



Exploración de aguas subterráneas en el Arco Seco de Panamá (Sector de Las Tablas) mediante métodos geofísicos

Alberto Caballero

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

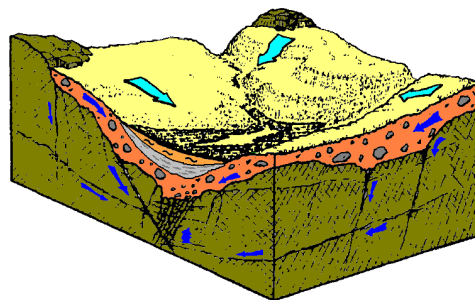
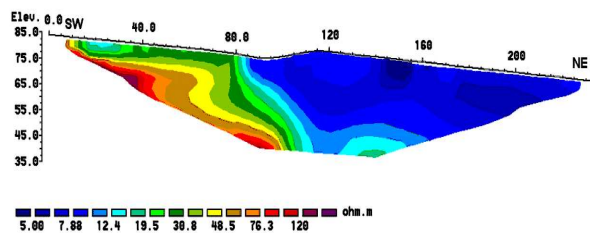
WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

Facultat de Geologia
Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica

TESIS DOCTORAL

**EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN
EL ARCO SECO DE PANAMÁ (SECTOR DE LAS
TABLAS) MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

ALBERTO CABALLERO



Barcelona, 2009

Capítulo 6

Discusión

6.1. Discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación, constituyen una contribución significativa al conocimiento de los recursos hídricos subterráneos del sector de Las Tablas en la Provincia de Los Santos. Este sector, está ubicado en el denominado Arco Seco de Panamá.

La investigación, se realizó a partir de la integración de los datos geológicos, geofísicos e hidrogeológicos disponibles o datos nuevos generados a lo largo de este trabajo. La misma, puede considerarse en el marco de la Hidrogeofísica. Ésta última, es una moderna disciplina en la frontera entre la Geofísica y la Hidrogeología, la que evoluciona muy rápidamente. Su objetivo es la aplicación de los métodos geofísicos en la exploración y el control de la zona vadosa y los acuíferos subyacentes. El agua subterránea, es un componente clave del subsuelo, tanto en la zona saturada como en la no saturada. Es por ello que, los métodos eléctricos, son los más adecuados para estudiar la geometría de las zonas de almacenamiento y drenaje de las aguas subterráneas.

La información, resultado de esta investigación, si bien no es completa ni exhaustiva, establece conclusiones que permiten proponer estrategias para facilitar la exploración de las aguas subterráneas en la zona de estudio y también, por extensión, en otras regiones de la República de Panamá con condiciones geológicas similares.

Desde el punto de vista geológico, la zona de estudio se conoce sólo de forma muy superficial, ya que no existe ninguna cartografía de detalle (escala menor que 1:200.000) ni tampoco ninguna síntesis geológica moderna. No existen columnas estratigráficas de las formaciones sedimentarias y la datación paleontológica es difícil a causa de la ausencia o mala preservación de los fósiles. Por otro lado, las características estructurales y litológicas distan mucho de ser las de un terreno monótono, como se pudiera deducir de algunas cartografías regionales, ya que dentro de una misma formación se incluyen litologías muy diversas.

A parte de la escasez de información geológica previa, los afloramientos son escasos y altamente meteorizados a causa de la densa vegetación y el clima.

Esto sucede, generalmente, en las regiones de clima tropical. Por este motivo, las técnicas geofísicas juegan un papel fundamental.

El modelo conceptual hidrogeológico de la zona está representado en la figura 6.1, donde se distingue el drenaje superficial en dirección a las quebradas, que a su vez coinciden con las principales fracturas que actúan como ejes de drenaje subterráneo. Además, los niveles de alteración superficial y los sedimentos detríticos acumulados en los valles constituyen localmente acuíferos con baja capacidad de almacenamiento, sin embargo aprovechables para el abastecimiento de pequeñas comunidades.

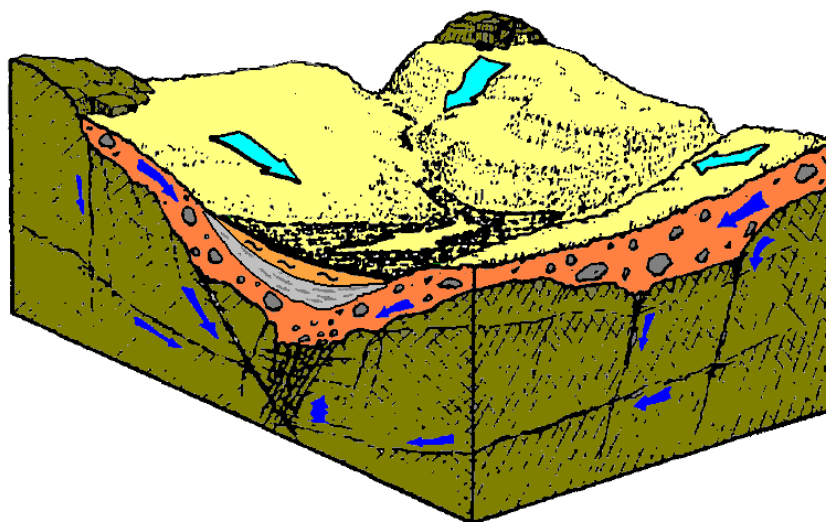


Figura 6.1. Modelo conceptual hidrológico general de la zona de estudio

Los métodos geofísicos empleados en este estudio, se seleccionaron en función de los objetivos planteados y de los medios técnicos disponibles. La combinación de técnicas de campo natural y a escala regional, como la magnetometría y la gravimetría, con los métodos geoelectrónicos de detalle. En este sentido, los SEV's y las tomografías eléctricas han demostrado su complementariedad y compatibilidad. Esto ha permitido obtener respuestas coherentes con las hipótesis planteadas para resolver el problema en estudio. Esta estrategia es razonable si se considera, como indica Plata (2000), que no existen recetas que garanticen a priori el éxito de una metodología sobre un contexto geológico determinado. Al contrario, es a lo largo de una campaña y sobre todo al final cuando se pueden valorizar los resultados, su coherencia con

las hipótesis de partida y su aplicación para la resolución de un determinado problema.

La importancia de la cartografía magnética para delimitar las principales estructuras regionales se ha puesto claramente de manifiesto, como puede observarse en la figura 6.2., modificada de Santamaría (2008).

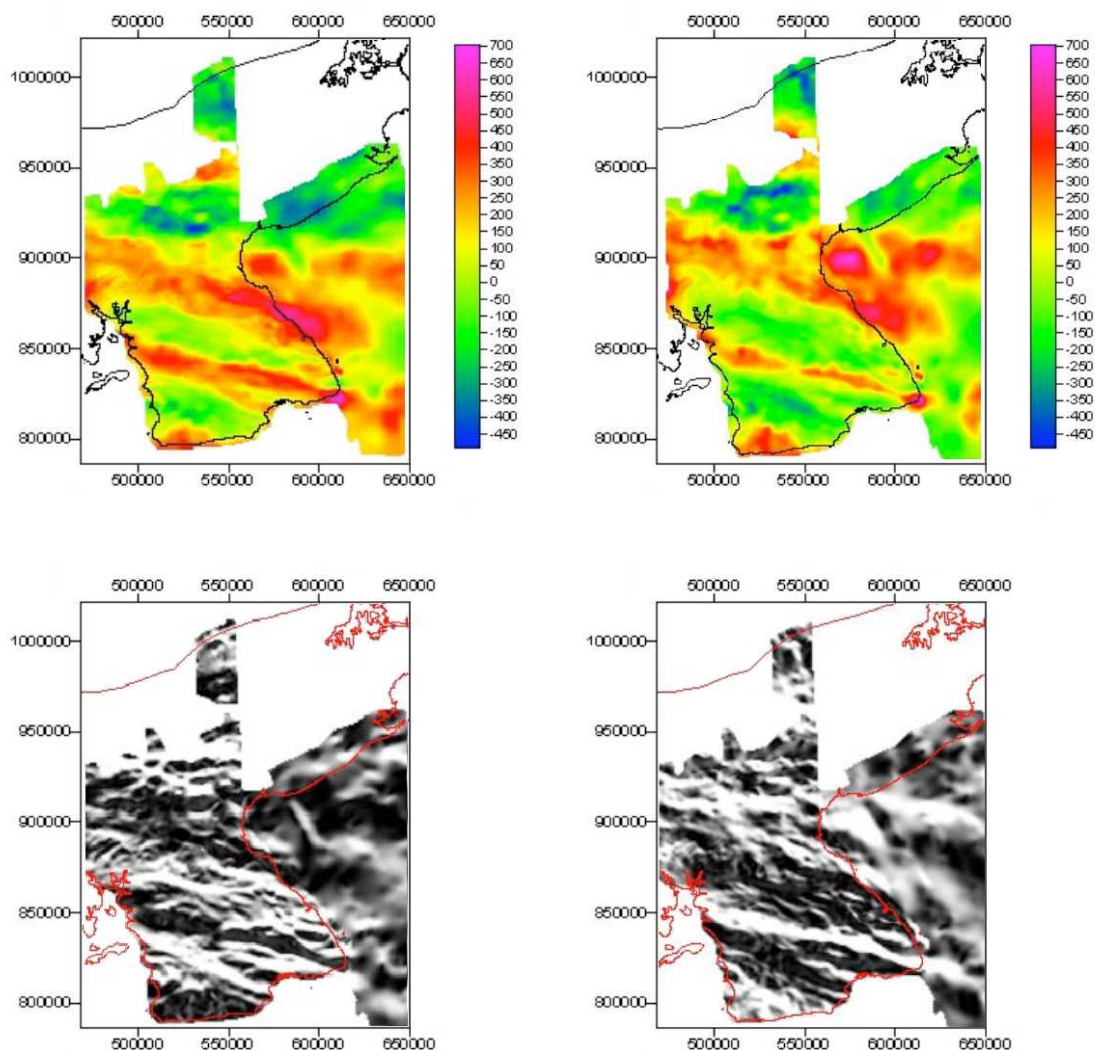


Figura 6.2. Anomalías magnéticas de la Península de Azuero. Mapa de anomalías de campo total (arriba izquierda). Mapa de anomalías reducidas al polo (arriba derecha). Mapa de anomalías con iluminación desde el NE (abajo izquierda). Mapa de anomalías con iluminación desde el N (abajo derecha). Modificado de Santamaría (2008).

El sistema de fallas regionales, detectado en el mapa de anomalías magnéticas sigue una orientación que coincide con las establecidas por algunos autores (del Giudice & Recchi, 1969; Buchs 2009). En el mapa de anomalías magnéticas destaca, por ejemplo, la falla de Pedasí, con orientación NW-SE y el

sistema de fallas paralelas a ésta. También se podrían considerar las E-W. Sin embargo, la estructura local presenta variaciones a este criterio y en algunas zonas se observan alineaciones perpendiculares a estas estructuras.

Por otro lado, los datos de campo, indican que el sector de San José ha sufrido esfuerzos tangenciales, lo cual se hace evidente al observar la orientación del sistema de fallas que rodea al valle, particularmente a través de la falla de Pedasí y otras alineaciones estructurales de dirección W-E. Los resultados del método gravimétrico son consistentes con estas estructuras, como se observa en el mapa de anomalías residuales de la figura 6.3.

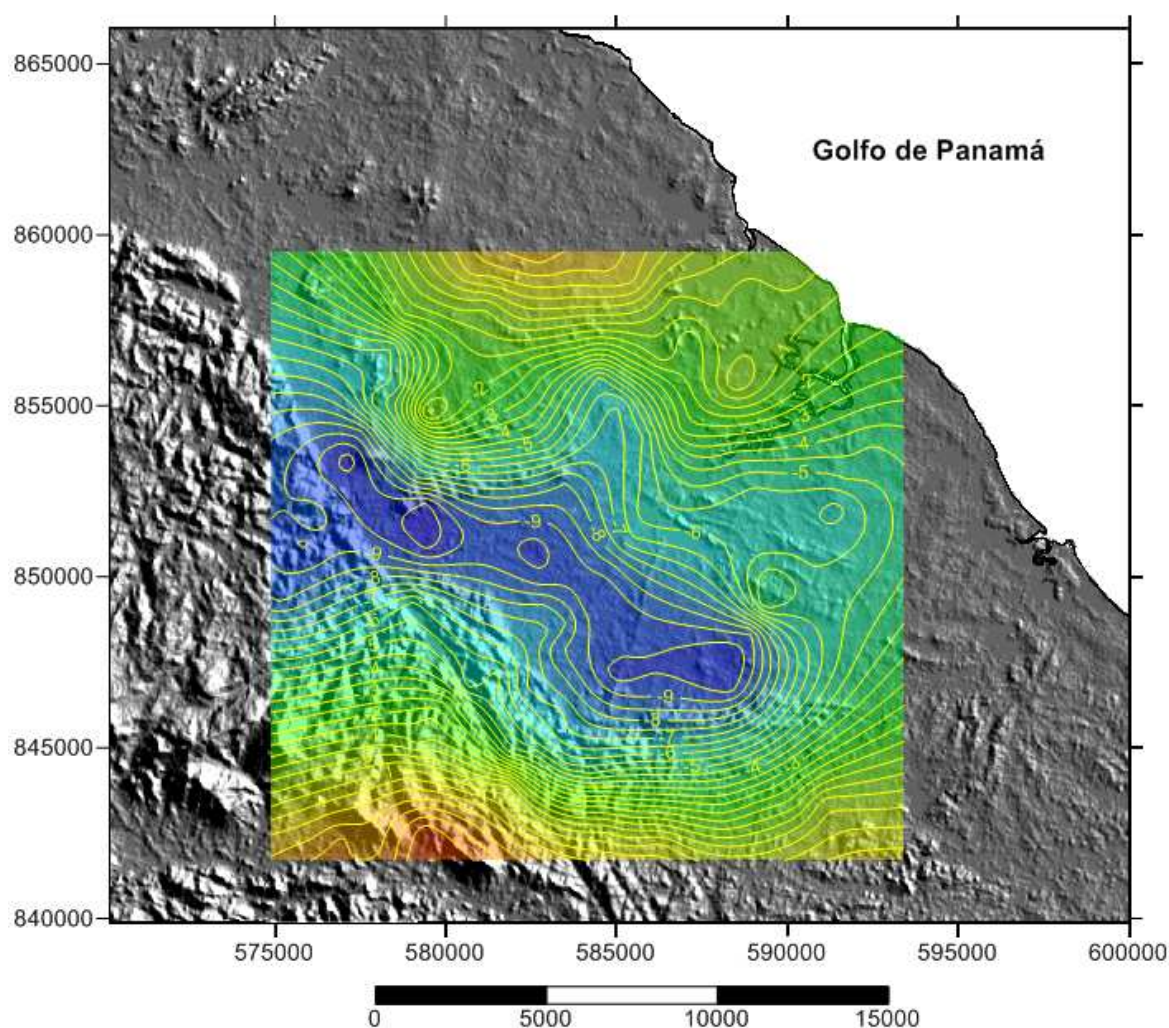


Figura 6.3. Mapa de anomalías gravimétricas residuales superpuesto al modelo digital del relieve en el que se muestra la correlación entre las alineaciones estructurales y las zonas de máximo gradiente o de inflexión del trazado de las líneas de isonomalía, como sucede con la falla de Pedasí de rumbo NW-SE.

El análisis e interpretación de los datos gravimétricos ha permitido establecer la geometría y el grosor de sedimentos en la cuenca situada al sur de San José, que según el modelo ajustado para un contraste de densidad de $0,4 \text{ g/cm}^3$ alcanza 700 metros en el depocentro. La gravimetría, ha contribuido a mejorar el conocimiento estructural de la zona de las Tablas, en particular la orientación y límites de la falla de Pedasí y fallas satélites.

En el caso de los métodos geoelectrónicos, el cálculo de la respuesta de modelos teóricos facilita la interpretación de los datos de campo. Además, ayuda a comprender y resolver el problema de la equivalencia, ya que se puede incorporar información a priori o comprobar el efecto de iniciar el proceso de inversión a partir de una u otra hipótesis geológica.

También es importante una adecuada selección del dispositivo eléctrico, ya que en función de la sensibilidad y penetración puede dar lugar a modelos substancialmente diferentes como han demostrado Martorana et al., 2009.

Al mismo tiempo, el método de inversión seleccionado también incide en el tipo de respuesta obtenida (Seaton & Burbey, 2002).

Los perfiles de tomografía eléctrica adquiridos en este estudio, han sido interpretados, por ajuste de los datos de resistividad aparente, mediante el método de inversión robusta; que ha mostrado ser más efectivo para reconstruir los diferentes modelos geológicos.

En la figura 6.4, se muestra como los lentejones resistivos se definen claramente sobre el fondo de baja resistividad del grueso paquete de lutitas subyacente del perfil SONN1.

Los dispositivos eléctricos empleados han sido el Wenner y el Wenner-Schlumberger.

La interpretación de los datos de campo de la tomografía SONN1, comparada con la columna litológica del sondeo mecánico del IDAAN, muestra similitud con los cálculos del modelo. Esta interpretación se muestra en la figura 6.5. Tal como se discutió en las tomografías SONN7 y SanJ17, la aplicación de esta metodología proporciona una adecuada solución al problema.

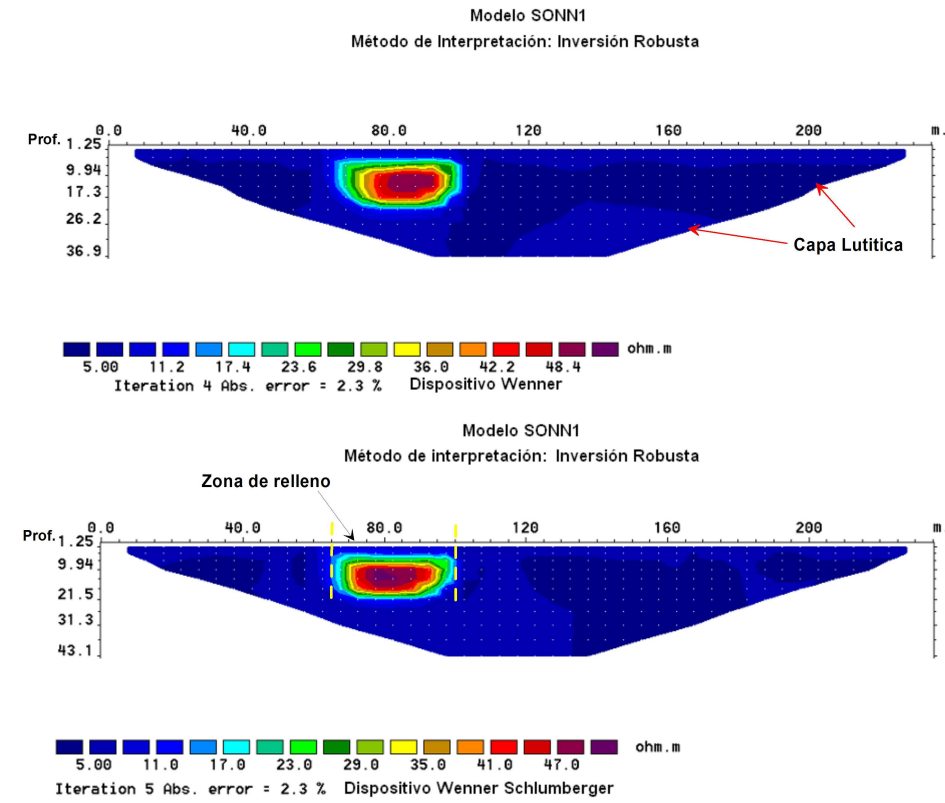


Figura 6.4. Resultado de los diferentes métodos de inversión para el perfil SONN1.

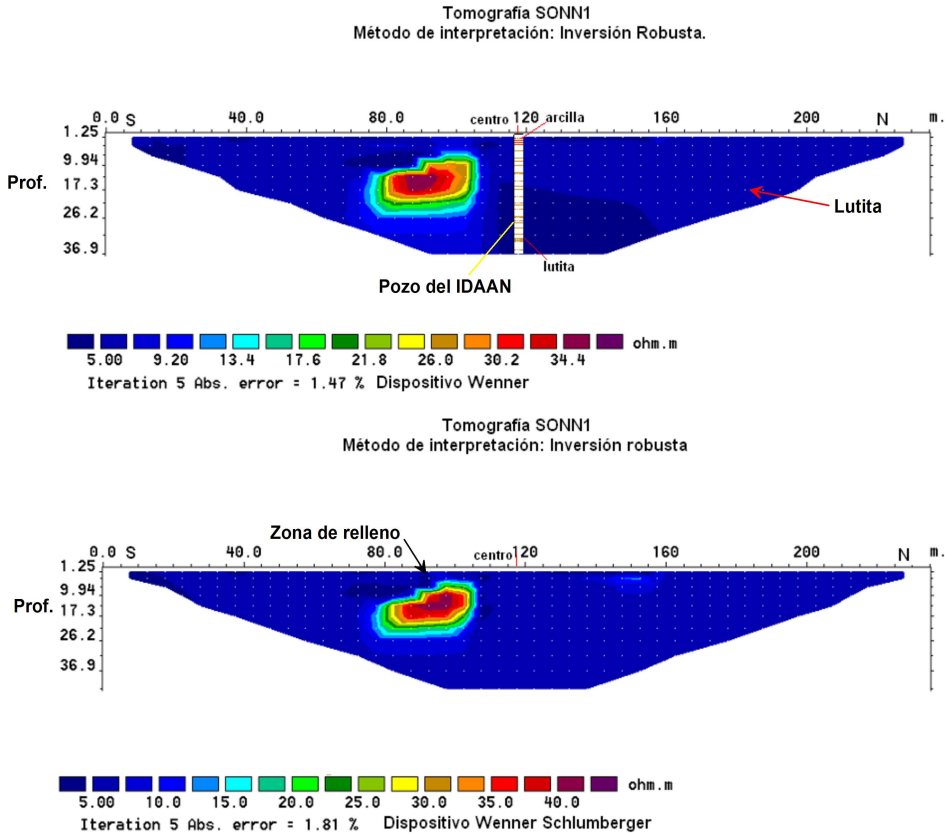


Figura 6.5. Comparación de la interpretación de los datos de campo con diferentes dispositivos.

La determinación de paleocanales y niveles de terrazas subyacentes se ha logrado satisfactoriamente mediante el empleo de las tomografías eléctricas. Esto se muestra en la tomografía SONN5, realizada en una terraza de la margen izquierda del río Mensabé (figura 6.6). En ésta se identifica el contraste de resistividad entre las lutitas y el conglomerado arcilloso. En estos casos es determinante realizar tomografías antes de realizar pozos exploratorios para no perforar en las zonas lutíticas. Resultados similares se han obtenido en la tomografía SONN4 (figura 5.25).

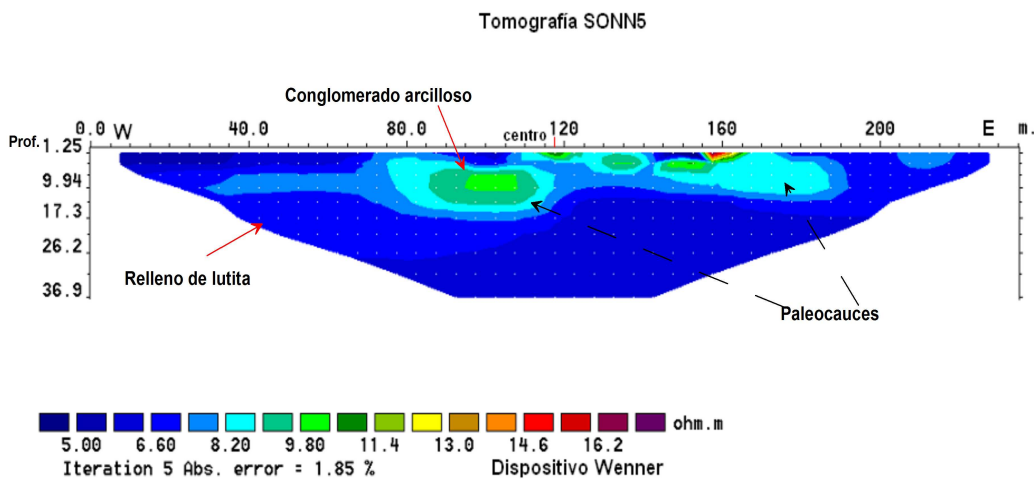


Figura 6.6. Determinación de paleocauces mediante tomografías eléctricas.

En la figura 6.7, se muestra la constitución interna de una terraza aluvial definida a partir de los resultados de la tomografía SanJ17. El corte geoelectrico interpretado muestra el elevado contraste de resistividad entre los niveles superior arcilloso e inferior de lutita con el nivel intermedio de mayor resistividad, que se interpreta como una unidad permeable confinada.

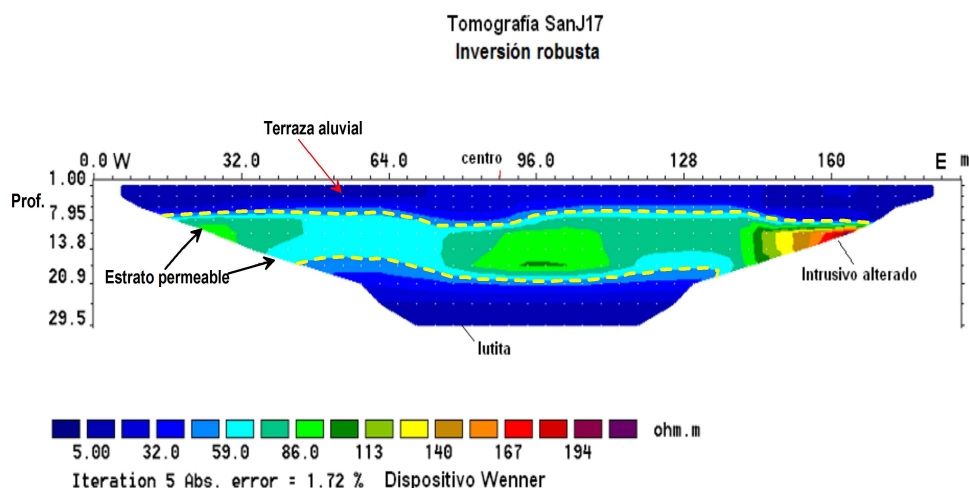


Figura 6.7. Identificación de un nivel permeable en zona de terraza.

El resultado de la inversión de los valores de resistividad aparente registrados en la tomografía SanJ04 es un ejemplo de la detección de zonas de fractura en andesitas (figura 6.8). Recubriendo la roca se identifica un paquete sedimentario constituido por arcillas, arenas y tobas. La dirección de flujo del agua subterránea sigue una dirección SE hacia la Quebrada Mariana.

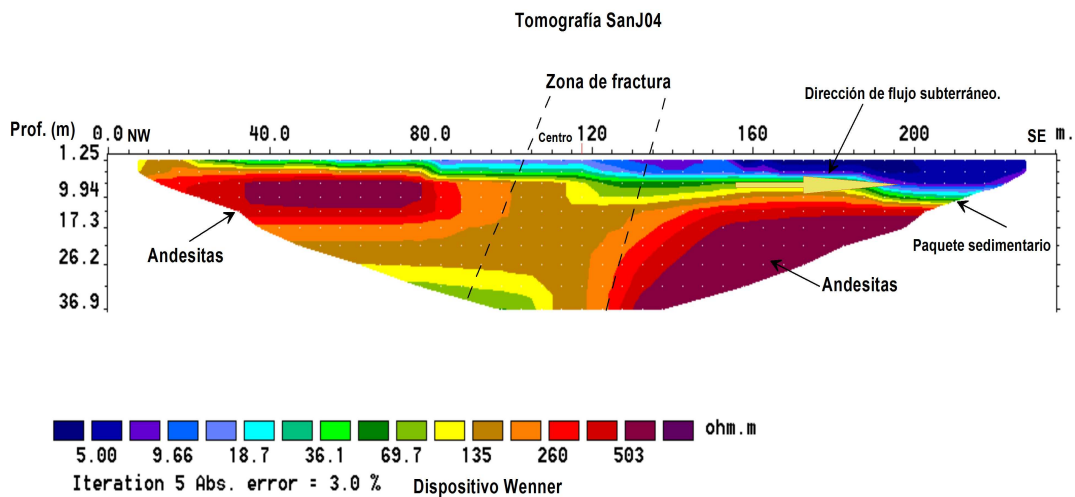


Figura 6.8. Localización de fractura y dirección de flujo.

Las zonas de contacto entre dos tipos de roca favorecen la recarga de un acuífero (Seaton & Burbey 2000). En este sentido, se ha identificado el contacto entre las calizas y las lutitas de la Formación Macaracas en el sector de la Quebrada La Cruz. Este contacto, funciona como zona de recarga, debido a que la caliza está fracturada en la parte superficial.

En la figura 6.9, se aprecia el contraste de resistividades en la zona de contacto. Este tipo de respuestas se ha observado en otras tomografías de la misma zona.

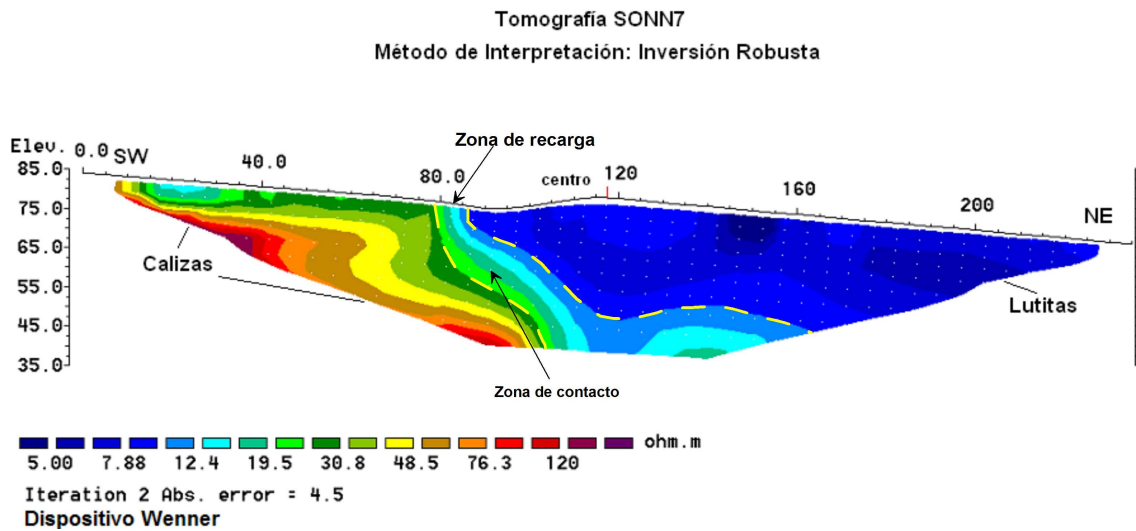


Figura 6.9. Tomografía eléctrica en el contacto entre las calizas y las lutitas.

Otra aplicación de la tomografía eléctrica para la exploración de aguas subterránea en rocas duras se presenta en la figura 6.10. En la tomografía SONN12, es evidente el contraste de resistividad en la zona de fractura del aglomerado ubicado en el horizonte Intermedio. Si la fractura es lo suficientemente amplia y la capa superior permeable, entonces los caudales aportados serían importantes.

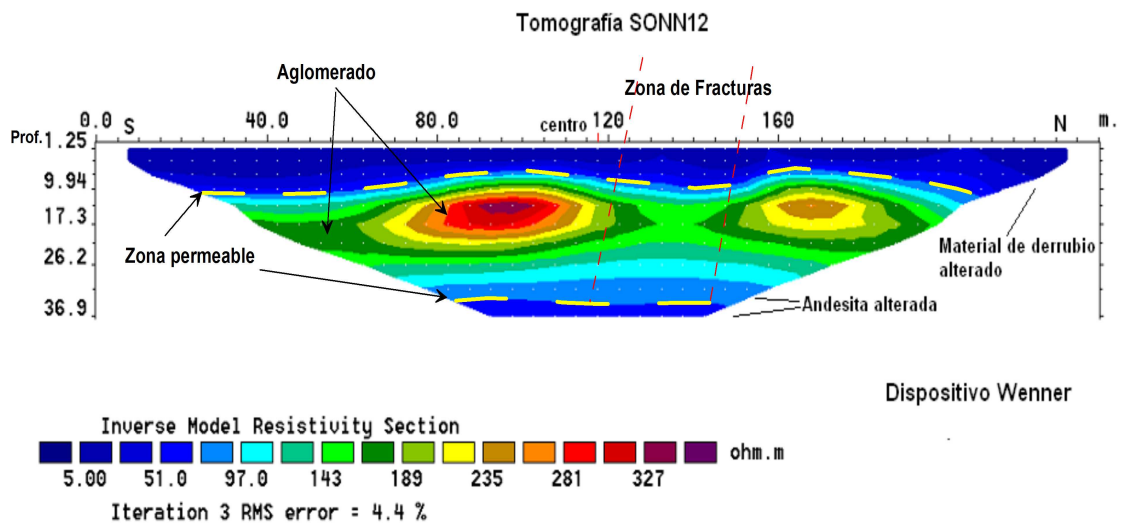


Figura 6.10. Tomografía eléctrica en una zona de fractura en roca volcánica.

Las tomografías eléctricas realizadas en el sector de Playa El Uverito muestran que, en la zona próxima a la costa, no hay indicios de intrusión salina.

Sin embargo, es necesario prestar atención a los efectos negativos por procesos antrópicos desarrollados en la zona (extracción de agua, deforestación, etc.), ya que los acuíferos de la zona pueden considerarse de vulnerabilidad entre moderada y alta.

Las tomografías presentadas en esta investigación, han demostrado su efectividad si son aplicadas con criterio científico. Ello implica que, será necesario localizar las fracturas en el campo y mediante las tomografías, verificar la orientación de las capas o los estratos. Secuencias paralelas de estas, a lo largo de las fracturas, podrían determinar la dirección del flujo de las aguas subterráneas. Por otra parte, estimar el grado de fracturación mediante tomografías eléctricas, puede ser un indicativo de los caudales posibles.

Las características hidroquímicas de las aguas subterráneas analizadas indican que, desde el punto de vista de la concentración en iones mayoritarios, estas son de muy buena calidad para consumo humano. Sin embargo, habría que considerar también su calidad desde el punto de vista bacteriológico, que no se ha abordado en este estudio.

En el sector de San José, el sistema de recarga esta asociado a las fracturas de la Quebrada La Cruz, El Paradero, Mensabé y Mariana. Las que, reciben el aporte de la escorrentía en los cerros La Mesa y Evangelisto respectivamente. Las aguas subterráneas se mueven en dirección NE-SW, en este sector.

Al sur de Las Tablas, el mecanismo de recarga es a través del sistema de fracturas asociado a las Quebradas La Ermita, La Cruz y El Carate. Parte de la infiltración proviene de la escorrentía del Cerro Los Buhos en Loma Bonita. La corriente de agua subterránea, en este sector, se mueve en dirección NW-SE. Esto coincide con el hecho de que las aguas superficiales drenan en dirección al Río Perales.

Al este de Las Tablas (sector NE de la zona de estudio), la recarga del sistema se produce a través de las fracturas asociadas a la Quebrada Las Cocobolas. Estas, se originan desde el Cerro Paseo Tablado y tienen una dirección NE-SW; por lo que el flujo de agua subterránea tendría la misma orientación.

En el sector de Santo Domingo, la recarga del sistema se produce por un lado por el sistema de fracturas asociados al Sur del Cerro Los Buhos en Loma Bonita. Por el otro, a través de las fracturas asociadas al Cerro Teta. En este sector, las aguas subterráneas se mueven en dirección NE-SW. Aunque la recarga puede ser más compleja, ya que el Cerro Teta crea una divisoria de aguas al N y al NE.

En el sector de La Palma, la recarga se produce por la escorrentía de Cerro Hueco al Sur de esta población. Sin embargo, no se puede descartar la recarga a través del sistema fracturas existente en el sector. Los datos son insuficientes para indicar la dirección de flujo.

Las zonas de recarga de los sitios mencionados, topográficamente se encuentran a baja altura. Estas, generalmente, son utilizadas como pastizales o para la agricultura. Esto crea una condición de vulnerabilidad a la contaminación antrópica; sobretodo si se toma en consideración que los pozos tienen poca profundidad. Por el contenido de sulfatos, obtenido en algunos pozos del sector de San José, se puede concluir que, las calizas y arcillas del sector posean pequeños nódulos de pirita. Estos últimos, en un ambiente oxido-reductor intenso, producen los componentes que le dan mal sabor y olor al agua (derivados sulfurosos). Es por esto que, algunos pozos han sido descartados.

En el Mapa Hidrogeológico de Panamá (ETESA 1999), se estableció la existencia de diferentes tipos de acuíferos en la región de Las Tablas. Este trabajo propone una clasificación adicional que correspondería al acuífero semiconfinado en el área de San José. En esta área las capas de lutita confinan parcialmente las capas de areniscas, tobas fracturadas, calizas y aglomerado volcánico por las que circulan las aguas subterráneas. En la figura 6.11 se muestra la distribución propuesta, en la misma se ilustra la dirección de flujo inferida a partir de los análisis realizados.

En el muestreo de puntos realizado en el sector NE de la zona de estudio, en mayo del 2002, la mayoría de las aguas muestreadas no presenta un catión dominante. Estas se encuentran en la región intermedia con una composición cálcico-sódico-potásica. Las mismas, muestran una facies bicarbonatada, a excepción de la muestra B7, la que presenta una ligera influencia del ión sulfato (ver figura 3.2). El mapa de distribución de iones cloruros (figura 3.3) indica una

correspondencia con la dirección de flujo, indicada en el mapa de isotransmiviscidad hidráulica para la zona NE (figura 3.11). Esto es cierto sobretodo hacia el sector de Las Tablas.

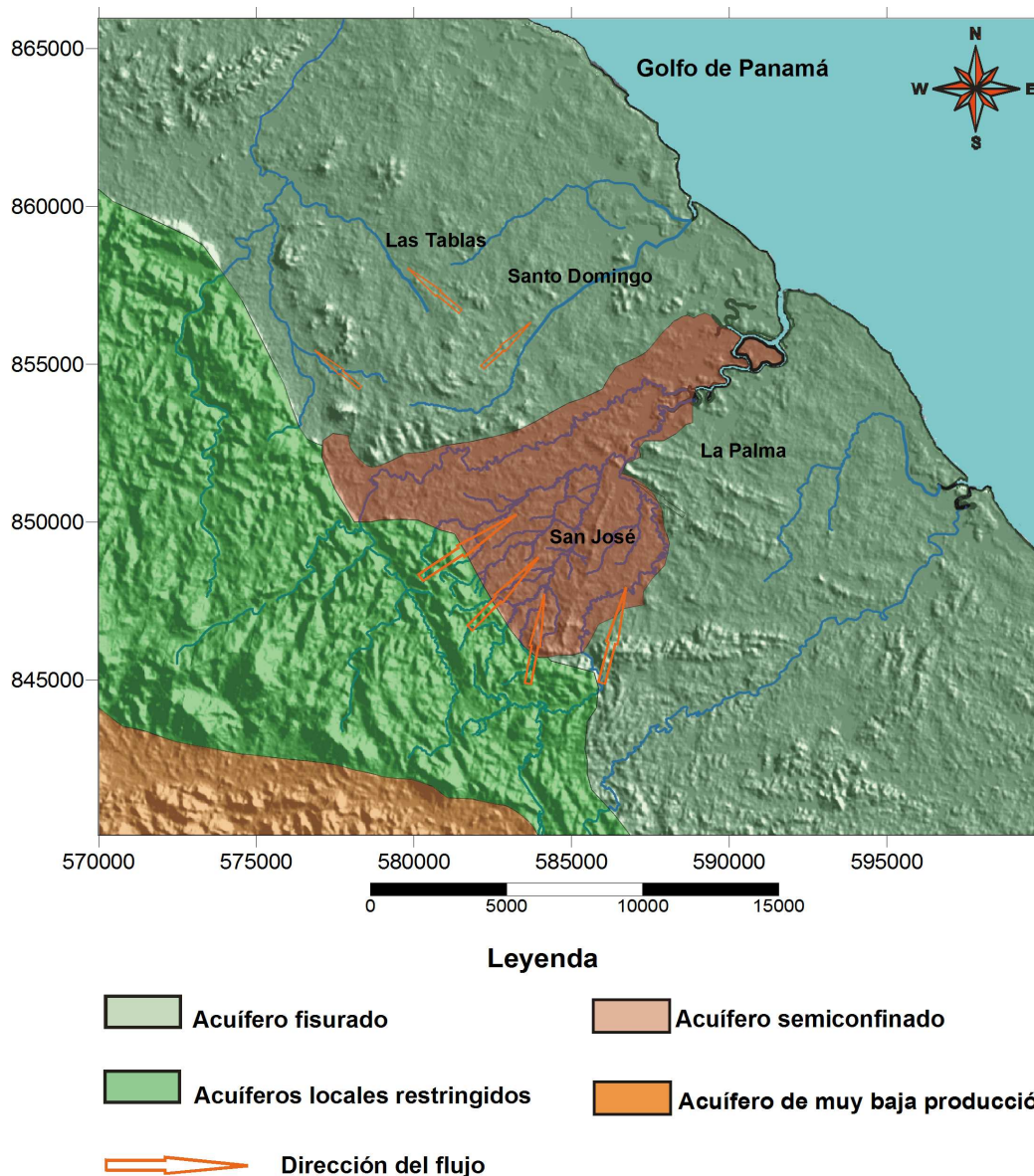


Figura 6. 11. Esquema hidrogeológico de la zona de estudio. Los segmentos orientados señalan la dirección de flujo interpretada.

En abril de 2006, se realizó un muestreo de puntos de agua, en el sector SW del área de estudio. Estos, al igual que en el sector NE, presentan una predominancia de los bicarbonatos, con una ligera tendencia al ión cloruro en las muestras SanJ 11, SanJ 13 y SanJ 18. En los puntos SanJ 1 y SanJ 9 se observa

una tendencia a las aguas sulfatadas (ver figura 3.4). Estos puntos de agua a excepción de las muestras de SanJ 1, SanJ 5, SanJ 13 y SanJ 11 que son cálcicas, no muestran un catión dominante. El resto de las muestras corresponde a una mezcla de aguas magnésicas, cálcicas y sódicas-potásicas.

Este primer análisis, del sector SW, muestra que las aguas subterráneas tienen poca evolución e interacción con la roca encajante durante su recorrido.

El mapa de isoconductividad (figura 3.5) y el de isocloruros (figura 3.6), para el periodo seco, muestran correspondencia con respecto a la dirección de flujo. Según el mismo, las aguas subterráneas se mueven de la zona SW en dirección NE. En el segundo muestreo realizado en el sector SW (nov-dic 2006), el diagrama de Piper (figura 3.7), indica que en el periodo de invierno las aguas conservan su carácter bicarbonatado. En el triángulo de los cationes se observa que el carácter cálcico de las aguas aumenta y la zona de mezcla se orienta hacia una tendencia de composición cálcico-magnésica.

En el mapa de isoconductividad (figura 3.8), correspondiente al periodo de lluvias, es evidente la variación de la mineralización en la dirección NE, esto resalta en el sector de los pozos seleccionados. El mapa de isoconcentración del ión cloruro (figura 3.9), muestra coincidencias, con el muestreo del periodo seco. En el mismo, es evidente el efecto de dilución de la época, aunque en realidad la variación no parece ser significativa. Estos resultados evidencian que la variación espacial en el contenido de los cloruros es coincidente con los máximos de conductividad. La presencia del ión cloruro en los puntos SanJ 18 y SanJ 13 se debe a fuentes antropogénicas. Aunque no se descarta un aumento en la dirección del pozo San J18.

A partir de los resultados obtenidos, se establece que la composición química del sistema de aguas subterráneas, se ha alcanzado mediante un proceso en el cual han intervenido factores de tipo, geológico, hidrogeológico, geomorfológico, climático, fisicoquímicos y antrópicos. Su composición química es el resultado de interacciones a través de la trayectoria, medianamente prolongada de los flujos y el medio geológico.

Las aguas subterráneas se clasifican, según el diagrama de Piper, como bicarbonatadas cálcicas existiendo una gran cantidad de bicarbonatadas

sulfatadas - cálcicas magnésicas. Esta constitución, estaría asociada a la interacción de las aguas y las rocas calizas, aunque en algunas perforaciones, se han encontrado capas de lutitas carbonosas. Es de resaltar el hecho de que el carácter bicarbonatado, nos indica tiempos de residencia cortos, o poca interacción con la roca.

La distribución de la transmisividad hidráulica del sector NE (Figura 3.11), presenta similitud con el mapa de isocloruros correspondiente al área. En estos el resultado indica que el flujo es hacia el sector NW, por la zona de drenaje de la Quebrada La Ermita. Otro gradiente se observa en dirección NW, hacia la Quebrada Las Cocobolas.

Los datos isotópicos indican que la concentración de las aguas superficiales y subterráneas difiere durante la época seca. En las aguas superficiales se observa una tendencia a la evaporación con un consiguiente aumento en la concentración de $\delta^{18}\text{O}$.

Esta diferencia indica que las aguas subterráneas y las de las quebradas o ríos, no interactúan durante la época seca, debido a que el nivel freático desciende en las subterráneas. Durante el periodo de invierno la concentración isotópica de las aguas tiende a ser igual, lo que es indicativo de que las aguas superficiales y las subterráneas interactúan.

El análisis de la muestra de agua de lluvia en la población de San José, con contenido isotópico similar al del agua subterránea y a la superficial, esto es indicativo del sistema de recarga en la zona y del poco recorrido de la misma.