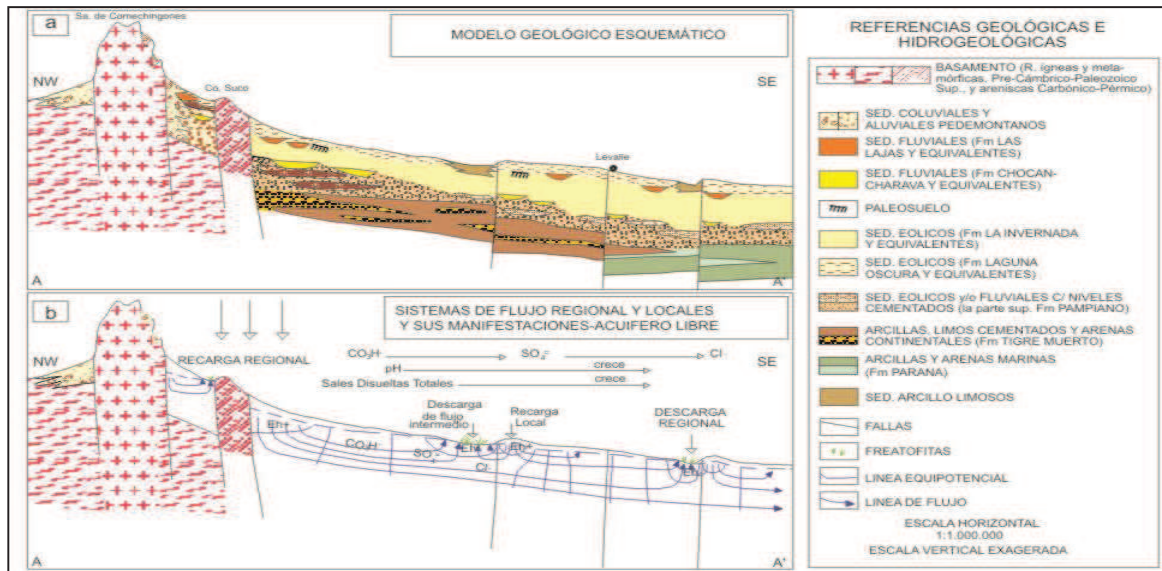


Figura 5.2: Esquema geológico e hidrogeológico regional. Sector Sur. Provincia de Córdoba. Blarasin (2003).

En este esquema hidroestratigráfico regional, el acuífero freático se aloja en los materiales cuaternarios eólicos y fluviales de origen continental. Por debajo, en algunos sectores, existen acuíferos semiconfinados. Los materiales de mejor aptitud acuífera (Formación Chocancharava, Formación Las Lajas y otros de granulometrías gruesas sepultados a diversas profundidades), con alta conductividad hidráulica y transmisividad, están fundamentalmente vinculados a las fajas fluviales de los principales ríos y arroyos. El resto de los materiales, eólicos y aluviales finos, alojan un acuífero freático de

características pobres: Formación La Invernada, Formación Laguna Oscura, etc. (Blarasin et al., 2003).

A mayor profundidad se distinguen dos ambientes diferentes de sedimentación, de origen marino (Fm. Paraná) y continental (Fm. Tigre Muerto) para el sector oriental y occidental de la provincia respectivamente (Blarasin, 2003), de edad terciaria, en donde se ubican los principales acuíferos confinados de la región.

La base del acuífero libre se conoce en líneas generales para grandes sectores y con cierto detalle para otros. De acuerdo a los datos aportados por las perforaciones disponibles, se trata de una formación acuícluda de materiales arcillosos yacente a una profundidad muy variable. En otros casos puede también estar constituido directamente por el basamento, en particular en áreas pedemontanas de la sierra de Comechingones y Las Peñas, donde el hidroapoyo se encuentra a profundidades variables como consecuencia del control estructural regional (Blarasin *et al.* 2003).

5.1.2.1.1 Acuífero libre

5.1.2.1.1a Acuífero libre en zona serrana

✓ *Acuífero en medio fracturado*

El sistema de fracturas y diaclasas que poseen las rocas del basamento aflorante en las sierras, da origen a un sistema acuífero con permeabilidad secundaria, libre (con niveles freáticos virtuales), de cualidades pobres en cuanto a su capacidad para conducir el fluido, pero de importancia en la dinámica hidrológica regional y local y en las características químicas del mismo.

✓ *Acuífero en medio clástico*

Está constituido por los sedimentos de edad cuaternaria que rellenan los valles intermontanos y se alimenta de la infiltración de lluvias locales y del aporte de agua de las rocas circundantes. Los materiales que rellenan los valles son limo-arenosos, arenosos y areno-gravosos y de acuerdo a sus características se le adjudican conductividades hidráulicas medias a altas (1-10 m/día), (Blarasin *et al.*, 2005)

5.1.2.1.1b - Acuífero libre en zona de llanura

✓ *Acuífero en fajas fluviales más importantes*

Se trata de sectores que bordean el río Cuarto y otros cursos importantes. Los materiales de estos depósitos son gruesos (arenas finas, gruesas y gravas) vinculados a paleocauces que alojan excelentes acuíferos dado su buen rendimiento y también calidad.

El espesor medio de estas formaciones se encuentra entre 20-40 m, la conductividad hidráulica entre 5 y 50 m/día y la transmisividad alcanza de 100 a 4000 m²/día. (Blarasin, 2003)

✓ *Acuífero libre en el resto de la llanura cordobesa*

Corresponde a sedimentos fluviales en posiciones medias y distales y las planicies intermedias, deprimidas y mal drenadas compuestas por materiales eólicos. En general estos acuíferos son homogéneos y están compuestos por sedimentos arenosos finos, limosos y limo arcillosos, con niveles de cementación carbonática. Se trata de formaciones de origen eólico de tipo loésicos.

Presenta una conductividad hidráulica de 10⁻³ hasta 1-4 m/día. Los bajos valores de K se compensan con grandes espesores que proporcionan mayor transmisividad (Blarasin, 2003).

5.1.2.1.2 - Acuíferos confinados

Los acuíferos confinados yacen a diferentes profundidades, en general por debajo de los 120 metros, y poseen características hidráulicas y químicas muy variables, condicionadas por la historia geológica de la región, (Blarasin *et al.*, 2005).

5.1.2.2 Hidrodinámica subterránea regional

La configuración geológico-geomorfológica en bloques que basculan al Este-Sudeste, es el principal condicionante de los flujos intermedios y regionales del agua subterránea. En general, el agua del acuífero freático circula en una dirección NO-SE,

distinguiéndose niveles locales, intermedios y regionales que interactúan con el ambiente (Blarasin, 2003).

La profundidad a la que se puede encontrar el nivel freático en el área está fundamentalmente condicionada por el relieve y varía en respuesta a las lluvias de las estaciones y años más húmedos. Las mayores profundidades se detectaron en las zonas próximas a las sierras, con valores de 90 a 30 metros en bloques elevados menores. En las áreas deprimidas se registran profundidades someras o afloramiento del agua.

En cuanto a la morfología de la superficie freática, es muy variable y dependiente de la topografía (Fig.5.3).

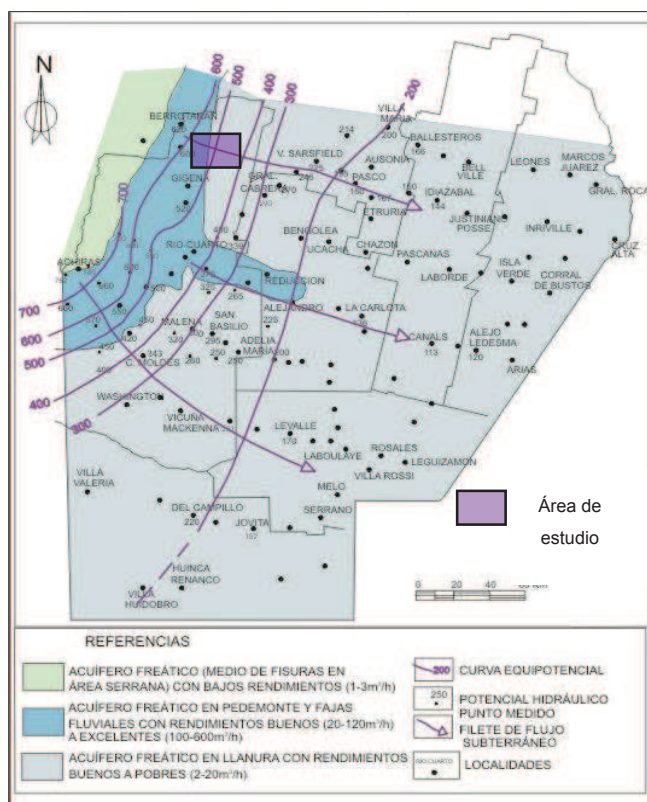


Figura 5.3: Mapa de equipotenciales del Sur de Córdoba (extraído de Blarasin, 2003)

5.2 Hidrología Local

5.2.1 Aspectos hidrográficos e hidrodinámicos superficiales

Para poder interpretar el comportamiento hidrológico del área, se realizó en una primera etapa el mapa de escurrimientos superficiales (Fig. 5.4), en el que se marcaron en bajos topográficos, todas las líneas de escurrimiento, discernibles a la escala utilizada, que se consideran funcionales durante las tormentas. En este caso todos resultaron escurrimientos efímeros, con excepción del arroyo Tegua, tal lo evaluado e interpretado de las cartas topográficas y en el relevamiento de campo. En el mapa se observa la

divisoria de aguas superficiales con dirección general EO, que genera un sentido de escurrimiento hacia el SE, al Sur de la divisoria, y hacia el E en la zona norte de la misma.

En general, la dinámica del escurrimiento superficial efímero en los bajos topográficos es de modalidad mantiforme, que luego se concentra, en numerosos sectores, con caudales de gran magnitud en épocas de lluvias, produciendo una importante erosión hídrica, observable en procesos de profundización de caminos, desarrollo de surcos y cárcavas. (Ver Cap.3, Fig.3.20 y 3.22).

El **arroyo Boca del Sauce**, de régimen efímero, tiene su nacimiento en la Sierra de Las Peñas y presenta un trazado rectilíneo con dirección SE. En las estaciones húmedas, evacua elevados caudales, habiendo desarrollado barrancas de diferente altura. Al Oeste del área, en su nacimiento, poseen aproximadamente 1,5 - 2 metros, en la zona media alrededor de 8 metros y pierden nuevamente importancia en el tramo distal (ver Cap. 3 Fig.3.25)

No se pudo realizar un aforo en este arroyo debido a que en los viajes a la zona nunca se encontró agua en el cauce.

El **arroyo Tegua**, de carácter permanente, se encuentra al SE del área de estudio, tiene su nacimiento en las Sierras de Comechingones y posee tres afluentes, arroyo El Cano, Mosuc Mayú y El Barreal. El Tegua se incorpora a la cuenca de la Depresión del Saladillo, y se integra a la cuenca del Plata a través del río Saladillo (Degiovanni, 2005).

El área estudiada toma parte de un pequeño tramo del arroyo Tegua, de carácter permanente por aporte freático, con nacientes en las Sierras de Comechingones; morfología meandriforme en tramos, pero rectilíneo en el área estudiada, debido a un alto control estructural. Posee barrancas de 15 a 17 metros de altura, indicando una alta tasa de incisión vertical y es el receptor de los escurrimientos superficiales de la mitad Sur del área evaluada.

Se realizó un aforo (ver ubicación en Fig. 5.4) en el mes de Mayo, calculándose con el método de la sección media, un caudal de **1,01 m³/s** (Fig.5.5)

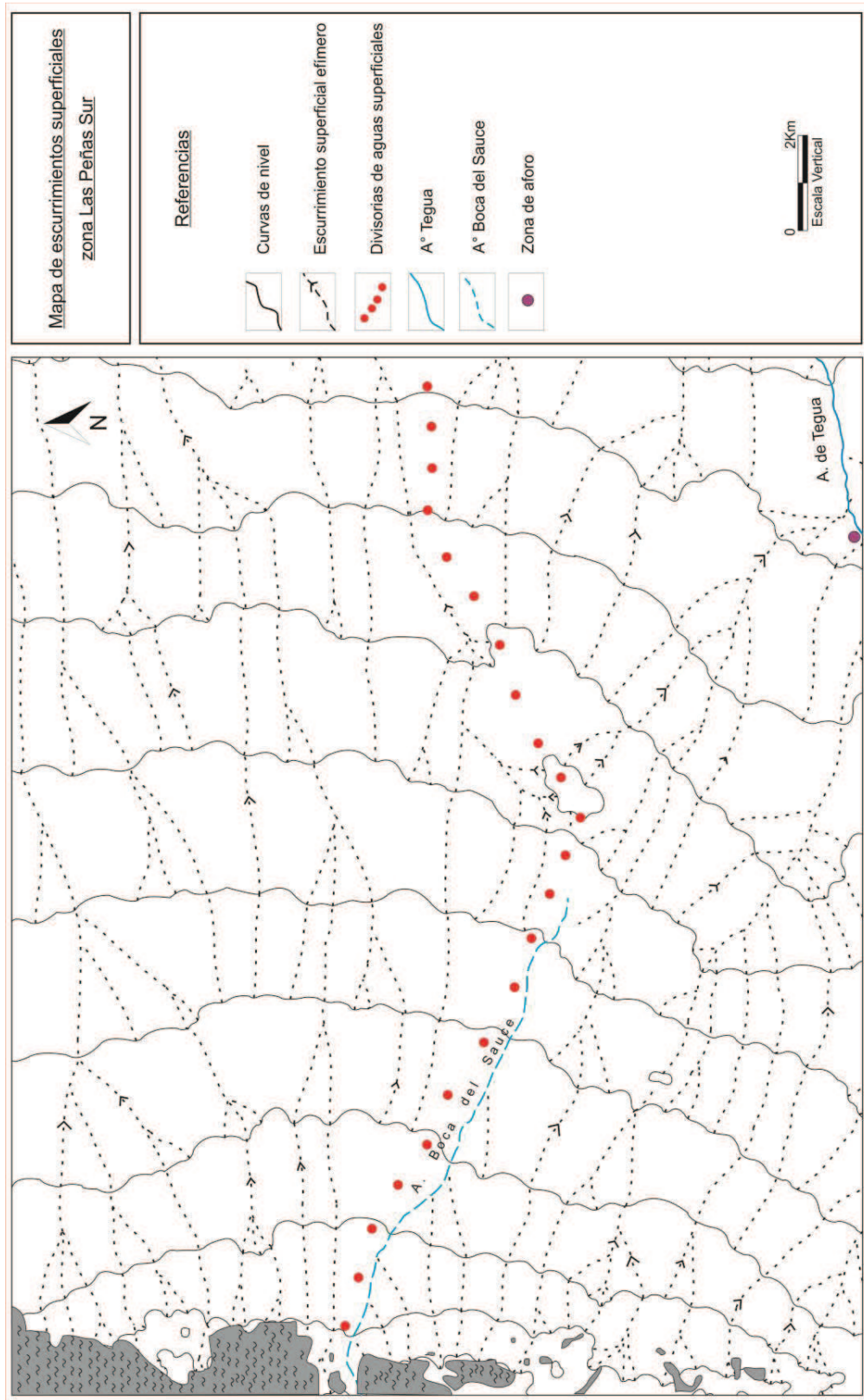


Figura 5.4: Mapa de escurrimientos superficiales zona Las Peñas Sur 2012

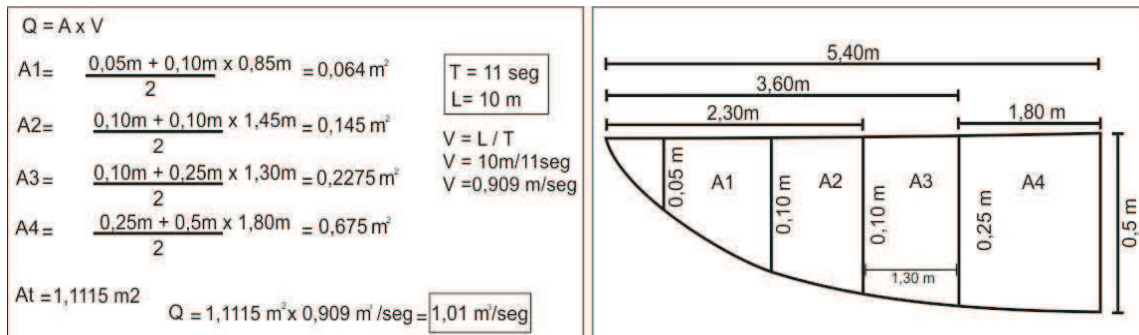


Figura 5.5: Cálculo del caudal del Arroyo Tegua con método de la Sección Media

5.2.2 - Hidrología subterránea

El presente trabajo hidrogeológico se basó principalmente en el estudio del acuífero freático de la zona Las Peñas Sur, pero los diferentes datos adquiridos, de perfiles de perforación y sondeos eléctricos verticales, alumbraron la presencia de acuíferos más profundos, con algún grado de confinamiento, constituidos de materiales arenosos, con intercalación de niveles de sedimentos mas finos, a diferentes profundidades, con cementación carbonática (toscas) (Cap.3, Fig. 3.14).

5.2.2.1 Acuífero libre zona Las Peñas Sur

5.2.2.1.1 Hidrodinámica

Para analizar el acuífero freático de la zona de estudio, se llevó a cabo el censo de perforaciones en 34 puntos, en antepozos de molinos y perforaciones, realizando la medición de los niveles estáticos del acuífero, con sonda piezométrica de señal lumínica y sonora (Fig. 5.6).

La ubicación de las mediciones realizadas se encuentra en la Figura 5.7.

El análisis del comportamiento hidrodinámico del acuífero se realizó a partir de la confección de los mapas de isopropundidad del nivel freático y el mapa de potenciales hidráulicos del acuífero.



Figura 5.6: Medidas de campo de niveles estáticos. A-B- Antepozos de molinos C-Perforación.

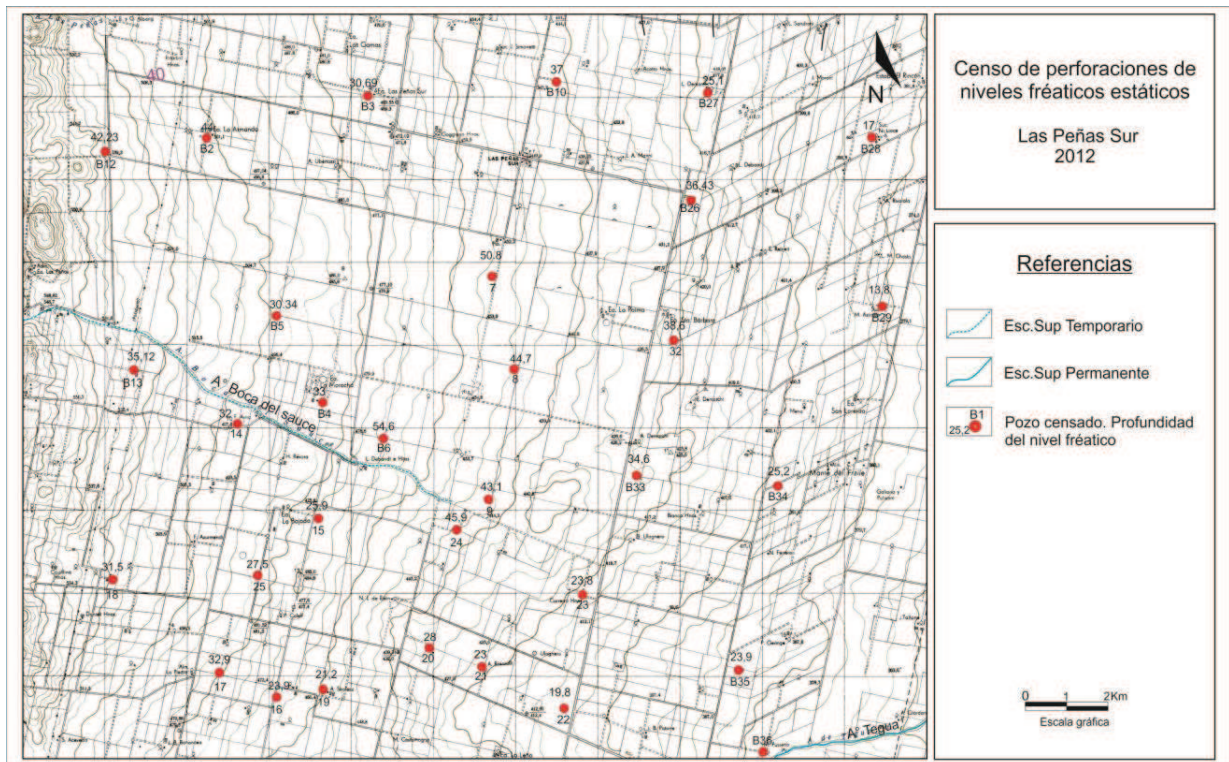


Figura. 5.7: Censo de perforaciones de niveles piezométricos zona Las Peñas Sur

5.2.2.1.1 Profundidad del nivel freático

El mapa que muestra la distribución de profundidades o espesor de zona no saturada se observa en la Figura 5.8).

Se advierten profundidades de nivel freático muy variables, encontrándose los máximos valores en el centro del área, mientras que los menores se dan cercanos a la faja fluvial del arroyo Tegua y en la parte NE de la zona estudiada (Fig. 5.8). Esta configuración, de disminución gradual hacia el Este, se interpreta como resultante del fuerte control estructural del área. El sector central muestra una pequeña anomalía de mayor profundidad, que también debe tener condicionamiento estructural, aunque serían necesarios más datos para su evaluación.

5.2.2.1.2 Potenciales hidráulicos del acuífero libre

En el mapa de equipotenciales del acuífero (Fig. 5.9) se puede observar un sentido general de flujo desde el Oeste hacia el E – SE, coincidente con el sentido de escurrimiento superficial. Localmente se advierten variaciones, como al Oeste de la zona de estudio, donde las líneas de flujo muestran leve divergencia en sentido O-NE y O –SE, aspecto típico de áreas pedemontana que recargan el acuífero.

La morfología de la superficie freática es suavemente ondulada y los gradientes hidráulicos calculados se encuentran entre 0,4% al Este, en el área de la llanura fluvio eólica y 2% en la bajada, proximal y distal.

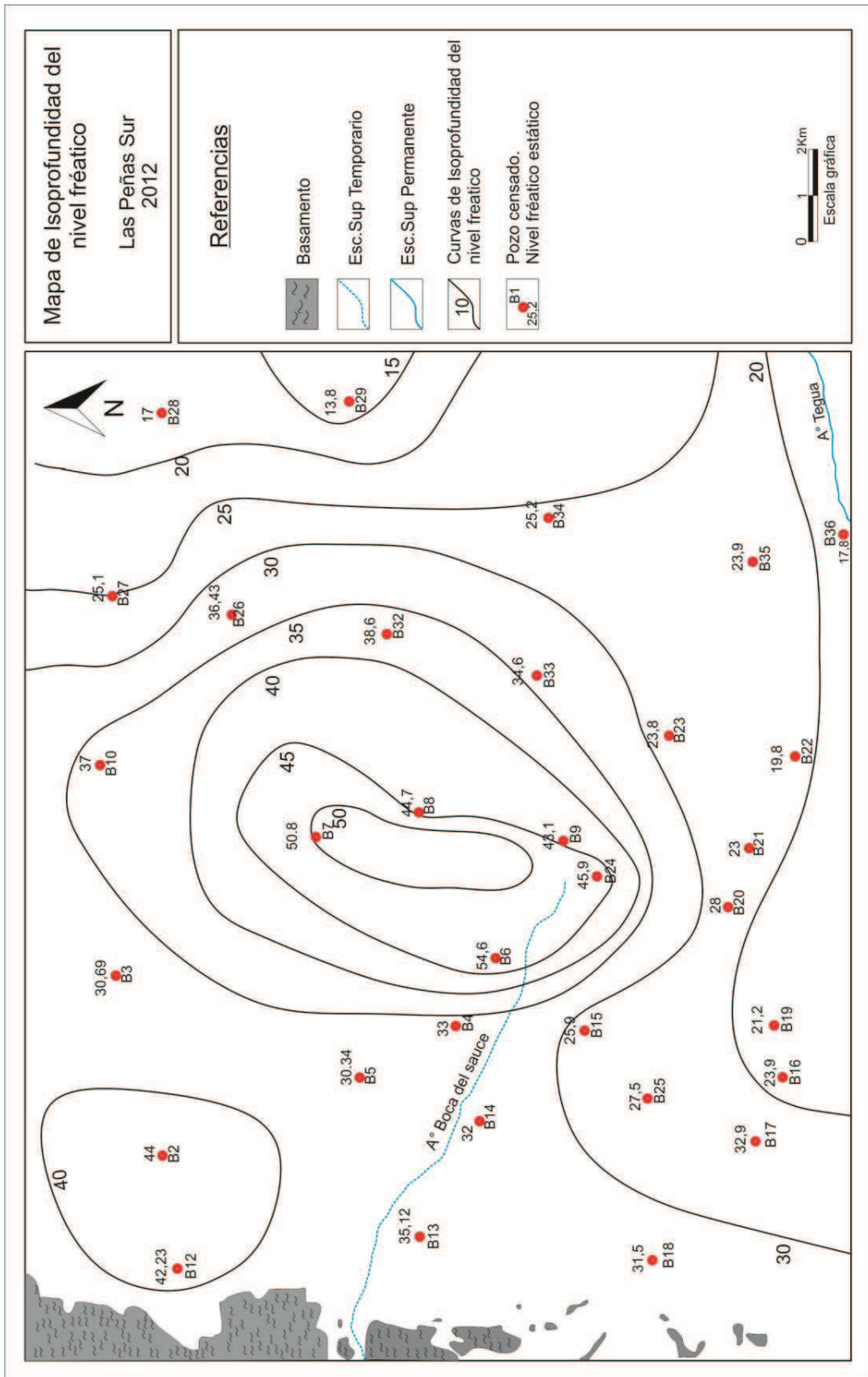


Figura 5.8: Mapa de Isopropfundidad del nivel freático, zona Las Peñas Sur

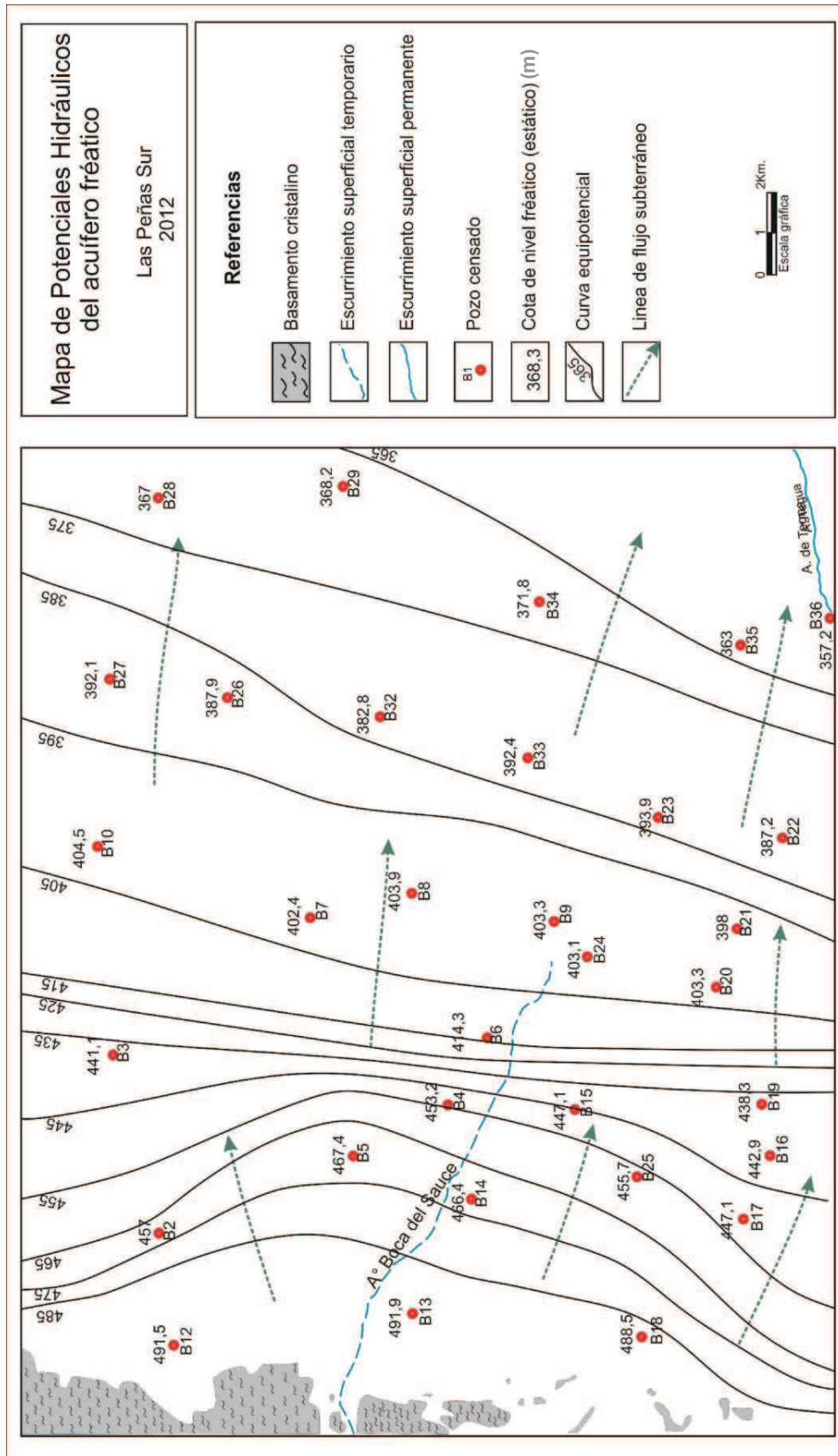


Figura. 5.9: Mapa de equipotenciales del acuífero libre, zona Las Peñas Sur.

5.2.3 - Perfiles hidrolitológicos

A partir de los mapas de potenciales hidráulicos del acuífero libre, topografía superficial y geomorfológico, se realizaron diferentes perfiles hidrolitológicos esquemáticos, con el objetivo de exponer la relación entre la topografía, el acuífero freático y el basamento cristalino en el área estudiada.

Se realizaron 2 perfiles esquemáticos, representativos del área, indicados en la figura 5.10, para comprender con mayor claridad el comportamiento hidrogeológico en estos sectores. Se advierte que una recolección de mayor cantidad de datos, a partir de

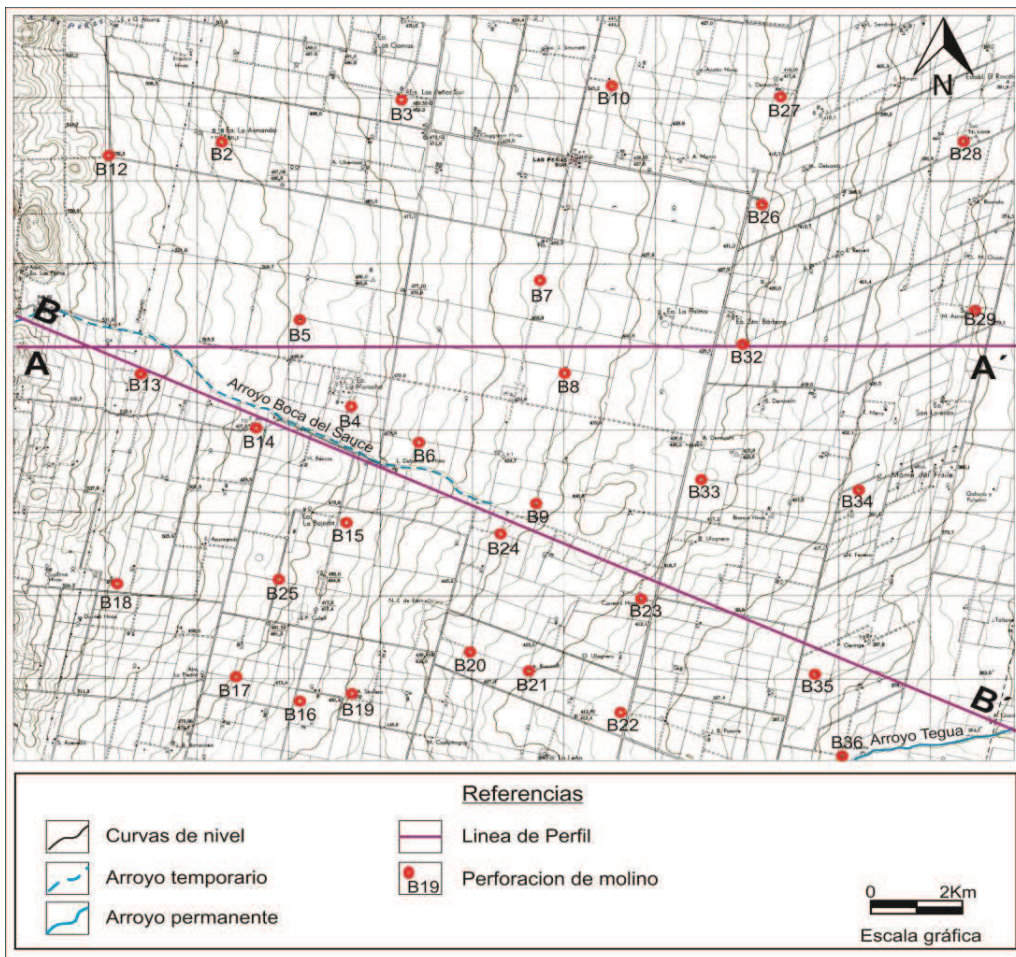


Figura 5.10: Localización de perfiles hidrolitológicos zona Las Peñas Sur

perfiles de perforación y sondeos eléctricos verticales, es esencial para una mejor comprensión y descripción del subsuelo del área.

✓ **Perfil A-A' (Oeste – Este)**

Este perfil muestra la presencia de materiales más gruesos al pie de la sierra, y los sedimentos más finos al centro y Este del área.

Se corrobora que el arroyo Boca del Sauce posee carácter efímero debido a la profundidad a la que se encuentra el nivel freático. Se observa también el aumento escalonado de las potencias sedimentarias hacia el Este, donde se obtuvo además, el perfilaje de una perforación, que indica la presencia de materiales finos con cementación carbonática que actuarían como base del acuífero freático, además de alumbrar la presencia de acuíferos más profundos, en explotación por parte del propietario de la perforación (Fig. 5.11).

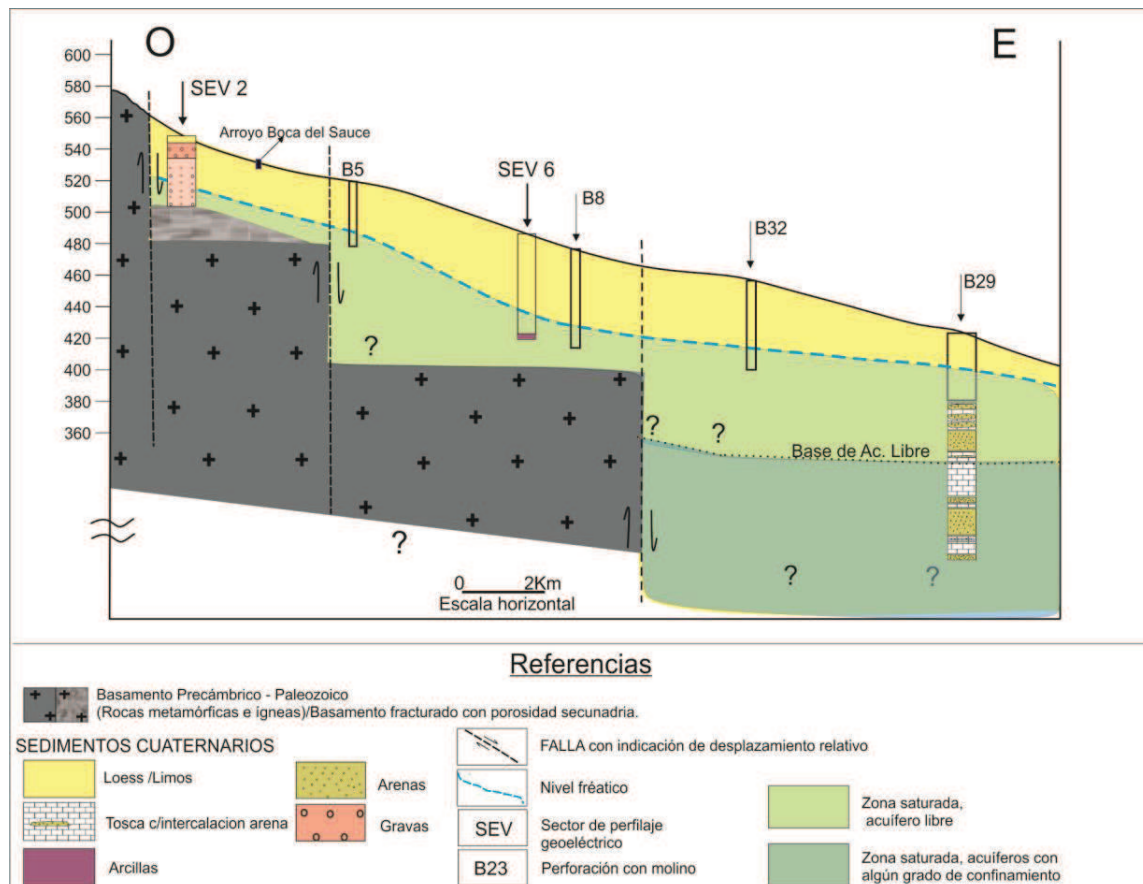


Figura 5.11: Perfil hidrológico esquemático A-A'. Rumbo O-E zona Las Peñas Sur

✓ **Perfil B-B' (NO-SE)**

Este perfil posee rumbo NO-SE (Fig. 5.12) y brinda información de los materiales constituyentes del subsuelo del área y la relación entre el agua subterránea y superficial muestra que el arroyo Tegua posee carácter permanente, debido a la alta tasa de profundización del mismo, que ha alcanzado el nivel freático del acuífero libre, que mantiene su caudal de base.

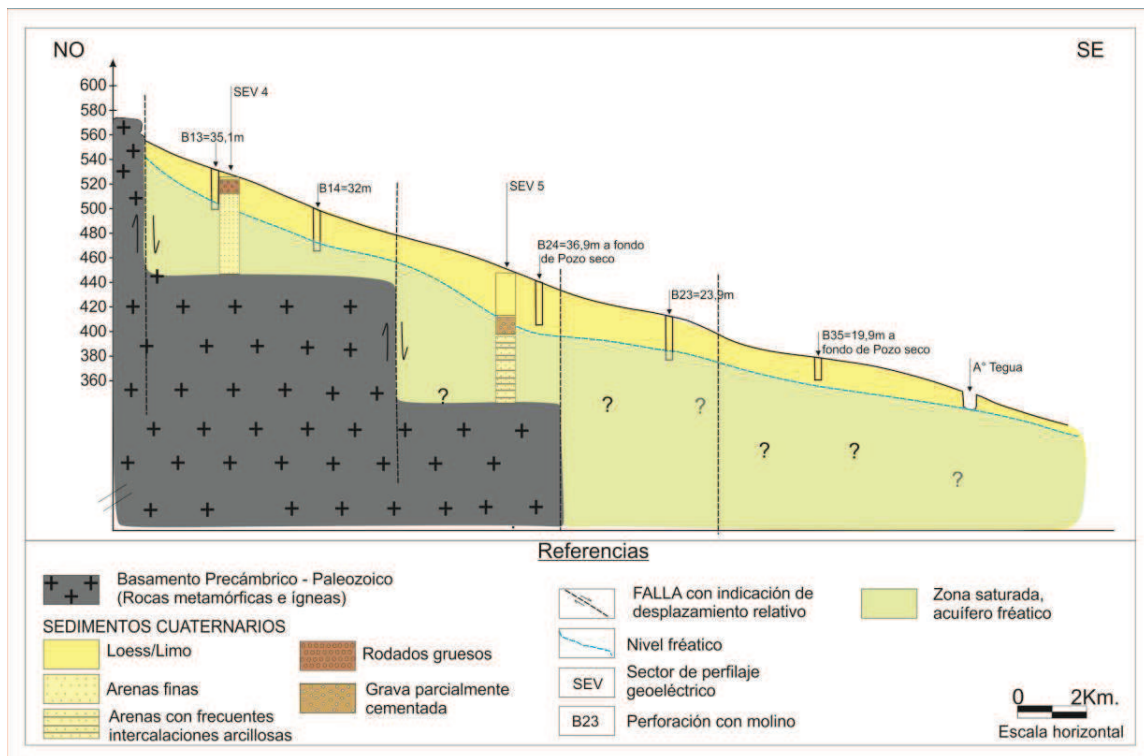


Figura 5.12: Perfil hidrolitológico esquemático B-B' .Rumbo NO-SE. Zona Las Peñas Sur.

5.3 Modelación numérica del flujo

5.3.1 Introducción

Un modelo es una herramienta diseñada para representar una versión simplificada de la realidad, en donde se resaltan sus rasgos más distintivos, ya que es muy compleja como para ser simulada con exactitud. Un modelo conceptual es una hipótesis de cómo

se comporta un sistema o proceso y se puede expresar de forma cuantitativa a través de un modelo matemático (Konikow 1996).

Los modelos numéricos de aguas subterráneas son también representaciones de la realidad y, si son coherentes con ella, son de gran utilidad para validar los modelos conceptuales que se realicen de un sistema en particular y pueden convertirse en herramientas predictivas importantes para el manejo de los recursos hídricos subterráneos. En este sentido, las predicciones que se hagan a través de un modelo matemático dependen del grado de acercamiento que exista entre el modelo y la realidad.

Además de constituir una herramienta de simulación, los modelos numéricos en hidrogeología ofrecen un camino para avanzar en el entendimiento de los sistemas acuíferos (Matteoda 2012).

El proceso de modelación consta de las siguientes etapas (Vives y Varni 2009):

1) **Conceptualización:** Es la creación del modelo conceptual y es un paso muy importante ya que en los pasos siguientes se podrán cuantificar los errores, mientras que esta etapa es cualitativa. Consiste en analizar el medio, identificar los contornos, las acciones exteriores, su posible geometría, etc.

2) **Discretización del medio:** Consiste en dividir el medio en una serie de subregiones que lo cubren y no se solapan. La discretización (tipo y tamaño) influirá en los errores numéricos.

3) **Estimación de los parámetros:** La conceptualización realizada dependerá de una serie de parámetros que deberán estimarse midiendo en campo o por bibliografía, la complicación radica en la heterogeneidad del medio y su variación espacial. La medición o el cálculo de los parámetros es importante, pero no es suficiente porque una medida es sólo un valor puntual o en algunos casos válida para un pequeño entorno.

4) **Calibración:** A partir de los parámetros medidos, se intentan obtener valores que reproduzcan la respuesta observada y que sean representativos del medio. Este proceso de calibración puede ser manual o automático. La calibración manual consiste en modificar secuencialmente los valores de los parámetros hasta ajustar los valores calculados con los medidos.

5) **Análisis de sensibilidad de los parámetros:** La evaluación de los errores de los parámetros se obtiene variando sus valores y observando cómo responde el sistema y

si es razonable esta respuesta. De esta manera se tiene una idea del rango en que se pueden mover las variables del sistema.

6) **Verificación o Validación:** Consiste en correr el modelo para condiciones distintas a las que se han usado en la calibración. El problema es que a veces no hay datos suficientes.

7) **Predicción:** Esta es una de las potencialidades más importantes de los modelos, consiste en que una vez construido el modelo, se simulan efectos de determinadas acciones hipotéticas.

Los métodos de resolución numérica de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales más conocidos, son cuatro: Diferencias Finitas, Diferencias Finitas Integradas, Elementos Finitos y Elementos de Contorno.

El Método de Diferencias Finitas, que se empleará en el presente trabajo, consiste en dividir el medio en una malla regular, generalmente rectangular, en donde las ecuaciones se plantean en función de los valores de la variable en los nudos.

5.3.2 Modelo numérico de flujo de la zona Las Peñas Sur

El principal objetivo de la modelación numérica fue ratificar el modelo hidrogeológico conceptual propuesto, reproduciendo por lo tanto el funcionamiento hidrodinámico actual del sistema, cabe aclarar que la “etapa de predicción” no se realizó en el presente trabajo dado que el modelo fue ejecutado en régimen estacionario.

La zona seleccionada posee un área de 414 km² y se modeló el acuífero libre como un medio poroso, heterogéneo e isótropo.

Para la modelación se empleó el programa MODFLOW (Mc Donald y Harbaugh, 1988) en la versión Visual MODFLOW Versión 2.8.1, que resuelve las ecuaciones de flujo de agua subterránea por medio del método de las Diferencias Finitas.

Se utilizó un modelo de acuífero monocapa no confinado, de régimen temporal estacionario. La capa tiene impuesta como superficie superior la topografía, que se extrajo de la carta Topográfica del Instituto Geográfico Nacional (IGN) 3363-7-4 Las Peñas Sur con escala 1:50.000. La capa inferior se interpoló con la información proporcionada por

perforaciones y SEV, indicados en el capítulo 3, siendo las profundidades alumbradas por los sondeos números 4 y 5 (ver Figura 3.17) y los datos de la perforación B28.

Se empleó como base del modelo el mapa de líneas equipotenciales del acuífero elaborado a partir de potenciales hidráulicos medidos en campo. El dominio se discretizó mediante una malla de 2.500 celdas, con una cuadrícula, de 50 x 50 y un tamaño de celda de 430 x 356 m, y se georeferenció utilizando coordenadas Universal Transversal de Mercator, obtenidas del programa Google Earth (Fig. 5.13).

Para el proceso de calibración se emplearon las medidas observadas en 24 perforaciones, distribuidas en toda la cuenca, en las que se midieron los potenciales hidráulicos. Para la determinación de la cota de referencia de cada punto se empleó la carta del IGN.

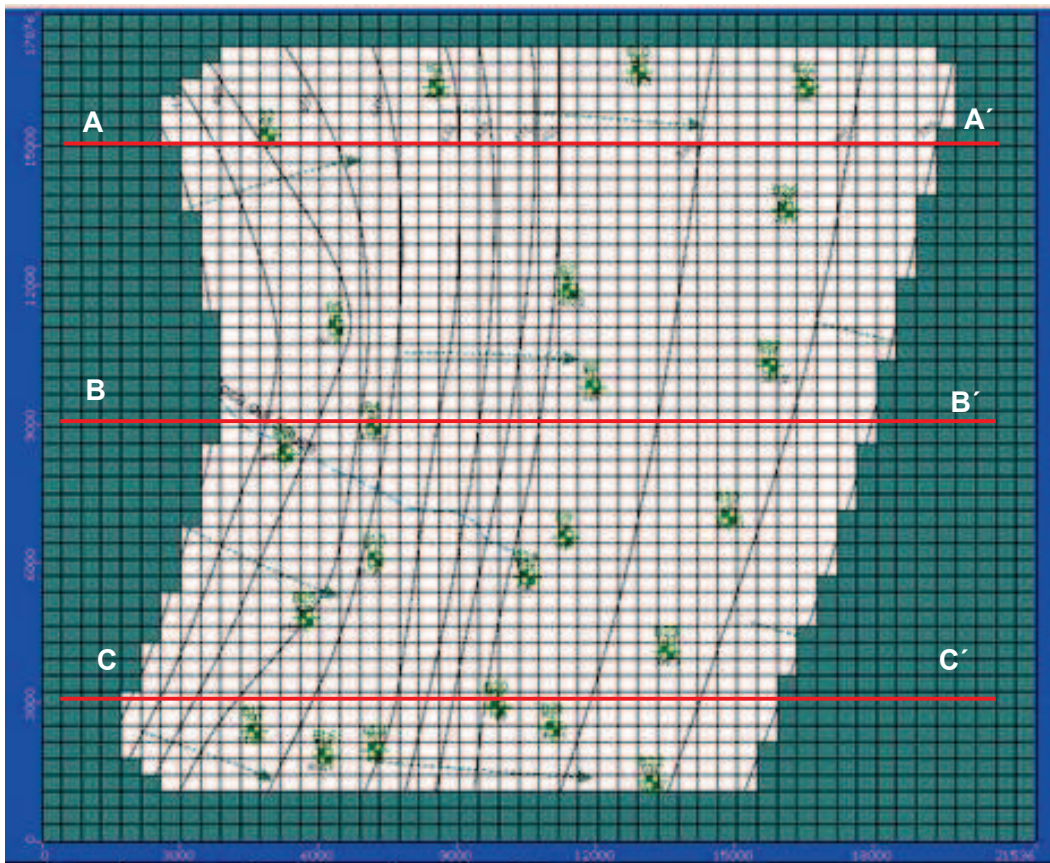


Figura 5.13: Malla de Diferencias Finitas con la localización de los perfiles y pozos de observación

Se desactivaron las celdas correspondientes al dominio no modelado y se identificaron las condiciones de contorno del área a modelar, correspondientes a: un límite de flujo variable asociado a una condición General Head Boundary de MODFLOW (*Zona número 1*), una condición nombrada River, que corresponde al Arroyo Boca del Sauce (*Zona número 2*), un límite denominado Constant Head (Nivel Constante), donde el nivel de la celda no varía, funcionando como una fuente infinita de agua, y está ubicado en la salida del área de estudio, en coincidencia con la línea de equipotencial de cota 375 m. (*Zona número 3*) y una condición de Flujo nulo según una línea de flujo, al N y al S de la zona (*Numero 4*) (Fig. 5.14).

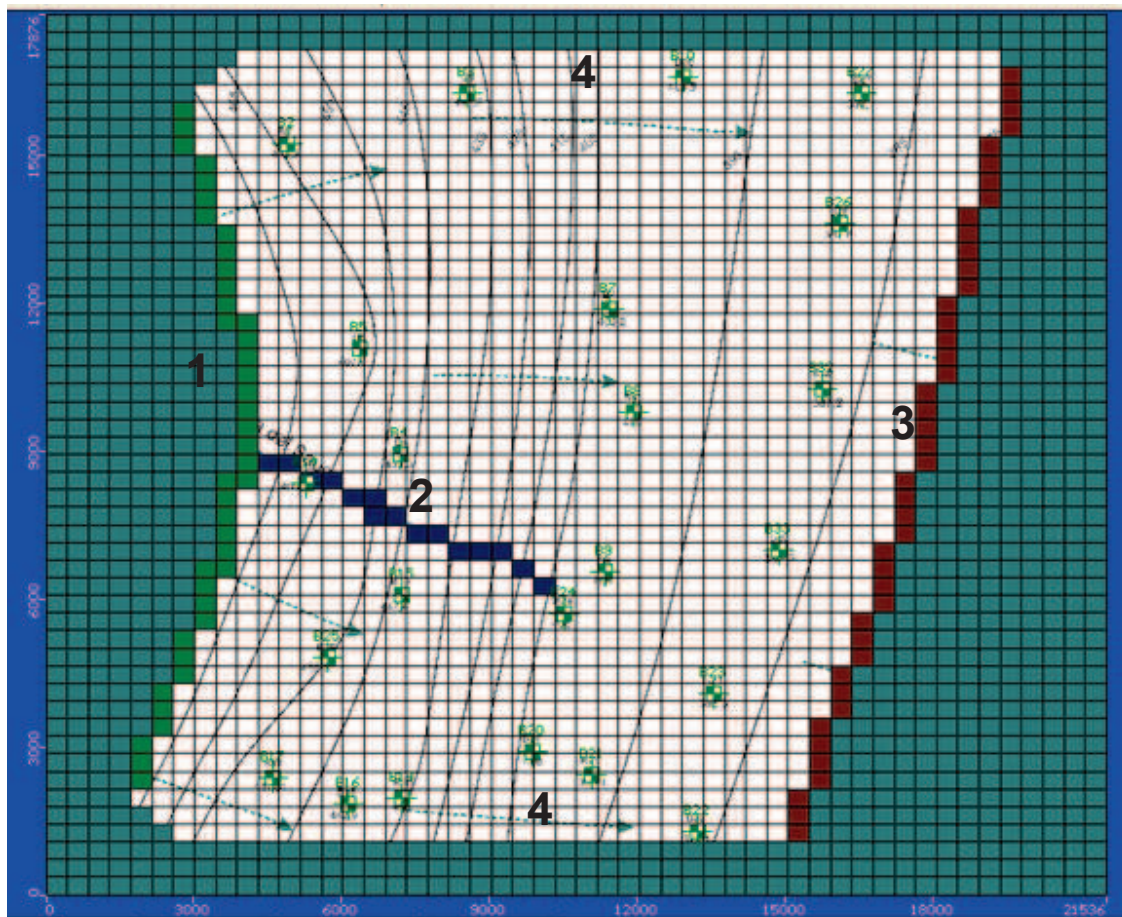


Figura 5.14: Condiciones de contorno con el número de zona. Las Peñas Sur.

Se asignó una recarga del acuífero de 50 mm/año a toda el área modelada (Matteoda, 2012) y valores de conductividad hidráulica (K) según Custodio y Llamas (1983) (Tabla 5.1).

Los valores de conductividad de los diferentes sectores del área a modelar (Fig. 5.15), quedaron principalmente condicionados por los bloques observados en los perfiles construidos con los datos de perforaciones y SEV.

Dado que las granulometrías analizadas en materiales aflorantes, que se asumen como similares a lo que se informa para mayores profundidades, variaron entre arenas muy finas limosas y arenas con clastos dispersos de diferente

Material	K [cm/seg]	K [m/día]
Grava limpia	>1	>1.000
Arena gruesa limpia	1 a 0,001	1.000 a 10
Mezcla de arena	10 ⁻² a 5*10 ⁻³	10 a 5
Arena fina	5*10 ⁻³ a 10 ⁻³	5 a 1
Arena limosa	2*10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁴	2 a 0,1
Limo	5*10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁵	0,5 a 0,001
Arcilla	<10 ⁻⁶	<0,001

Tabla 5.1: Valores de K según el tipo de material (Custodio y Llamas 1983).

tamaño, se colocaron valores de K equivalentes (promedio para espesores mostrados) que disminuyeron muy gradualmente hacia el Este, ya que es esperable que al alejarse del pedemonte disminuyan las gravillas dispersas. Se mantuvieron valores correspondientes a arenas (entre 1 y 5 m/d) dado que en profundidad, en la parte oriental, han sido alumbrados capas de arena importantes. La información es escasa por lo que se trata de valores a examinar con más detalle en el futuro.

El mapa de equipotenciales del acuífero libre calculado por el programa se muestra en la Fig. 5.16 y en él se puede observar también los vectores de la velocidad de flujo del mismo. Como se observa el modelo reproduce en forma general la morfología freática y los sentidos de flujo, aunque claramente falta ajustarlo. El modelo conceptual muestra cierta divergencia del flujo y más gradiente en las bajada pedemontana, que aquí se insinúa levemente.

Se obtuvieron además perfiles O-E (Fig. 5.17), con exageración vertical 10; donde se observa la variación del espesor del acuífero (con un notable aumento en sentido Oeste – Este), de la zona no saturada y del gradiente hidráulico. La ubicación de estos perfiles se observa en la figura 5.13

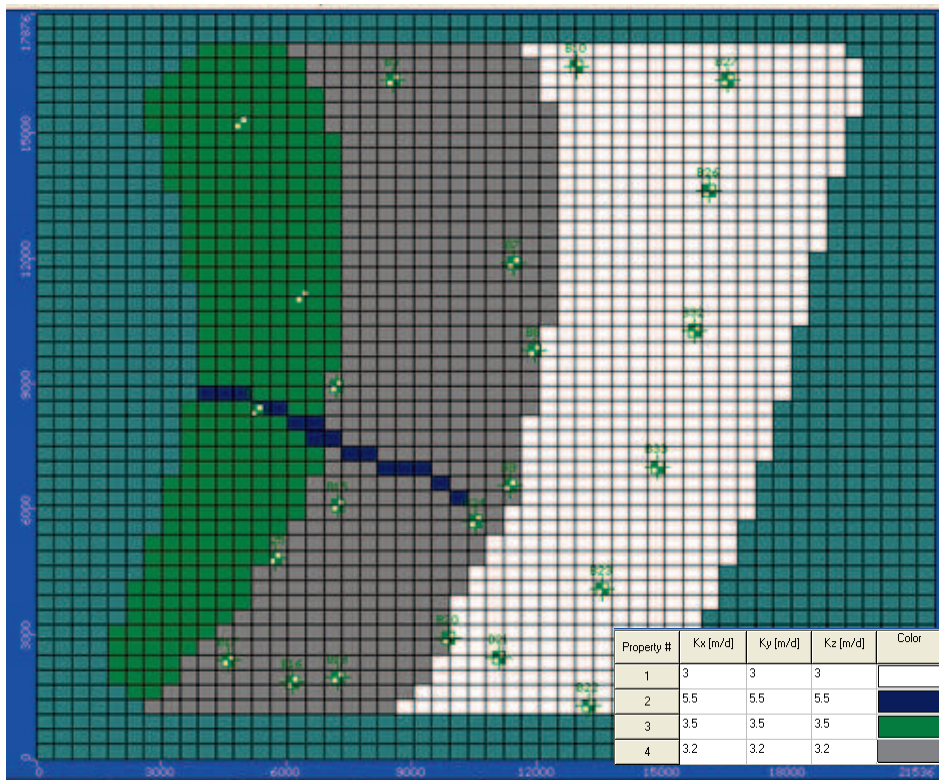


Figura 5.15: Zonas de conductividades hidráulicas y sus valores asignados Las Peñas Sur

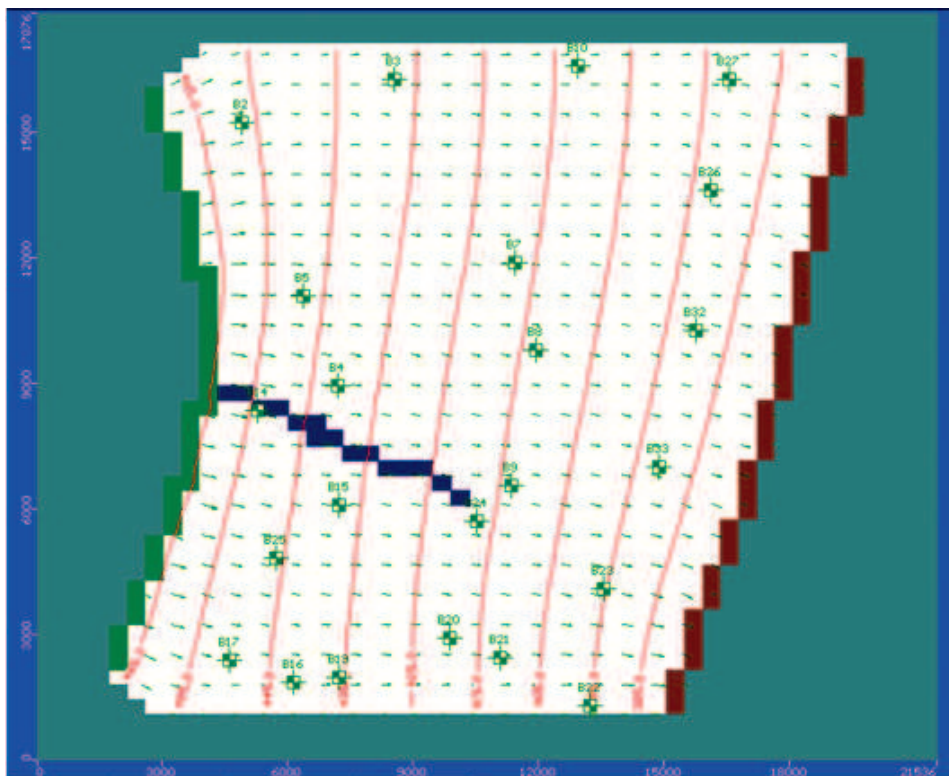


Figura 5.16: Mapa equipotencial (equidistancia 10m), velocidades de flujo y condiciones de contorno.

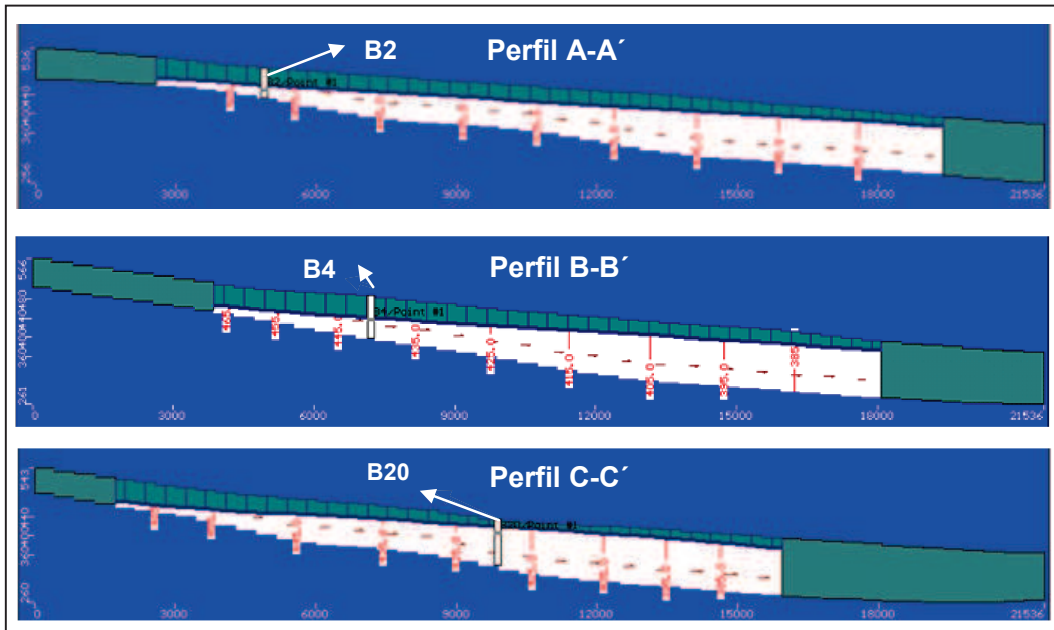


Figura 5.17 Perfiles piezométricos O-E calculados por el modelo, con exageración vertical 10.

El balance de entradas y salidas de agua obtenido (Fig. 5.18) reproduce el modelo conceptual, es decir entrada de agua por precipitaciones y flujo subterráneo y salida por flujo subterráneo. Así, en el balance de masas de agua se observa que el 82,6 %(31.706

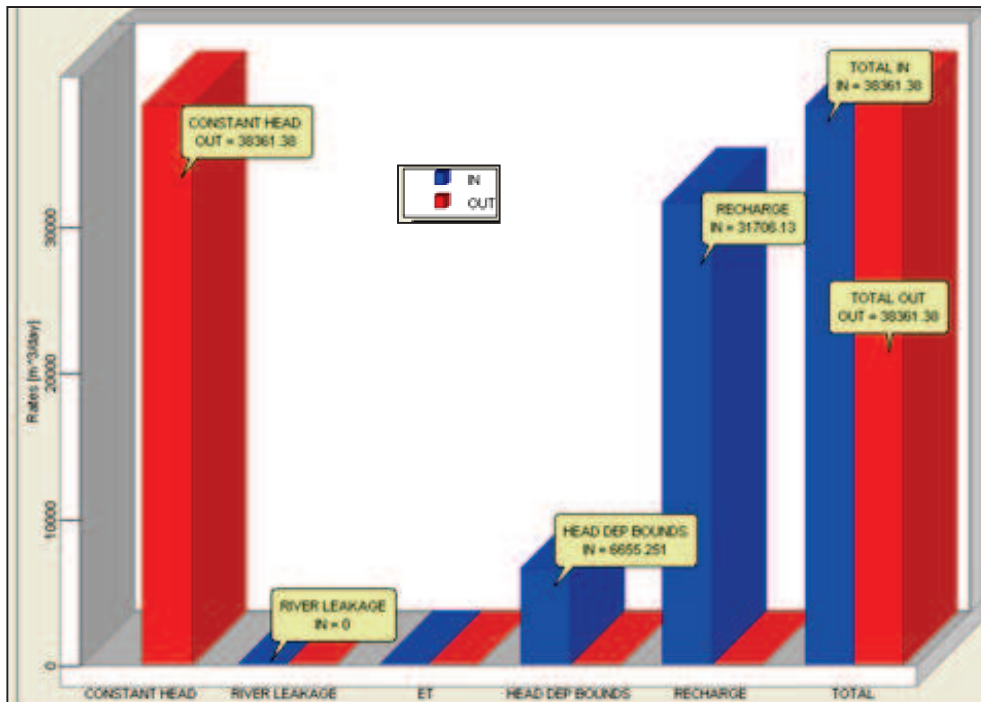


Figura 5.18: Balance Obtenido en Visual Modflow de la zona Las Peñas Sur

m³/día) del volumen de agua que entra al sistema acuífero libre, lo hace por recarga por precipitaciones y el 17,3 %(6.655 m³/día) consiste en entrada de flujo de agua subterránea por el borde occidental del área modelada. La salida del agua se produce netamente por el borde oriental del área, por el nivel constante definido en la curva equipotencial de 375 m.

En la Fig. 5.19 se presentan las cargas hidráulicas observadas versus calculadas, mostrando un índice de correlación R de 0,96, el error medio es de 1,4 m y el error medio absoluto de 7,5 m.

En este sentido, son numerosos los factores que pueden contribuir al error, como la compleja geometría del acuífero, la heterogeneidad de los materiales y el escalonamiento del basamento a diferentes profundidades en el área de estudio, si bien el modelo ha sido de utilidad para integrar la información recolectada y mejorar el análisis e interpretación del funcionamiento hidrodinámico del acuífero y especialmente para el balance general de masas.

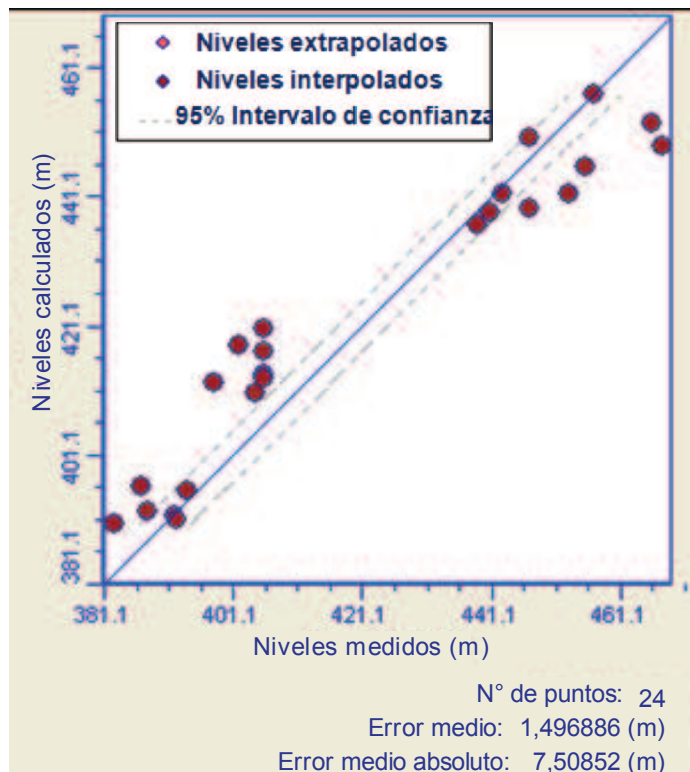


Figura 5.19: Cargas hidráulicas observadas/calculadas

La disminución del error se lograría con mayor información sobre niveles piezométricos del acuífero freático, los materiales que lo constituyen e hidroapoyo, ya que debido a la complejidad estructural de la zona resulta difícil realizar una correcta determinación del espesor del acuífero libre, información que permitiría mejorar la calibración e incrementar la confiabilidad del modelo elaborado.

Capítulo 6

Hidroquímica

6.1 - Introducción

Inicialmente, el agua de lluvia que recarga un acuífero tiene escaso contenido iónico. En la escorrentía superficial y a través de la zona no saturada y la zona saturada, hay una interacción agua-fase sólida por la que el agua va adquiriendo sustancias químicas como especies disueltas.

Los factores que influyen en la interacción agua -fase sólida son:

- ✓ Naturaleza de la fase sólida (mineralogía, composición química)
- ✓ Superficie específica de las partículas (granulometría)
- ✓ Concentración de especies iónicas en el agua
- ✓ Tiempo
- ✓ Condiciones del sistema: Temperatura, presión, pH, potencial redox, presión de CO₂, etc.

Los iones disueltos en las aguas subterráneas se dividen en *mayoritarios*, *minoritarios* y *trazas*. Los iones *mayoritarios* son **cloruro, sulfato, bicarbonato, calcio, magnesio, sodio y potasio**. Los iones *minoritarios* son aquellos que se encuentran habitualmente formando menos del 1% del contenido iónico total. Los más importantes son: bromuro, yoduro, sílice, litio, estroncio, fosfato, nitrito, hierro, manganeso, aluminio, amonio, sulfuro, fluoruro.

✓ **Ion Cloruro (Cl⁻)**

En aguas subterráneas el ion cloruro procede fundamentalmente de aporte de lluvias (Martinez et al., 1995), como ocurre en esta región (Blarasin, 2003; Cabrera 2009; Matteoda, 2012), no precipita en acuíferos, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, tampoco es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, por lo que es conservativo y un buen trazador.

✓ **Ion Sulfato (SO₄⁼)**

El aporte más importante de este ion a las aguas subterráneas procede de la disolución de sales sulfatadas (yeso y anhidrita fundamentalmente). En la zona se asume

que es aportado fundamentalmente por precipitaciones (Blarasin, 2003; Cabrera 2009; Matteoda, 2012). El ión sulfato sufre procesos de reducción, sobre todo en presencia de bacterias y materia orgánica.

✓ **Iones bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) y CO_2**

El dióxido de carbono disuelto en agua genera diferentes compuestos que forman un papel importante en la química del agua; éste se disuelve en el agua, una parte permanece en disolución en forma de gas, mientras que otra reacciona con el agua para formar ácido carbónico que se disocia parcialmente para dar *iones carbonato y bicarbonato*.

La fuente de CO_2 disuelto en agua procede de la zona edáfica (por respiración de organismos y descomposición de la materia orgánica), y por la disolución de calizas y dolomitas (fuentes principales de carbonatos y bicarbonatos). En la zona de estudio hay carbonato en forma de capas, nódulos y disperso en la masa de sedimentos.

✓ **Ión calcio**

Suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas subterráneas debido al alto contenido en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas sedimentarias aparece en forma de carbonatos (calcita, aragonito y dolomita) o sulfatos (yeso y anhidrita). La disolución de carbonato de calcio e hidrólisis de silicatos serían los principales procesos que aportan calcio en la zona, acorde a lo ya probado en la región (Blarasin, 2003; Cabrera 2009; Matteoda, 2012).

✓ **Ión magnesio**

Es menos abundante que el calcio y procede de la disolución de rocas carbonatadas, como dolomitas y calizas magnesianas, evaporitas y también de la alteración de silicatos ferromagnesianos.

✓ **Ión sodio**

El sodio entra en solución por la meteorización de silicatos tipo albita; las sales de sodio generadas son altamente solubles y tienden a permanecer en solución, ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación, como ocurre en el caso del calcio. Si bien el sodio puede ser adsorbido en arcillas con buena capacidad de cambio catiónico, en general en la región es intercambiado con calcio el que entra a las posiciones de intercambio provocando una disminución de la dureza de las aguas (Blarasin, 2003; Cabrera 2009; Matteoda, 2012),

✓ **Ión potasio**

Este ion procede mayoritariamente de la meteorización de los feldespatos y tiende a ser fijado en procesos de formación de arcillas y de sufrir adsorción en la superficie de minerales con alta capacidad de intercambio catiónico.

6.2 Hidroquímica regional

La evolución natural del agua del acuífero freático produce un aumento progresivo en el contenido salino (0,2 g/l hasta aproximadamente 15 g/l) (Fig.6.1), desde las zonas más altas ubicadas en las serranías hasta las más deprimidas situadas al Este de la provincia. También se produce un cambio gradual del tipo geoquímico, desde aguas bicarbonatadas cálcicas y/o sódicas, luego sulfatadas sódicas y finalmente cloruradas sódicas; observándose además aumentos de pH y transición desde condiciones oxidantes a reductoras (Blarasin, 2003). Se debe destacar que el agua procedente del acuífero libre suele tener problemas de aptitud para consumo humano por la presencia de altos tenores de arsénico y flúor (As y F) (Blarasin, 2003; Cabrera, 2009; Matteoda, 2012),

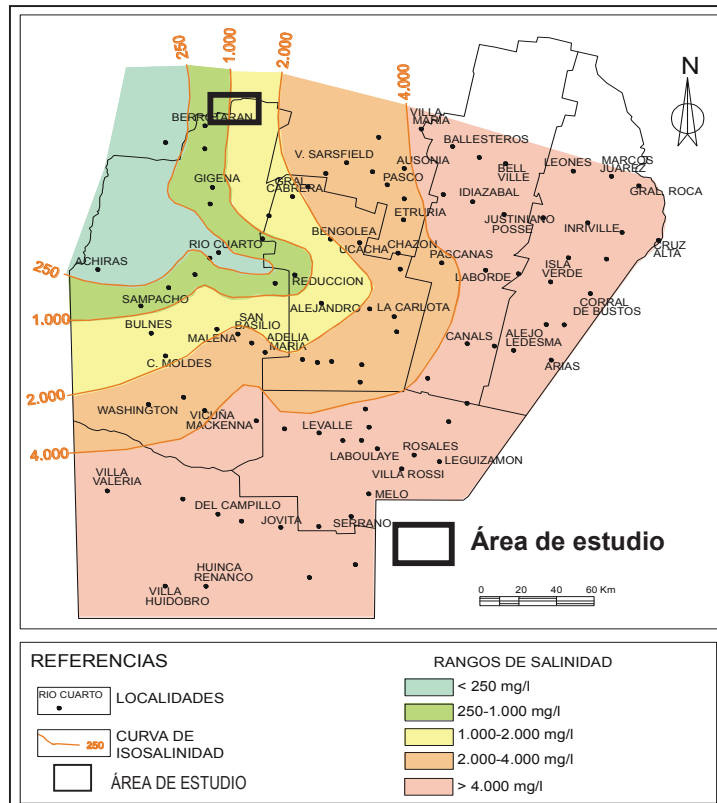


Figura 6.1: Mapa de salinidad del Sur de Córdoba (extraído de Blarasin, 2003)

6.3 - Hidroquímica del acuífero de la zona Las peñas Sur

6.3.1 - Acuífero libre

Se llevaron a cabo los análisis físico-químicos de 23 muestras en el Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Geología. Como se indicara la mayoría procede de captaciones que explotan los primeros 10-15 m del acuífero libre. A partir de los resultados obtenidos en el laboratorio, se elaboraron los mapas de conductividad eléctrica del acuífero y de Stiff modificado, que permite apreciar rápidamente los valores de las relaciones iónicas y la variación de las mismas.

✓ Conductividad eléctrica

El mapa de CE (Fig. 6.2) muestra un aumento de la conductividad, por lo tanto de la salinidad del agua, en sentido O-E, desde valores de 1000 uS/cm, hasta 4500 uS/cm en

la zona centro-este del área. Puede interpretarse que a medida que el agua circula alejándose de las sierras los tiempos de contacto agua-sedimento serían el motivo fundamental de la salinización.

Se observa un valor anómalo al NO de la zona, el que se asume como condicionado por contaminación puntual, dado que la perforación (B2) estaba rodeada por ganadería concentrada tal como se muestra en la figura 6.3. Si bien en esta muestra los valores de NO₃ resultaron bajos (15 mg/L), los de Cl y SO₄ fueron altos, por lo que la anomalía en CE podría estar vinculada a actividad agrícola ganadera.

✓ Clasificación geoquímica

Se realizaron los diagramas de Stiff modificados, compuestos por 3 ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión; todos los cationes (K⁺, Na⁺, Mg⁺⁺, Ca⁺⁺) se disponen a la izquierda del eje vertical del diagrama, y los aniones a la derecha (Cl⁻, SO₄⁻, HCO₃⁻+CO₃⁻). Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/L. Estos diagramas son luego representados en un mapa, con lo que se visualiza rápidamente la variación espacial del carácter geoquímico del agua en el acuífero. (Fig. 6.4)

Desde el punto de vista de la clasificación geoquímica, en la zona estudiada, el 73,9 % de las muestras obtenidas son sulfatadas sódicas, el 17,4% bicarbonatadas sódicas y en menor porcentaje se encuentran muestras mixtas (bicarbonatadas cálcico-sódicas, bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sulfatadas sódicas).

Se identifica al catión Na⁺ como el dominante, debido a los procesos de intercambio catiónico que se lleva a cabo en los materiales finos, por proceso de hidrólisis en los minerales silicatados que poseen Na⁺ y la elevada solubilidad de este elemento.

En general se observa que las muestras bicarbonatadas y aquellas sulfatadas más dulces se ubican en el ámbito de la bajada proximal y distal, mientras que las sulfatadas más saladas en el resto del área (llanura fluvio eólica). Es probable que los valores de sulfatos se vean incrementados por procesos de contaminación puntual (especialmente ganadero) y difusa (dado el uso extensivo de fertilizantes detectado, por ejemplo sulfato de amonio, Fig. 6.5).

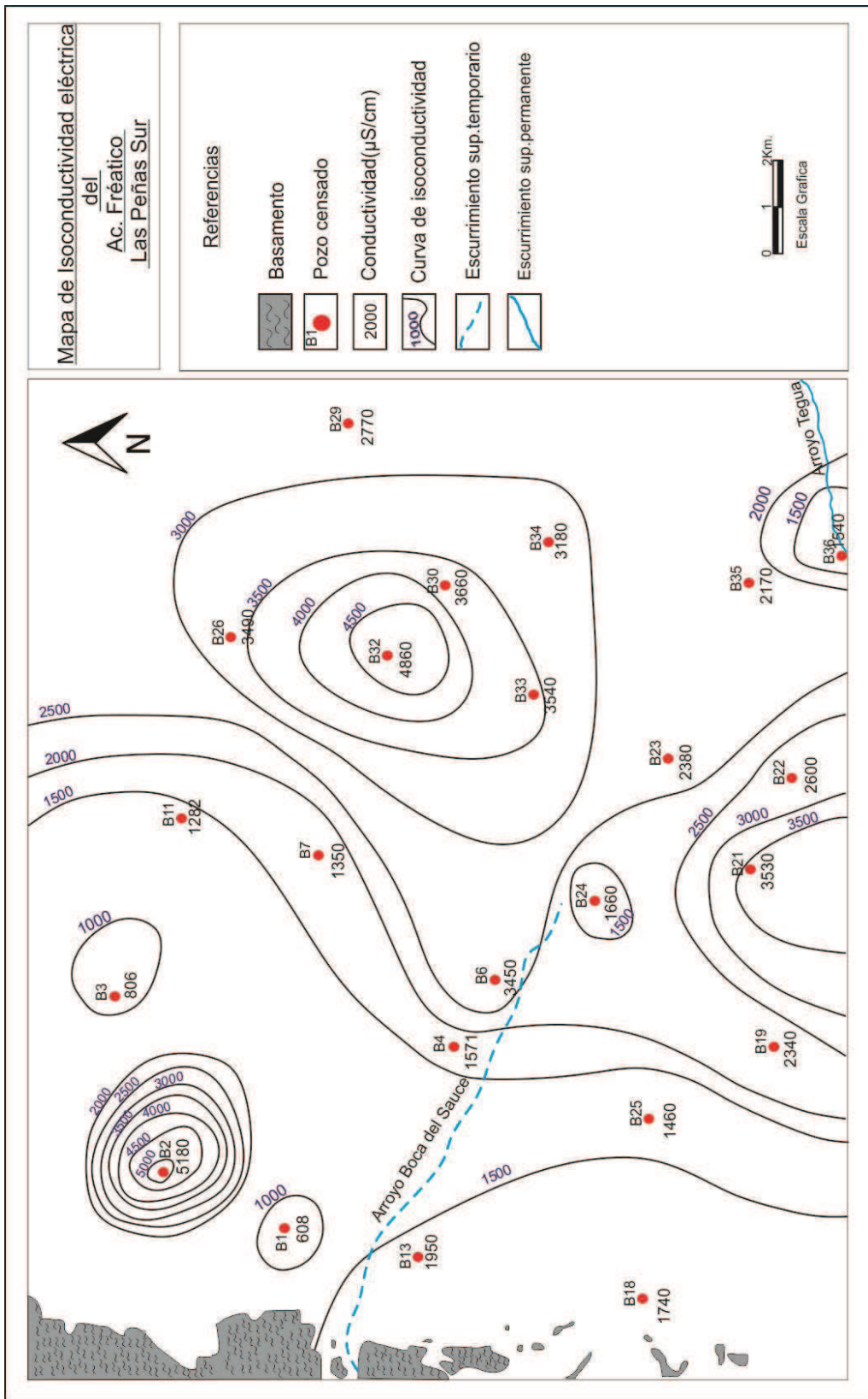


Figura 6.2. Mapa de conductividad eléctrica del acuífero libre, Las peñas Sur.

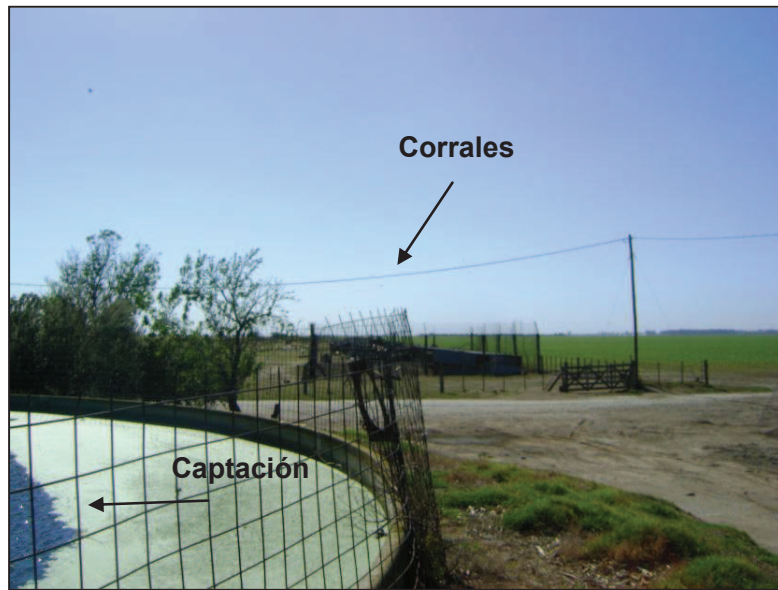


Figura 6.3: Corrales rodeando la captación B2

6.3.2 - Acuífero confinado

Se analizaron 3 muestras de capas acuíferas confinadas: B27 de carácter bicarbonatada sulfatada sódica, B28, clorurada sulfatada sódica y B31 de carácter sulfatada sódica. El agua de la perforación correspondiente a B28 es captada a una profundidad de 195 metros aproximadamente, y en la perforación B27 a 180 metros según los datos provistos por los particulares.

La diferencia entre los caracteres geoquímicos de las muestras de acuíferos confinados puede deberse a la capa acuífera que esté en explotación, su litología y espesor, velocidad del agua, etc.

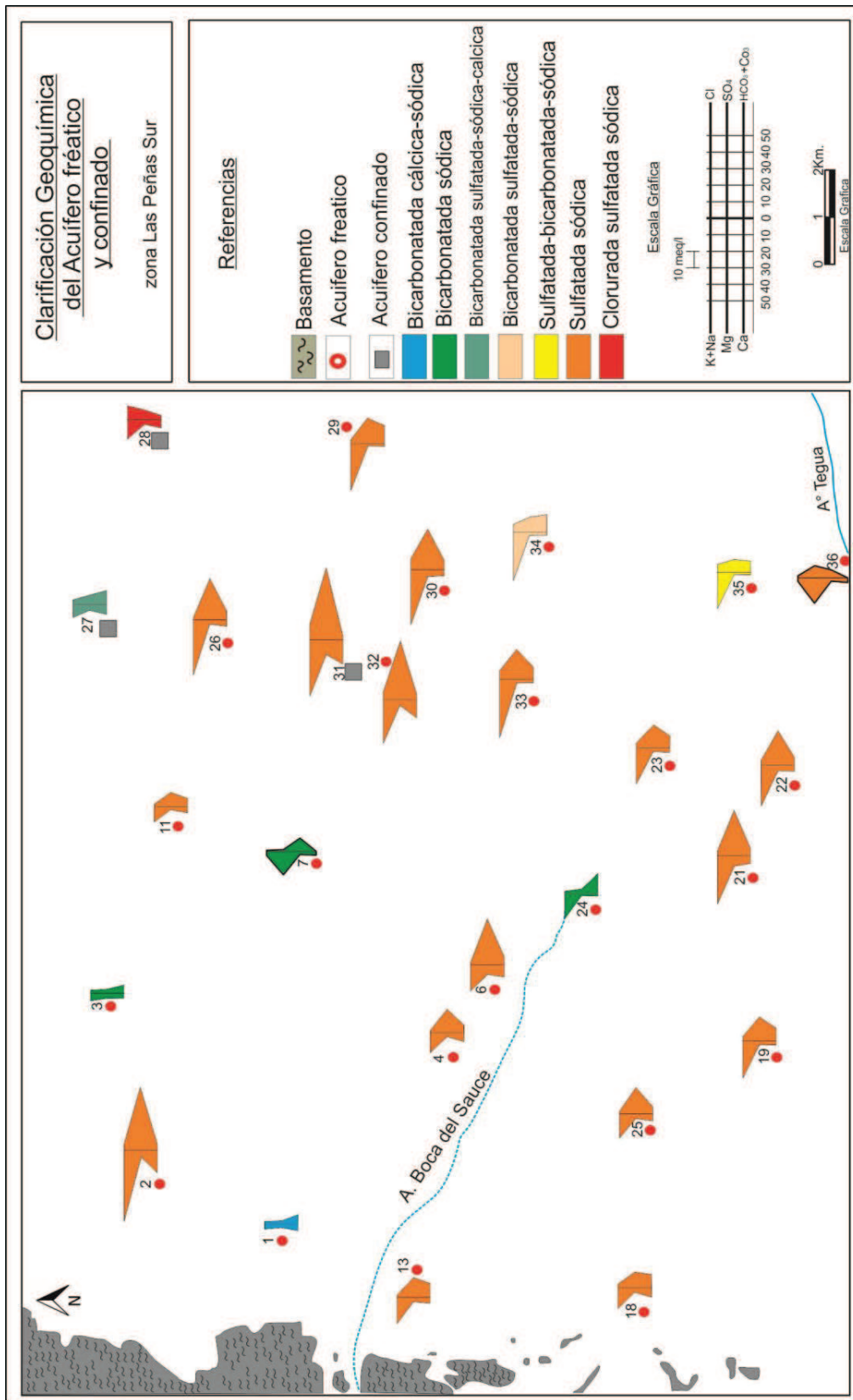


Figura 6.4 Mapa de Clasificación geoquímica del acuífero libre y confinado zona las Peñas Sur



Figura 6.5: Compuestos utilizados en agricultura en la zona Las Peñas Sur

6.3.3 - Elementos minoritarios y trazas: Nitratos, Arsénico y Flúor

El estudio geoquímico realizado permitió detectar la presencia de elementos minoritarios y trazas, como nitratos, arsénico y flúor en el acuífero libre.

Los límites de aptitud de uso humano utilizados en el presente trabajo son los estipulados por la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba.

Los **nitratos** derivan de la oxidación de la materia orgánica nitrogenada procedente de las excretas de animales y humanos o bien de compuestos inorgánicos como urea, fosfato de amonio y sulfato de amonio para el cultivo de maíz y soja, mediante la práctica de siembra directa. Los nitratos no se encuentran naturalmente en agua con tenores que superen los 3-15 mg/L, considerados valores de fondo natural que proceden de la oxidación de materia orgánica del suelo (Canter, 1997; Blarasin, 2003; Matteoda et

al., 2008; Matteoda, 2012), indicando que su mayor concentración es debida a contaminación.

Para los nitratos, el límite admisible para consumo humano es de 45 mg/L. La presencia de cantidades excesivas de nitratos en las aguas puede provocar en los lactantes efectos mortales (cianosis) por la formación de metahemoglobina, y en adultos, nitrosaminas cancerígenas, por la reacción de nitratos con aminas y aminoácidos. Hay investigaciones que indican que altas concentraciones de nitrato aumentan el riesgo de cáncer de estómago, desarrollando la enfermedad a largo plazo. También disminuye la absorción de oxígeno por la sangre. De las 23 muestras extraídas del acuífero libre, 18 son aptas para el consumo humano con respecto a este elemento, 2 sobrepasan este límite con valores de 50 mg/L, dos presentan una concentración entre 100-200 mg/L y una 360 mg/L (Fig.6.6). Los valores más elevados corresponden a las muestras B13, B33 y B34. En B13 se advierte la presencia de corrales bovinos cercanos a la captación y soja como cultivo, para el que utilizan fertilizantes como urea y fosfato, granulados. En B33 y B34 en cambio no se encuentran corrales animales, sino soja como monocultivo extensivo para el cual se utiliza gran cantidad de fertilizantes que contribuyen a los altos valores de nitratos encontrados.

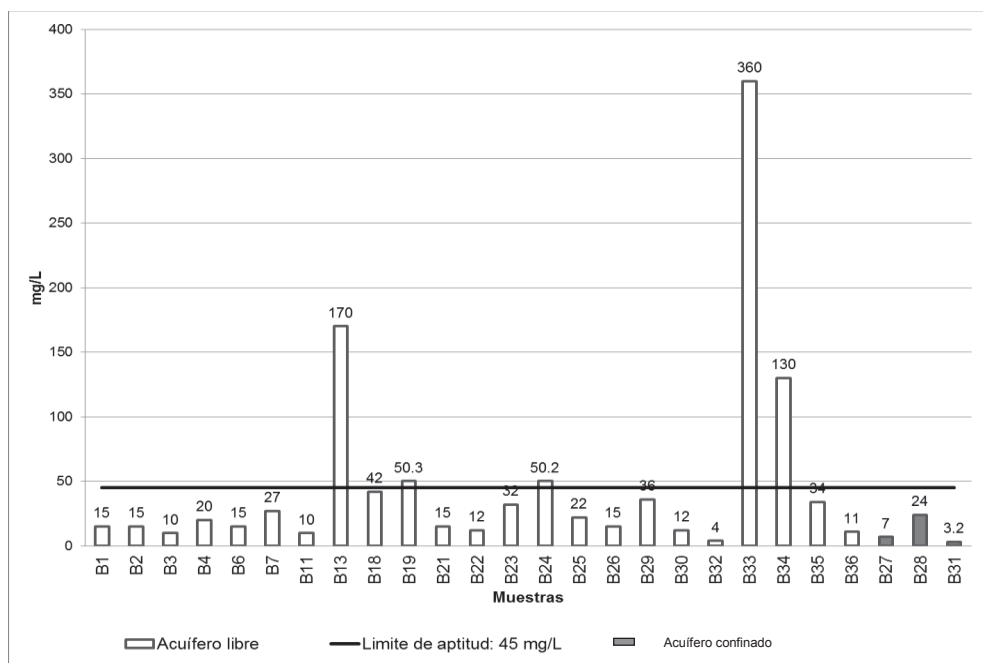


Figura 6.6: Tenores de Nitratos en el acuífero libre y confinado de Las Peñas Sur

Las muestras de acuífero confinado presentan valores de 3.2, 7 y 24 mg/L (B31, B27 y B28, respectivamente), si bien no corresponden a los valores más bajos obtenidos en el área, son menores que en el acuífero libre debido a que el acuífero confinado se encuentra más protegido a la llegada de contaminantes debido a su mayor profundidad. Debe destacarse que si bien se constató que los pozos no son surgentes, se desconoce la posición del nivel piezométrico y por ende su relación con el nivel freático, por lo que es posible que en algún caso o en todos los valores de nitratos hallados estén vinculados a aporte desde el acuífero libre, si éste tuviera mayor carga hidráulica.

En relación al **arsénico** la ingesta diaria y continua de dosis elevadas produce una enfermedad en las personas conocida como Arsenicismo Crónico. En nuestro país se trata de una enfermedad endémica conocida como Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE), que se manifiesta por espesamiento de la epidermis, úlceras en la boca y cáncer arsenical (Lerda, 1995). El límite para consumo humano es de 50 $\mu\text{g/L}$. De las 23 muestras obtenidas, 13 son aptas, 7 poseen concentraciones entre 50-100 $\mu\text{g/L}$, 1 entre 100-300 $\mu\text{g/L}$ y 2 presentan concentraciones mayores a 300 $\mu\text{g/L}$ (450 y 690 $\mu\text{g/L}$) (Fig.6.7), por lo que el 38,46% de las muestras no son aptas para el consumo humano.

Con respecto al **flúor**, los altos tenores producen como efecto principal la fluorosis dental, aunque en cantidades muy altas puede afectar a los huesos.

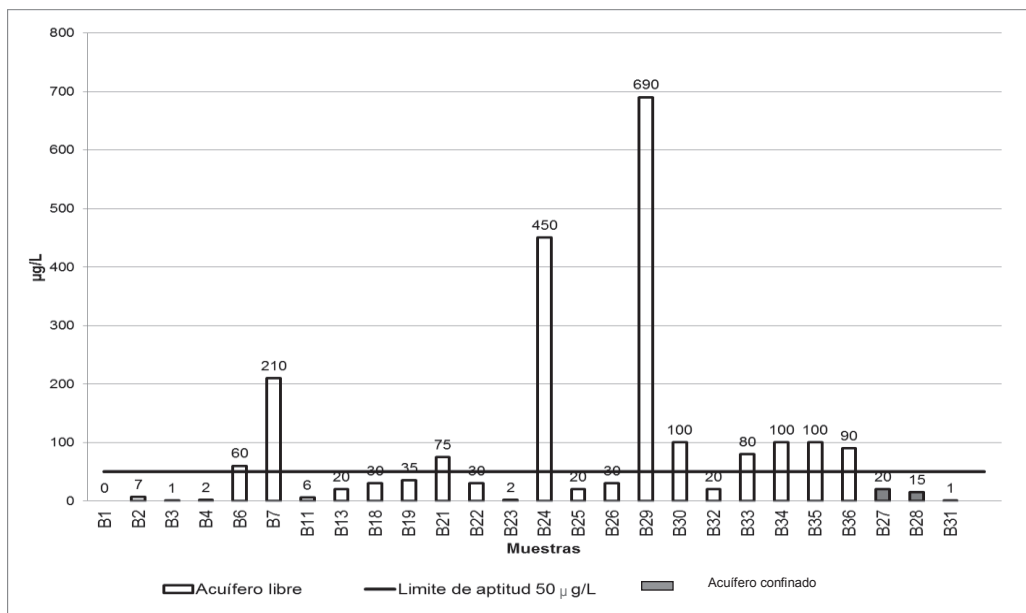


Figura 6.7: Tenores de Arsénico en el acuífero libre y confinado de Las Peñas Sur

El límite admitido de flúor para consumo humano es de 1,3 mg/L. De las 23 muestras, 13 se encuentran por debajo del límite, 8 poseen concentraciones entre 1,3 y 3 mg/L, 1 entre 3-5mg/L y 1 mayor a 5 mg/L, por lo que el 34,6% de las muestras analizadas superan el límite admisible para consumo humano (Fig.6.8)

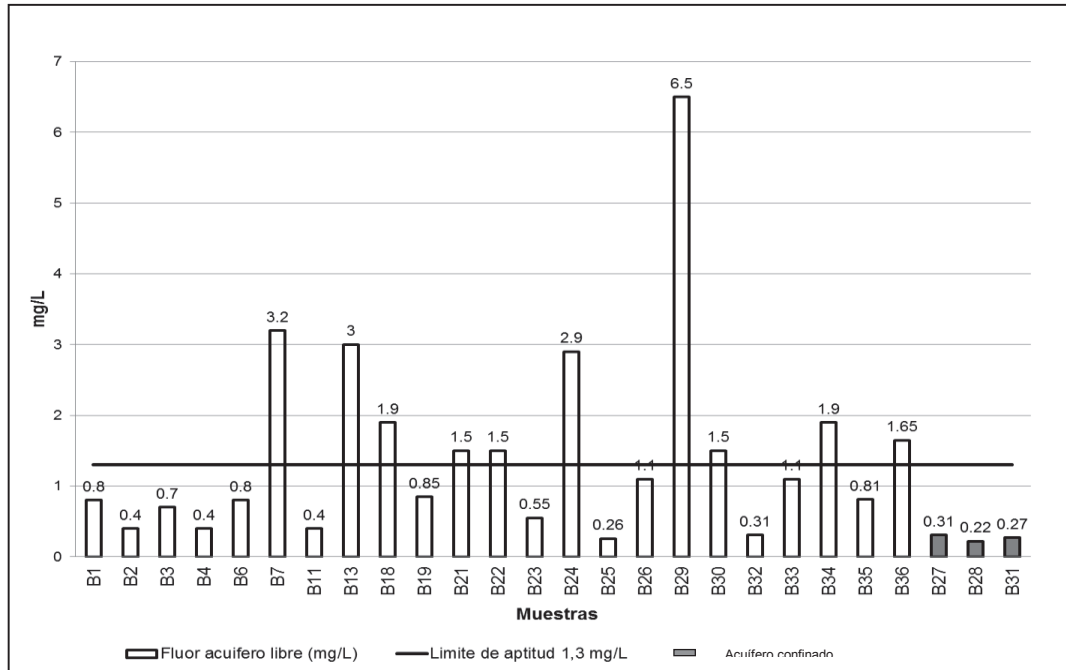


Figura 6.8: Tenores de Flúor en el acuífero libre y confinado de Las Peñas Sur

La presencia de estos elementos químicos (arsénico y flúor) está condicionada por factores naturales, indicando diversos estudios, que las altas concentraciones en el acuífero libre derivarían de los componentes piroclásticos principales del loess (Nicolli et al., 1985; Smedley, 1996; Cabrera y Blarasin, 2001; Villalba, 1999; Smedley et al., 2000; Matteoda, 2012; entre otros). Según Nicolli, et al. (1985, 2005 y 2007) y Nicolli (2006) la fuente de As de los sedimentos en la llanura Chaco Pampeana sería el vidrio volcánico presente en el loess (este mineraloide ha sido identificado para la región del Sur de Córdoba en muy altos porcentajes, Blarasin, 1984; Hernández, 1984; Matteoda, 2012).

Los bajos valores de arsénico y flúor encontrados en las muestras del acuífero confinado podrían deberse a que corresponden a materiales arenosos, con menor porcentaje en vidrio volcánico y materiales más gruesos donde hay un menor tiempo de

contacto agua - sedimentos, tal como se observa en el perfil de la perforación B28 (capítulo 3, figura 3.14).

Con los valores obtenidos de los análisis físico-químicos de las muestras, se realizaron mapas de distribución de concentraciones de nitratos, arsénico y flúor. Los mapas se elaboraron en función de los límites admisibles establecidos por la Secretaria de Recursos hídricos de la Provincia, utilizando para el mapeo el criterio del código del semáforo (Fig.6.9, 10 y 11).

En general, como se observa en los mapas, los menores valores de estos elementos se ubican en la bajada pedemontana y en el sector Norte.

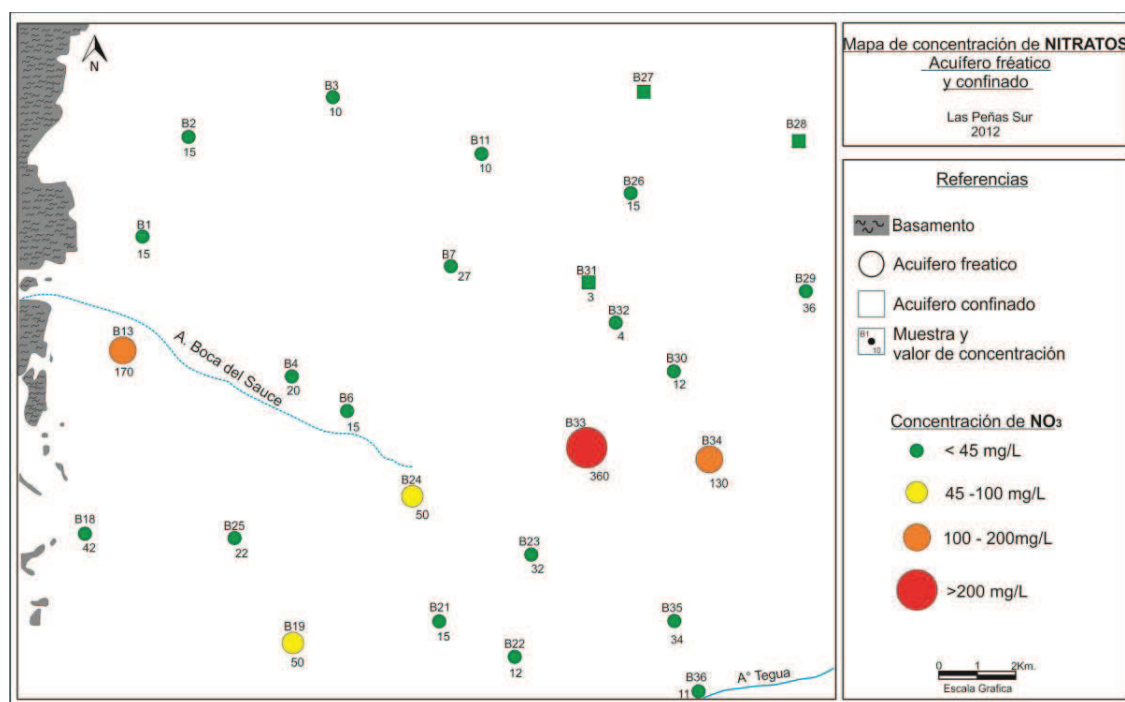


Figura 6.10: Mapa de distribución de concentración de nitratos zona Las Peñas Sur

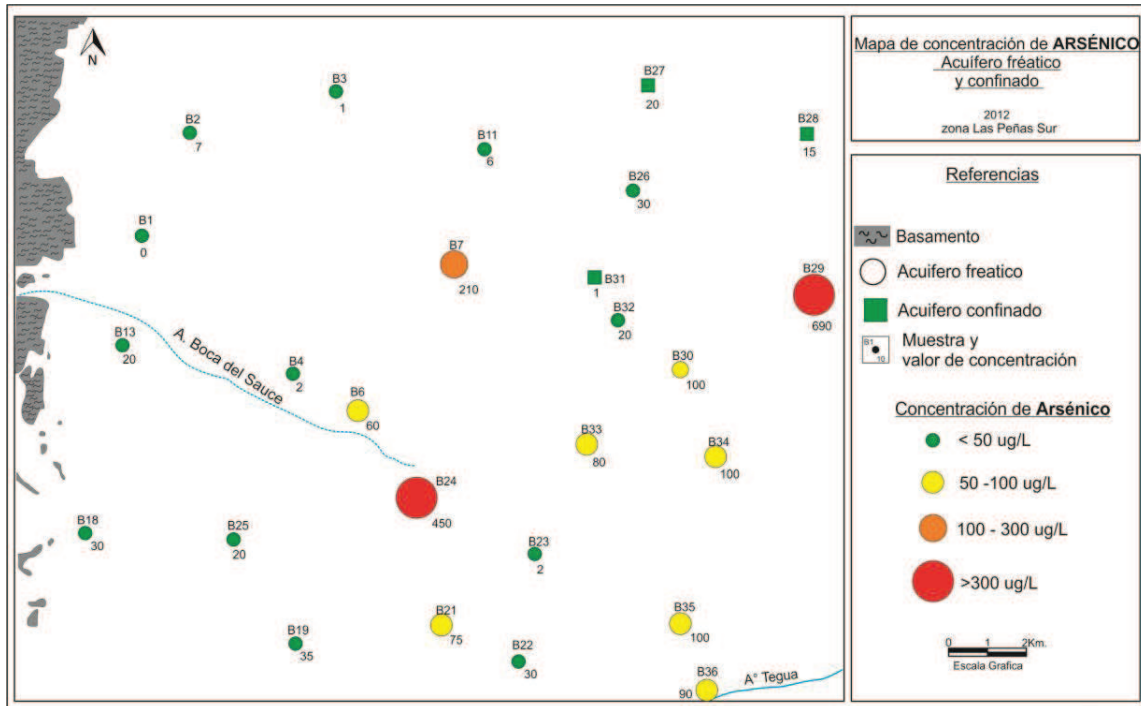


Figura 6.11: Mapa de distribución de concentración de arsénico zona Las Peñas Sur

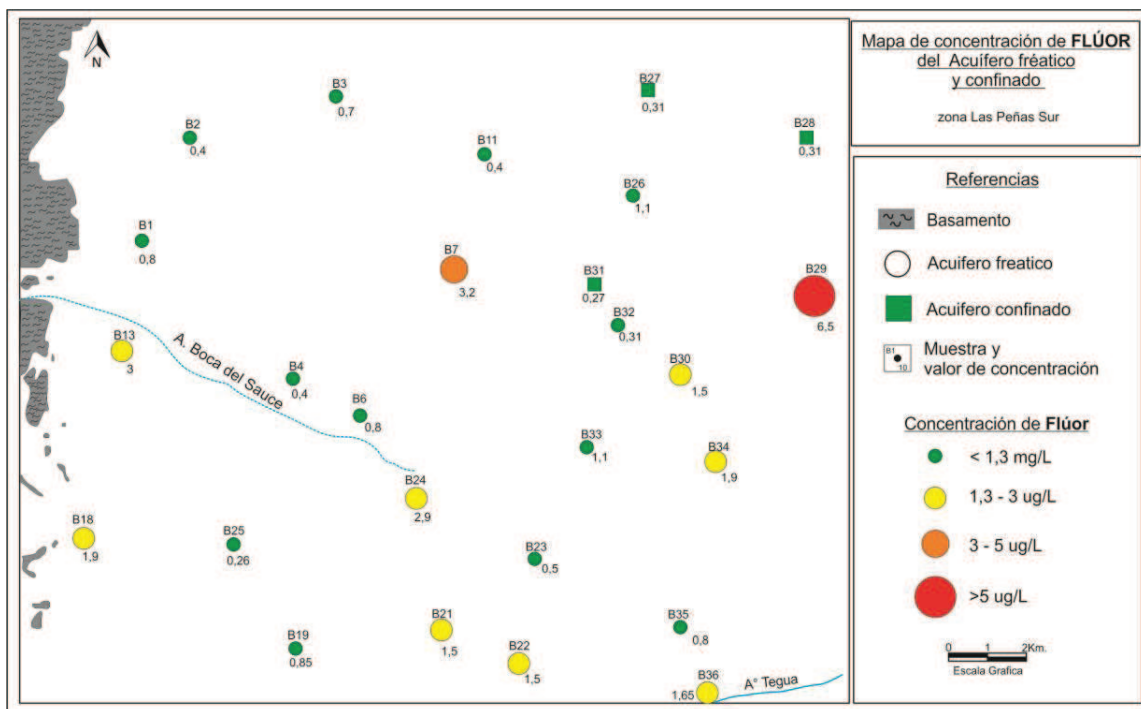


Figura 6.12: Mapa de distribución de concentración de Flúor zona Las Peñas Sur

6.3.4 - Aptitud para consumo humano del agua subterránea

Se considera en este apartado el aspecto utilitario del recurso hídrico subterráneo en la región, respecto a su aptitud para consumo humano.

Muestra	Aptitud	pH (6,5-8,5)	SDT(1500 mg/L)	SO4(400mg/L)	Cl-(350 mg/L)	NO3(45 mg/L)	F-(1,3 mg/L)	As-(50 ug/L)
B1	APTA	7.55	426	48.07	20.00	15.00	0.80	0.00
B2	NO APTA (SDT y SO4)	7.56	3626	1847.71	165.71	15.00	0.40	7.00
B3	APTA	7.58	564	96.28	22.86	10.00	0.70	1.00
B4	NO APTA (SO4)	7.55	1100	679.48	28.57	20.00	0.40	2.00
B6	NO APTA (SDT y SO4 Y As)	7.70	2415	1335.63	28.57	15.00	0.80	60.00
B7	NO APTA (As)	7.80	945	82.54	17.14	27.00	3.20	210.00
B11	APTA	7.72	897	440.48	31.43	10.00	0.40	6.00
B13	NO APTA (SO4 y NO3)	8.04	1365	568.09	28.57	170.00	3.00	4.00
B18	APTA	7.50	1218	440.48	42.86	42.00	1.90	20.00
B19	APTA	8.18	1638	637.71	74.29	50.30	0.85	35.00
B21	NO APTA (SDT, SO4 Y As)	7.82	2471	1319.53	100.00	15.00	1.50	75.00
B22	NO APTA (SDT, SO4)	7.83	1820	976.54	71.43	12.00	1.50	30.00
B23	NO APTA (SDT, SO4)	8.10	1666	661.38	74.29	32.00	0.55	2.00
B24	NO APTA (As)	8.55	1162	103.58	22.86	50.20	2.90	450.00
B25	APTA	7.59	1022	788.08	34.29	22.00	0.26	20.00
B26	NO APTA (SDT y SO4)	8.07	2443	1182.65	31.43	15.00	1.10	30.00
B27	APTA	7.30	1120	289.29	94.29	7.00	0.31	20.00
B28	APTA	7.40	1281	316.67	302.86	24.00	0.22	15.00
B29	NO APTA (SDT, SO4 Y As)	7.80	1939	724.03	57.14	36.00	6.50	690.00
B30	NO APTA (SDT, SO4 Y As)	7.60	2562	1152.06	240.00	12.00	1.50	100.00
B31	NO APTA (SDT, SO4)	7.60	2310	2032.90	342.86	3.20	0.27	1.00
B32	NO APTA (SDT, SO4 Y As)	8.00	3402	1697.95	165.71	4.00	0.31	20.00
B33	NO APTA (SDT, SO4 NO3 y As)	7.60	2478	879.98	162.86	360.00	1.10	80.00
B34	NO APTA (SDT,NO3 y As)	8.10	2226	452.98	171.43	130.00	1.90	100.00
B35	NO APTA (As)	8.50	1519	383.33	148.57	34.00	0.81	100.00
B36	NO APTA	7.70	1078	410.71	42.86	11.00	1.65	90.00

6.4 - Tratamiento estadístico de datos hidroquímicos

6.4.1 - Análisis de correlación lineal simple.

El concepto de correlación se refiere al grado de variación conjunta existente entre dos o más variables. El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de asociación lineal, toma valores que se encuentran dentro del intervalo cerrado $[-1,1]$, de modo que cuando los valores son cercanos a 1 en términos absolutos la dependencia entre las dos variables es estrecha. De otra parte, el signo del mencionado coeficiente denota si nos encontramos ante un tipo de relación directa, para el caso de valores positivos, e inversa, para el caso de valores negativos. Un valor 0 indica que no existe una relación lineal entre ambas variables. (Fig. 6.13)

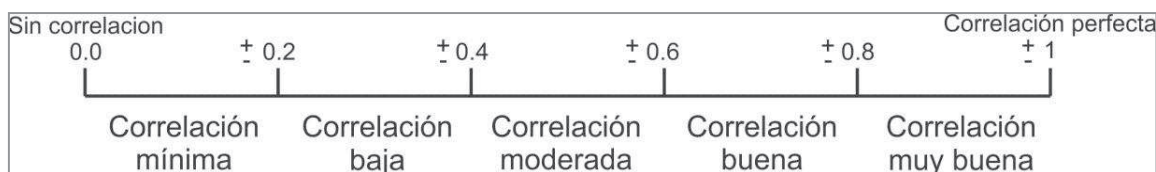


Figura 6.13 Valores del coeficiente de correlación de Pearson

Además se observa si esta correlación es o no significativa, desde el punto de vista estadístico, al estimarse qué tan probable sería observar una correlación de semejante magnitud. Si p es igual o menor que 0,05 (%5) se dice que es estadísticamente significativa, por lo que es poco probable que esta correlación se dé por el azar.

Se observa entonces la correlación entre diferentes componentes como la conductividad eléctrica (CE) y los sulfatos (SO_4), donde se observa una muy buena correlación positiva de 0,886. (Fig. 6.14)

Para el caso de la conductividad eléctrica (CE) y el ion cloruro (Cl) (Fig.6.15), el índice de correlación es bueno, con un valor de 0,709 positivo, y es significativo estadísticamente.

Capítulo 6

		CE	SO4
CE	Correlación de Pearson	1	.886(**)
	Sig. (bilateral)	.	.000
	N	24	24
SO4	Correlación de Pearson	.886(**)	1
	Sig. (bilateral)	.000	.
	N	24	24

** La correlación es significativa al nivel 0.01

Figura 6.14 Correlación de Pearson CE/SO4

		CE	CL
CE	Correlación de Pearson	1	.709(**)
	Sig. (bilateral)	.	.000
	N	24	24
CL	Correlación de Pearson	.709(**)	1
	Sig. (bilateral)	.000	.
	N	24	24

** La correlación es significativa al nivel 0.01

Figura 6.15 Correlación de Pearson CE-CL

Entre la conductividad eléctrica (CE) y el Sodio (Na^+) (Fig. 6.16) se puede ver una correlación buena con un valor de 0,786 positiva y significativa estadísticamente.

Estas correlaciones altas y positivas entre CE y SO_4^- , Cl^- y Na^+ estarían indicando el factor de mineralización del agua por parte de estos iones, especialmente a lo largo del trayecto en el acuífero.

		CE	NA
CE	Correlación de Pearson	1	.786(**)
	Sig. (bilateral)	.	.000
	N	24	24
NA	Correlación de Pearson	.786(**)	1
	Sig. (bilateral)	.000	.
	N	24	24

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Figura 6.16: Correlación de Pearson CE-Na

Con respecto a los elementos traza como el arsénico y flúor (Fig. 6.17 y 6.18), se observa una correlación alta de 0,871, muy buena y significativa, lo que permite pensar en el origen común de ambos elementos, que como se indicara, se vincula a la mineralogía del loess pampeano.

		ARSENICO	FLUOR
ARSENICO	Correlación de Pearson	1	.871**
	Sig. (bilateral)	.	.000
	N	24	24
FLUOR	Correlación de Pearson	.871**	1
	Sig. (bilateral)	.000	.
	N	24	24

** .La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Figura 6.17: Correlación de Pearson As-F

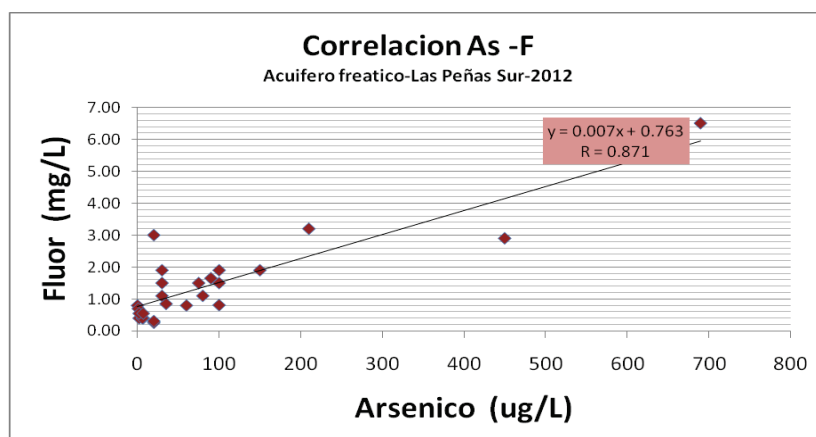


Figura 6.18: Correlación Arsénico – Flúor

La correlación entre el bicarbonato (HCO_3^-) y el arsénico (Fig. 6.19) posee un valor de 0.632, correspondiente a una correlación buena, positiva, y significativa estadísticamente, por lo que se ven vinculados directamente al aumentar o reducir sus concentraciones. Es común que As aumente en aguas alcalinas dado que este elemento aumenta en aguas con altos pH, los que se incrementan con la alcalinidad. En estos casos, los iones OH^- compiten por los sitios de adsorción en partículas pequeñas (por ejemplo óxidos de hierro), liberando el As la agua.

	arsénico	HCO_3
Correlación de Pearson	1	,640 ^{**}
arsénico Sig. (bilateral)		,001
N	24	24
Correlación de Pearson	,640 ^{**}	1
hco3 Sig. (bilateral)	,001	
N	24	24

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Figura 6.19 Correlación de Pearson As-F

En el caso del flúor (F^-) y el calcio (Ca^{++}) (Fig.6.20), se observa una correlación negativa y moderada de -0.419, indicando una correspondencia lineal inversa, donde el valor de uno aumentará cuando disminuya el del otro, y viceversa. Esto corrobora que flúor es estable en aguas sódicas, ya que si hubiera altos contenidos de calcio, flúor precipitaría como fluorita (Cabrera, 2009; Blarasin, 2003)

		F	CA
F	Correlación de Pearson	1	-.419(*)
	Sig. (bilateral)	.	.041
	N	24	24
CA	Correlación de Pearson	-.419(*)	1
	Sig. (bilateral)	.041	.
	N	24	24

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Figura 6.20 : Correlación de Pearson F- Ca⁺⁺

6.4.2 - Análisis estadístico multivariado

El análisis multivariado es de sumo interés, ya que involucra una serie de técnicas estadístico-matemáticas destinadas a realizar un estudio integrado de todos los datos para dilucidar las posibles vinculaciones entre ellos.

Se utilizaron las siguientes variables: pH, Conductividad eléctrica, HCO₃⁻, SO₄⁼, Cl⁻, Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, As^{+3/+5}, F⁻ y NO₃⁻. No se incluyeron en el análisis las sales disueltas totales (SDT), por tenerse en cuenta la conductividad eléctrica (CE), y tampoco carbonatos, por su dependencia de pH.

Se aplicó el método de agrupamiento (Cluster) que permite determinar agrupaciones (tipos, subtipos) a partir de la matriz de similitud resultante de este conjunto de datos

En el dendrograma resultante (Fig. 6.21) se observa la existencia de tres grupos hidroquímicos principales:

- ✓ Grupo 1: constituido por SO₄⁼, Cl⁻, K⁺, Na⁺, Mg⁺, Ca⁺ y CE, que representa al factor de mineralización del agua.
- ✓ Grupo 2, correspondiente a la asociación del núcleo As-F⁻ con HCO₃⁻, enlazados, aunque más débilmente, a pH. Este núcleo puede interpretarse como resultado del origen común de As y F (vinculados a la mineralogía del loess pampeano) y su afinidad, ya indicada, por aguas bicarbonatadas y más altos pH.

- ✓ El Grupo 3 se encuentra definido por NO_3^- , cuyo aislamiento se interpreta como el resultado de su origen debido a contaminación antrópica.

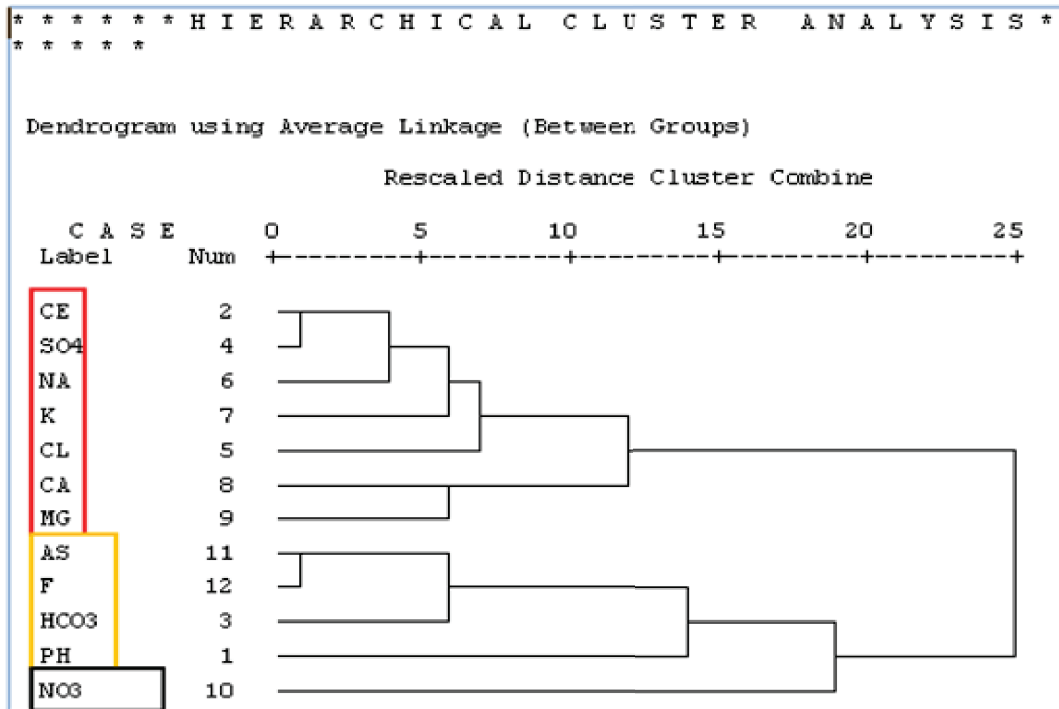


Figura 6.21 Dendrograma de análisis multivariado

Capitulo 7

Conclusiones y
Recomendaciones

7.1 - Conclusiones

La zona estudiada es una típica llanura agradacional pedemontana ligada a la Sierra de las Peñas, ésta última formada por basamento cristalino de edad Precámbrica – Paleozoica inferior, constituido por complejos ígneos-metamórficos (granitoides, gneises, esquistos y migmatitas). Se trata de una planicie muy suavemente ondulada con pendiente general hacia el Este, que fundamentalmente refleja, debido al fuerte control estructural, el descenso gradual de bloques de basamento en esa dirección. El sector más cercano a la sierra es un típico ambiente geomorfológico de bajada, construido a partir de depósitos aluvio-coluviales (paleocauces aislados, abanicos antiguos de poca expresión, etc.) que se disponen sobre el basamento. Se suman los sedimentos eólicos depositados durante las épocas más secas del Cuaternario, los más nuevos cubriendo prácticamente toda el área (Fm. Laguna Oscura), aunque en inmediaciones de las sierras tienen alta participación de gravillas dispersas por lo que no constituyen depósitos eólicos típicos. Localmente se identificaron depósitos fluviales aflorantes de diferentes edades (Pleistoceno sup-actualidad) ligados a las fajas actuales de los arroyos, los más importantes en el arroyo Tegua. En la parte superior de casi todos los perfiles evaluados se observaron depósitos aluviales históricos laminados, previos a la importante incisión que caminos y arroyos sufrieron, de acuerdo a la información regional disponible, en los últimos 50 años más húmedos. Como se observa, el control estructural y el modelado fluvio-eólico, son los condicionantes principales del relieve del área, aunque algunos procesos de erosión hídrica activa muy relevantes tienen, además del climático, un importante componente de origen antrópico.

Las precipitaciones constituyen la principal entrada de agua al sistema fluvial y subterráneo (acuífero), siendo la precipitación media anual de 748,5 mm. Compartiendo un típico comportamiento regional, las máximas precipitaciones se concentran en los meses de primavera-verano, con un porcentaje del 83 % y 17 % en los meses de otoño-invierno. Mediante la realización del balance hídrico seriado de tipo edáfico pudo establecerse que las precipitaciones se reparten en el orden de 90 % como agua devuelta a la atmósfera por evapotranspiración real y 10 % como excesos hídricos que escurren superficialmente y/o infiltran en forma efectiva alcanzando el acuífero .

La red de drenaje del área posee sentido general O-E y está integrada fundamentalmente por bajos topográficos en los que circulan escurrimientos superficiales

de tipo efímeros, de modalidad mantiforme, que en numerosos sectores se concentran en surcos y cárcavas. El arroyo Boca del Sauce, de carácter efímero, con nacientes en la Sierra de Las Peñas, colecta mínimos escurrimientos superficiales del área pedemontana y llanura, respondiendo su funcionamiento hidrológico episódico a las lluvias serranas. Se encuentra encajado entre barrancas de diferente altura (1,5 a 8 m) y posee un marcado trazado rectilíneo O-E, debido en parte al control estructural de la falla Boca del Sauce, a la pendiente del área y a que se trata de una incisión vertical reciente con escasa evolución debido a su régimen hidrológico. El área estudiada incluye parte de un pequeño tramo del arroyo Tegua, de carácter permanente por aporte freático, con nacientes en las Sierras de Comechingones; morfología rectilínea y un alto control estructural, que es receptor de los escurrimientos superficiales de la mitad Sur del área evaluada.

En cuanto al sistema acuífero libre se distinguen en la zona dos ambientes: el medio fracturado y el medio poroso sedimentario. El primero, localizado en la Sierra de Las Peñas y como relictos en la bajada proximal, consiste en un macizo rocoso con fracturas y diaclasas responsables de la porosidad secundaria almacenadora y transmisora de agua. El segundo, corresponde al medio poroso sedimentario de arenas muy finas limosas con intercalaciones locales más gruesas y diferencialmente cementadas con carbonato de calcio. Este medio sedimentario abarca el resto del área estudiada y presenta al basamento como hidroapoyo en la zona cercana a las sierras, mientras que al Este, donde el espesor sedimentario y la profundidad del basamento son mayores, la base del acuífero se correspondería con materiales finos arcillosos y/o areno-fino-limosos cementados. Se identificaron importantes capas acuíferas arenosas a diferentes profundidades (100-200 m) con mayor grado de confinamiento.

Desde el punto de vista hidrodinámico, el acuífero libre presenta morfología de superficie freática con pendiente suavemente ondulada similar al relieve topográfico, con gradientes hidráulicos del orden de 0,9 % al pie de la sierra y 0,4% al Este en la llanura fluvio eólica, con anomalías de mayores gradientes cercanos a la sierra, que pueden atribuirse a cambios en la posición del basamento que actúa como hidroapoyo que, al estar más alto en algunos bloques, produciría la disminución del espesor de la zona no saturada y consecuentemente los cambios en la transmisividad y gradiente.

El funcionamiento hidrodinámico del acuífero freático fue validado con modelación numérica en régimen estacionario, obteniéndose un buen ajuste entre cargas hidráulicas medidas y calculadas ($R= 0,96$, error medio= 1,4 m, error medio absoluto= 7,5 m). En general, se reproduce en forma satisfactoria la configuración de la superficie freática, las

direcciones predominantes de flujo, el carácter efluente del acuífero para el sector modelado, así como también las entradas y salidas del agua al sistema (82,6% ingresa por precipitaciones y 17,3 subterráneamente y 100 % sale subterráneamente). La disminución del error se lograría con más información sobre los sedimentos del acuífero, la profundidad de los diferentes bloques del hidroapoyo y los espesores de la zona saturada ya que, debido a la complejidad estructural, resulta difícil realizar una correcta definición de la geometría del acuífero. El modelo numérico de flujo es en general coherente con el modelo conceptual propuesto de funcionamiento del sistema, ha sido de utilidad para integrar la información recolectada, mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrodinámico y cuantificar el balance de masas de agua.

En relación a la calidad del agua subterránea se observa una evolución geoquímica normal con incremento en el contenido salino en el sentido de la circulación del flujo (Oeste-Este). En la bajada proximal y distal se encuentran CE entre 1000-1500 uS/cm, con algunas anomalías vinculadas al incremento en la concentración de cloruros y/o sulfatos atribuibles a procesos de contaminación puntual (cría concentrada de ganado) y difusa (uso de agroquímicos). En la llanura fluvio-eólica los valores de CE varían de 2000-4500 uS/cm en el sentido del flujo. En cuanto al carácter geoquímico, 74 % son sulfatadas sódicas, 13 % bicarbonatadas sódicas y el resto son de tipo mixto. Las muestras bicarbonatadas y las sulfatadas más dulces se ubican principalmente en el ámbito de la bajada proximal y distal, aspecto que responde a la menor interacción agua-fase sólida en este trayecto y mayor abundancia de sedimentos gruesos. Por su parte, las sulfatadas más saladas, se ubican en la llanura fluvio-eólica, como resultado de más tiempo de interacción del agua con el terreno (mayor trayecto, abundancia de sedimentos finos), que habilita más procesos hidrogeoquímicos (hidrólisis, intercambio iónico, etc.). Las muestras correspondientes a capas confinadas, exhiben diferentes calidades, aunque los procesos involucrados no se evalúan en este trabajo.

Se detectó además la presencia de elementos minoritarios y trazas, como nitratos, arsénico y flúor. Con respecto al nitrato (límite de aptitud= 45 mg/L) el 78 % de las muestras extraídas son aptas para el consumo humano y el 22 % sobrepasan este límite. Los altos tenores hallados (4-360 mg/L), por encima de valores de fondo natural regional (3-15 mg/L), responden a las actividades del uso del territorio que generan contaminación difusa (uso de fertilizantes) y puntual (corrales bovinos cercanos a la captación), siendo necesario un estudio más detallado para evaluar el comportamiento de este contaminante. Con respecto a arsénico, el 43 % de las muestras obtenidas supera el

límite de uso humano en Córdoba de 50 ug/L y en cuanto al flúor, el 43 % se encuentra por encima del límite de 1,3 mg/L. Las mayores concentraciones de As y F, cuyos valores se encuentran estadística y significativamente correlacionados, se corresponden con el ambiente de la llanura fluvio eólica, donde disminuyen los paleocauces y aumentan los espesores eólicos, estos últimos ya citados en la región como fuente principal de estos elementos. Para las capas confinadas, de las 3 muestras sólo 1 resultó apta para consumo. En general, el 70 % de las muestras de agua subterránea extraídas y analizadas resultaron inaptas para consumo humano por excesos de diversos elementos, compuestos o propiedades.

El estudio estadístico multivariado (Cluster) de los iones disueltos en el agua, permitió definir tres grupos. El primero explica la salinidad del agua (aspecto regional), el segundo la asociación de pH altos con aguas bicarbonatadas y elevados tenores de As y F⁻ (aspecto más específico y local), mientras que el último explica aspectos puntuales como la contaminación por nitratos debido a actividades antrópicas, corroborando el modelo conceptual.

En función de la información relevada y del análisis de la misma se puede aseverar que la dinámica del agua subterránea y consecuentemente su calidad, además de la condicionante climática, está fundamentalmente controlada por el relieve y las litologías presentes, mientras que la calidad se encuentra, además, modificada localmente por la actividad humana.

7.2 - Recomendaciones

Se recomienda realizar actividades de mitigación de los procesos erosivos mediante prácticas conservacionistas de suelos y agua, como la realización de cultivos en contorno, rotación de cultivos, reforestación del ambiente serrano.

Con respecto a la simulación numérica, futuros estudios del subsuelo contribuirían al mejoramiento del modelo conceptual para incrementar la confiabilidad del modelo numérico de flujo. Además, la extensión del mismo al análisis temporal permitiría su empleo y aplicación para la gestión de los recursos hídricos subterráneos.

Se debe procurar que las fuentes puntuales de contaminación se ubiquen aguas abajo de las captaciones. En el caso de las fuentes difusas, siempre se debe tratar de disminuir la cantidad y tiempo de vertido de las mismas, especialmente con respecto a la cantidad de agroquímicos utilizados en el sistema agrícola actual.



Anexos



Anexo 1
Datos hidrometeorológicos

Balance hídrico Seriado para la estación Las Peñas sur

Periodo 1991-2009

Agua útil en la capa superior: 25.0mm

Y en la capa inferior: 125mm

Diccionario de variables:

P: Precipitaciones

ETP: Evapotranspiración potencial

ALMAC: Almacenaje

RP: Recarga potencial

R: Recarga

APE: Agua potencialmente extraíble

AE: Agua extraída

ETR: Evapotranspiración Real

ESC: Escurrimiento

	MES	P	ETP	ALMAC.	RP	R	APE	AE	ETR	ESC.
1991	1	107	136	43,9	95,6	0	49,4	10,5	117,5	0
	2	126	96	73,9	106,1	30	28,1	0	96	0
	3	81	92	62,9	76,1	0	46,8	11	92	0
	4	42	56	48,9	87,1	0	27,7	14	56	0
	5	59	36	71,9	101,1	23	11,7	0	36	0
	6	40	22	89,9	78,1	18	22	0	22	0
	7	7	19	77,9	60,1	0	19	12	19	0
	8	22	32	67,9	72,1	0	21,2	10	32	0
	9	19	42	56,3	82,1	0	19,9	11,7	30,7	0
	10	96	73	79,3	93,7	23	27,4	0	73	0
	11	48	93	48	70,7	0	49,3	31,3	79,3	0
	12	159	125	82	102	34	40	0	125	0
1992	1	55	136	35,7	68	0	67,2	46,3	101,3	0
	2	86	96	33,3	114,3	0	22,9	2,4	88,4	0
	3	174	92	115,3	116,7	82	20,5	0	92	0
	4	38	56	97,3	34,7	0	43,7	18	56	0
	5	21	36	85,5	52,7	0	24,5	11,8	32,8	0
	6	0	22	73	64,5	0	12,5	12,5	12,5	0
	7	6	19	66,7	77	0	9,2	6,3	12,3	0
	8	16	32	59,5	83,3	0	14,2	7,1	23,1	0
	9	72	42	89,5	90,5	30	16,7	0	42	0

Anexos

	10	34	73	58,5	60,5	0	45,7	31	65	0
	11	103	93	68,5	91,5	10	36,3	0	93	0
	12	255	125	150	81,5	81,5	54,9	0	125	48,5
1993	1	115	136	129	0	0	117,5	21	136	0
	2	53	96	92,5	21	0	80,7	36,5	89,5	0
	3	85	92	88,2	57,5	0	56,7	4,3	89,3	0
	4	27	56	71,1	61,8	0	32,9	17	44	0
	5	14	36	60,7	78,9	0	17,1	10,4	24,4	0
	6	0	22	51,8	89,3	0	8,9	8,9	8,9	0
	7	0	19	45,2	98,2	0	6,6	6,6	6,6	0
	8	0	32	35,6	104,8	0	9,7	9,7	9,7	0
	9	26	42	31,8	114,4	0	10	3,8	29,8	0
	10	39	73	24,6	118,2	0	15,5	7,2	46,2	0
	11	244	93	150	125,4	125,4	15,2	0	93	25,6
	12	98	125	123,3	0	0	108,3	26,7	124,7	0
1994	1	88	136	83,9	26,7	0	111,8	39,5	127,5	0
	2	21	96	41,9	66,1	0	53,7	41,9	62,9	0
	3	106	92	55,9	108,1	14	25,7	0	92	0
	4	14	56	34,1	94,1	0	25,7	21,8	35,8	0
	5	76	36	74,1	115,9	40	8,2	0	36	0
	6	0	22	52,1	75,9	0	22	22	22	0
	7	0	19	43,9	97,9	0	8,2	8,2	8,2	0
	8	52	32	63,9	106,1	20	9,4	0	32	0
	9	15	42	41,8	86,1	0	26,4	22	37	0
	10	101	73	69,8	108,2	28	20,4	0	73	0
	11	94	93	70,8	80,2	1	45,3	0	93	0
	12	26	125	23,2	79,2	0	55,5	47,6	73,6	0
1995	1	187	136	74,2	126,8	51	21	0	136	0
	2	88	96	66,2	75,8	0	48,3	8	96	0
	3	68	92	46,9	83,8	0	41,6	19,3	87,3	0
	4	18	56	35	103,1	0	17,5	11,9	29,9	0
	5	35	36	34,8	115	0	8,4	0,2	35,2	0
	6	0	22	29,7	115,2	0	5,1	5,1	5,1	0
	7	0	19	25,9	120,3	0	3,8	3,8	3,8	0
	8	0	32	20,4	124,1	0	5,5	5,5	5,5	0
	9	10	42	16	129,6	0	5,7	4,4	14,4	0
	10	52	73	13,8	134	0	7,8	2,2	54,2	0
	11	192	93	112,8	136,2	99	8,6	0	93	0
	12	60	125	64,4	37,2	0	83,5	48,4	108,4	0
1996	1	138	136	66,4	85,6	2	58,4	0	136	0
	2	144	96	114,4	83,6	48	42,4	0	96	0
	3	42	92	74,5	35,6	0	64,9	39,9	81,9	0
	4	93	56	111,5	75,5	37	27,8	0	56	0

Anexos

	5	0	36	80,1	38,5	0	31,3	31,3	31,3	0
	6	0	22	68,4	69,9	0	11,8	11,8	11,8	0
	7	0	19	59,7	81,6	0	8,7	8,7	8,7	0
	8	0	32	47	90,3	0	12,7	12,7	12,7	0
	9	0	42	33,8	103	0	13,2	13,2	13,2	0
	10	32	73	24,6	116,2	0	16,5	9,2	41,2	0
	11	143	93	74,6	125,4	50	15,2	0	93	0
	12	111	125	60,6	75,4	0	58,1	14	125	0
1997	1	135	136	59,6	89,4	0	52,3	1	136	0
	2	54	96	39	90,4	0	38,4	20,6	74,6	0
	3	64	92	31,7	111	0	23,9	7,3	71,3	0
	4	39	56	28,1	118,3	0	11,8	3,6	42,6	0
	5	0	36	21,4	121,9	0	6,8	6,8	6,8	0
	6	16	22	20,5	128,6	0	3,1	0,9	16,9	0
	7	6	19	18,7	129,5	0	2,6	1,8	7,8	0
	8	5	32	15,4	131,3	0	4	3,4	8,4	0
	9	47	42	20,4	134,6	5	4,3	0	42	0
	10	42	73	12,7	129,6	0	12	7,7	49,7	0
	11	133	93	52,7	137,3	40	7,9	0	93	0
	12	201	125	128,7	97,3	76	43,5	0	125	0
1998	1	143	136	135,7	21,3	7	101,7	0	136	0
	2	99	96	138,7	14,3	3	77,4	0	96	0
	3	49	92	100,1	11,3	0	75,8	38,6	87,6	0
	4	85	56	129,1	49,9	29	37,4	0	56	0
	5	32	36	125,1	20,9	0	32,6	4	36	0
	6	13	22	116,1	24,9	0	21,7	9	22	0
	7	0	19	99,2	33,9	0	16,9	16,9	16,9	0
	8	0	32	78	50,8	0	21,2	21,2	21,2	0
	9	42	42	78	72	0	21,9	0	42	0
	10	25	73	53,1	72	0	38	25	50	0
	11	134	93	94,1	96,9	41	32,9	0	93	0
	12	128	125	97,1	55,9	3	71	0	125	0
1999	1	162	136	123,1	52,9	26	78,3	0	136	0
	2	29	96	70,6	26,9	0	71,4	52,5	81,5	0
	3	223	92	150	79,4	79,4	43,3	0	92	51,6
	4	103	56	150	0	0	50,8	0	56	47
	5	0	36	115,8	0	0	34,2	34,2	34,2	0
	6	12	22	108,1	34,2	0	17	7,7	19,7	0
	7	3	19	96,6	41,9	0	13,7	11,5	14,5	0
	8	10	32	82,4	53,4	0	20,6	14,2	24,2	0
	9	30	42	75,8	67,6	0	23,1	6,6	36,6	0
	10	104	73	106,8	74,2	31	36,9	0	73	0
	11	129	93	142,8	43,2	36	62,1	0	93	0

Anexos

	12	262	125	150	7,2	7,2	103,5	0	125	129,8
2000	1	146	136	150	0	0	117,5	0	136	10
	2	62	96	117,5	0	0	84,2	32,5	94,5	0
	3	63	92	94,8	32,5	0	72,1	22,7	85,7	0
	4	146	56	150	55,2	55,2	35,4	0	56	34,8
	5	42	36	150	0	0	34,2	0	36	6
	6	0	22	128	0	0	22	22	22	0
	7	10	19	120	22	0	16,3	8	18	0
	8	0	32	94,4	30	0	25,6	25,6	25,6	0
	9	0	42	68	55,6	0	26,4	26,4	26,4	0
	10	99	73	94	82	26	33,1	0	73	0
	11	157	93	150	56	56	56,3	0	93	8
	12	128	125	150	0	0	108,3	0	125	3
2001	1	117	136	131	0	0	117,5	19	136	0
	2	0	96	50	19	0	81	81	81	0
	3	148	92	106	100	56	30,7	0	92	0
	4	88	56	138	44	32	41,7	0	56	0
	5	7	36	110	12	0	33,3	28	35	0
	6	4	22	96,8	40	0	16,1	13,2	17,2	0
	7	0	19	84,5	53,2	0	12,3	12,3	12,3	0
	8	20	32	77,8	65,5	0	18	6,8	26,8	0
	9	62	42	97,8	72,2	20	21,8	0	42	0
	10	63	73	87,8	52,2	0	47,5	10	73	0
	11	65	93	68,4	62,2	0	53	19,3	84,3	0
	12	114	125	63,4	81,6	0	57	5	119	0
2002	1	112	136	53,3	86,6	0	57,5	10,1	122,1	0
	2	78	96	46,9	96,7	0	34,1	6,4	84,4	0
	3	138	92	92,9	103,1	46	28,8	0	92	0
	4	190	56	150	57,1	57,1	39	0	56	76,9
	5	0	36	115,8	0	0	34,2	34,2	34,2	0
	6	0	22	98,8	34,2	0	17	17	17	0
	7	17	19	97,5	51,2	0	12,5	1,3	18,3	0
	8	18	32	88,4	52,5	0	20,8	9,1	27,1	0
	9	3	42	65,4	61,6	0	24,8	23	26	0
	10	21	73	42,8	84,6	0	31,8	22,7	43,7	0
	11	156	93	105,8	107,2	63	26,5	0	93	0
	12	99	125	80,2	44,2	0	78,8	25,5	124,5	0
2003	1	64	136	41,7	69,8	0	72,7	38,5	102,5	0
	2	54	96	30	108,3	0	26,7	11,7	65,7	0
	3	139	92	77	120	47	18,4	0	92	0
	4	76	56	97	73	20	35,8	0	56	0
	5	2	36	67,7	53	0	30,3	29,3	31,3	0
	6	3	22	59,1	82,3	0	9,9	8,6	11,6	0

Anexos

	7	29	19	69,1	90,9	10	7,5	0	19	0
	8	0	32	50,5	80,9	0	18,7	18,7	18,7	0
	9	0	42	36,3	99,5	0	14,1	14,1	14,1	0
	10	24	73	24,5	113,7	0	17,7	11,9	35,9	0
	11	49	93	17,3	125,5	0	15,2	7,2	56,2	0
	12	213	125	105,3	132,7	88	14,4	0	125	0
2004	1	107	136	78,1	44,7	0	84,4	27,1	134,1	0
	2	111	96	93,1	71,9	15	50	0	96	0
	3	96	92	97,1	56,9	4	55,1	0	92	0
	4	16	56	67,2	52,9	0	38,3	29,9	45,9	0
	5	85	36	116,2	82,8	49	16,1	0	36	0
	6	0	22	94,2	33,8	0	22	22	22	0
	7	45	19	120,2	55,8	26	12,7	0	19	0
	8	0	32	90,8	29,8	0	29,4	29,4	29,4	0
	9	0	42	65,3	59,2	0	25,4	25,4	25,4	0
	10	87	73	79,3	84,7	14	31,8	0	73	0
	11	91	93	77,3	70,7	0	48,4	2	93	0
	12	174	125	126,3	72,7	49	61,2	0	125	0
2005	1	169	136	150	23,7	23,7	100	0	136	9,3
	2	228	96	150	0	0	84,2	0	96	132
	3	72	92	130	0	0	80,8	20	92	0
	4	20	56	99,2	20	0	47,5	30,8	50,8	0
	5	7	36	80	50,8	0	23,8	19,2	26,2	0
	6	7	22	72	70	0	11,7	8	15	0
	7	4	19	64,8	78	0	9,1	7,2	11,2	0
	8	6	32	53,6	85,2	0	13,8	11,2	17,2	0
	9	5	42	40,4	96,4	0	15	13,2	18,2	0
	10	36	73	30,4	109,6	0	19,6	10	46	0
	11	115	93	52,4	119,6	22	18,8	0	93	0
	12	51	125	19,9	97,6	0	42,9	32,5	83,5	0
2006	1	119	136	17,6	130,1	0	18	2,3	121,3	0
	2	134	96	55,6	132,4	38	11,3	0	96	0
	3	96	92	59,6	94,4	4	38,7	0	92	0
	4	138	56	141,6	90,4	82	32,2	0	56	0
	5	0	36	108,1	8,4	0	33,6	33,6	33,6	0
	6	0	22	92,2	41,9	0	15,8	15,8	15,8	0
	7	0	19	80,5	57,8	0	11,7	11,7	11,7	0
	8	0	32	63,4	69,5	0	17,2	17,2	17,2	0
	9	3	42	46,9	86,6	0	17,7	16,5	19,5	0
	10	56	73	41,6	103,1	0	22,8	5,3	61,3	0
	11	185	93	133,6	108,4	92	25,8	0	93	0
	12	70	125	86,9	16,4	0	97,4	46,7	116,7	0
2007	1	267	136	150	63,1	63,1	78,7	0	136	67,9

Anexos

	2	88	96	142	0	0	84,2	8	96	0
	3	184	92	150	8	8	79,5	0	92	84
	4	62	56	150	0	0	50,8	0	56	6
	5	27	36	141	0	0	34,2	9	36	0
	6	10	22	129	9	0	21	12	22	0
	7	0	19	112,5	21	0	16,5	16,5	16,5	0
	8	0	32	88,5	37,5	0	24	24	24	0
	9	57	42	103,5	61,5	15	24,8	0	42	0
	10	29	73	71,4	46,5	0	49,2	32,1	61,1	0
	11	40	93	46,2	78,6	0	44,3	25,2	65,2	0
	12	83	125	33,2	103,8	0	38,5	12,9	95,9	0
2008	1	250	136	147,2	116,8	114	30,1	0	136	0
	2	30	96	88,8	2,8	0	82,9	58,4	88,4	0
	3	102	92	98,8	61,2	10	54,5	0	92	0
	4	22	56	74,6	51,2	0	37,2	24,2	46,2	0
	5	0	36	56,7	75,4	0	17,9	17,9	17,9	0
	6	0	22	48,4	93,3	0	8,3	8,3	8,3	0
	7	0	19	42,3	101,6	0	6,1	6,1	6,1	0
	8	0	32	33,2	107,7	0	9	9	9	0
	9	23	42	29	116,8	0	9,3	4,2	27,2	0
	10	49	73	24,4	121	0	14,1	4,6	53,6	0
	11	202	93	133,4	125,6	109	15,1	0	93	0
	12	87	125	99	16,6	0	97,3	34,4	121,4	0
2009	1	148	136	111	51	12	89,8	0	136	0
	2	118	96	133	39	22	67,4	0	96	0
	3	95	92	136	17	3	73,2	0	92	0
	4	0	56	88,1	14	0	47,9	47,9	47,9	0
	5	6	36	70,4	61,9	0	21,1	17,6	23,6	0
	6	0	22	60,1	79,6	0	10,3	10,3	10,3	0
	7	10	19	56,5	89,9	0	7,6	3,6	13,6	0
	8	0	32	44,5	93,5	0	12,1	12,1	12,1	0
	9	40	42	43,9	105,5	0	12,4	0,6	40,6	0
	10	6	73	24,3	106,1	0	21,3	19,6	25,6	0
	11	124	93	55,3	125,7	31	15	0	93	0
	12	144	125	74,3	94,7	19	45,2	0	125	0
2010	1	43	136	26,9	75,7	0	61,5	47,3	90,3	0
	2	151	96	81,9	123,1	55	17,2	0	96	0
	3	65	92	56,2	68,1	0	50,4	25,8	90,8	0
	4	84	56	84,2	93,8	28	21	0	56	0
	5	4	36	56,4	65,8	0	29,3	27,8	31,8	0
	6	6	22	50,4	93,6	0	8,3	6	12	0
	7	0	19	44	99,6	0	6,4	6,4	6,4	0
	8	0	32	34,6	106	0	9,4	9,4	9,4	0

Anexos

	9	54	42	46,6	115,4	12	9,7	0	42	0
	10	42	73	30,2	103,4	0	26,1	16,4	58,4	0
	11	91	93	29,8	119,8	0	18,7	0,4	91,4	0
	12	62	125	17,3	120,2	0	24,9	12,5	74,5	0
2011	1	123	136	15,8	132,7	0	15,7	1,5	124,5	0
	2	52	96	11,2	134,2	0	10,1	4,6	56,6	0
	3	46	92	7,7	138,8	0	6,8	3,4	49,4	0
	4	45	56	7,2	142,3	0	2,9	0,6	45,6	0
	5	0	36	5,5	142,8	0	1,7	1,7	1,7	0
	6	16	22	5,2	144,5	0	0,8	0,2	16,2	0
	7	0	19	4,6	144,8	0	0,7	0,7	0,7	0
	8	7	32	3,8	145,4	0	1	0,8	7,8	0
	9	38	42	3,7	146,2	0	1,1	0,1	38,1	0
	10	114	73	44,7	146,3	41	1,8	0	73	0
	11	101	93	52,7	105,3	8	33,9	0	93	0
	12	80	125	24	97,3	0	43,5	28,7	108,7	0
2012	1	47	136	9,8	126	0	21,8	14,2	61,2	0
	2	127	96	40,8	140,2	31	6,3	0	96	0
	3	36	92	12,5	109,2	0	32	28,3	64,3	0
	4	14	56	9	137,5	0	4,7	3,5	17,5	0
	5	29	36	8,6	141	0	2,2	0,4	29,4	0
	6	0	22	7,3	141,4	0	1,3	1,3	1,3	0
	7	0	19	6,4	142,7	0	0,9	0,9	0,9	0
	8	20	32	5,9	143,6	0	1,4	0,5	20,5	0
	9	95	42	58,9	144,1	53	1,6	0	42	0
	10	180	73	150	91,1	91,1	35,8	0	73	15,9
	11	102	93	150	0	0	81,7	0	93	9
	12	90	125	116,7	0	0	108,3	33,3	123,3	0

Anexo 2

Análisis de laboratorio

N° Muestra	pH	Cond. [uS/cm]	S.D.T. [mg/l]	CO ₃ ²⁻ [meq/l]	CO ₃ H ⁻ [meq/l]	SO ₄ ²⁻ [meq/l]	Cl ⁻ [meq/l]	Na ⁺ [meq/l]	K ⁺ [meq/l]	Ca ⁺ [meq/l]	Mg ⁺ [meq/l]	F ⁻ [meq/l]	NO ₃ ⁻ [meq/l]	NO ₂ ⁻ [meq/l]
B1	7.55	608	426	0.00	5.68	1.01	0.56	2.04	0.16	3.04	1.04	0.04	0.24	0
B2	7.56	5180	3626	0.00	4.28	38.80	4.64	41.74	0.58	12.32	3.96	0.02	0.24	0
B3	7.58	806	564	0.00	5.40	2.02	0.64	3.83	0.22	2.80	3.32	0.04	0.16	0
B4	7.55	1571	1100	0.00	5.00	14.27	0.80	11.74	0.30	5.28	1.48	0.02	0.32	0
B6	7.70	3450	2415	0.00	5.72	28.05	0.80	15.83	0.53	7.24	5.88	0.04	0.24	0
B7	7.8	1350	945	0	9.52	1.7333424	0.48	13.22	0.23	0.48	0.36	0.17	0.43	0
B11	7.72	1282	897.4	0.00	4.96	9.25	0.88	9.65	0.25	3.08	1.40	0.02	0.16	0
B13	8.04	1950	1365	0.00	8.92	11.93	0.80	16.61	0.28	3.76	2.88	0.16	2.72	0
B18	7.50	1740	1218	0.00	7.92	9.25	1.20	11.57	0.31	5.12	2.32	0.10	0.67	0
B19	8.18	2340	1638	0.00	8.60	13.39	2.08	21.91	0.47	1.52	1.04	0.04	0.80	0
B21	7.82	3530	2471	0.00	4.32	27.71	2.80	28.30	0.68	4.24	5.56	0.08	0.24	0
B22	7.83	2600	1820	0.00	5.64	20.51	2.00	22.70	0.47	2.40	2.40	0.08	0.19	0
B23	8.10	2380	1666	0.00	7.76	13.89	2.08	20.61	0.64	1.96	1.32	0.03	0.51	0
B24	8.55	1660	1162	0.32	11.56	2.18	0.64	15.13	0.23	0.24	0.36	0.15	0.80	0
B25	7.59	1460	1022	0.00	3.68	16.55	0.96	13.04	0.51	3.80	2.60	0.01	0.35	0
B26	8.07	3490	2443	0.00	5.40	24.84	0.88	32.61	0.41	2.36	1.76	0.06	0.24	0
B27	7.30	1600	1120	0.00	8.00	6.08	2.64	8.00	0.42	5.20	3.40	0.02	0.11	0
B28	7.40	1830	1281	0.00	2.48	6.65	8.48	10.78	0.43	4.96	1.92	0.01	0.38	0
B29	7.80	2770	1939	0.00	10.60	15.20	1.60	28.17	0.25	0.76	0.88	0.34	0.58	0
B30	7.60	3660	2562	0.00	6.04	24.19	6.72	32.26	0.55	2.80	3.52	0.08	0.19	0
B31	7.60	3300	2310	0.00	2.04	42.69	9.60	33.39	0.63	13.92	9.64	0.01	0.05	0
B32	8.00	4860	3402	0.00	2.84	35.66	4.64	25.65	0.61	10.76	3.36	0.02	0.06	0
B33	7.60	3540	2478	0.00	7.56	18.48	4.56	34.70	0.51	1.88	1.84	0.06	5.76	0
B34	8.10	3180	2226	0.00	10.72	9.51	4.80	29.35	0.41	1.12	1.00	0.10	2.08	0
B35	8.5	2170	1519	0.48	6.88	8.05	4.16	21.57	0.15	0.36	0.44	0.04	0.54	0
B36	7.7	1540	1078	0	5.48	8.625	1.2	14.17	0.27	1.12	0.68	0.09	0.18	0

Bibliografía

Bibliografía

-Albouy R., J Carrica y G. Bonorino, 2005. El acuífero libre del área industrial costera de Bahía Blanca: modelo preliminar del flujo. Congreso Hidrogeológico Argentino. Rio Cuarto.Arg.Tomo 1 Pag 161-170 - ISBN 950-665-346-1.Ed. Blarasin et al.

-Anderson M. and W. Woessner, 2002. Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport. Ed Academic Press.

-Baldo E. G., Saavedra J., Pankhurst R. J., Rapela C., Casquet W. y C.Galindo. 1999. Síntesis geocronológica de la evolución paleozoica inferior del borde sudoccidental de Gondwana en las Sierras Pampeanas, Argentina. Acta Geológica Hispánica, 32, 15-26.

-Bocanegra E., D. Martínez, H Massone y M. Farenga, 2005. Modelación numérica preliminar del flujo subterráneo de la cuenca del río Quequén. Bs As. Congreso Hidrogeológico Argentino. Rio Cuarto.ARG.Tomo 1-pág. 191 -200 - ISBN 950-665-346-1.Ed. Blarasin et al.

-Bettioli A. 2012. Estudio neotectónico de fallas con actividad cuaternaria ubicadas al Sur de la sierra de Las Peñas. Informe de Tesis de licenciatura. Dpto de Geología. UNRC. Dir: G. Sagripanti. Inédito.

-Blarasin M. 1984. Hidrología subterránea de la zona de Laguna Oscura. Córdoba. Tesis de Lic. U.N.R.C. Inédito.

-Blarasin M., 2003. Geohidrología Ambiental del Sur de Córdoba, con énfasis en la ciudad de Río Cuarto y su entorno rural. Tesis Doctoral. UNRC. Inédita.

-Blarasin M., 2004. Groundwater shallow systems and indicators of environmental changes in the South of Córdoba province, Argentina. Holocene environmental catastrophes in South America: From the lowlands to the Andes. March 11--17, 2005. Laguna Mar Chiquita-Miramar, Córdoba Province, Argentina

-Blarasin M. 2005. Groundwater shallow systems and indicators of environmental changes in the South of Córdoba province, Argentina. Holocene environmental catastrophes in South America: From the lowlands to the Andes. Laguna Mar Chiquita-Miramar, Córdoba Province, Argentina

-Blarasin M. 2006. Arsénico en aguas subterráneas del Sur de Córdoba y consideraciones estadísticas para el cálculo de la línea de base de la calidad del agua. Conferencia dictada en el marco de la reunión "El arsénico en Iberoamérica. Distribución,

metodologías analíticas y tecnologías de remoción". Invitación cursada por responsables de la RED CYTED Red Temática 406RT0282 Iberoarsen.

-Blarasin M., Cabrera A., Matteoda E., Damilano G. y J. Giuliano Albo, 2008. Indicadores para evaluar cambios ambientales en acuíferos. Consideraciones sobre el fondo natural de la calidad de agua. En "Evaluación de la sustentabilidad amb. en sistemas agropecuarios" Cantú, Becker, Bedano (Eds.) ISBN 978-987-1003-58-7 pag. 69-80 Ed. UNRC

-Blarasin M., Damilano G., Cabrera A. y E. Matteoda. 2006. Hidrogeoquímica del acuífero freático en un agroecosistema y consideraciones sobre el cálculo de la línea de base de la calidad del agua. Memorias del VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Paraguay. 25 pp.

-Blarasin M., Cabrera A. y N. Alincaastro. 2011. Evaluación del nivel freático y consideraciones en relación a procesos de recarga-descarga del acuífero. Rio Cuarto, Córdoba, Argentina. VII Congreso Argentino de Hidrogeología V Seminario Hispanolatinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Salta. Argentina.

-Blarasin M., Cabrera A., Torti S. y M. Defacci. 2011b. Hidrogeoquímica del acuífero freático y análisis de la incidencia de ingesta de agua con flúor en pobladores rurales, Sampacho, Córdoba. VII Congreso Argentino de Hidrogeología V Seminario Hispanolatinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Salta. Argentina.

-Blarasin M., Cabrera A. y G. Villalba. 2001a. Groundwater contaminated with arsenic and fluoride in the Chaco-Pampeana Plain. Journal of Environmental Hydrology. ISSN: 1058-3912. International Association of Environmental Hydrology. Paper 6. Vol. 9. 9 pp.

-Blarasin M., Cabrera A., Matteoda E., Gomez M., Hildmann F., Bettera A. y G. Villalba. 2004. "El problema ético de la escasa disponibilidad de agua apta para consumo humano en áreas rurales del Sur de Córdoba: indicadores ambientales de estado y respuesta". Presentado en la II Jornadas de Bioética. 20 y 21 de octubre. UNRC. 10 pag.

-Blarasin M., Cabrera A. y S. Degiovanni. 2000. "Hidrogeología Regional: el agua subterránea como recurso fundamental del Sur de la provincia de Córdoba". Actas Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas. Fortaleza. Brasil.

Bibliografía

-Blarasin M. y A. Cabrera. 2005. Aguas subterráneas: hidrolitología, hidrodinámica e hidrogeoquímica regional. En Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Cba.: una perspectiva geambiental. Ed. UNRC ISBN: 950-665-350-X. pp. 235-241.

-Bodenbender, G., 1905. La Sierra de Córdoba. Constitución geológica y productos minerales de aplicación. Anales del Ministerio de Agricultura de la Nación, Y, No 2, pp. 1-150.

-Bodenbender G., 1929. Triásico y Terciario en la falda oriental de la sierra de Córdoba. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias, Córdoba. XIX, 1, pp. 1-220.

-Bonalumi A., Escayola, M., Kraemer P., Baldo E. y E. Martino. 1999. Sierras Pampeanas (Córdoba, Santiago del Estero). A) Precámbrico paleozoico inferior de las Sierras de Córdoba. Geología Regional Argentina. 136 p.

-Bonalumi A., Martino R., Sfragula J., Carignano C. y A. Tauber. 2005. Hoja Geológica Villa María (3363-I). SEGEMAR. 74 pp.

-Bonalumi A. A. y A. A. Gigena. 1987. Relación entre las metamorfitas de alto grado y las rocas básicas y ultrabásicas en el Departamento de Calamuchita, Córdoba. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 42: 73-81.

-Bonorino F. 1950. Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. Revista de la Asociación Geológica Argentina V(3) pp. 81-110.

Cantú M., 1992. Holoceno de la prov. de Córdoba. Manual: Holoceno de la Rep. Arg. Tomo I. Simposio Internacional sobre el Holoceno en América del Sur. 24 pág. Paraná. Argentina.

-Cantú M., 1998. Estudio geocientífico para la evaluación ambiental y ordenación territorial de una cuenca pedemontana. Caso: Cca. Arroyo La Colacha, Dpto. Río Cuarto, provincia de Córdoba. Inédito. Tesis Doctoral. Dpto de Geología. UNRC.

-Cantu M., A. Becker y H. Schiavo. 1996. Molisoles desarrollados en loess del Pleistoceno superior de Córdoba, Argentina. CD Com 05-049. XIII Congreso Latino Americano de la Ciencia del Suelo. Agosto 1996, Brasil.

-Cantú M. P., Becker A. R., Bedano J. C., Blarasin M., Parra B., Cabrera A., Grumelli, M. del T., Matteoda E. y H. Eschiavo. 2008. Estudio de caso Córdoba: Cuenca del arroyo La Colacha. En: Evaluación de la sustentabilidad ambiental en sistemas agropecuarios. Desarrollo y aplicación de la metodología del proyecto REDESAR.

Bibliografía

Fundación UNRC. EFUNARC. Cantú, M. P., Becker, A. R. Y J. C. Bedano Eds. ISBN: 978-987-1003-58-7.

-Cantú M.P., Schiavo, H.F., Musso T.B. y A. R. Becker. 2004. Paleosuelos del Pleistoceno superior? Holoceno del Sur de la provincia de Córdoba, Argentina. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, junio de 2004. 12 p.p.

-Cantú M. y S. Degiovanni. 1984. Geomorfología de la Región Centro Sur de Córdoba. IX Congreso Geológico Argentino. San Carlos de Bariloche. Actas IV: 76-92.

-Capitanelli R. G., 1979. Clima. En: Geografía física de la Provincia de Córdoba. Editorial BOLDT pág 45-138.

-Chebli G., Mozetic M., Rossello C. y M. Bühler. 1999. Cuencas Sedimentarias de la Llanura Chacopampeana. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Geología Argentina. Anales 29 (20): 627-644. Bs. As.

-Chebli G., Spalletti L., Rivarola D., Elorriaga E. y R. Webster. 2006. Cuencas cretácicas de la región central de la Arg. Simp. especial de Geol. de Hidrocarburos.

-Chien C. C., Medina Jr. M. A., Pinder G. F., Reible D. D., Sleep B. E. y Ch. Zheng. 2004. Contaminated Ground Water and Sediment. Modeling for Management and Remediation. Lewis Publishers. ISBN 0-56670-667-X.

-Costa C. 1996. Análisis neotectónico en las Sierras de San Luis y Comechingones: problemas y métodos. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas II: 285-300.

Costa C., Gonzalez Díaz E., Murillo M., Gardini C., Giaccardi A., Sequeiros J. y S. Bea. 1999 b. Morfoneotectónica del frente de levantamiento andino de la Sierra de Comechingones, Cba. y San Luis. XIV Congr. Geológico Argentino, Actas I: 32-33.

-Custodio E. y M. R. Llamas. 1996. Hidrología subterránea, vol. I. Barcelona, 1.157 p., Omega (1ª ed. 1984).

-Custodio E. 1993. Hidrogeoquímica e Isotopía ambiental. Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Bocanegra y Rapaccini (Eds.). Mar del Plata. Pp. 61-78.

-Custodio E. y M. Llamas. 1983. Hidrología subterránea. Ediciones Omega. Barcelona. 2 Vol. 1-2350.

-Dalla Salda L., 1984. La estructura íntima de las Sierras de Córdoba. Revista Asociación Geológica Argentina, 39: 38-51.

Bibliografía

-Dalla Salda L., 1987. Basement tectonics of the Southern Pampean Ranges, Argentina. *Tectonics* 6: 249-260.

-Degiovanni S. 2005. Geomorfología Regional. En *Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Cba.: una perspectiva geoambiental*. Ed. UNRC. Río Cuarto. ISBN 950-665-350-X

-Degiovanni, S., 2008. Análisis geoambiental del comportamiento de los sistemas fluviales del Sur de Córdoba, en especial del arroyo Achiras-del Gato, como base para su gestión sustentable. Tesis Doctoral. UNRC. Inédito.

-Degiovanni S., Villegas M. y N. Doffo. 2003. Geomorfología del extremo Sur de la Sierra de Comechingones. II Cong. Nac. de Cuaternario y Geomorfología (S.M.Tucumán). *Cuaternario y Geomorfología*. ISBN 987-9390-47-4. pág 257-266.

-Degiovanni S. y M. Blarasin. 2005. Hidrología superficial y morfodinámica de sistemas fluviales. En *Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Cba.: una perspectiva geoambiental*. Ed. UNRC. Río Cuarto. ISBN950-665-350.

-Degiovanni S. y M. Cantú. 1997. Neotectonic activity in the La Cruz-Gigena depression, Córdoba, Argentina. Fourth International Conference on Geomorphology. Suplemento III. Tomo 1: 142. Bologna. Italia.

-Degiovanni S., Villegas M., Blarasin M. y G. Sagripanti. 2005. Hoja Geológica 3363-III Río Cuarto. Provincia de Córdoba. Esc. 1:250.000. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Boletín N° 349. SEGEMAR. Servicio Geológico Minero Argentino.

-Demichelis A. 1986. Geología de la Sierra de Las Peñas. Tesis de Licenciatura. Inédita. Universidad Nacional de Río Cuarto.

-Demichelis A.H., Rabbia O. M., Ayers J., Otamendi J. E. y A.Tibaldi. 2008. Nuevos aportes al conocimiento del Orógeno Pampeano: dataciones U-Pb e isótopos Nd y Sr en metagrauvas y rocas ígneas, en la Sierra de Comechingones, Cba. XVII Congreso Geológico Argentino, Actas III, pp 1340. Jujuy.

-Francisco Quintana Salvat, 2000 "Caracterización geológica y geomorfológica para la prevención de desastres naturales y antrópicos en el faldeo oriental de la sierra de las peñas y adyacencias (Las Peñas Sur)" Fotoint. N°1-2 Vol.IX Pags. 372-385.

-**Geuna, Silvana E.** et al. La susceptibilidad magnética del batolito de Achala (Devónico, Sierra Grande de Córdoba) y sus diferencias con otros granitos achalianos. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* [online]. 2008, vol.63, n.3 [citado 2013-03-04], pp. 380-394 . Disponible en: <http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48222008000300006&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1851-8249.

-**Gordillo C. E.** 1984. Migmatitas cordieríticas de la Sierra de Córdoba, condiciones físicas de la migmatización. Academia Nacional de Ciencias, Miscelánea 68, 1-40.

-**Gordillo C. y A. Lencinas.** 1967. Geología y petrología del extremo norte de la Sierra de Los Cóndores. Boletín de la Academia Nac. de Ciencias, 46:73-108. Córdoba.

-**Gordillo C. y A. Lencinas.** 1979. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. 2º Simp. de Geol. Reg. Arg., Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, I, 577-650.

-**Gorgas J.A., Tassile J., Jarsún B., Zamora E., Bosnero E., Lovera E., Ravelo A., Carnero M., Bustos V., Pappalardo J., Petropulo G., Rossetti E. y M. Ledesma.** 2003. Los recursos naturales de la Provincia de Córdoba: Los suelos. Agencia Córdoba D.A.C. y T.S.E.M. Dirección de Ambiente-INTA Manfredi.

-**Introcaso A., Lion A. y V. Ramos,** 1987. La estructura profunda de las Sierras de Córdoba. *Rev. de la Asoc. Geol. Arg.* 42:177-187.

-**Kraemer P., Escayola M. y R. Martino.** 1995. Hipótesis sobre la evolución neoproterozoica de las Sierras Pampeanas de Córdoba. 30° LS 32° LS. Provincia de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 50: 47-59.

Martino R., Kraemer P., Escayola M., Giambastiani M. y M. Arnosio. 1995. Transecta de las Sierras Pampeanas de Córdoba a los 32° S. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 50: 60-77

-**Matteoda E.** 2007. Evaluación hidrodinámica e hidrogeoquímica de la cuenca del arroyo El Barreal para establecer línea de base ambiental, con énfasis en la geoquímica del cromo. Doctorado en Ciencias Geológicas. 1º informe de avance. UNRC.

-**Matteoda E., Blarasin M. y A. Cabrera.** 2005a. Caracterización geohidrológica ambiental de la cuenca media y alta del arroyo El Barreal. Elena. Córdoba. 10 pp. En: *Aguas superficiales y subterráneas del sur de Córdoba: Una perspectiva geoambiental.* Blarasin M., Degiovanni S., Cabrera A. y M. Villegas Compiladores. UNRC. ISBN: 950-665-350-X.

-Matteoda E., Blarasin M., Sender B. y J. Cantero. 2005b. Comportamiento hidrológico del Sistema Humedal El Barreal y su importancia en la retención de cromo derivado de efluentes. Córdoba. Argentina. En: Relación aguas superficiales- aguas subterráneas. Blarasin M., Cabrera A. y E. Matteoda Compiladores. UNRC. Río Cuarto, Córdoba, Argentina. 11 pp. ISBN: 950-665-349-6.

-Matteoda E., Blarasin M., Damilano G. y Cabrera A. 2007. Valores característicos del fondo natural de flúor y arsénico en aguas subterráneas en la cuenca del arroyo El Barreal, Córdoba. II Taller sobre arsénico en aguas. V Congreso Hidrogeol. Argentino. Entre Ríos. 31-41. ISBN: 978-987-23936-4-9.

-Matteoda E., Blarasin M., Damilano G. y A. Cabrera. 2008. Contaminación por nitratos en el acuífero freático: análisis del fondo natural y relaciones con las actividades de uso del territorio. IX Congreso ALHSUD Quito, Ecuador.

-Matteoda E., Blarasin M., Cabrera A., Gómez L., Avalis F. y A. Rumie Vittar, 2003. "Los ecosistemas rurales del Sur de Córdoba y la problemática del arsénico en el agua subterránea: aspectos generales y ejemplos en las cuencas del arroyo del Barreal y Chaján". Presentado en la IX Reunión Nacional de Arsénico. Organizado por el Ministerio de Salud de la Nación.

-Matteoda E., Blarasin M., Damilano G. y Cabrera A. 2007. Valores característicos del fondo natural de flúor y arsénico en aguas subterráneas en la cuenca del arroyo El Barreal, Córdoba. "II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea". – Taller sobre arsénico en aguas: Hacia una integración de las investigaciones. Entre Ríos. ISBN: 978-987-23936-4-9

-Matteoda E., Blarasin M., Damilano G., Cabrera A. y J. Giuliano Albo. 2009. Cromo en aguas subterráneas y superficiales en el entorno de una curtiembre, relación con valores de fondo natural. Elena, Córdoba. Boletín Geológico y Minero. España. 120: (4). 617-630. ISSN: 0366-0176.

-Matteoda E., Blarasin M. y A. Cabrera. 2011. Hidrogeoquímica de un acuífero freático sedimentario. relación con aspectos dinámicos, modelacion geoquímica y procesos de mezcla. Córdoba. Argentina. VII Congreso Argentino de Hidrogeología V Seminario Hispanolatinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Salta. Argentina.

Bibliografía

-Matteoda E. M., Blarasin M., Vives L., Cabrera A. y J. Felizzia. 2011b. Modelación numérica del flujo de agua subterránea del acuífero freático sedimentario de la cuenca del arroyo El Barreal, Córdoba. ASAGAI. En prensa.

-Matteoda E. M. y M. Blarasin. 2011c. Arsénico en aguas subterráneas en la zona rural de Elena, Córdoba. 1º Taller El Arsénico como factor limitante en la producción agrícola-ganadera". UBA.

-Matteoda, E. M.:2012 "Evaluación hidrodinámica e hidrogeoquímica de la cuenca del arroyo El Barreal para establecer línea de base ambiental, con énfasis en la geoquímica del cromo". Tesis doctoral UNRC

-McDonald M. y A. Harbaugh. 1988. MODFLOW, A modular three- dimensional finite difference ground-water flow model. U. S. Geological Survey, Open-File Report 83-875, Chapter A1, Washington, DC.

-OMS (Organización Mundial de la Salud). 2006. Guías para la calidad del agua potable. Apéndice 1. Vol. 1: Recomendaciones. ISBN 92 4 154696 4.

-Ramos V. A. 1999. Rasgos Estructurales del Territorio Argentino. Geología Argentina. Anales 29 (24): 715-784. Instituto de Geología y Recursos Minerales.

-Rapela C. W., Pankhurst R. J., Casquet C., Baldo E., Saavedra J. y C. Galindo, 1998. Early evolution of the proto-andean margin of South America. *Geology* 26 (8) 707-710.

-Rapela W., Pankhurst R. J., Kirschbaum A. y E. Baldo, 1991. Facies intrusivas de edad Carbónica en el batolito de Achala: evidencias de anatexis regional en las Sierras Pampeanas. Congreso Geológico Chileno. Vol. I, 40-43.

-Rasmuss J., 1916. Rasgos geológicos generales de las Sierras Pampeanas. Dirección General de Minas, Geología e Hidrología. Bol. 13-B, Buenos Aires.

-Ravelo C. 1990. PDIMES. Balance hídrico seriado - Indices de sequía y humedad del cultivo. Manual Teórico/operativo. Asociación Agronómica de Agrometeorología. 8 pág.

-Renz H. 1993. Caracterización Hidrogeológica preliminar del área central de Córdoba. Trabajo Final. UNC. Inédito. Córdoba. Argentina.

Bibliografía

-**Rodriguez L. y Vionnet C.** Integración de los código Modflow y Kineros para la simulación de la integración río-acuífero. Congreso Nacional de Hidrogeología . Entre Rios 177-186. Ed. Diaz et al.

-**Sagripanti G.** 2006. Neotectónica y Peligro sísmico de la región de Sampacho. Dpto. Río Cuarto, Prov. de Córdoba. Tesis Doctoral. UNRC. Inédito.

-**Trovatto M., Alvarez M., Hernandez M. y Gonzalez N.,** Modelo matemático preliminar del sector Sur de Península Valdezz, región patgónica, Argentina. Congreso Nacional de Hidrogeología. Entre Rios 392-400. Ed. Diaz et al.

-**Visual MODFLOW. 1999.** The fully integrated, three-dimensional, graphical modeling environment for professional groundwater flow and contaminant transport modeling. Waterloo Hydrogeologic Inc.

-**Vives L., Custodio E. y Rodríguez L.,** 2009. "Planificación y Gestión de Aguas Subterráneas". Editado por la Asociación Civil Grupo Argentino de la Asociación Internacional de Hidrología Subterránea. ISBN 978-987- 1082-38-4, Ed. Amerindia Nexa Di Napoli, 234 p.

- **Varni M, Entriagas I. y Vives L, 2010.** "Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura". Editado para el 1º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires, 21-24 de septiembre 2010. Editorial Martín. ISBN 978-987-543-392-2, dos volúmenes, 794 p.