

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

**ESTUDIO HIDROGEOFÍSICO PARA
CARACTERIZAR EL LÍMITE
HIDROGEOLOGÍCO ENTRE LOS
ACUÍFEROS RÍO SAN MIGUEL Y RÍO
SONORA, PORCIÓN RAYÓN-URES,
SONORA, MÉXICO.**

TESIS

**Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.**



PRESENTA:

IRLANDA PATRICIA GRIJALVA LEAL.

Hermosillo, Sonora, Septiembre de 2017

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

F01

Hermosillo, Sonora, a 10 de Agosto de 2017

Dr. Jesús Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

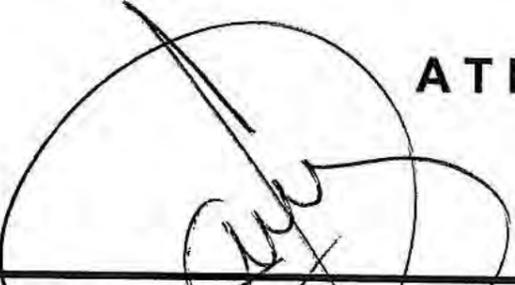
Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

**"ESTUDIO HIDROGEOFÍSICO PARA CARACTERIZAR EL LÍMITE
HIDROGEOLOGICO ENTRE LOS ACUÍFEROS RÍO SAN MIGUEL Y RÍO
SONORA, PORCIÓN RAYÓN-URES, SONORA, MÉXICO"**

Esto es con el fin de que el alumno: **IRLANDA PATRICIA GRIJALVA LEAL**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Grado de la Maestría en Ciencias-Geología.

Sin otro en particular quedamos de Usted.

ATENTAMENTE



Dr. Miguel Rangel Medina

Director de Tesis



**Dr. Francisco Javier Grijalva
Noriega**

Codirector de Tesis

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo





"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

F02

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 18 de agosto de 2017

Dr. Miguel Rangel Medina
Director de Tesis
Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega
Codirector de Tesis

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Ustedes, intitulado:

**"ESTUDIO HIDROGEOFÍSICO PARA CARACTERIZAR EL LÍMITE
HIDROGEOLOGICO ENTRE LOS ACUÍFEROS RÍO SAN MIGUEL Y RÍO
SONORA, PORCIÓN RAYÓN-URES, SONORA, MÉXICO"**

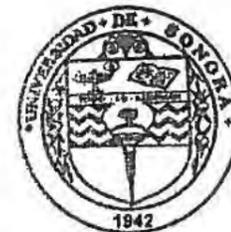
Esto, con el fin de que la alumna **IRLANDA PATRICIA GRIJALVA LEAL** pueda presentar su examen profesional, para la obtención del título de Grado. Asimismo les comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

| | |
|--|--------------------------------|
| Dra. Silvia Martínez Retama | Presidente |
| Dr. Rogelio Monreal Saavedra | Secretario |
| M.C. Adrián Grijalva Montoya | Vocal (Sinodal Externo) |
| Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega | Vocal |
| Dr. Miguel Rangel Medina | Vocal |

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente

Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Interesada
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

F06

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

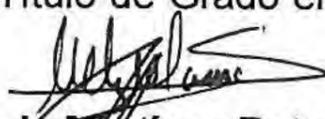
NOMBRE DE LA TESIS:

**"ESTUDIO HIDROGEOFÍSICO PARA CARACTERIZAR EL LÍMITE
HIDROGEOLÓGICO ENTRE LOS ACUÍFEROS RÍO SAN MIGUEL Y RÍO SONORA,
PORCIÓN RAYÓN-URES, SONORA, MÉXICO"**

NOMBRE DE LA SUSTENTANTE:

IRLANDA PATRICIA GRIJALVA LEAL

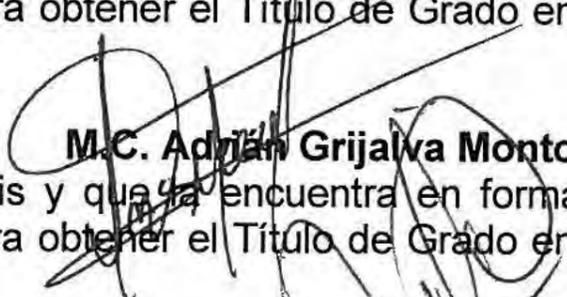
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dra. Silvia Martínez Retama

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. Rogelio Monreal Saavedra

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


M.C. Adrián Grijalva Montoya

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.

Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. Miguel Rangel Medina

Atentamente


Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

F07

Hermosillo, Sonora, a 23 de agosto de 2017

Dr. Jesús Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que después de revisar y aprobar el trabajo de tesis de la alumna **IRLANDA PATRICIA GRIJALVA LEAL**, hemos acordado que la presentación del examen de grado de la alumna se lleve a cabo el día viernes 8 de septiembre del presente a las 17:00 horas.

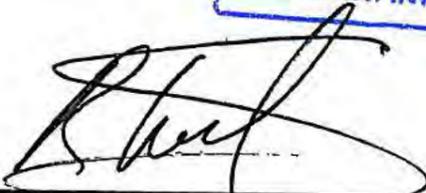
Sin otro particular, quedamos a la espera de su respuesta.

ATENTAMENTE
Comité de Tesis

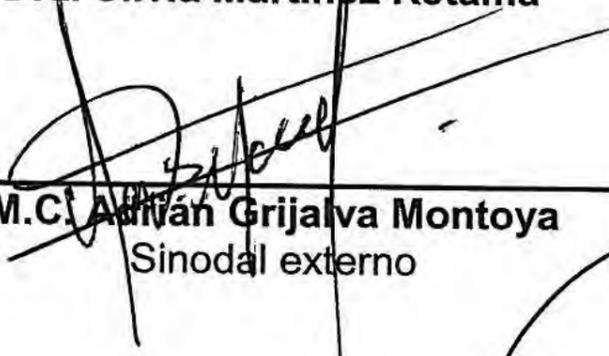




Dra. Silvia Martínez Retama



Dr. Rogelio Monreal Saavedra



M.C. Adrián Grijalva Montoya
Sinodal externo



Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega
Codirector de Tesis



Dr. Miguel Rangel Medina
Director de Tesis

C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

F08

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 25 de agosto de 2017

Dr. Miguel Rangel Medina

Director de Tesis

Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega

Codirector de Tesis

Por este conducto y en atención a la solicitud recibida el día 24 de agosto del presente, le comunico que ha sido aprobada la fecha para la presentación de Examen de Grado de la alumna **IRLANDA PATRICIA GRIJALVA LEAL** propuesta por el Comité de Tesis.

Dicho examen se llevará a cabo el día **viernes 08 de septiembre del presente a las 17:00 horas** en el *Auditorio del Departamento de Física*.

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente



Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Archivo

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico que me brindó para realizar mis estudios en el programa maestría en Ciencias-Geología en la Universidad de Sonora, mediante una beca con número (CVU/Becario): 708998/585666, la cual se me otorgó en el periodo agosto 2015- julio 2017.

A la Universidad de Sonora, en especial al departamento de maestría Ciencia-Geología por ser parte de mi formación académica.

Al Dr. Miguel Rangel Medina, quien ha pasado de ser mi maestro, jefe y actualmente director de tesis, de antemano muchas gracias por todo su apoyo y entera confianza de realizar este proyecto.

Al Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega, quien siempre presentó disponibilidad para atender y aclarar mis dudas, quejas, comentarios y sugerencias.

Al M.C. Adrián Grijalva Montoya, quien participó como asesor externo resolviendo dudas y aportando ideas para el desarrollo de esta tesis.

A la Dra, Silvia Martínez Retama y al Dr. Rogelio Monreal Saavedra, por sus aportaciones a este trabajo mediante sus observaciones, comentarios y sugerencias.

A mis compañeros Julio Orantes y Luis Davila, quienes me apoyaron en campo con el levantamiento geofísico. Así mismo a la Ing. Geofísica Arianna Vega, quien me brindó su apoyo y asesoría en la adquisición de datos.

A mis compañeros Juan Carlos Gonzáles, por apoyarme en campo al realizar las pruebas de bombeo. A Marcia Navarro y An Ho Taylor, quienes me solucionaron dudas principalmente respecto al uso de software.

Al Ing. Carlos Pineda, quien me brindó ayuda al momento de buscar o conseguir información cual fuera necesaria.

A los señores Adrian Inñigo y Rodolfo Llanes, quienes siempre tuvieron disponibilidad de permitirme el acceso a sus propiedades para realizar mi trabajo de campo.

A mi familia, mis padres María Ramona Leal Buelna y Víctor Manuel Grijalva Durazo, y a mis hermanos Tania y Víctor, quienes han estado para mí siempre que los he necesitado, los amo.

A la vida, por permitirme realizar todo lo que he querido hasta este momento...



RESUMEN

Los límites administrativos que dividen a los acuíferos no siempre corresponden con los límites de acuíferos de carácter y comportamiento hidrogeológico. En este trabajo se toma como referencia la parte sur del acuífero Río San Miguel porción Rayón-Ures, el cual limita con el acuífero Río Sonora, el objetivo principal de este estudio radica en, conocer si el límite administrativo entre los acuíferos Río San miguel y Río Sonora coinciden con un límite hidrogeológico, ya que en el área de estudio no se tiene bien definida la divisoria hidrogeológica (parteaguas de las aguas subterráneas), pues resulta difícil delimitarla debido a que el límite está cubierto por material sedimentario, el cual sepulta la estructura geológica que se encuentra en el subsuelo. En este trabajo se muestran los resultados de la investigación del subsuelo en esta zona, mediante técnicas geofísicas gravimétricas y electromagnéticas, así también, se hizo apoyo de la información hidrogeológica. Como parte de los resultados obtenidos, se demuestra que no existen afloramientos de unidades geológicas que en el subsuelo del área se comporten como una frontera hidrogeológica, por lo que dicho límite administrativo no puede considerarse propiamente como una división de acuíferos. Lo anterior se soporta en el origen geológico de las variaciones que se tienen en las unidades hidrogeológicas que conforman el sistema acuífero, que se pueden interpretar no como un límite hidrogeológico, sino más bien como cambios litológicos en el cual se presentan intercalaciones entre materiales de textura gruesa pasando a más finos, esto aunado con la baja conductividad hidráulica de dichos sedimentos, así como el rendimiento y potencial hidráulico, y las diferencias en su carga, por las cuales se condiciona el movimiento del flujo subterráneo.

Palabras clave: Acuífero Río San Miguel, Límites hidrogeológicos, Hidrogeofísica, Sonora.



ABSTRACT

The administrative boundaries used to divide the aquifers do not always correspond to the natural limits of aquifers of character and hydrogeological behavior. In this work the southern part of the Río San Miguel aquifer is taken as a reference, specifically the Rayón-Ures portion, which borders with the Río Sonora aquifer. The main objective of this study is to know if the administrative boundary between the Río San Miguel and Río Sonora aquifers coincides with their hydrogeological border, since in the area of study the hydrogeological divide (watershed of groundwater) is not well defined, because it is difficult to delimit because the area of study has a broad detrital coating, which buries the geological structure underground. This work shows the results of the research carried out in this area through gravity and electromagnetic geophysical techniques, as well as, hydrogeological information. As part of the results, there are no outcrops of geological formations in the area that allow the attribution of this limit to a geological origin, therefore we could interpret it as a hydrogeological limit which is restricted by the differences in hydraulic potential.

Key words: Río San Miguel aquifer, Hydrogeological limits, Hydrogeophysical, Sonora.



CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Objetivos..... | 2 |
| 1.1.1. Objetivo general..... | 2 |
| 1.1.2. Objetivos específicos | 2 |
| 1.2. Estudios previos..... | 3 |
| 1.3. Localización..... | 6 |
| 1.4. Marco físico..... | 7 |
| 1.4.1. Fisiografía | 7 |
| 1.4.2. Geomorfología..... | 8 |
| 1.4.3. Carta hidrogeológica..... | 9 |
| | |
| 2. METODOLOGÍA | 10 |
| 2.1. Gravimetría..... | 10 |
| 2.1.1. Recopilación de datos gravimétricos | 11 |
| 2.1.2. Separación regional-residual..... | 12 |
| 2.1.3. Modelado directo: método de Talwani | 13 |
| 2.2. Sondeos electromagnéticos transitorios en el dominio del tiempo..... | 14 |
| 2.2.1. Adquisición de datos electromagnéticos..... | 16 |
| 2.2.2. Modelo unidimensional | 18 |
| 2.2.3. Secciones resistivas..... | 19 |
| 2.3. Hidrogeología | 20 |
| 2.3.1. Piezometría | 21 |
| 2.3.2. Pruebas de bombeo | 22 |
| 2.3.3. Muestreo de agua subterránea..... | 23 |
| | |
| 3. GEOLOGÍA | 26 |
| 3.1. Estratigrafía regional | 26 |
| 3.2. Geología local..... | 29 |
| 3.3. Geología estructural..... | 32 |
| 3.4. Geología del subsuelo..... | 34 |



| | |
|---|-----------|
| 4. RESULTADOS..... | 35 |
| 4.1. Gravimetría..... | 35 |
| 4.1.1. Plano de anomalía residual..... | 35 |
| 4.1.2. Plano de anomalía residual-geología..... | 36 |
| 4.1.3. Perfil gravimétrico: método de Talwani..... | 38 |
| 4.2. Sondeos electromagnéticos transitorios en el dominio del tiempo..... | 40 |
| 4.2.1. Clasificación geoelectrica para el área de estudio..... | 40 |
| 4.2.2. Perfil resistivo y geoelectrico..... | 42 |
| 4.2.3. Modelo de la distribución resistiva en el área de estudio..... | 46 |
| 4.3. Hidrogeología..... | 48 |
| 4.3.1. Gradiente hidráulico en el área de estudio..... | 48 |
| 4.3.2. Pruebas de bombeo..... | 49 |
| 4.3.3. Muestreo de agua subterránea..... | 51 |
| 4.4. Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del área de estudio..... | 54 |
| 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 57 |
| 6. REFERENCIAS CITADAS..... | 60 |
| 7. ANEXO 1 (Ver CD)..... | 62 |
| 8. ANEXO 2 (Ver CD)..... | 94 |



FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Localización del polígono del área de estudio respecto a los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora | 6 |
| Figura 2. Provincias fisiográficas comprendidas dentro del área de estudio..... | 7 |
| Figura 3. Geomorfología del área de estudio | 8 |
| Figura 4. Carta hidrogeológica superficial del área de estudio (INEGI, 1999)..... | 9 |
| Figura 5. Diagrama de la metodología aplicada..... | 10 |
| Figura 6. Localización de las estaciones gravimétricas observadas (INEGI) | 12 |
| Figura 7. Propagación de las corrientes Eddy en el terreno, a) Los tiempos cercanos, entregan información superficial. b) Los tiempos lejanos o tardíos, entregan información a mayor profundidad..... | 15 |
| Figura 8. Tipo de señales obtenidas para transitorio electromagnético en el dominio del tiempo, donde se transmite corriente y como respuesta se mide voltaje..... | 16 |
| Figura 9. Localización de los sondeos electromagnéticos realizados en campo..... | 17 |
| Figura 10. Arreglo one-loop, utilizado en la adquisición de datos en campo. | 17 |
| Figura 11. Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam en los datos adquiridos por los sondeos. a) Donde en el eje “x” se presenta el tiempo (msec) y en el eje “y” resistividad aparente (ohm.m). b) Se representa en el eje “x” la resistividad (ohm.m) y en el eje “y” la profundidad (m)..... | 19 |
| Figura 12. Representación de una sección resistiva con escala en ohm.m, donde los valores conductores se representan en color azul, por otro lado, los valores resistivos se muestran en color rojo | 20 |
| Figura 13. Localización de los pozos monitoreados en el área de estudio..... | 21 |
| Figura 14. Esquema del gradiente hidráulico. | 22 |
| Figura 15. Secuencia Chevotareb, la cual relaciona la composición del agua respecto al recorrido y tiempo de permanencia del agua en el acuífero | 23 |
| Figura 16. Columna estratigráfica (SGM, 1999)..... | 28 |



| | |
|---|----|
| Figura 17. Geología del área de estudio (SGM, 1999)..... | 29 |
| Figura 18. Modelo del funcionamiento estructural | 33 |
| Figura 19. Anomalía residual 2 ^{do} grado, (la escala se presenta en mGals, anomalía gravimétrica negativa representada por color azul y anomalía gravimétrica positiva en color rojo) | 36 |
| Figura 20. Anomalía residual 2 ^{do} grado (la escala se presenta en mGals, anomalía gravimétrica negativa representada por color azul y anomalía gravimétrica positiva en color rojo), con la geología del área sobrepuesta | 38 |
| Figura 21. Modelado método Talwani, el modelo se compone de dos secciones, la parte superior en donde se muestra el ajuste entre las curvas de anomalía gravimétrica y la parte inferior en donde se propone el modelo geológico. En ambos casos en el eje “x” se representa la longitud del perfil, mientras que en el eje “y” de la parte superior es referente a los mGals, en la parte inferior es a la elevación en m.s.n.m..... | 40 |
| Figura 22. Clasificación geoelectrica del área de estudio | 41 |
| Figura 23. Localización de los perfiles generados a partir de los TEM levantados en campo | 42 |
| Figura 24. Perfil de resistividad 1 | 44 |
| Figura 25. Perfil geoelectrico 1 | 46 |
| Figura 26. Representación de la distribución de las resistividades en el área de estudio..... | 47 |
| Figura 27. Representación del gradiente hidráulico (movimiento del agua subterránea) respecto a 2 pozos en el área de estudio | 48 |
| Figura 28. Diagrama de Piper, donde se representa en triangulo rojo el resultado de la muestra de agua para el pozo la Noria siendo esta bicarbonatada sódica-cálcica (HCO ₃ -Na-Ca), y en triangulo amarillo se representa la muestra del pozo la Casita con resultado bicarbonatada sódica (HCO ₃ -Na)..... | 53 |
| Figura 29. Diagrama de Stiff, respecto a la localización del área de estudio | 54 |
| Figura 30. Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del área de estudio..... | 56 |



TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Densidades de algunas rocas del área de estudio en gr/cm ³ | 14 |
| Tabla 2. Características hidráulicas obtenidas en las pruebas de bombeo | 49 |
| Tabla 3. Valores estimados de conductividad hidráulica en m/día (Sanders, 1998). | 50 |
| Tabla 4. Parámetros físicos de las muestras analizadas | 51 |
| Tabla 5. Clasificación de salinidad con base en la conductividad eléctrica (APHA) | 52 |



1. INTRODUCCIÓN

En México se han realizado distintos trabajos encaminados a definir la división hidrográfica nacional (CONAGUA, 2009). Y con el propósito de administrar las aguas nacionales, así se han definido 731 cuencas hidrológicas en el país.

La delimitación de las cuencas hidrográficas se realiza a partir de criterios topográficos e hidrográficos, donde los límites de una cuenca quedan establecidos por la línea imaginaria, o “parteaguas” que une los puntos topográficamente más altos, a partir de la cual el agua de lluvia se separa hacia dos vertientes de cuencas hidrográficas contiguas.

Cuando los materiales que integran a una cuenca hidrológica son impermeables, se constituye toda el área de escorrentía, recolectando el agua hacia los cauces principales; cuando existen en ella materiales permeables, parte del agua se infiltra alimentando a los acuíferos pasando a conformar a la cuenca hidrogeológica. Sin embargo, en ocasiones el agua que se infiltra no siempre alimenta al acuífero de la cuenca en escorrentía, si no que puede llegar a incrementar el flujo subterráneo de algún acuífero vecino. Por ello, el límite de una cuenca hidrogeológica y cuenca hidrográfica no siempre coinciden (Bosch, 2014).

Por lo tanto, la cuenca hidrogeológica es la unidad fisiográfica que contiene un gran acuífero o varios conectados o interrelacionados, cuyas aguas fluyen a un desagüe común, y que está delimitada por una divisoria de aguas subterráneas, donde dicha divisoria, corresponde a la línea imaginaria de la superficie piezométrica de un acuífero, que separa direcciones de los flujos subterráneos.

La circulación del agua subterránea en el interior de una cuenca hidrogeológica queda delimitada en ocasiones, por la presencia de las rocas impermeables que constituyen el substrato regional y por los accidentes geológicos: fallas, estratificación, etc., que condicionan la disposición y la profundidad del basamento impermeable, así como altos estructurales donde el basamento resistivo esté a poca profundidad en el subsuelo.

El agua es de naturaleza fluida, libre y no respetan ningún límite geográfico, administrativo o fronterizo. Por rigor científico se debe denominar estrictamente agua. Sin embargo, si se trata de la administración del recurso, las entidades normativas oficiales se refieren con el término “aguas”, ya que se expresan en términos de su gestión la diferencia para administrarlas legalmente por sus usos. Por ejemplo, superficiales, subterráneas,



marinas, salobres, de laboreo, etc. (Rangel Medina, M. 2012). De aquí la importancia de que en una investigación hidrogeológica se definan científicamente sus límites y orígenes.

Con base en lo anterior, el área de estudio carece de trabajos enfocados científicamente a esta temática. Sin embargo, trabajos semejantes a este realizó López, J. *et al.*, en 2013, en España, en este se muestra satisfactoriamente el resultado de la caracterización de la divisoria hidrogeológica entre las cuencas del Río Guadiana y Río Júcar, a partir de los resultados de la investigación mediante técnicas geofísicas gravimétricas y eléctricas, y mediante la interpretación de sondeos preexistentes, en dicho estudio se determinó una barrera física, a partir de la cual el nivel piezométrico se sitúa por encima de la elevación de dicha estructura, que en cuyo caso esta no afecta la división del flujo.

En el presente estudio, trazar la divisoria de aguas subterráneas a partir de datos piezométricos, es casi imposible, pues no existen sitios de observación suficientes que permitan definir bien la hidrodinámica y su divisoria.

En esta investigación se utilizaron métodos geofísicos para mejorar el conocimiento hidrogeológico del área de estudio e intentar caracterizar el límite hidrogeológico. A partir de lo anterior, se buscó identificar la estructura geológica existente en el subsuelo, y en conjunto con los datos hidrogeológicos, explicar el funcionamiento hidrogeológico del área, todo ello en relación con la definición del límite administrativo de los acuíferos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Identificar y caracterizar el límite hidrogeológico que divide a los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora y obtener el modelo hidrogeológico del área comprendida entre los poblados Rayón-Ures,

1.1.2. Objetivos específicos

- Obtener la morfología del basamento mediante gravimetría, que consiste en el registro de los cambios en la densidad de los materiales del subsuelo.
- Identificar las diferentes resistividades las cuales serán asociadas a distintos materiales que se encuentren depositados en la cuenca, así también, determinar los espesores del material depositado, las profundidades a las que se encuentra y conocer las principales



estructuras geológicas en el subsuelo, esto a través de sondeos electromagnéticos transitorios.

- Conocer las variaciones del nivel estático y observar el comportamiento de la dirección de flujo subterráneo, mediante piezometría.
- Determinar los parámetros hidráulicos que rigen el movimiento del agua en el subsuelo como son: conductividad hidráulica y transmisividad, esto a partir de la ejecución de pruebas de bombeo.
- Caracterizar la hidrogeoquímica del agua subterránea existente en el área de estudio, a través de muestreo de agua subterránea.

1.2. Estudios previos

En el área de estudio no existen trabajos previos que estén relacionados al objetivo de esta tesis, los trabajos encontrados en bibliografía realizados por distintas instituciones como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Comisión Estatal del Agua (CEA), Universidad de Sonora (UNISON), y empresas consultoras entre otros, han sido estudios donde la mayoría de estos tienen el objetivo de evaluar la disponibilidad del acuífero bajo la NOM-011-CNA-2000, otros tantos se orientan a la exploración hidrogeológica. Los más antiguos se enfocan a las áreas de mayor extracción de agua, y los más actualizados a todo el acuífero. Al no contar con trabajos previos realizados en el área de estudio, se citan a continuación algunos trabajos que fueron realizados en sitios cercanos a él.

- *Universidad de Sonora, elaboró para la Comisión Estatal del Agua (2005). “Estudio geohidrológico de las subcuencas de los ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri–La Victoria y cuenca Bacoachito”*. En este estudio se muestran 2 perfiles gravimétricos, uno de ellos localizado en las inmediaciones del poblado de Rayón, la sección muestra una máxima profundidad al basamento de 510 m. La segunda sección se localiza en el poblado de Ures, este perfil presenta su máxima profundidad al basamento con 124 m. También se muestra un perfil generado a partir de sondeos eléctricos verticales, la sección es paralela al cauce del Río Sonora e inicia a la altura del poblado Puerta del Sol, está constituido por 9 sondeos y en ella se observa un horizonte potente de material arcilloso en la parte más profunda detectada, con resistividades de 2 a 7 Ohm.m.



- *Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A de C.V (IDEAS), elaboró para Exploraciones Global, S.A de C.V (2008). “Estudio de evaluación hidrogeológica para el proyecto minero el Crestón, municipio de Rayón, Estado de Sonora. Primera etapa: factibilidad hidrogeológica”.* Se realizaron 40 sondeos electromagnéticos entre los poblados Meresichic y Rayón, el rango de variación de resistividad que predomina en el área oscila entre los 35 y los 600 ohm-m, en los perfiles geoeléctricos se interpretan una serie de fosas (bajos y altos estructurales) sepultadas por el material sedimentario que rellena la cuenca, este material sedimentario presenta características resistivas que van de 5-30 Ohm.m.
- *Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A de C.V (IDEAS), elaboró para Moly Corp, S.A de C.V (2011). “Estudio de evaluación hidrogeológica para el proyecto minero el Crestón, municipio de Rayón, Estado de Sonora. Segunda etapa: prospección para ubicar pozos de extracción”.* Ejecución de 32 sondeos electromagnéticos en las cercanías del poblado Opodepe, cuyo arreglo permitió contar con una profundidad de investigación teórica de 500 m en promedio, la variación de las resistividades permitió clasificar el área de exploración en 5 unidades geoeléctricas, que van de 10-40 Ohm.m material sedimentario de grano fino hasta pasar a material de grano grueso y de 40 a >80 Ohm.m roca fracturada hasta una roca sana o poco fracturada.
- *Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A de C.V (IDEAS), elaboró para Moly Corp, S.A de C.V (2011). “Estudio de evaluación hidrogeológica para el proyecto minero el Crestón, municipio de Rayón, Estado de Sonora. Etapa: perforación de pozo y piezómetros”.* Hacia el sur del poblado Opodepe, se perforó un pozo de 200 m de profundidad, y dos piezómetros ambos a 70 m de profundidad aproximadamente, de las tres perforaciones se obtuvo el recorte litológico el cual muestra ser material sedimentario (en su mayoría gravas con intercalaciones de arcillas y arenas) con el cual se calibraron las unidades geoeléctricas pertenecientes a este tipo de material. Los tres aprovechamientos presentaron un nivel estático promedio de 21 m de profundidad. En el pozo se efectuó un aforo con duración de 26 horas, los resultados obtenidos mostraron un máximo abatimiento de 151 m y un caudal de operación de 5.00 l/s.



- *Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A de C.V (IDEAS), elaboró para Moly Corp, S.A de C.V (2011). “Prospección hidrogeofísica de las zonas de Meresichic y tres Álamos, Opodepe Sonora”.* Con el propósito de determinar zonas potencialmente aptas para la ubicación y perforación de pozos de abastecimiento, se llevaron a cabo 47 sondeos electromagnéticos, estos sondeos permitieron contar con una profundidad de exploración teórica entre los 500 y 600 m, las resistividades obtenidas a partir de estos sondeos van desde <10 a >80 Ohm.m, la mayoría de los sitios propuestos para perforación caen dentro de la unidad geoeléctrica perteneciente a resistividades que van de 20 a 40 Ohm.m asociado a material granular y/o roca muy fracturada probablemente saturada permeable.
- *Comisión Nacional del Agua (2015). “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río San Miguel (2625), Estado de Sonora”.* De acuerdo a este estudio se define la presencia de un acuífero tipo libre, constituido por dos medios: el superior de tipo granular, estos materiales presentan permeabilidad media a alta, y el inferior fracturado, el cual está constituido por rocas que presentan porosidad secundaria por fracturamiento y alteración. Los niveles del agua subterránea responden de manera rápida a la recarga originada por la infiltración de los escurrimientos, la profundidad al nivel estático variaba desde algunos metros, en la zona cercana al cauce del río, hasta 60 m conforme se asciende topográficamente hacia los piedemontes. Con relación a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, la familia de agua predominante es la bicarbonatada cálcica (HCO₃-Ca), que representa agua meteórica de reciente infiltración. En menor proporción se presentan las familias bicarbonatada sódica (HCO₃-Na) y sulfatada-cálcica-sódica (SO₄-Ca-Na).



1.3. Localización

En esta sección, se utilizan para fines prácticos de identificación geográfica, la localización administrativa de la CONAGUA. Así, los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora, se localizan en la porción centro-norte del estado de Sonora, limitan al norte con los acuíferos Magdalena, Río Bacanuchi y Río Bacoachi, al este con el acuífero Cumpas y Río Moctezuma, al sur con los acuíferos Mesa del Seri-La Victoria y Santa Rosalía, al oeste con la Tinaja y Río Zanjón, todos ellos pertenecientes al Estado de Sonora.

El área de estudio se localiza entre los poblados Rayón y Ures, justamente abarca el límite administrativo que divide a ambos acuíferos, el polígono cubre un área de 355 Km², incluye una porción del acuífero Río San Miguel donde se encuentra el rancho la Casita y otra porción del acuífero Río Sonora donde se localiza el rancho la Noria (Figura 1).

Se tiene como vía de acceso la carretera Federal número 14 que conecta de la ciudad de Hermosillo al poblado de Ures, posteriormente se toma la carretera pavimentada Ures-Rayón, la cual te da acceso al área de estudio por la parte sur.

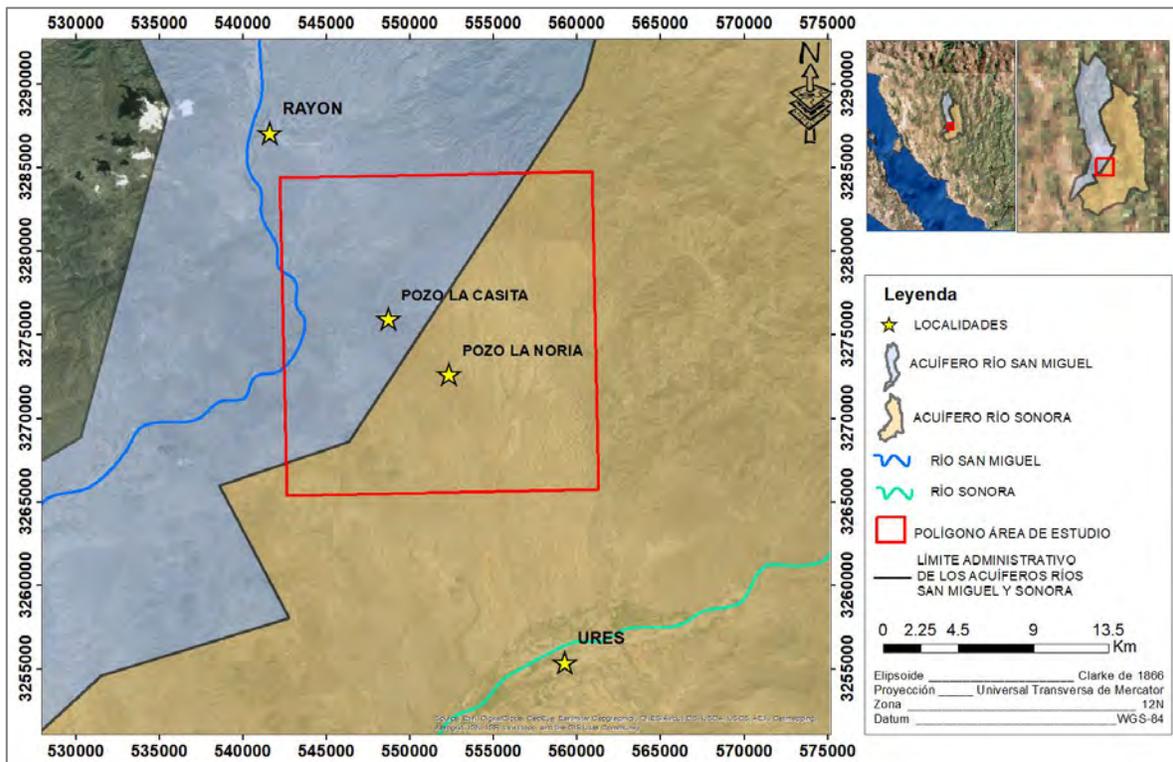


Figura 1. Localización del polígono del área de estudio respecto a los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora.

1.4. Marco físico

1.4.1. Fisiografía

El área de estudio queda comprendida dentro de dos provincias fisiográficas del país: la provincia Sierra Madre Occidental, subprovincia fisiográfica de Sierras y Valles del Norte, y la provincia fisiográfica Llanura Sonorense, subprovincia fisiográfica Sierras y Llanuras Sonorenses.

La subprovincia de Sierras y Valles del Norte se caracteriza por ser sierras alargadas con orientación NW-SE, limitadas por valles intermontanos. El área de estudio abarca hacia el este una pequeña parte de la provincia Sierra Madre Occidental, mientras que la mayor parte del área de estudio queda comprendida dentro de la provincia Llanura Sonorense representada por lomeríos (Figura 2).

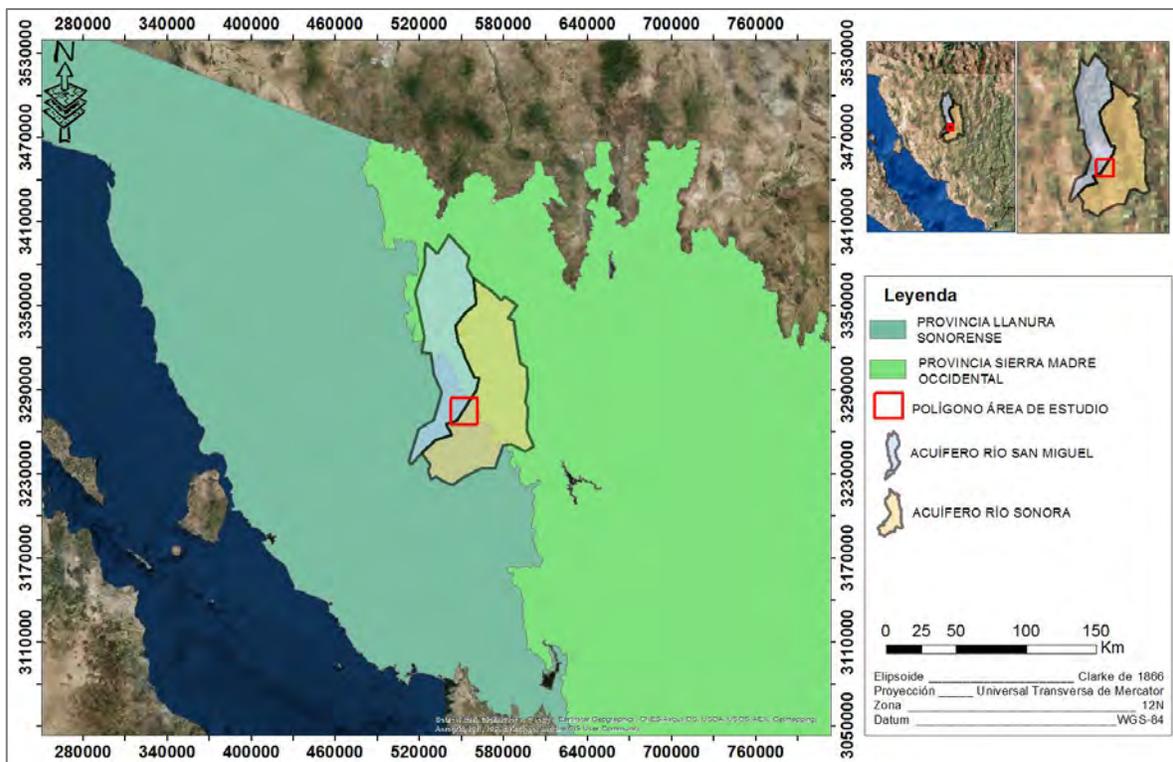


Figura 2. Provincias fisiográficas comprendidas dentro del área de estudio.

1.4.2. Geomorfología

En conjunto, las principales formas morfológicas que se encuentran expuestas en el área de estudio están representadas por valles, sierras y terrazas. Los valles están constituidos por materiales de relleno formado por gravas, arenas, limos y arcillas terciarios y cuaternarios; las sierras por rocas intrusivas, sedimentarias, volcánicas y metamórficas y las terrazas por los conglomerados de la Formación Báucarit (King, 1939). Se caracteriza geomorfológicamente por la presencia de una serie de sierras y lomas paralelas, con orientación NW-SE y separadas entre sí por valles angostos.

La mayor parte del polígono de estudio se compone principalmente de lomeríos, con elevaciones que van de 550 a 700 m.s.n.m. A continuación se muestran las principales geoformas presentes en el área de estudio (Figura 3).

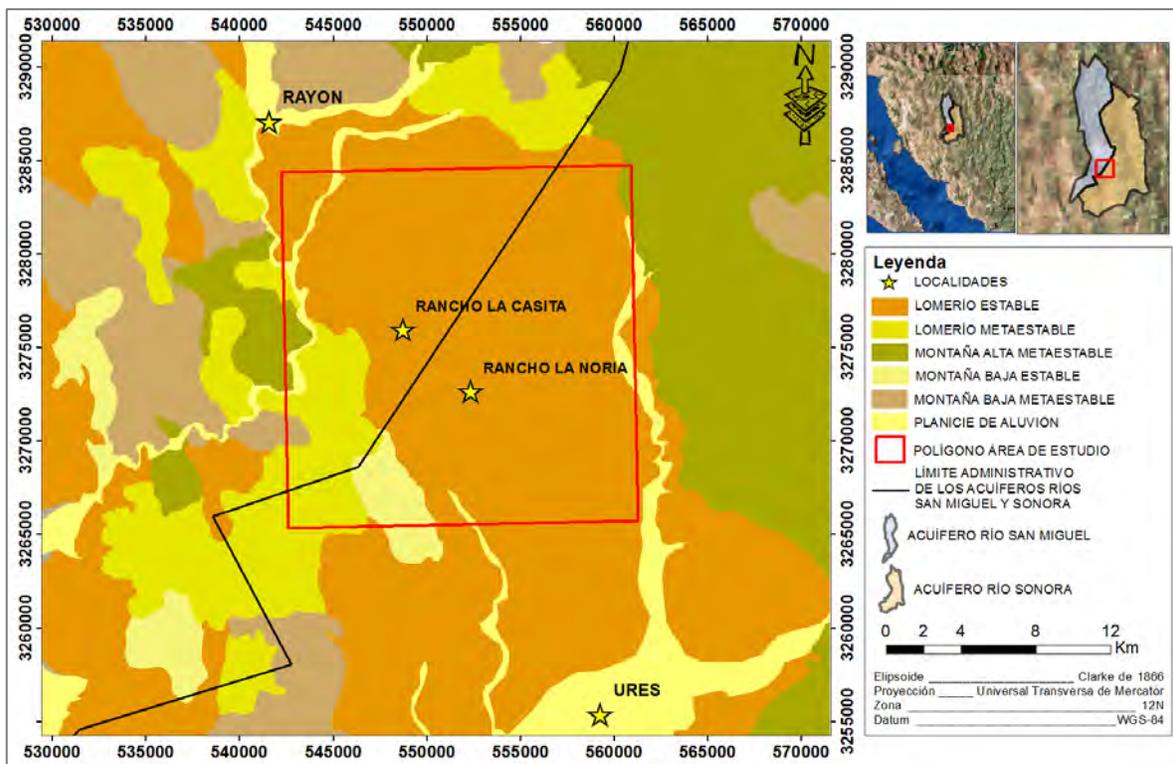


Figura 3. Geomorfología del área de estudio.



1.4.3. Carta hidrogeológica

Una carta hidrogeológica permite agrupar en un mapa geológico las principales características geológicas de una región (naturaleza de los terrenos, secuencia estratigráfica, rasgos estructurales y geomorfológicos), en relación con las características hidrogeológicas presentes (porosidad y permeabilidad), en función de los datos aportados por los diversos puntos de agua, naturales y artificiales existentes. La carta proporciona una idea más organizada y completa de la hidrogeología general de una determinada región (del Arenal, R 1978).

En la Figura 4, se observa que la mayoría del material presente en el área de estudio no está consolidado y se caracteriza por tener una permeabilidad media (m), para el caso del material consolidado hacia los extremos oriente y poniente del área se tiene una permeabilidad baja media (BM), y hacia el sureste del polígono aparece una pequeña porción de material que se caracteriza por tener permeabilidad media (M).

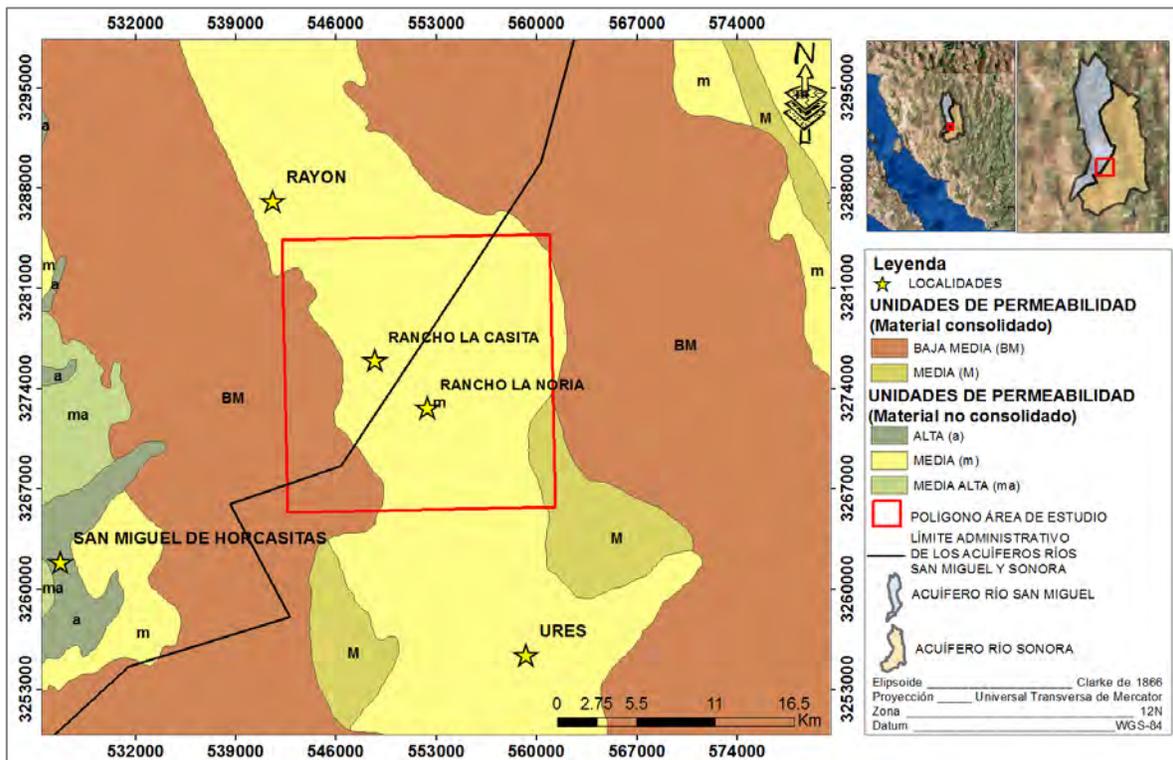


Figura 4. Carta hidrogeológica superficial referente al área de estudio (INEGI, 1999).

2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el desarrollo de esta tesis se siguieron las siguientes etapas:

- Para iniciar se implementó el plan para trabajar en gabinete y en campo, con los métodos geofísicos de gravimetría (recopilación de información de la base de datos de estaciones gravimétricas INEGI) y posteriormente con sondeos transitorios electromagnéticos (adquisición de datos, levantamiento de TEM's en campo),
- La información geofísica se procesó, modeló e interpretó, esto con el fin de obtener una idea general de la morfología del basamento y las características resistivas del material que rellenan la cuenca,
- Finalmente para complementar la caracterización hidrogeológica, se realizaron mediciones del nivel potenciométrico, pruebas de bombeo y muestreo de agua subterránea (Figura 5).

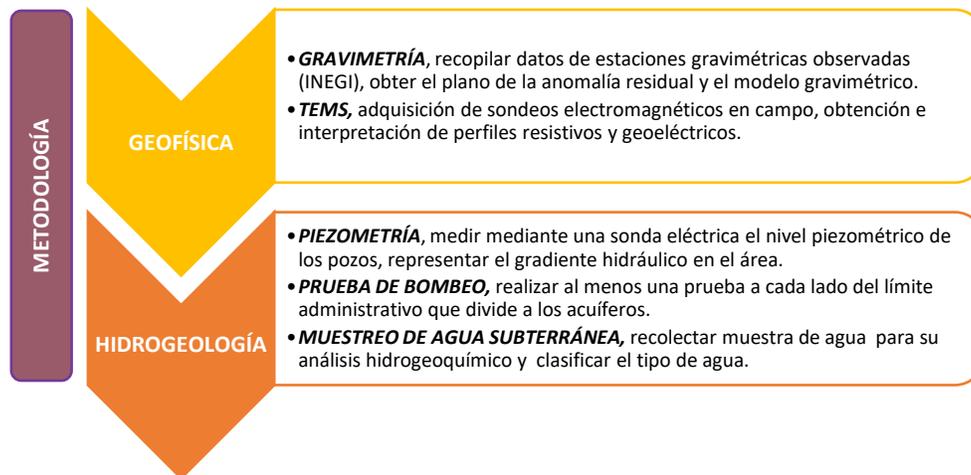


Figura 5. Diagrama de la metodología aplicada.

2.1. Gravimetría

El método gravimétrico de prospección se basa en la medida en superficie, de las pequeñas variaciones (o anomalías) de la componente vertical del campo gravífico terrestre. Estas variaciones son debidas a una distribución irregular en profundidad de masas de diferentes densidades, por lo que conociendo aquellas se puede llegar a una interpretación más o menos



probable de la situación de las masas en el subsuelo, dependiendo del conocimiento geológico y de la distribución de densidades en profundidad (Cantos, 1974).

Este método se basa en la “Ley de la Gravitación Universal de Newton”, la cual establece que la fuerza (F) entre dos partículas de masa m_1 y m_2 es directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (r) entre ellas:

$$F = G (m_1 m_2 / r^2)$$

Donde G es la constante de Gravitación universal, cuyo valor es $6.670 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{gr s}^2$.

La aceleración gravitacional es la manifestación de la atracción universal que impulsa los cuerpos hacia el centro de la tierra, se denota con la letra “ g ” y se define como el incremento constante de la velocidad por unidad de tiempo percibido por un cuerpo en caída libre, la aceleración de la gravedad es distinta en todos los lugares del planeta, pero se ha considerado un valor normalizado de $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ en unidades de acuerdo con el sistema internacional:

$$g = F/m_2 = G (m_1/r_2)$$

2.1.1. Recopilación de datos gravimétricos

El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), cuenta con una base de datos de estaciones gravimétricas observadas en campo del estado de Sonora, en ella se incluye principalmente información tal como, nombre de la estación, coordenadas geográficas latitud y longitud datum NAD27 (para fines prácticos de este trabajo dichas coordenadas se cambiaron a la proyección UTM datum WGS84), elevación en metros sobre el nivel del mar y anomalía de Bouguer completa, esta información fue la que se utilizó al procesar los datos con apoyo del programa WinGLink.

Con la finalidad de mostrar un panorama regional del comportamiento de la anomalía gravimétrica en el área de estudio, lamentablemente las estaciones recopiladas tienen baja cobertura en el área, por ello se optó por seleccionar un total de 222 estaciones, aún y cuando una minoría caen dentro del polígono de estudio, el resto de las estaciones, siendo la mayoría, se extienden por fuera del área (Figura 6).

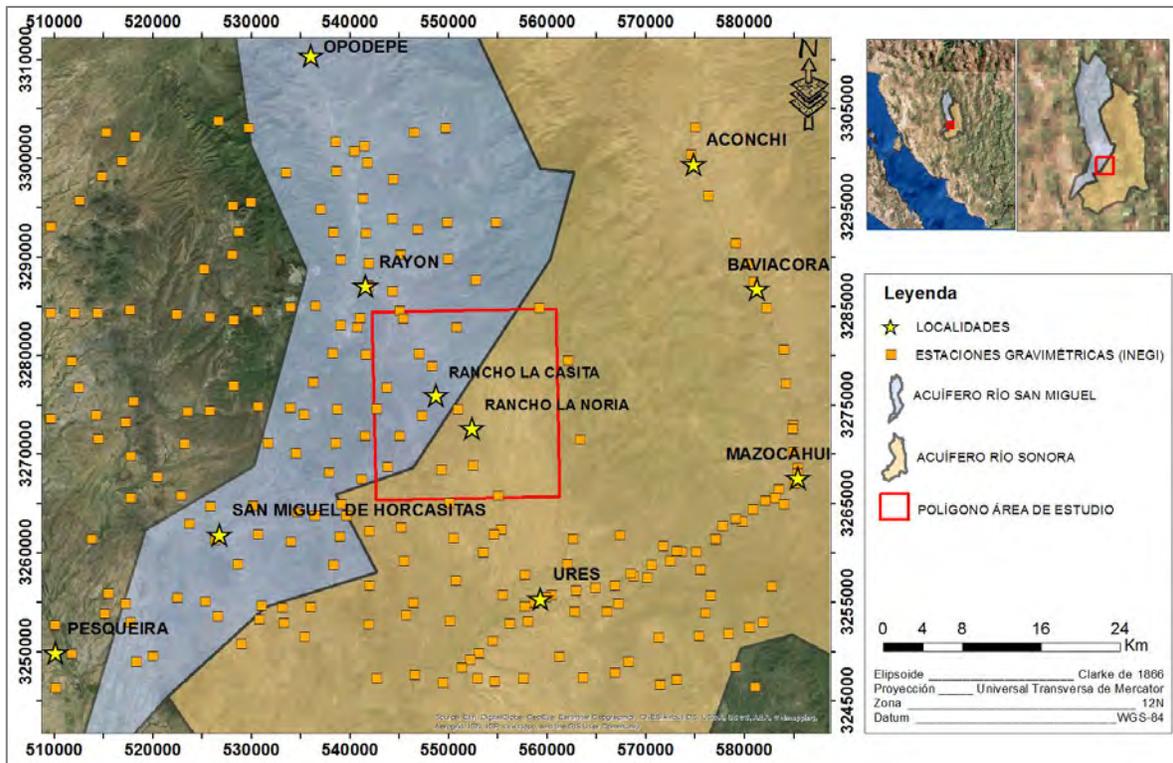


Figura 6. Localización de las estaciones gravimétricas observadas (INEGI).

2.1.2. Separación regional-residual

El mapa de anomalía de Bouguer se considera como la suma de:

1) el mapa regional, debido al efecto de las masas profundas y lejanas (generalmente el basamento) y,

2) el mapa residual debido a los efectos de las masas superficiales (estratos geológicos más pesados o masas más o menos densas que las rocas circundantes).

En prospección interesa hacer resaltar el efecto debido a las masas superficiales, eliminando o reduciendo al mínimo el efecto de las masas profundas. Por ello la anomalía regional se define como el efecto de todo aquello que no interesa prospectar (Cantos, 1974). La anomalía residual se obtendrá simplemente como la diferencia entre el mapa de Bouguer y el regional:

$$\text{Anomalía residual (R)} = \text{Anomalía de Bouguer (A}_B\text{)} - \text{Anomalía regional (A}_R\text{)}$$



Existen distintos métodos para calcular la anomalía regional, entre ellos los métodos analíticos (medias aritméticas, determinación por mínimos cuadrados, método de Griffin, etc...) que suelen ser más precisos en comparación de los métodos gráficos (suavización de contornos, método de los perfiles, etc...).

En este trabajo para llevar a cabo la separación regional-residual, se utilizó por parte de los métodos analíticos la determinación por mínimos cuadrados. Con apoyo del programa WinGLink primero se integraron todas las estaciones que contiene la anomalía de Bouguer completa para obtener una malla, posteriormente se calcularon polinomios de varios órdenes, generalmente de bajo orden para ver cuál (plano, paraboloides, etc.) representa el mejor ajuste en los datos.

2.1.3. Modelado directo: método de Talwani

Esta técnica implica la creación de un modelo geológico hipotético y el cálculo de la respuesta geofísica a ese modelo. Este método analítico, conocido como método de Talwani se utiliza para definir el basamento o diferentes cuerpos, usando un polígono de n-lados para aproximarse al contorno de la sección vertical de un cuerpo de dos dimensiones 2D. Se puede calcular el efecto de la gravedad a mano o digitalmente en computadora (Talwani *et al.*, 1959).

En el modelado en 2D los modelos gravimétricos no son únicos, es decir, varios modelos pueden producir la misma respuesta gravimétrica, sin embargo, es tarea del intérprete evaluar razonablemente la geología de cualquier modelo.

Con apoyo del software WinGLink se trazó un perfil sobre la anomalía residual obtenida, dicha sección se considera como la más representativa del área de estudio ya que intersecta perpendicularmente con el límite administrativo de los acuíferos en estudio.

Para llevar a cabo la modelación, inicialmente se necesita plantear el número de capas que conformarán al modelo y asignarle una densidad a cada capa, para este modelo se propusieron las siguientes unidades:

- Basamento granodiorítico, densidad 2.65 g/cm³.
- Secuencia volcanosedimentaria, densidad 2.5 g/cm³.
- Relleno sedimentario, densidad 2.1 g/cm³.



Las densidades propuestas para estas unidades, resultan de valores encontrados en fuentes bibliográficas, la Tabla 1, muestra las densidades en (gr/cm^3) de algunas rocas existentes en el área.

Tabla 1. Densidades de algunas rocas del área de estudio en gr/cm^3 .

| TIPO DE ROCA | ⁽¹⁾ DENSIDAD PROMEDIO | ⁽²⁾ DENSIDAD PROMEDIO | ⁽³⁾ DENSIDAD RANGO | ⁽⁴⁾ DENSIDAD RANGO |
|--------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Aluvión | 2,0 | 1,54 | 1,7 - 2,3 | |
| Conglomerado | | | | 2,0 - 2,7 |
| Basalto | 3,0 | 2,99 | | 2,7 - 2,8 |
| Riolita | | 2,52 | | |
| Andesita | | 2,61 | | 2,5 - 2,8 |
| Arenisca | 2,3 | 2,24 | 2,0 - 2,6 | 1,6 - 2,9 |
| Caliza | 2,5 | 2,11 | | 1,5 - 2,8 |
| Cuarcita | 2,7 | | 2,65 | 2,3 - 2,7 |
| Diorita | 2,8 | 2,85 | | |
| Granito | 2,6 | 2,64 | 2,5 - 2,8 | 2,5 - 2,8 |
| Granodiorita | 2,7 | | | |

⁽¹⁾ Mirónov, V.S. 1977. *Curso de Prospección Gravimétrica*. Ed. Reverté, S.A. Pág.327-328.

⁽²⁾ Timothy L, Leland, Douglas K, Ronald. 2013. *Acquisition and Analysis of Terrestrial Gravity Data*. Pág. 100-102.

⁽³⁾ Suping Peng, Jincal Zhang. 2007. *Engineering Geology for Underground Rocks*. Ed. Springer. Pág. 1- 2.

⁽⁴⁾ Documento WEB. *Tabla de Características Físico-Mecánicas de varios tipos de rocas*. (http://www.conanma.com/descargas/cap_12_geotecnica.pdf).

En el programa WinGLink se comienza por proponer un modelo geológico teórico, tomando en cuenta el número de capas y sus respectivas densidades asignadas, así también los espesores que cada capa tendrán, una vez generado el modelo, el programa calcula la respuesta, siendo esta la gravedad calculada; esta respuesta se compara con el perfil generado a partir de los datos de la anomalía residual, si ambas curvas no coinciden, se modifica el modelo geológico propuesto inicialmente hasta que se logre obtener el mejor ajuste.

2.2. Sondeos electromagnéticos transitorios en el dominio del tiempo (TEM)

Este método consiste en medir el campo magnético secundario generado por fenómenos de inducción cuando se suprime el campo primario, el cual se genera al hacer circular cíclicamente en cortos periodos de tiempo un campo eléctrico alterno a través de una espira transmisora puesta en tierra (Loop) con forma cuadrada y tamaño variable según sea el objetivo de investigación.



Se considera un circuito por el que fluye una corriente constante, al cortar la corriente repentinamente se interrumpe el campo magnético primario y se inducen corrientes parásitas en el terreno conocidas como corrientes de Eddy, estas corrientes fluyen en trayectorias cerradas en el subsuelo, migran a profundidad y lateralmente, su intensidad disminuye al pasar el tiempo lo que genera a su vez un campo magnético secundario transitorio (Figura 7).

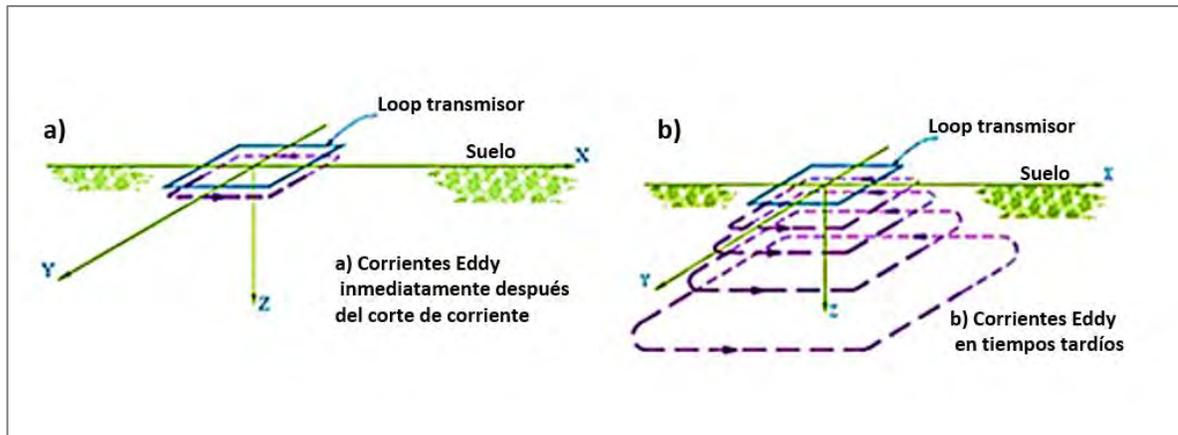


Figura 7. Propagación de las corrientes Eddy en el terreno, a) Los tiempos cercanos, entregan información superficial. b) Los tiempos lejanos o tardíos, entregan información a mayor profundidad.

La señal que se emite sobre el terreno es de tipo escalón, consiste en la circulación de una corriente constante durante un tiempo determinado y la cual se corta abruptamente, donde se aplica posteriormente un tiempo de espera equivalente al utilizado al envío de la corriente, lo que genera una señal tipo rampa en los extremos, para que tiempo después se vuelva a introducir la misma corriente solo que con una polaridad invertida, esto forma la señal de tipo escalón (Figura 8).

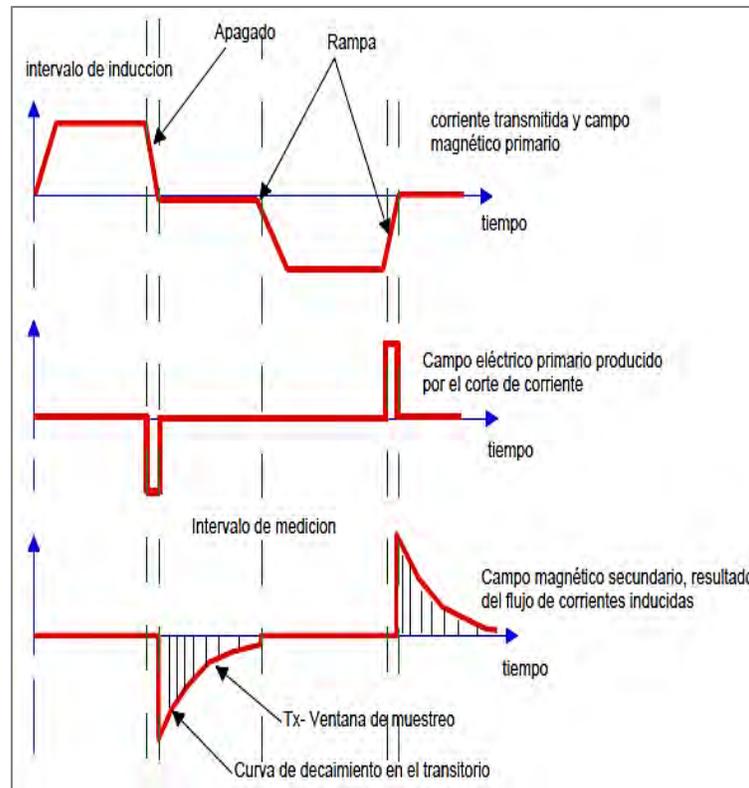


Figura 8. Tipo de señales obtenidas para transitorio electromagnético en el dominio del tiempo, donde se transmite corriente y como respuesta se mide voltaje.

2.2.1. Adquisición de datos electromagnéticos

Originalmente se propuso realizar 37 sondeos, de los cuales solo fue posible llevar a cabo la adquisición en campo de 33 TEM (las fotografías del levantamiento en campo se encuentran en Anexo 1, ver CD), las estaciones se localizan aproximadamente a 1 km de distancia entre ellas y la distribución se realizó perpendicular al límite administrativo entre los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora (Figura 9).

La ubicación de los sitios se realizó tomando en cuenta la información disponible, principalmente a partir de la observación del comportamiento de la anomalía gravimétrica residual, que se obtuvo del procesamiento de los datos de las estaciones recopiladas de INEGI, además de tener en cuenta otros factores como la localización del polígono del área de estudio y del límite administrativo de los acuíferos, así también las características geológicas y geomorfológicas del área.

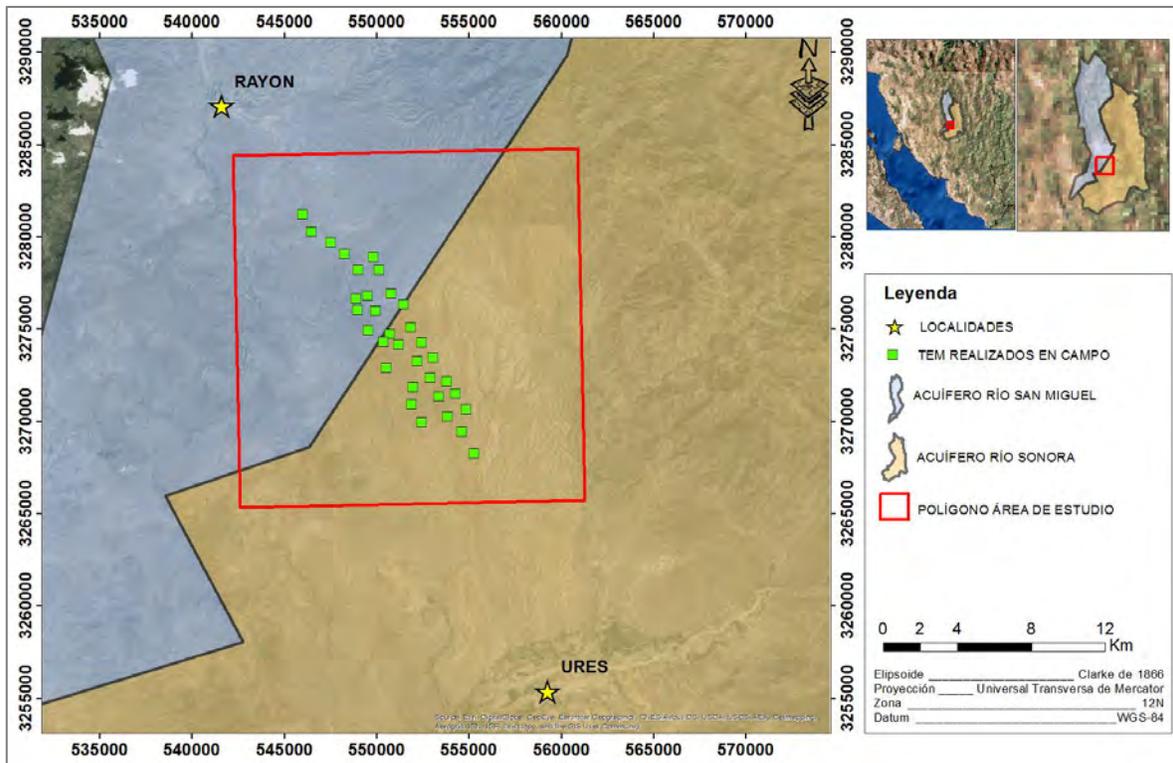


Figura 9. Localización de los sondeos electromagnéticos realizados en campo.

Los sondeos se realizaron con el equipo TEM-FAST48 mediante el arreglo one-loop, en este arreglo se utiliza una misma bobina que sirve como transmisora y receptora, en este estudio se trabajó con espiras de 150 X 150 metros (área de la bobina 22,500 m²), a través de dicha espira la corriente fluye, esta actúa como receptora, una vez que la corriente se corta los extremos de la bobina están conectados al receptor y la señal transmitida puede ser medida (Figura 10).

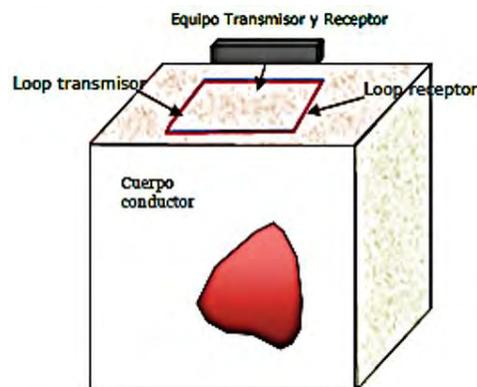


Figura 10. Arreglo one-loop, utilizado en la adquisición de datos en campo.



Los pasos que se siguieron para llevar a cabo el levantamiento de los sondeos en campo, se mencionan a continuación:

- Ubicación del sitio con GPS marca GARMIN, el cual nos proporciona para cada sitio las coordenadas geográficas (X, Y, Z).
- Instalación del equipo TEM-FAST48 y tendido el cable (misma bobina funciona como receptora y transmisora).
- Ingreso de parámetros e inicio de la medición (se toman dos lecturas con diferentes corrientes, una con 1 A y otra con 4 A).
- Verificación de la curva obtenida y guardado del archivo.

Posteriormente a la adquisición de datos en campo, se trabajó en gabinete procesando los sondeos en el programa WinGLink, a continuación se describen las siguientes etapas:

- Transferencia de los registros del equipo TEM-FAST48 a la PC.
- Edición de las curvas registradas con cada ganancia para obtener una curva final de nV/AMP contra tiempo (curva de decaimiento).
- Conversión de la curva de decaimiento a resistividad aparente contra tiempo.
- Cálculo del modelo estratificado.
- Cálculo del modelo suavizado (inversión Occam).
- Impresión gráfica del modelo unidimensional.
- Transferencia de las curvas y los modelos generados, formación de la base de datos.
- Elaboración de secciones de isorresistividad e impresión de resultados gráficos.

2.2.2. Modelo unidimensional

A partir del análisis de cada sondeo realizado se obtiene un modelo unidimensional, partiendo de la curva de resistividad aparente, la cual se procesa en una primera etapa mediante el modelo por capas planas, siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de la curva (cambios bruscos de resistividad) y los tiempos en los que ocurren las inflexiones. Una segunda etapa en el proceso de la curva de resistividad aparente es la de aplicar una regresión



tipo Occam con los cuales se logra obtener un modelo multicapas (hasta 19 capas) para integrar secciones y simular un comportamiento bidimensional de la sección (Figura 11). Los modelos unidimensionales se presentan en el Anexo 1 (Ver CD).

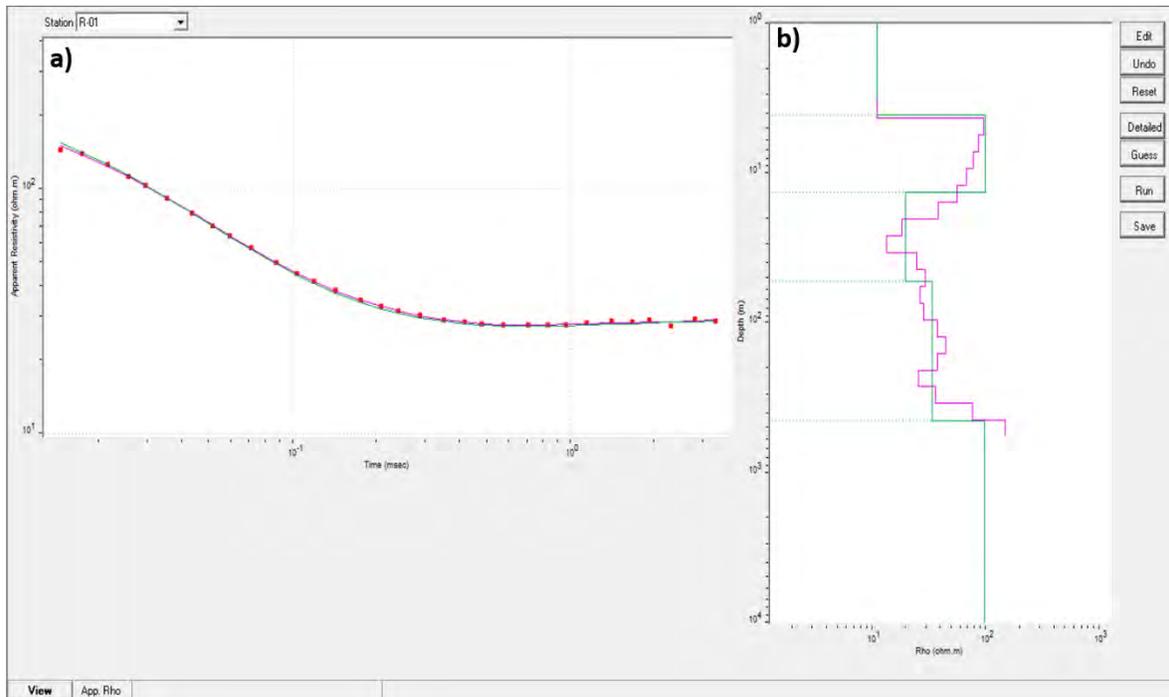


Figura 11. Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam en los datos adquiridos por los sondeos. a) Donde en el eje “x” se presenta tiempo (msec) y en el eje “y” resistividad aparente (ohm.m). b) Se representa en el eje “x” la resistividad (ohm.m) y en el eje “y” la profundidad (m).

2.2.3. Secciones resistivas

La manera de visualizar los resultados obtenidos después de haber llevado a cabo el procesamiento de la información, es generando secciones resistivas, esto haciendo uso del software WinGlink. Se generaron secciones donde el programa interpola las resistividades obtenidas a partir de cada uno de los modelos unidimensionales adquiridos de los sondeos realizados (Figura 12).

Una vez generados estos perfiles se inicia la interpretación resistiva, y posteriormente se hace apoyo de la información geológica que se tiene en el área de estudio para convertir la sección resistiva en geoelectrica, asociando resistividades a diferentes materiales.

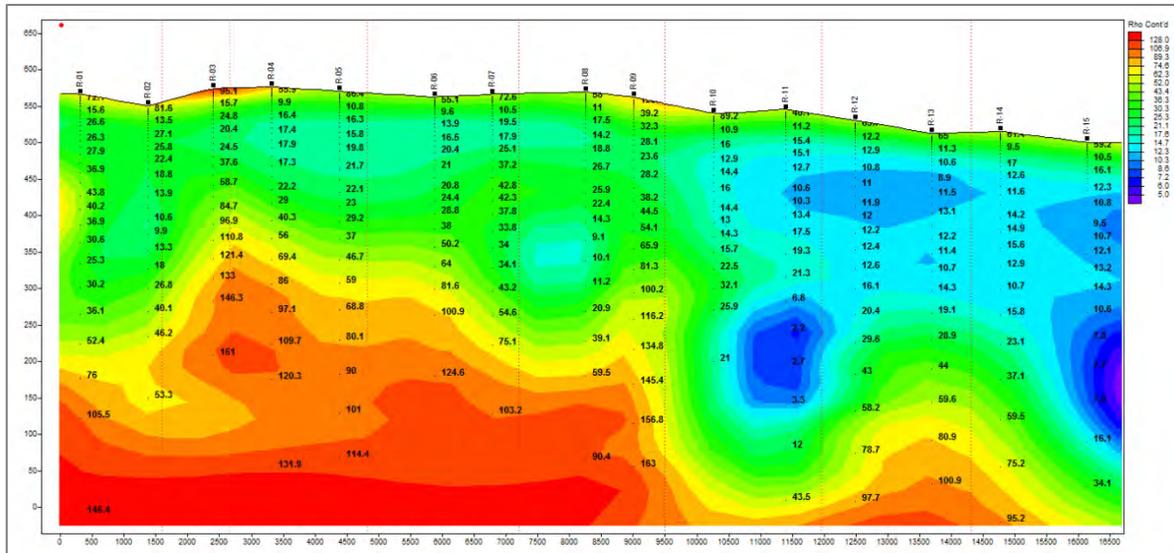


Figura 12. Representación de una sección resistiva con escala en ohm.m, donde los valores conductores se representan en color azul, por otro lado, los valores resistivos se muestran en color rojo.

2.3. Hidrogeología

Hidrogeología es aquella parte de la hidrología que corresponde al almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre (Custodio y Llamas, 1996).

En el área de estudio hay escasez de aprovechamientos, se localizaron dos pozos, uno de ellos se ubica dentro del acuífero Río San Miguel en el rancho la Casita, el segundo pozo se ubica en el acuífero Río Sonora en el rancho la Noria, por lo tanto, ambos aprovechamientos se encuentran separados por el límite administrativo de estos acuíferos (Figura 13).

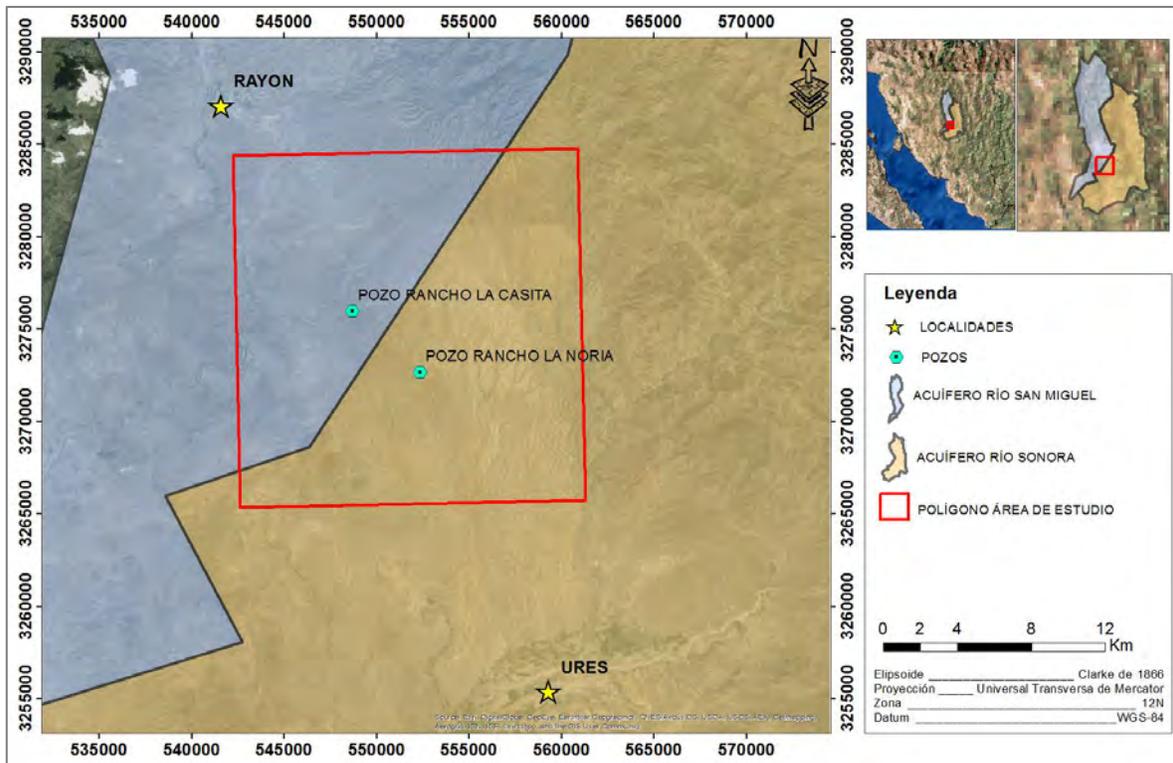


Figura 13. Localización de los pozos monitoreados en el área de estudio.

2.3.1. Piezometría

Se consideró realizar las mediciones piezométricas con la finalidad de conocer las variaciones de los niveles del agua en el área. Sin embargo, al no contarse con suficiente información como para configurar la elevación del nivel de saturación, ya que la mayoría de los pozos se concentran a las cercanías de los cauces de los ríos San Miguel y Sonora, no es posible obtener de manera clara la dirección del movimiento del flujo de agua subterránea en el área de estudio.

El nivel del agua en los pozos localizados dentro del polígono de estudio se midió con una sonda eléctrica, procurando observar la profundidad del agua cuando el pozo se encuentra apagado, es decir, medir el nivel estático mediante el cierre de un circuito eléctrico cuando un elemento detector establece contacto con el agua, la sonda consta de un electrodo, cable eléctrico y un detector.

Con base en la Ley de Darcy el agua subterránea se mueven en la dirección en que decrece el potencial hidráulico, por lo tanto, trabajando con la información obtenida de estos dos pozos se obtuvo el gradiente hidráulico.

El gradiente hidráulico (i) se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo del agua.

El gradiente hidráulico es adimensional y está definido por $i = \Delta h / L$, que viene a significar la pendiente de la superficie piezométrica entre dos puntos, en la Figura 14, se indica el potencial hidráulico (h) en un cierto punto, la diferencia de h_1 y h_2 es igual a Δh , y L está definido por la distancia que existe entre los dos puntos, el flujo del agua se dirige de la línea equipotencial h_1 a la línea equipotencial h_2 y perpendicularmente a las mismas.

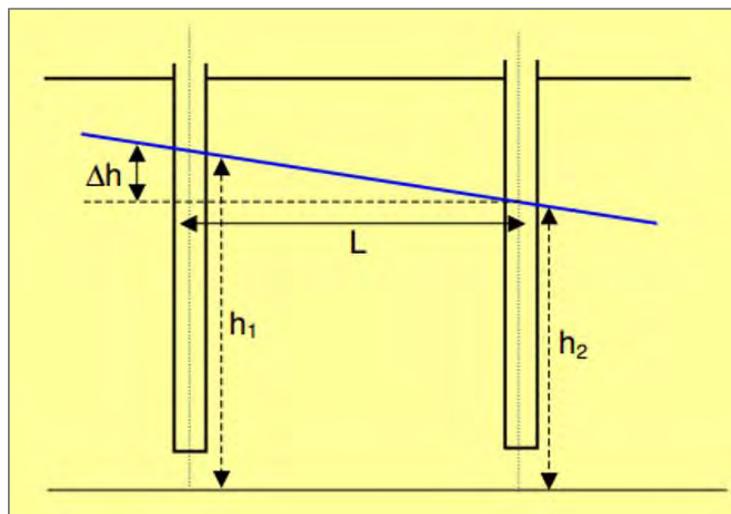


Figura 14. Esquema del gradiente hidráulico.

2.3.2. Pruebas de bombeo

Las pruebas de bombeo son utilizadas para determinar los parámetros hidrogeológicos de un acuífero como son: conductividad hidráulica K , transmisividad T y el coeficiente de almacenamiento S .

La conductividad hidráulica K , es la facilidad que ofrece la unidad hidrogeológica combinada con las propiedades del fluido para permitir su paso, las dimensiones de K son las de una velocidad, se suelen expresar en m/día, m/s o cm/s (Fetter, 1994).

El concepto de transmisividad o transmisibilidad T fue introducido por Theis en 1935, es el producto de la conductividad hidráulica K por el espesor saturado del acuífero, considerando el flujo básicamente horizontal, las unidades de la transmisividad



frecuentemente se expresan en $m^2/día$, o cm^2/s , e incluso en m^2/h . La conductividad hidráulica y la transmisividad, son los dos parámetros que definen la capacidad de transmitir agua en los acuíferos (Béjar, 2007).

Para conocer los parámetros hidrogeológicos del acuífero del área de estudio, se realizó una prueba de bombeo en cada uno de los pozos mencionados anteriormente.

Las pruebas fueron de corta duración, y consistieron en medir las variaciones del nivel piezométrico tanto en la etapa de abatimiento como en la etapa de recuperación, cada etapa se realizó en un lapso de una hora con mediciones a diferentes intervalos de tiempo, los datos obtenidos en campo se procesaron con apoyo del programa AcuíferTest mediante los métodos de Theis y Jacob.

2.3.3. Muestreo de agua subterránea

La hidrogeoquímica analiza la calidad del agua por medio de la geoquímica, que es la ciencia que estudia los caracteres y el comportamiento en la corteza terrestre de los diferentes elementos químicos, su distribución cuantitativa, sus combinaciones así como sus migraciones (dispersiones y concentraciones); intenta explicar estos procesos y trata de hacerlos utilizables (Custodio y Llamas, 1996).

El agua subterránea al moverse a través de las rocas normalmente cambia su composición química. En general, entre más tiempo permanezca el agua subterránea en contacto con las rocas del acuífero, mayor es la cantidad de material que tendrá en solución. La composición del agua también depende de la profundidad de los viajes, como los aniones bicarbonato, que dominan en muchas aguas subterráneas poco profundas, da paso a los sulfatos y luego a los aniones cloruro y el calcio es intercambiado por sodio (Figura 15), la secuencia fue descrita por primera vez por Chevotareb en 1955 (Allaby, 2010).

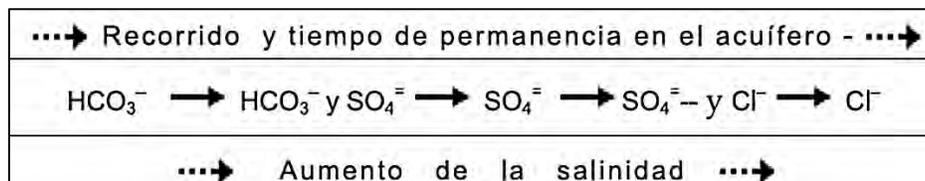


Figura 15. Secuencia Chevotareb, la cual relaciona la composición del agua respecto al recorrido y tiempo de permanencia del agua en el acuífero.



En este estudio se tomaron muestras de los 2 pozos disponibles en el área, antes de recolectarlas se dejó correr el agua por la descarga del pozo durante 5 minutos.

Se midieron los parámetros físicos en campo, estos describen las condiciones de temperatura, pH, conductividad, sólidos totales disueltos a los cuales se encuentran sometidas las aguas subterráneas al momento de ser extraídas del acuífero. Es importante realizar estas mediciones “in-situ” ya que al extraer el agua de las profundidades del pozo se alteran las condiciones de temperatura y presión causando que los parámetros físicos cambien.

En cada sitio de muestreo se utilizó 1 envase de 100 ml para análisis químico, previamente los envases fueron lavados 3 veces con agua del mismo pozo, posteriormente a la toma de agua fueron etiquetados y sellados con papel “Parafilm” alrededor de la tapa para evitar pérdidas. Los envases se depositaron en una caja térmica a la cual se agregó hielo, con el fin de preservarlas y mantenerlas a una temperatura de 4°C durante su transportación al laboratorio.

Las muestras fueron enviadas y analizadas en el laboratorio del Instituto de Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias de la Tierra y Gestión Ambiental de la Universidad de Wrocław (Polonia).

Una manera sencilla de analizar los resultados y obtener una caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas, es haciendo uso de los diagramas hidrogeoquímicos, en el presente estudio se hizo uso de los diagramas de Piper y Stiff.

El diagrama de Piper está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes son Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^{++} \text{K}^{+}$ y los vértices del triángulo de aniones son SO_4^{2-} , Cl^{-} y $\text{HCO}_3^{+}\text{CO}_3$.

Los datos de los diagramas triangulares se proyectan en un rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Este diagrama fue diseñado para identificar las facies de agua y los procesos principales de la evolución geoquímica en las aguas subterráneas.

El diagrama de Stiff está compuesto por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Na se confronta con el Cl, el Ca con el HCO_3 , y el Mg con el SO_4 .



El diagrama Stiff permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica).

La interpretación de los resultados a través de la generación de los diagramas hidrogeoquímicos, se llevó a cabo mediante el uso del software AquaChem 2011.1.



3. GEOLOGÍA

3.1. Estratigrafía regional

Estratigráficamente se tienen rocas con edades que oscilan desde el Precámbrico hasta el Holoceno (Figuras 16 y 17).

Precámbrico

Las rocas de edad precámbrica, corresponden a una serie de unidades litológicas de origen sedimentario, asignadas específicamente al Precámbrico Superior, representadas por areniscas, limolitas cuarcitas y dolomías, las cuales afloran al sur-suroeste del poblado de Rayón, así como también, en el extremo noreste del área de estudio.

Cretácico

Después de un hiato, que comprende desde el Cámbrico Inferior hasta el Jurásico Superior, se depositó una secuencia de calizas y areniscas, del Cretácico Inferior, sobre las areniscas y cuarcitas de edad precámbrica. El contacto geológico entre las secuencias sedimentarias precámbricas y cretácicas es, en algunas ocasiones, por fallamiento o cabalgamiento, y en otras es deposicional.

Durante el Cretácico Tardío se deposita un paquete de rocas sedimentarias-volcanosedimentarias, constituido por areniscas, limolitas, andesitas, conglomerados, dacitas y riolacitas, que cubren discordantemente a las rocas del Cretácico Inferior, estas unidades se correlacionan con la Formación Tarahumara.

Las rocas del Cretácico Inferior y Cretácico Superior, ocurren en forma indistinta en toda el área, en afloramientos que presentan formas y tamaños irregulares.

Terciario

Las rocas de edad precámbrica y cretácica fueron afectadas a consecuencia del emplazamiento de cuerpos batolíticos de rocas calcoalcalinas de edad terciaria, correspondiendo al evento inicial y de mayor magnitud a una etapa intrusiva, con variaciones en la composición mineralógica, desde granito a cuarzomonzonita y desde granodiorita hasta cuarzodiorita, constituyendo lo que regionalmente se define como “Complejo Batolítico de Sonora” (Cretácico Superior-Terciario Inferior). Las principales manifestaciones



superficiales corresponden con afloramientos que se localizan en el extremo oriental, así como hacia la porción noroeste del área.

Después de este evento magmático, tiene lugar una serie de intrusiones de menor magnitud representadas por apófisis-troncos y diques, en los que se considera que su origen estaría relacionado a pulsaciones intermitentes dentro de la cámara magmática, una vez que fueron emplazadas las rocas batolíticas graníticas. En una primera etapa, estos cuerpos intrusivos eocénicos tienen una composición diorítica y cuarzodiorítica, a diferencia de otros intrusivos de composición monzonítica, cuarzomonzonítica y riolítica, emplazados en una etapa final. Este conjunto de rocas intrusivas, se caracteriza por manifestarse como cuerpos aislados que afloran hacia la porción poniente y suroeste del área y en menor proporción en el extremo noreste de la misma.

A finales del Eoceno y hasta principios del Mioceno se genera un grupo de rocas volcánicas que cubren discordantemente a las rocas sedimentarias y volcánicas preexistentes. Estas rocas volcánicas son de composición intermedia-félsica, están representadas por flujos, derrames y aglomerados andesíticos y riolíticos, con niveles de tobas riolíticas, ignimbritas y riolitas, conformando las partes abruptas y topográficamente altas. Los afloramientos principales se encuentran hacia la parte noroeste del área.

Después de los eventos volcánicos anteriores, fueron extrusionadas una serie de rocas volcánicas máficas, constituidas básicamente, por basaltos y andesitas interdigitados con conglomerados polimícticos y areniscas de la Formación Baúcarit, de edad Mioceno.

Cuaternario

Todas las secuencias de rocas anteriores, desde las precámbricas hasta las cuaternarias, han estado sujetas a diversos esfuerzos y movimientos generados durante los procesos tectónicos y estructurales, ocasionando con esto, el fracturamiento de las mismas y la consecuente erosión y transporte de fragmentos y partículas de rocas que se depositaron en las partes topográficamente bajas, formando el conglomerado polimíctico del Pleistoceno y el aluvión del Holoceno en las márgenes de los ríos y arroyos.

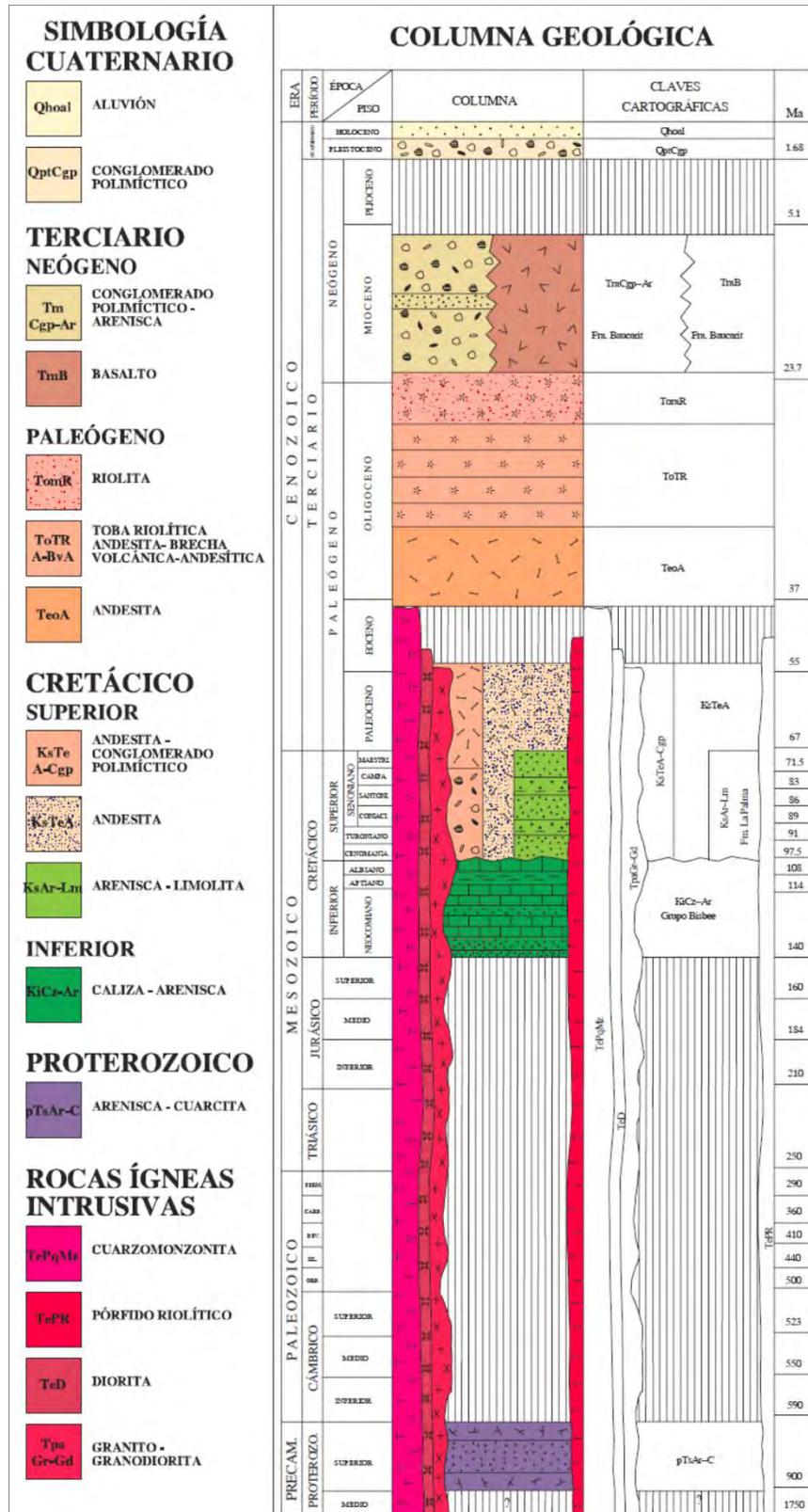


Figura 16. Columna estratigráfica (SGM, 1999).

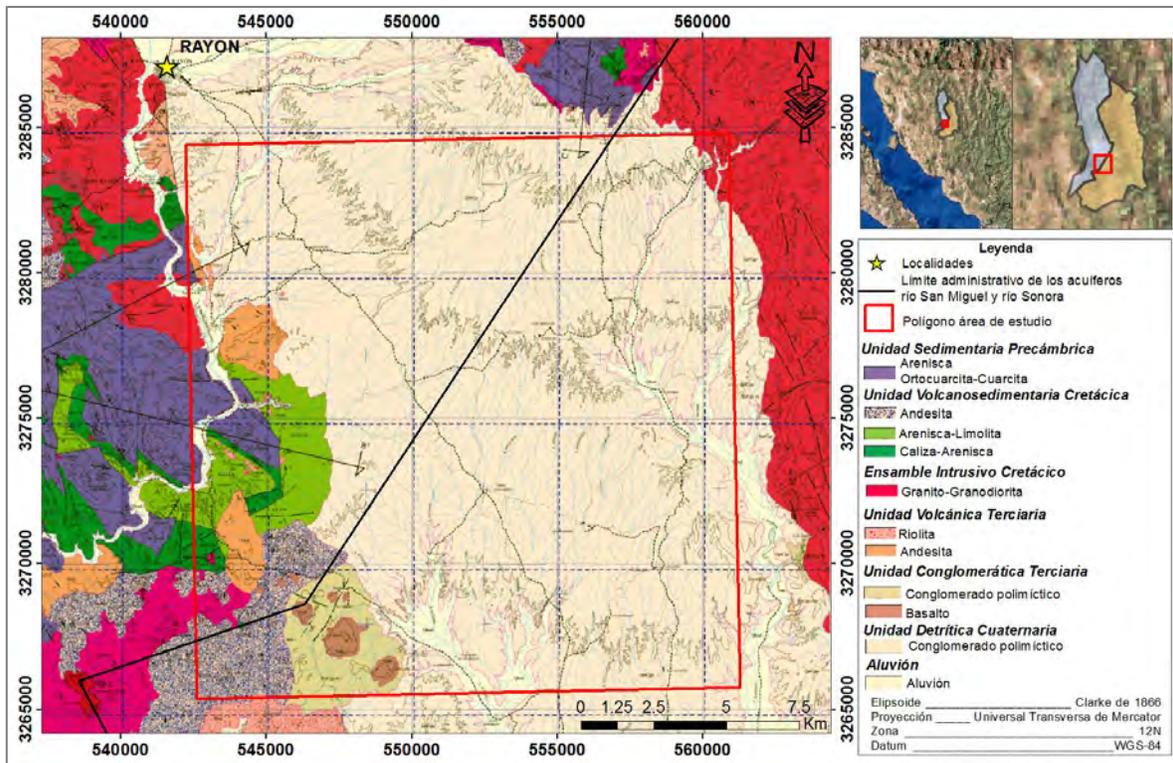


Figura 17. Geología del área de estudio (SGM, 1999).

3.2. Geología local

El área de estudio está caracterizada por un basamento constituido por rocas intrusivas, las cuales están cubiertas discordantemente por una secuencia sedimentaria dominada por ortocuarcitas del Precámbrico. Posteriormente se continúa con una serie de rocas volcanosedimentarias y sedimentarias detríticas del Cretácico Superior. Todo esto intrusionado por cuerpos graníticos del Cretácico Superior al Eoceno, y sobreyacida discordantemente por rocas volcánicas félsicas del Oligoceno, y rocas conglomeráticas y aluvión más jóvenes que representan el relleno sedimentario de una cuenca en distensión.

Unidad sedimentaria precámbrica

Esta unidad consiste principalmente de ortocuarcitas de grano medio a grueso texturalmente maduras. Esta unidad genera relieves topográficos abruptos.

La ortocuarcita es de color rosa en superficie fresca, con un color de intemperismo café claro; es bien clasificada y con estratificación delgada hasta localmente laminar.



Esta unidad sedimentaria se le atribuye una edad del Neoproterozoico con base en su similitud con la cuarcita Los Changos de la región de Tuape (Rodríguez-Castañeda, 1984), y con la Formación las Víboras, reportada al sur en el área de Cerro de Oro (González-León y Jacques-Ayala, 1988).

Unidad volcanosedimentaria cretácica

Esta secuencia volcanosedimentaria está constituida por flujos de lava de composición andesítica, intercalados con sedimentos principalmente detríticos.

De manera general esta secuencia está formada por un conglomerado sobreyacido por horizontes de flujos andesíticos, con alternancias de areniscas, calizas arenosas, tobas andesíticas, y localmente, tobas riolíticas. Las tobas andesíticas presentan un color pardo rojizo al intemperismo y gris rosado a verdoso en superficie fresca.

Estas rocas se correlacionan con la Formación Tarahumara definida en el arroyo El Obispo, en la porción centro-este de Sonora (McDowell *et al.*, 2001).

Ensamble intrusivo cretácico

Esta unidad incluye una serie de intrusiones terciarias que afloran en el área estudiada. Esta actividad plutónica está representada por intrusivos de dimensiones batolíticas, cuya composición varía entre granodiorita y granito. La textura de estas rocas es equigranular a porfídica y localmente pegmatítica.

Las rocas graníticas muestran cristales de cuarzo, plagioclasa, ortoclasa y/o microclina, hornblenda, biotita y zircón. Se observa piritita y magnetita diseminadas, asociadas a la fase hidrotermal.

Se reporta una edad en feldespato potásico de 55 Ma para un pórfido cuarzomonzónico, la cual se encuentra en el rango de 57–51 Ma obtenido para las rocas graníticas del batolito de El Jaralito (Damon *et al.*, 1983).



Unidad volcánica terciaria

La secuencia volcánica más joven en el área está formada por flujos y tobas riolíticas. Las rocas volcánicas terciarias están cubiertas en discordancia por los sedimentos clásticos de la Formación Báucarit. No se tienen edades isotópicas, pero las relaciones de campo de una secuencia de flujos riolíticos similares que afloran en la Sierra de Aconchi indican una edad dentro del Oligoceno.

Unidad conglomerática terciaria

Esta unidad se compone principalmente por un conglomerado polimíctico con intercalaciones de areniscas y limolitas.

El conglomerado polimíctico es de color café rojizo de intemperismo y gris oscuro a gris claro en superficie fresca; Los clastos son de sub-angulosos a sub-redondeados, y su composición litológica está dominada por arenisca, andesita, dacita y riolita, con tamaños de hasta 40 cm, cementados en una matriz arenosa. Presenta intercalaciones de areniscas de grano fino, con un espesor de afloramiento de 100 m.

Esta secuencia conglomerática se asocia a la presencia de la Formación Báucarit, la cual fue definida como tal por King (1939).

Unidad detrítica cuaternaria

Dentro de esta unidad se incluyen secuencias sedimentarias formadas por gravas, arenas y localmente arcillas que se encuentran pobremente y no consolidadas, y cuyos afloramientos se restringen a la porción central del área estudiada, aflorando principalmente en el valle con una topografía suave formando mesetas bajas y planas.

Esta secuencia está compuesta por gravas polimícticas y areniscas pobremente consolidadas. Las gravas están mal clasificadas y están formadas por fragmentos de las rocas que componen las partes altas del área, principalmente de rocas graníticas y volcánicas. El tamaño de los clastos alcanza hasta los 10 cm de diámetro, pero por lo general varía entre los 2 y 5 cm, son fragmentos angulosos a subangulosos en una matriz areno-arcillosa. La arena es de grano fino a medio de color crema, débilmente consolidada, fácilmente erosionable, y se presenta tanto forma masiva como estratificada. Su composición mineral está dominada por cuarzo y feldespatos.



Aluvión

Corresponde a material fluvial compuesto por grava de diversos tamaños, arena, arcilla y limo no consolidados, relleno de los cauces de arroyos, ríos y partes bajas.

Estos depósitos aluviales se consideran la unidad más joven dentro del área estudiada, los cuales consisten en sedimentos no consolidados de arena, grava, limo, predominando las formas subangulosas en los sedimentos.

3.3. Geología estructural

Hacia fines del Cretácico y principios del Terciario, el paisaje geológico de la región estaba conformado por enormes plegamientos de rocas paleozoicas, triásicas y cretácicas.

Hacia esa misma época, se produce un evento compresivo asociado a la Orogenia Laramide que deforma a las secuencias existentes. Este evento y el intenso magmatismo contemporáneo que produce el emplazamiento de los cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas, están asociados a cambios cinemáticos ocurridos al nivel de la subducción de la Placa Farallón debajo de la Placa Norteamericana.

Posteriormente, durante el Oligoceno-Mioceno, se desarrolla un evento tectónico distensivo que dio origen a la formación de sierras y valles paralelos que caracterizan la morfología actual, donde se identifican varios sistemas de fracturamiento y fallamiento, uno predominante de rumbo NW-SE, el evento distensivo se denomina “Basin and Range”, éste originó horsts y grabens con rumbo general NW-SE a N-S, formándose así el “graben” de la subcuenca del Río Zanjón, y los bajos tectónicos de los ríos San Miguel y Sonora (Figura 18).

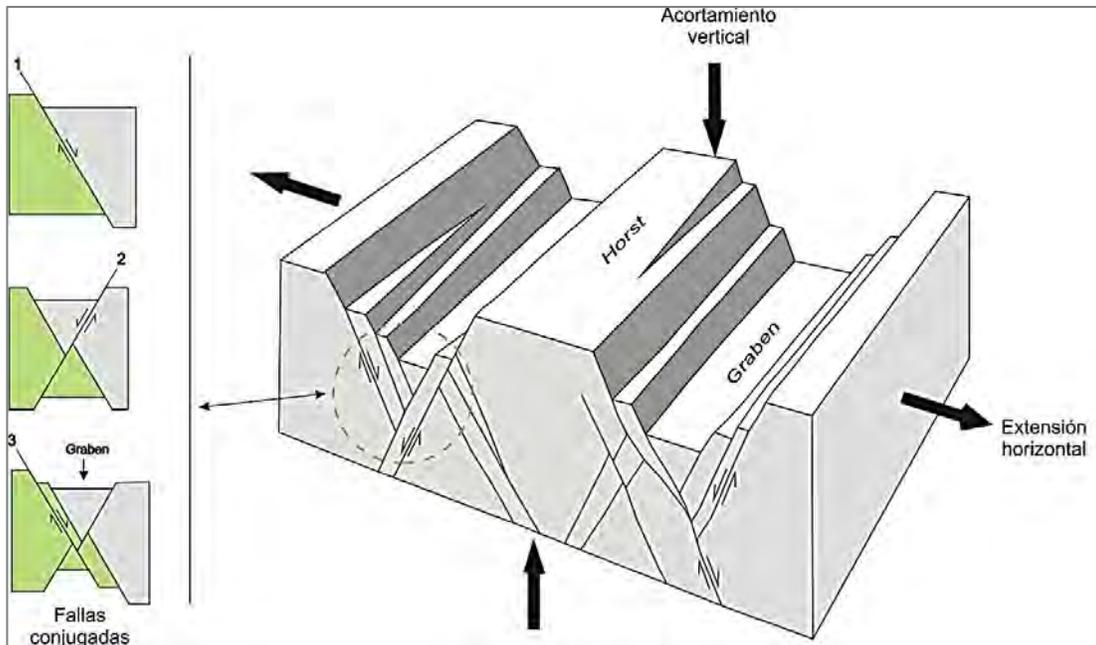


Figura 18. Modelo del funcionamiento estructural.

Una prolongada etapa de erosión, acumuló en las fosas tectónicas y sobre las tierras menos elevadas grandes espesores de conglomerados, arenas y arcillas que componen la Formación Báucarit.

Al inicio del Cuaternario, ya se encontraba prácticamente delineado el sistema de drenaje actual, iniciándose el modelado del paisaje de las tierras altas y de corte, y depósito sobre los valles rellenos de conglomerados, de depósitos aluviales y fluviales cuaternarios, los que por el corto tiempo transcurrido desde el inicio del Periodo, forman apenas una cubierta de poco espesor sobre el relleno Terciario.



3.4. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recopilada en el área por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015), se define un acuífero superior, alojado en sedimentos fluviales, aluviales y conglomerado, cuyo espesor varía desde algunos metros en las estribaciones de la sierra, incrementándose ligeramente en las inmediaciones de los cauces, ríos y arroyos, hasta alcanzar varias decenas de metros en el centro de los valles.

El acuífero inferior se aloja en un medio fracturado conformado por rocas sedimentarias, volcánicas y vulcanosedimentarias, así como rocas ígneas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración, respectivamente, cuyo espesor puede alcanzar algunas centenas de metros.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas ígneas, sedimentarias, cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración. El basamento geohidrológico regional está constituido por las rocas metamórficas.



4. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos gravimétricos recopilados (INEGI), los datos obtenidos de los sondeos electromagnéticos realizados en campo, así como la información hidrogeológica adquirida.

4.1. Gravimetría

4.1.1. Plano de anomalía residual

Para obtener la anomalía residual, en el programa WinGLink se generaron superficies matemáticas que mejor ajusten a los datos distribuidos en un sistema de coordenadas xyz, estas son definidas por funciones polinomiales, para este trabajo el ajuste a los datos se realizó por el método de mínimos cuadrados. En el área de estudio el polinomio que presentó mayor ajuste fue la anomalía residual de grado 2.

Si bien es cierto que la separación entre estaciones no es homogénea, ya que en algunos sitios la distancia entre estaciones es mayor que en otras, la información cubre lo suficiente al área como para poder obtener una idea regional del comportamiento del basamento.

El plano muestra dos anomalías gravimétricas negativas de interés, la primera se localiza hacia el NW del polígono de estudio cerca del poblado Rayón, este bajo gravimétrico presenta valores del orden de los -6 a -12 mGals. La segunda anomalía aparece hacia el SE del polígono tomando como referencia el poblado de Ures, los valores de este bajo gravimétrico van de -4 a -18 mGals. Ambas anomalías presenta en general una forma alargada y una orientación NW-SE.

Tomando en cuenta que el interés del estudio está en el límite entre los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora, se observa justamente dentro del polígono del área de estudio, que los dos bajos gravimétricos pierden continuidad entre más se acercan hacia el límite que divide ambos acuíferos, ya que no se observa anomalía negativa que indique la existencia de algún bajo gravimétrico en esta zona, esto en comparación con las anomalías mostradas hacia el NW y SE a las afueras del polígono.

Otra anomalía de interés se localiza hacia el NE dentro del área de estudio, corresponde a una anomalía positiva bien marcada que presenta valores que van de 18 a 22 mGals, dicho alto gravimétrico coincide en parte con el límite que divide a los acuíferos de este estudio.

Por lo tanto a primera instancia se puede interpretar que el límite entre los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora, corresponde con la presencia de un alto gravimétrico, que pudiera funcionar como separación entre ambos acuíferos, sin embargo, hasta este punto no se conoce bien la estructura y composición geológica a la que corresponde dicha anomalía (Figura 19).

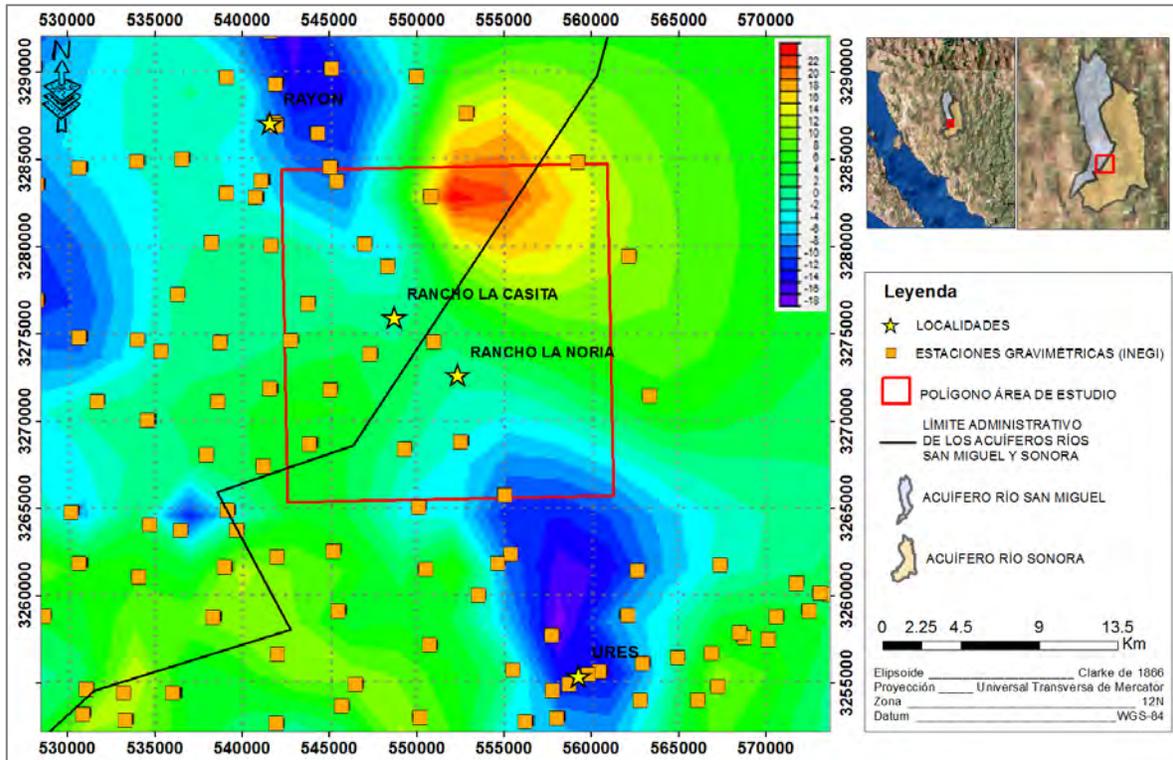


Figura 19. Anomalía residual 2^{do} grado, (la escala se presenta en mGals, anomalía gravimétrica negativa representada por color azul y anomalía gravimétrica positiva en color rojo).

4.1.2. Plano de anomalía residual-geología

Para darle coherencia a la anomalía residual obtenida respecto a la geología del área de estudio, la Figura 20, muestra el empalme de la anomalía residual de 2^{do} grado con la geología.

Se puede apreciar la correspondencia que tienen los dos bajos gravimétricos en la parte de la cuenca en la cual están depositados los sedimentos del Cuaternario, estos bajos gravimétricos se relacionan a áreas que tienen espesores considerables de este relleno sedimentario.



Muy posiblemente se traten de dos subcuencas, formadas como parte del evento distensivo Basin and Range, el cual se caracteriza por la formación de pilares y fosas con rumbo general NW-SE a N-S.

La anomalía gravimétrica positiva presente hacia el NE dentro del polígono de estudio, no coincide con algún afloramiento, al localizarse este alto gravimétrico dentro de la cuenca la cual está cubierta por los sedimentos, nos indica que en esta área existe un menor espesor de sedimentos que están sepultando a este cuerpo de mayor densidad.

Los cambios bien marcados entre dos anomalías gravimétricas son indicativos de estructuras, fracturas y/o fallas. A partir de la anomalía presentada, se interpretan fallas las cuales no son posibles de ver en superficie pues se encuentran sepultadas bajo los sedimentos que se tiene en la zona, dichas estructuras se interpretan como fallas normales de rumbo NW-SE y otras con rumbo NE-SW, las cuales dieron origen a las dos fosas descritas anteriormente.

En el área de estudio el límite que divide a los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora corresponde a un alto gravimétrico el cual está cubierto por sedimentos, por lo que se interpreta que el espesor de estos sedimentos es menor respecto al espesor que se tiene depositado hacia los bajos gravimétricos que se observan a ambos lados del límite de los acuíferos. Sin embargo, en la siguiente etapa en la cual corresponde al modelado del perfil gravimétrico, se definirán los espesores con mayor precisión.

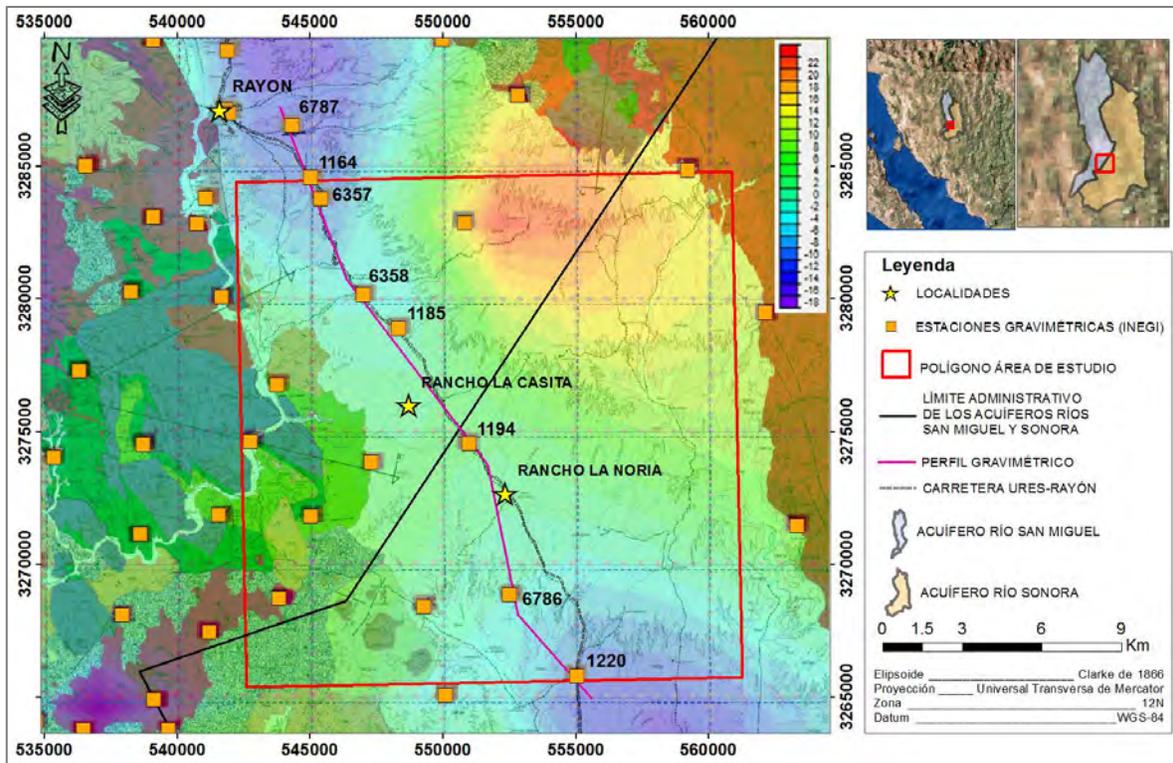


Figura 20. Anomalía residual 2^{do} grado, (la escala se presenta en mGals, anomalía gravimétrica negativa representada por color azul y anomalía gravimétrica positiva en color rojo), con la geología del área sobrepuesta.

4.1.3. Perfil gravimétrico: método de Talwani

Se realizó la modelación de un perfil gravimétrico utilizando el método de Talwani. El perfil sigue un rumbo NW-SE, básicamente se extiende sobre la carretera que conecta a los poblados Ures-Rayón, mide aproximadamente 25 km de largo, y se compone de 8 estaciones cuyas claves son 6787, 1164, 6357, 6358, 1185, 1194, 6786 y 1220 (Figura 20).

La sección se considera como la más representativa del área de estudio, ya que intersecta con el límite de los acuíferos con la estación 1194, el modelo se realizó con el fin de ver el comportamiento que tiene la cuenca en sentido longitudinal, conociendo la distribución y el espesor de los sedimentos que se encuentran depositados principalmente debajo del límite que divide a ambos acuíferos.

Para realizar este modelo inicialmente se observó la anomalía residual de 2^{do} grado anteriormente obtenida, posteriormente con el conocimiento de la geología del área se propuso el modelo geológico que mejor se adecuaba y se tomaron en cuenta las posibles



fallas que intersectan con el perfil, el modelo presenta buen ajuste entre la curva de anomalía gravimétrica observada (línea de color rojo) con la curva de anomalía gravimétrica calculada (línea de color verde) (Figura 21).

En el modelo se representan los dos bajos gravimétricos separados por una anomalía positiva a la cual se le atribuye sea un bloque levantado, el perfil inicia en la estación 6787 localizada al NW de la sección, en donde se representa el bajo gravimétrico que se encuentra hacia las cercanías del poblado Rayón, y termina en la estación 1220 hacia el SE, donde se modela la segunda anomalía negativa asociada al bajo gravimétrico localizado hacia Ures.

Continuando con el análisis del modelo, se observa que a partir de la mitad del perfil donde se localiza el bloque levantado se presenta un sistema de fallas normales hacia el NW y SE de la sección, esto hace que los bloques se desplacen hacia abajo, lo que nos genera las fosas anteriormente mencionadas.

El límite de los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora pasa muy cerca de la estación 1194, a partir de este modelo el espesor del relleno sedimentario bajo ésta estación es de aproximadamente 250 m, mientras tanto el espesor hacia ambas fosas va en aumento registrando un máximo espesor promedio de 750 m para la fosa localizada hacia el NW y 1000 m para la fosa ubicada hacia el SE.

Eventualmente se llega a interpretar que con un espesor de 250 m de sedimentos los cuales corresponden con el límite de los acuíferos, se pueden considerar como conexión entre las fosas localizadas a ambos lados del límite. Pero aún se desconocen sus características resistivas/geoeléctricas, las cuales mas adelante con el método electromagnético se detallarán.

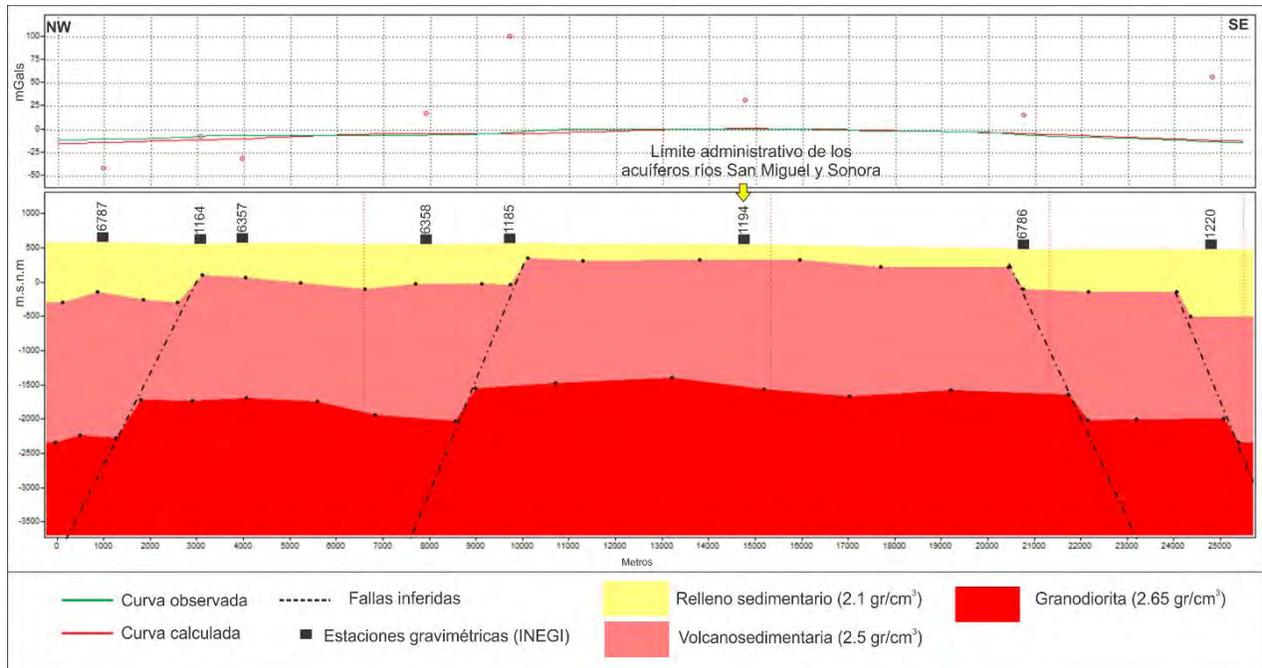


Figura 21. Modelado método Talwani, el modelo se compone de dos secciones, la parte superior en donde se muestra el ajuste entre las curvas de anomalía gravimétrica y la parte inferior en donde se propone el modelo geológico. En ambos casos en el eje “x” se representa la longitud del perfil, mientras que en el eje “y” de la parte superior es referente a los mGals, en la parte inferior es a la elevación en m.s.n.m.

4.2. Sondeos electromagnéticos transitorios en el dominio del tiempo (TEM)

4.2.1. Clasificación geoelectrica para el área de estudio

Haciendo revisión de los trabajos previos que se tienen a los alrededores del área de estudio y después de haber procesado los datos electromagnéticos adquiridos en campo, se comenzó por generar una clasificación geoelectrica para el área de estudio, con la cual es más fácil darle seguimiento a la interpretación de los perfiles geoelectricos que se generen (Figura 22), pues en algunos de los estudios previos se realizaron perforaciones y cuentan con su corte litológico lo cual directamente asocia una resistividad a una litología, esto nos permite calibrar los valores obtenidos para el presente trabajo.

Dicha clasificación se basa en asociar un rango de valores resistivos con la litología existente en el área de estudio, en algunos casos se relacionó la resistividad con materiales sedimentarios y por otro lado también se asoció con el grado de fracturamiento de la roca.

En total se identificaron 8 unidades geoelectricas distintas, las unidades que describen el material sedimentario son, U1 esta unidad tiene la característica de presentar un rango de



resistividad variable y se relaciona al relleno superficial, la unidad denominada U2a de resistividad menor o igual a 10 ohm-m se asocia a materiales de granulometría fina (arcillas), la unidad U2b presenta un intervalo resistivo de 11 a 20 ohm-m y la relación litológica de esta unidad es material de grano medio (arenas), la tercer unidad referente a material sedimentario es la U2c con un intervalo resistivo de 20 a 30 ohm-m, asociado a material de grano grueso (gravas).

La clasificación de las unidades geoelectricas para las rocas se hace a partir del criterio del grado de fracturamiento, empezando con la unidad U3a la cual presenta valores menores a 10 ohm-m se relaciona a rocas muy fracturadas y/o mineralizadas, por otro lado la unidad U3b la cual su intervalo de resistividades van de los 10 a 40 ohm-m se le atribuye a rocas fracturadas, dando seguimiento con el grado de fracturamiento de las rocas, la unidad de nomenclatura U3c se caracteriza por presentar un intervalo resistivo de 40 a 90 ohm-m, dichas resistividades describen a las rocas moderadamente fracturadas, y por último la unidad U3d es la más resistiva presentando valores mayores a 90 Ohm-m, atribuyendo estas resistividades a rocas poco fracturadas y/o sanas.

Es muy importante siempre tener en cuenta que pueden existir excepciones, esto depende de la interpretación que se dé a partir del conocimiento geológico que se tenga del área.

| ESCALA DE RESISTIVOS (Ohm-m) | INTERVALO RESISTIVO | DESCRIPCIÓN PARA MATERIAL SEDIMENTARIO | ESCALA DE RESISTIVOS (Ohm-m) | INTERVALO RESISTIVO | DESCRIPCIÓN PARA FRACTURAMIENTO DE LA ROCA |
|---|---------------------|--|---|---------------------|--|
| U1  | VARIABLE | RELLENO SUPERFICIAL | U3a  | <10 | ROCA MUY FRACTURADA Y/O MINERALIZADA |
| U2a  | ≤ 10 | MATERIAL FINO (ARCILLAS) | U3b  | 10 a 40 | ROCA FRACTURADA |
| U2b  | 11 a 20 | MATERIAL DE GRANO MEDIO (ARENAS) | U3c  | 40 a 90 | ROCA MODERADAMENTE FRACTURADA |
| U2c  | 20 a 30 | MATERIAL DE GRANO GRUESO (GRAVAS) | U3d  | >90 | ROCA POCO FRACTURADO Y/O SANA |

NOTA: SE PRESENTA UNA ASOCIACIÓN LITOLÓGICA GENERAL QUE CONSIDERA LA RELACIÓN ENTRE LA RESISTIVIDAD DE LOS MATERIALES GRANULARES Y FRACTURAMIENTO DE ROCA. PUEDE PRESENTARSE EXCEPCIONES.

Figura 22. Clasificación geoelectrica del área de estudio.



4.2.2. Perfil resistivo y geoelectrico

A partir de los sondeos levantados en campo, se proponen 6 perfiles con los cuales se intenta abarcar la mayor parte del área de interés, los perfiles 1, 2 y 3 tienen una dirección NW-SE, son paralelos entre sí y se localizan a lo largo del valle, mientras que los perfiles 4, 5 y 6 presentan una dirección casi E-W y son transversales a los tres perfiles anteriores (Figura 23).

El perfil 1 es el de mayor longitud con aproximadamente 15 km, se localiza al centro del área de estudio y está orientado NW-SE, hacia el este del perfil 1 se encuentra el perfil 2 con una longitud de 10 km, y hacia el oeste del perfil 1 se localiza el perfil 3 de longitud aproximada de 8 km.

Los perfiles 4, 5 y 6 están orientados E-W, miden en promedio 2.6 km cada uno, el perfil 4 se localiza al sur de los perfiles 5 y 6.

Se considera el perfil 1 como el más representativo para este estudio, por ser el que presenta mayor longitud y por intersectar perpendicularmente con el límite que divide a los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora.

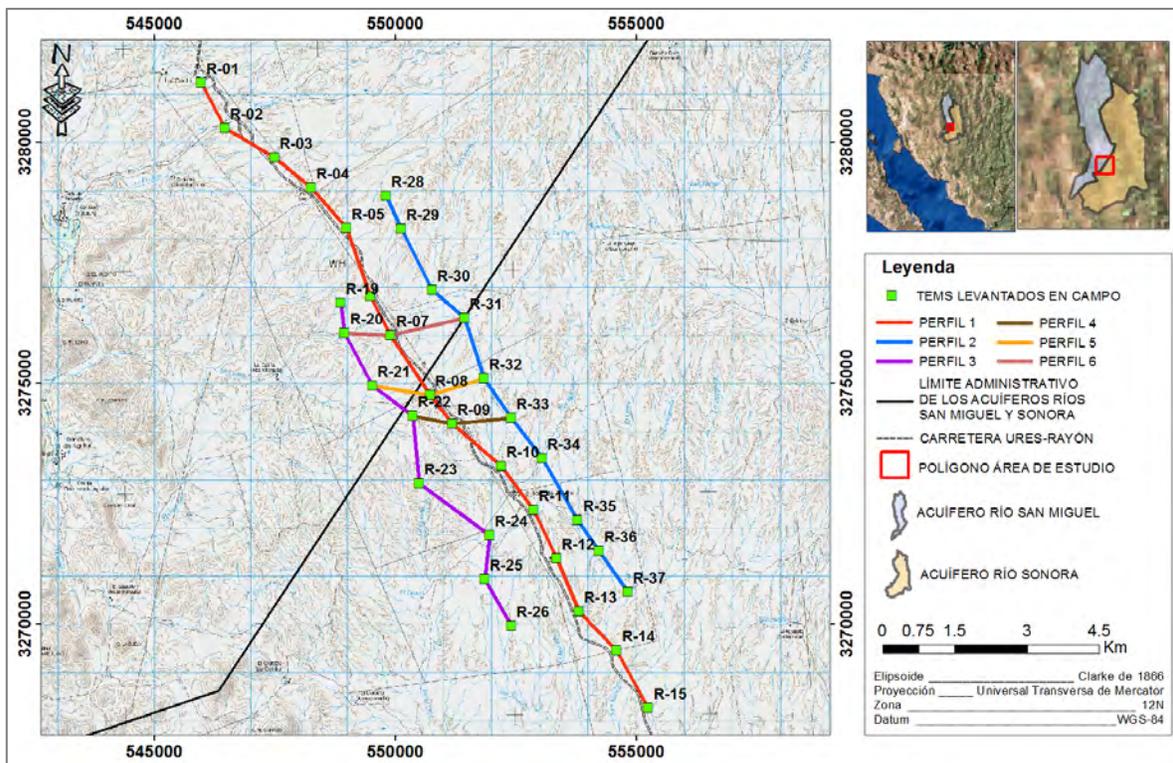


Figura 23. Localización de los perfiles generados a partir de los TEM levantados en campo.



Perfil de resistividad 1

Con base en la información obtenida a partir de los sondeos electromagnéticos, se generó el perfil de resistividad 1 (Figura 24). A continuación se describe la sección más representativa del área. El resto de los perfiles se encuentran en el Anexo 1 (Ver CD).

Este perfil se conforma por 15 sondeos de nomenclatura R-01 hasta el R-15, en él es posible observar la presencia de las 8 unidades resistivas descritas en la Figura 22.

La unidad U1 se localiza a lo largo y en la parte más superficial de todo el perfil, ésta unidad se caracteriza por presentar valores resistivos muy variables y por ser de poco espesor. La unidad U2a se identifica por 3 cuerpos de diferentes dimensiones que se encuentran hacia la parte SE del perfil, notablemente uno de los tres cuerpos es de mayor dimensión en comparación con los otros dos, los valores resistivos que definen a esta unidad son ≤ 10 Ohm-m. La unidad U2b se tiene en gran medida hacia la parte SE del perfil, mientras que otro cuerpo de menor dimensión se presenta entre los sondeos R-04 al R-08, el rango resistivo para esta unidad va de 11 a 20 Ohm-m. La unidad U2c se extiende en la primera mitad del perfil adelgazando su espesor hacia el SE, alcanza valores resistivos de 20 a 30 Ohm-m.

La unidad U3a se muestra entre los sondeos R-10 al R-12 y debajo del sondeo R-15, su valor de resistividad es de <10 Ohm-m. La unidad U3b se presenta hacia el NW del perfil debajo de los sondeos R-01 y R-02, otros cuerpos se tienen hacia la parte SE del perfil, el rango resistivo de esta unidad queda comprendido entre los 10 a 40 Ohm-m. La unidad U3c se presenta en todo el perfil excepto por debajo del sondeo R-15, los valores resistivos que caracterizan esta unidad van de 40 a 90 Ohm-m. Finalmente la unidad U3d se localiza en la mayoría del perfil, solo con la excepción de no encontrarse debajo de los sondeos R-10, R-11 y R-15, esta unidad es la más resistiva pues en ella se contienen los valores >90 Ohm-m.

El objetivo de realizar los sondeos electromagnéticos, es para caracterizar resistivamente el material sedimentario que esta rellenando a la cuenca en especial debajo del límite administrativo que divide a los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora (sondeo R-08), por lo que se observan resistividades que van de los 11 a 30 Ohm-m.

En general al observar la distribución de las resistividades en el perfil, se tiene que estas van en aumento respecto a la profundidad.

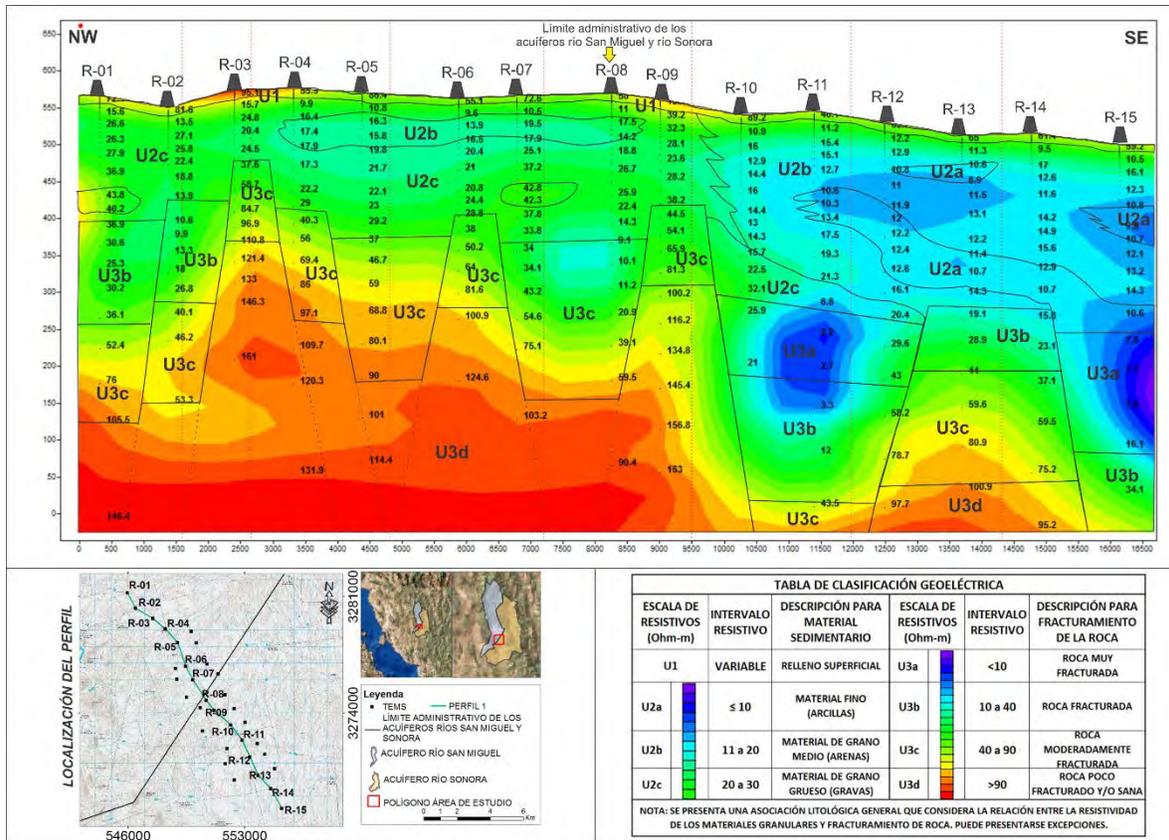


Figura 24. Perfil de resistividad 1.

Perfil geoelectrico 1

A partir del perfil de resistividad 1 y con la información geológica del área de estudio, se interpretó la sección geofísica para convertirla en sección geoelectrica (Figura 25). El resto de los perfiles geoelectricos se encuentran en el Anexo 1 (Ver CD).

La unidad U1 se asocia al relleno superficial constituida por sedimentos recientes mal clasificados de poco a nada consolidados, que se depositan principalmente en el cauce de arroyos y ríos, el espesor de esta unidad varía alrededor de los 10 m. La unidad U2a se relaciona con materiales de granulometría fina como pueden ser arcillas, esta unidad se presenta en forma lenticular y de extensión y espesor variable. En el perfil se muestran tres cuerpos que representan a esta unidad, el de mayor dimensión es de casi 6 km de largo y 75 m de espesor en promedio. La unidad U2b está representada por material sedimentario de grano medio (arenas), el mayor espesor de este material es de 200 m bajo el sondeo R-10 y tiene cerca de 7 km de extensión, dentro de esta unidad se encuentran depositadas las arcillas



de la unidad U2a; otro cuerpo de la unidad U2b se presenta en forma lenticular y de menor espesor que el cuerpo anterior, alcanzando este una longitud de 5.5 km y espesor del orden de los 50 m aproximadamente. La unidad U2c se conforma por material de grano grueso (gravas), esta unidad se extiende a lo largo de unos 10 km y su espesor promedio es de 140 m, esta unidad contiene al lente de arenas de la unidad U2b.

Las unidades U3 son identificadas como unidades rocosas con distinto grado de fracturamiento, este perfil muestra las cuatro sub-unidades, desde la U3a definida como un cuerpo rocoso muy fracturado y/o mineralizado, pasando a la unidad U3b relacionada a un cuerpo rocoso fracturado, después la unidad U3c se le atribuye a rocas moderadamente fracturadas y finalmente la unidad U3d se asocia a cuerpos rocosos de fracturamiento bajo y/o sano, hacia el NW del perfil estas unidades empiezan a aparecer a partir de los 100 m de profundidad y a partir de los 250 m de profundidad hacia el SE del perfil.

Enfocándonos al objetivo de este estudio, se analiza la asociación geoelectrica a la cual le corresponde el relleno sedimentario que se encuentra depositado bajo el límite administrativo que divide ambos acuíferos, debajo del sondeo R-08 en los primeros 200 metros de profundidad en su mayoría se atribuye a material de granulometría gruesa como las gravas y en menor parte a las arenas.

En general el espesor de relleno sedimentario va en incremento de NW hacia el SE del perfil, para el caso del material depositado, se tienen hacia el NW (acuífero Río San Miguel) los materiales más gruesos y después de pasar el límite administrativo de los acuíferos hacia el SE (acuífero Río Sonora) los materiales depositados se vuelven más finos, apareciendo las arenas y las arcillas.

Para las unidades que describen a las rocas, se presenta en general que el grado de fracturamiento va desapareciendo a profundidad, teniendo la presencia de rocas poco fracturadas y/o sanas.

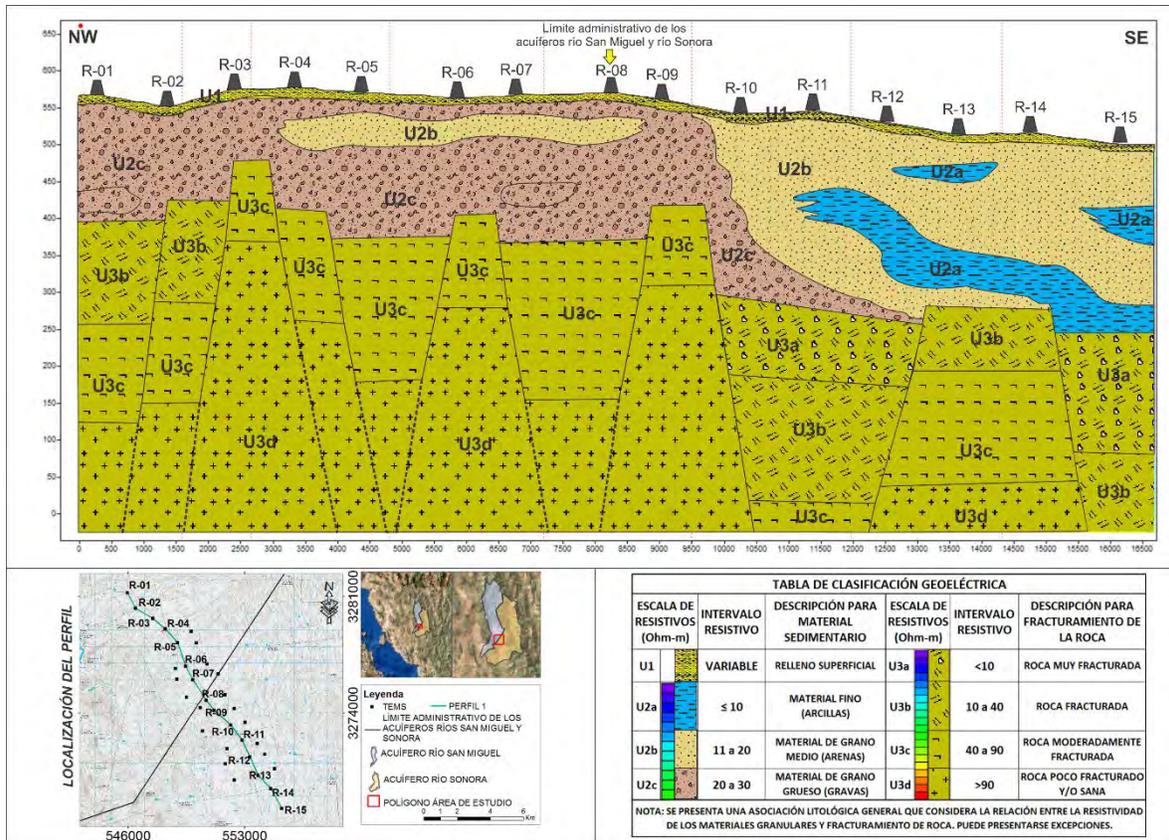


Figura 25. Perfil geoelectrico 1.

4.2.3. Modelo de la distribución resistiva en el área de estudio

Con el objetivo de visualizar la distribución de las resistividades en el área de estudio, se generó un modelo a partir de los perfiles resistivos (Figura 26). Es posible observar que las mayores resistividades se presentan hacia el NW, los perfiles que principalmente presentan resistividades >90 Ohm-m son perfil 1, 4, 6 y 7, estas resistividades se empiezan a encontrar en algunos casos a partir de los 200 metros de profundidad en adelante.

Por otro lado, los bajos resistivos se presentan en su mayoría hacia el SE del modelo, principalmente hacia el SE del perfil 1, también encontrándose estos valores en los perfiles 2, 3, 8 y 9. Hacia el SE se alcanzó una máxima profundidad de investigación de 600 m aprox. para el perfil 9, donde aún a esta profundidad no se detectó basamento resistivo.

Comparando las resistividades obtenidas con la clasificación geoelectrica anteriormente presentada, se relaciona la parte sureste como la zona que presenta mayor espesor de material sedimentario y además la que presenta el depósito de material sedimentario de granulometría

más fina, geológicamente esta parte corresponde a un bajo estructural (fosa) la cual ha permitido el depósito de mayores espesores de sedimento con respecto a la parte noroeste.

Los perfiles 2 y 3 en comparación con el perfil 1, presentan en su mayoría valores resistivos que no van más allá de los 90 Ohm-m los cuales se consideran como una roca poco fracturada y/o sana, por lo tanto geológicamente se infiere la existencia de fallas normales de rumbo NW-SE localizadas entre el perfil 1 y 2, y otra entre el perfil 1 y 3, se piensa que estas fallas han desplazado hacia abajo los bloques, los cuales conforman a los perfiles 2 y 3, al presentarse este desplazamiento el basamento resistivo se va a profundidad permaneciendo un mayor espacio para el depósito de material de relleno de la cuenca, por lo que el sondeo no ha sido capaz de detectar a profundidad mayores resistividades, registrando únicamente valores de resistividades relacionadas a material sedimentario y en otras ocasiones como roca fracturada.

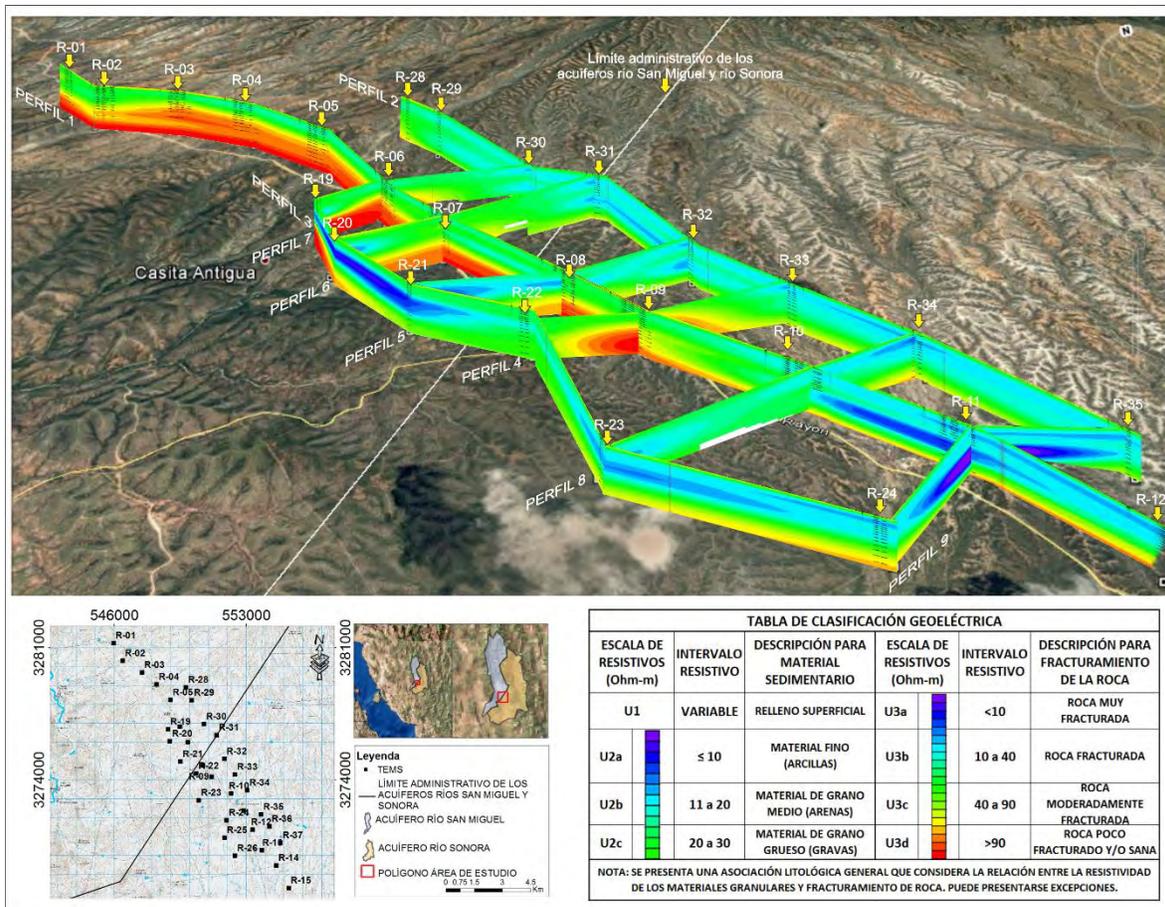


Figura 26. Representación de la distribución de las resistividades en el área de estudio.

4.3. Hidrogeología

4.3.1. Gradiente hidráulico en el área de estudio

Para conocer la dirección en la que se mueve el agua subterránea en el área de estudio, se realizó la representación del gradiente hidráulico en base a los dos pozos monitoreados, la localización de estos pozos se puede ver en la Figura 13.

La Figura 27, representa ambos pozos, hacia el NW el pozo la Casita el cual se ubica dentro del acuífero Río San Miguel, hacia el SE el pozo la Noria localizado hacia el lado del acuífero Río Sonora, por lo tanto, ambos aprovechamientos se encuentran separados por el límite administrativo de estos acuíferos.

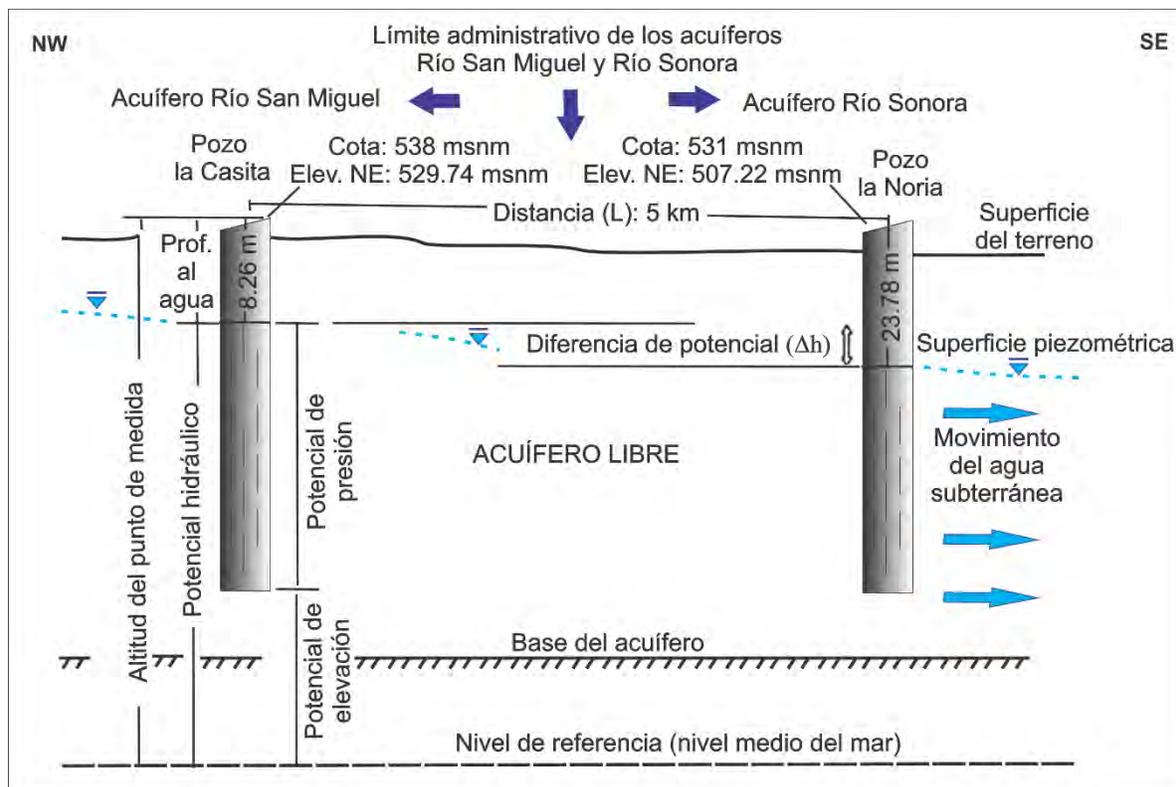


Figura 27. Representación del gradiente hidráulico (movimiento del agua subterránea) respecto a 2 pozos en el área de estudio.

La pendiente de la superficie piezométrica entre los dos pozos en el área de estudio, está definida por, $i = \Delta h / L$, donde $\Delta h = (h_1 - h_2)$ y en este caso h_1 se considera como el potencial hidráulico del pozo la Casita, mientras que h_2 es el potencial hidráulico del pozo la Noria, finalmente L es la distancia que separa a los dos pozos, por lo tanto:



$$i = \Delta h / L$$

$$i = 22.52 \text{ m} / 5000 \text{ m}$$

$$i = 0.004504$$

Donde:

$$\Delta h = (529.74 - 507.22) = 22.52 \text{ m}$$

$$L = 5000 \text{ m}$$

En la representación del gradiente hidráulico (Figura 27), se observa que el movimiento del flujo del agua subterránea va hacia el sureste, pasando del acuífero Río San Miguel hacia el acuífero Río Sonora.

4.3.2. Pruebas de bombeo

Se realizaron dos pruebas de bombeo, la prueba realizada en el pozo la Casita tuvo una duración de 1:35 horas, el nivel estático fue de 8.26 m y después de una hora de bombeo el nivel descendió a 14.85 m, presentando un abatimiento de 6.59 m, mientras tanto la recuperación del nivel estático fue del 88% en 35 minutos.

En el pozo la Noria la prueba de bombeo se realizó en 2:00 horas, el nivel estático fue de 23.78 m, después de una hora de bombeo el nivel dinámico fue de 61.35 m, por lo tanto se presentó un abatimiento de 37.57 m, la recuperación del nivel estático fue del 92% en 60 minutos.

Los datos obtenidos fueron interpretados con el programa AquiTest, mediante el método de Theis para el abatimiento y el método de Theis-Jacob para recuperación. De esta manera se obtuvieron las características hidráulicas del sitio de bombeo, tales como: transmisividad y conductividad hidráulica (Tabla 2).

Tabla 2. Características hidráulicas obtenidas en las pruebas de bombeo.

| POZO | N.E. (m) | N.D. (m) | ABATIMIENTO (m) | MÉTODO THEIS (ETAPA DE ABATIMIENTO) | | MÉTODO THEIS-JACOB (ETAPA DE RECUPERACIÓN) | |
|-----------|-------------|-------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| | | | | TRANSMISIVIDAD (m ² /d) | CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (m/d) | TRANSMISIVIDAD (m ² /d) | CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (m/d) |
| La Casita | 8.26 | 14.85 | 6.59 | 1.76 E ¹ | 2.15 E ⁻¹ | 9.59 | 1.17 E ⁻¹ |
| La Noria | 23.78 | 61.35 | 37.57 | 1.67 | 3.62 E ⁻² | 1.67 | 3.61 E ⁻² |



Los resultados de conductividad se compararon con la Tabla 3, en donde diferentes autores presentan una serie de valores estimados de conductividad hidráulica, las unidades se presentan en m/día.

El pozo la Casita presentó una conductividad hidráulica de 0.215 m/día y 0.117 m/día, estos resultados corresponden a la etapa de abatimiento y recuperación respectivamente, de acuerdo con los valores de la Tabla 3, los resultados obtenidos se asocian con arenas medias-arenas gruesas que son consistentes con la interpretación geofísica.

Los valores de conductividad hidráulica que presentó el pozo la Noria en la etapa de abatimiento fue de 0.0362 m/día, por otra parte en la etapa de recuperación se obtuvo 0.0361 m/día, los valores se asocian a arenas arcillosas-arenas finas, esto según la Tabla 3.

Las gráficas obtenidas y las fotografías de las pruebas de bombeo se encuentran en el apartado de Anexo 2 (Ver CD).

Tabla 3. Valores estimados de conductividad hidráulica en m/día (Sanders, 1998).

| | | Domenico | Smith & W | Freeze | Fetter | Sanders |
|---------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Sedimentos | Grava | 25 a 2500 | 100 a 10 ⁵ | 100 a 10 ⁵ | 10 a 1000 | |
| | Grava con arena | | | | | |
| | Arena gruesa | 0,1 a 500 | 0,01 a 1000 | 1 a 1000 | 1 a 100 | 1 a 100 |
| | Arena media | 0,1a 50 | | | | |
| | Arena fina | 0,02a 20 | | | 0,01 a 1 | 0,01 a 1 |
| | Arena arcillosa | | | 0,01 a 100 | 0,001 a 0,1 | |
| | Silt, loess | 10 ⁻⁴ a 2 | 10 ⁻⁴ a 1 | 10 ⁻⁴ a 1 | 0,001 a 0,1 | 10 ⁻⁴ a 1 |
| | Arcilla | 10 ⁻⁶ a 4*10 ⁻⁴ | 10 ⁻⁷ a 10 ⁻³ | | 10 ⁻⁶ a 10 ⁻³ | 10 ⁻⁶ a 10 ⁻³ |
| Arcilla marina inalterada | 10 ⁻⁷ a 2*10 ⁻⁴ | | 10 ⁻¹¹ a 10 ⁻⁷ | | | |
| Rocas Sedimentarias | Calizas carstificadas | 0,1 a 2000 | 0,05 a 0,5 | 0,1 a 1000 | | 0,1 a 10 ⁷ |
| | Calizas, dolomías | 10 ⁻⁴ a 0,5 | 0,001 a 0,5 | 10 ⁻⁴ a 1 | | 10 ⁻⁴ a 1 |
| | Areniscas | 3*10 ⁻⁵ a 0,5 | 10 ⁻⁵ a 1 | 10 ⁻⁵ a 1 | | |
| | Argilitas (siltstone) | 10 ⁻⁶ a 0,001 | | | | |
| | Pizarras sedimentarias (Shale) intactas | 10 ⁻⁸ a 2*10 ⁻⁴ | 10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁴ | 10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁶ | | 10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁶ |
| | Pizarras sed. (Shale) fracturadas/alteradas | | 10 ⁻⁴ a 1 | | | |
| Rocas cristalinas | Basalto inalterado, sin fracturar | | 10 ⁻⁶ a 10 ⁻³ | | | 10 ⁻⁶ a 10 ⁻³ |
| | Basalto fracturado/vesicular cuaternario | | 10 a 1000 | | | 0,1 a 10 ⁵ |
| | Escorias basálticas | | 0,001 a 1000 | | | |
| | Basalto permeable | 0,03 s 2000 | | 0,02 a 1000 | | |
| | Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar | 10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵ | | 10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵ |
| | Rocas ígneas y metamórficas fracturadas | 0,001 a 25 | 10 ⁻⁵ a 1 | 0,0005 a 20 | | 10 ⁻⁵ a 1 |
| | Granito alterado | 0,3 a 5 | | | | |
| Gabro alterado | 0,05 a 0,3 | | | | | |



4.3.3. Muestreo de agua subterránea

Los resultados de los parámetros físicos del agua de los dos pozos muestreados se presentan en la Tabla 4. Estos resultados (si bien la fuente no es de agua potable, sino una fuente de suministro pecuario), se compararon con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994: “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, la cual establece las características que debe cumplir el agua para su uso potable.

Tabla 4. Parámetros físicos de las muestras analizadas.

| PARÁMETRO | UNIDADES | LÍMITE NOM-127 | POZO LA CASITA | POZO LA NORIA |
|---------------------------------|----------|----------------|----------------|---------------|
| Potencial de hidrógeno (pH) | U | 6.5 – 8.5 | 8.38 | 7.88 |
| Conductividad (CE) | μS/cm | NA | 227 | 402 |
| Sólidos totales disueltos (STD) | mg/L | 1000 | 114 | 201 |
| Temperatura | °C | / | 28.02 | 27.73 |

Potencial de hidrógeno (pH)

El resultado de una medición de pH viene determinado por una consideración entre el número de protones (iones H⁺) y el número de iones de hidroxilo (OH⁻). Cuando el número de protones iguala al número de iones hidroxilo, el agua es neutra, teniendo entonces un pH alrededor de 7. El pH del agua puede variar entre 0 y 14, de manera que cuando es mayor de 7, es alcalina y cuando está por debajo de 7, es ácida.

Conforme a la NOM-127 el pH de las muestras se encuentra dentro del límite máximo permisible (LMP) para uso y consumo humano.

Conductividad eléctrica (CE)

La NOM-127 no presenta LMP para la conductividad, por lo tanto, un criterio representativo para la interpretación de la calidad del agua en función de la medición de la CE, es el establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), que clasificó la calidad del agua de acuerdo con los criterios presentados en la Tabla 5.



Tabla 5. Clasificación de salinidad con base en la conductividad eléctrica (APHA).

| Clasificación | CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 18°C) |
|---------------|---|
| Agua dulce | 100 - 2,000 |
| Agua salobre | 2,000 - 5,000 |
| Agua de mar | 5,000 - 45,000 |
| Salmuera | 45,000 - 100,000 |

Los resultados de conductividad, clasifican al agua de los pozos muestreados como agua tipo dulce, ya que presentaron valores por debajo de los 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Sólidos totales disueltos (STD)

Los sólidos totales disueltos comprenden las sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua.

La NOM-127 establece un LMP de 1000 mg/L para uso y consumo humano, las dos muestras analizadas cumplen con este límite.

Temperatura

A efectos prácticos, puede considerarse que en los acuíferos existe una "zona neutra" de temperatura constante, por encima de la cual la influencia térmica más significativa es la de las variaciones diarias o estacionales de la temperatura ambiente. Por debajo de esta zona el factor preponderante es el "gradiente geotérmico".

En promedio la temperatura que presenta el agua de ambos pozos en el área de estudio fue de 27.8°C .

Caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea

Las muestras fueron interpretadas mediante los diagramas de Piper y Stiff para obtener la familia de agua a la que pertenecen, para el caso de la muestra obtenida del pozo la Casita perteneciente al acuífero Río San Miguel, se obtuvo un agua tipo bicarbonatada sódica ($\text{HCO}_3\text{-Na}$), mientras que el agua del pozo la noria perteneciente al acuífero Río Sonora, presentó una caracterización hidrogeoquímica de tipo bicarbonatada sódica-cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$). Las fotografías del muestreo se encuentran en el apartado Anexo 2 (Ver CD).

En general las aguas bicarbonatadas hacen referencia a las aguas subterráneas poco profundas y de reciente infiltración; El sodio usualmente es liberado por la meteorización de silicatos y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino, el Na puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de intercambio catiónico y puede ser intercambiado por Ca; El calcio comúnmente suele ser un catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Respecto al diagrama de Piper, el triángulo cuyos vértices están representados por los aniones SO_4^{2-} , Cl^- y $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, se observa que ambas muestras se agrupan hacia el vértice de los $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$. Por otra parte, en el triángulo cuyos vértices representan a los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, es notable ver que las muestras de agua para ambos pozos presentan una diferencia en sus concentraciones de Na y Ca, ya que el agua del pozo la Casita se inclina más hacia el vértice del Na, mientras que la muestra de agua del pozo la Noria se desplaza ligeramente con tendencia hacia el vértice Ca (Figura 28).

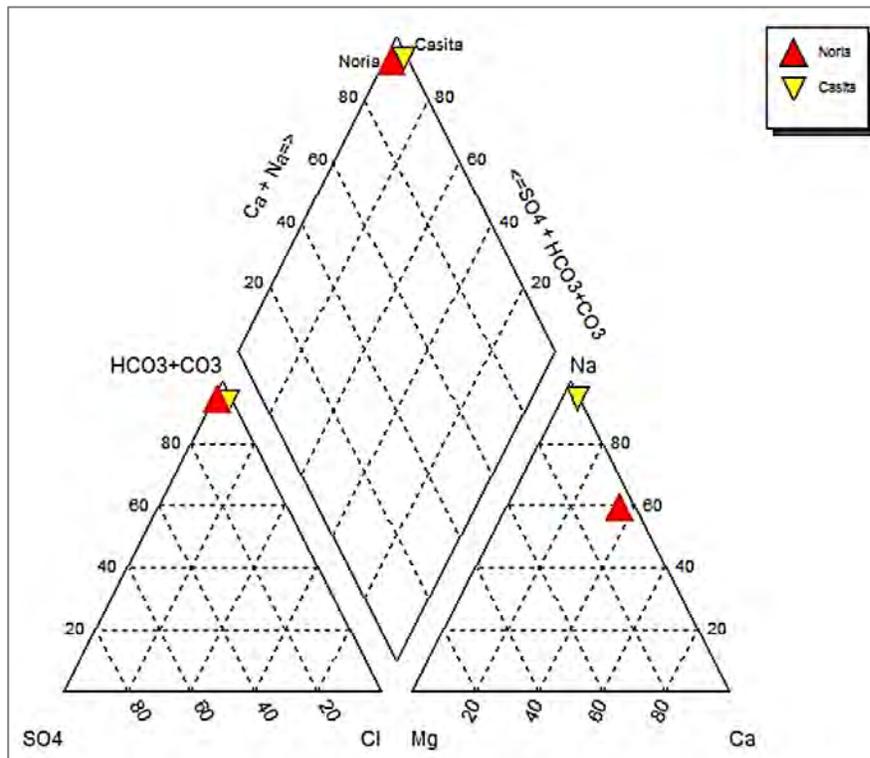


Figura 28. Diagrama de Piper, donde se representa en triángulo rojo el resultado de la muestra de agua para el pozo la Noria siendo esta bicarbonatada sódica-cálcica (HCO_3^- -Na-Ca), y en triángulo amarillo se representa la muestra del pozo la Casita con resultado bicarbonatada sódica (HCO_3^- -Na).



En la Figura 29, se puede observar el tipo de familia de agua obtenida mediante los diagramas de Stiff y la distribución de las muestras, siendo estas de gran utilidad para visualizar directamente los patrones de variación, al ser presentados sobre un mapa de ubicación de los puntos de muestreo realizados en el área de estudio.

Anteriormente se vio que el movimiento del flujo del agua subterránea en el área de estudio circula desde el acuífero Río San Miguel hacia el acuífero Río Sonora; si esto es así, podemos decir que el agua proveniente del pozo la Casita, cuya caracterización hidrogeoquímica pertenece al tipo bicarbonatada sódica, se enriquece en Ca durante su paso hacia el pozo la Noria, cambiando a un agua tipo bicarbonatada sódica-cálcica.

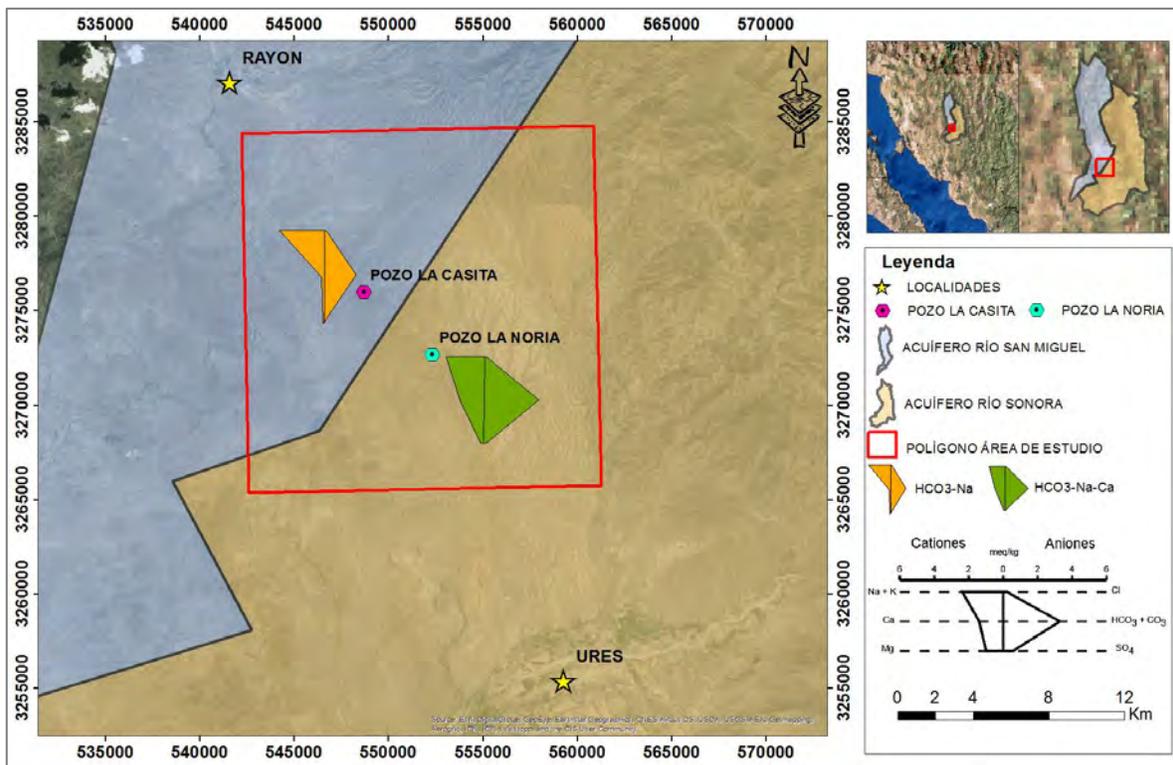


Figura 29. Diagrama de Stiff, respecto a la localización del área de estudio.

4.4. Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del área de estudio

Un modelo es una simplificación de la realidad a partir de datos, buscando obtener una interpretación personal del medio natural. En este caso y con el fin de conocer si la estructura del subsuelo responde realmente como el límite administrativo que actualmente divide a los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora, se generó el siguiente modelo en el cual se integra



todo el conocimiento obtenido, y con el cual se generan los resultados de este estudio (Figura 30).

La Figura 30 presenta el modelo topográfico digital donde es posible observar que no existe afloramiento de rocas (divisoria física superficial), y en el subsuelo tampoco se aprecia material impermeable que pudiera constituir esta frontera. La geología del subsuelo está conformada por una serie de altos y bajos estructurales (fosas y pilares), sepultados bajo un espesor de sedimentos que se encuentran rellenando cada cuenca (basamento local). Estos rellenos constituyen un sistema acuífero estratificado, formado por dos unidades litológicas; una superior detrítica, freática, de tipo libre, cuyo espesor promedio es de 20 metros y está presente en toda el área de estudio. Debajo de este acuífero superior, se encuentra otro de igual tipo detrítico, que en la porción del río San Miguel está formado por gravas de grano grueso y gradúa lateralmente hacia una litología de textura más fina (arenas de grano medio) en la porción del acuífero río Sonora. Ambas unidades litológicas presentan pequeñas intercalaciones, interdigitadas y horizontes de textura media-fina que trabajan como una sola unidad hidráulica dados los espesores de sus materiales, pero su comportamiento va de semiconfinado a confinado.

Con base en lo anterior, se resuelve que debajo del límite administrativo que divide actualmente a los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora no existe una barrera física sino relleno sedimentario compuesto por material detrítico permeable al menos en los primeros 200 metros de profundidad, y no existen elementos hidrogeológicos que sostengan una divisoria del flujo de agua subterránea.

En consecuencia, la relación hidrodinámica, tomando como referencia la elevación de los niveles estáticos de los dos pozos observados en el área de estudio, muestran en el esquema con línea discontinua, la posición del nivel piezométrico, el cual se considera representativo de la potencia hidráulica de esta unidad.

El comportamiento hidrogeológico de las unidades que forman el basamento local queda fuera del alcance de esta tesis. Además la posibilidad de que pudiera existir flujo vertical ascendente desde las rocas que lo constituyen o bien que sus respuestas geoeléctricas se relacionen con mineralización (U3a, U3b, U3c) en las que la interpretación geofísica muestra que se encuentran fracturadas.

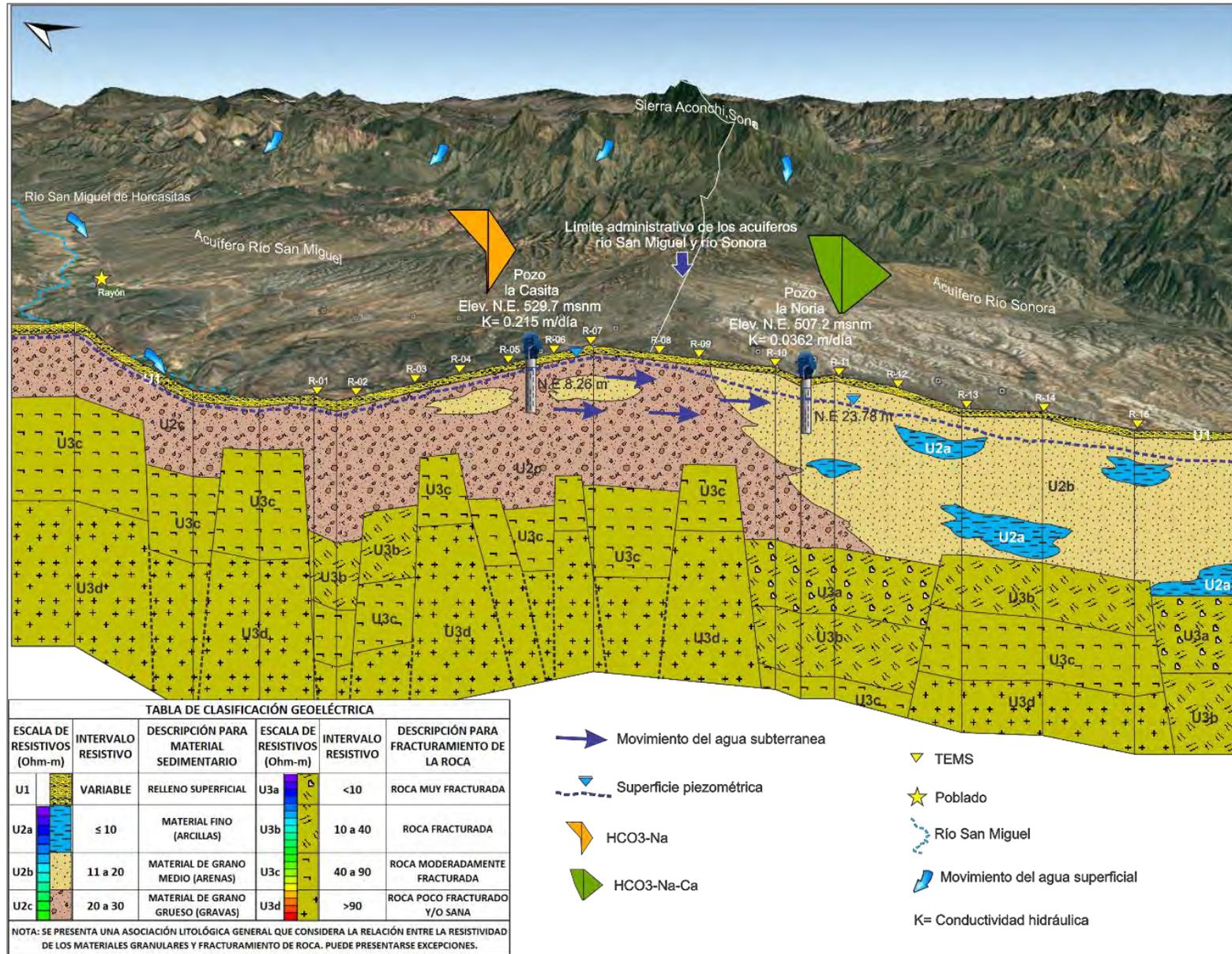


Figura 30. Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del área de estudio.



5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Geofísica

- Al comparar los resultados obtenidos a partir del método gravimétrico y electromagnético aplicado en el área de estudio, se corrobora la presencia de un alto estructural en el subsuelo, el cual se encuentra sepultado por al menos 200 metros de sedimentos que constituyen un sistema acuífero estratificado que, por su comportamiento define la no existencia de un límite hidrogeológico. Por lo tanto, si bien el valor del límite administrativo que divide a los acuíferos Río San Miguel y Río Sonora se admite válido para la gestión administrativa, científicamente es contundente que el único alto estructural existente y que pudiese ser límite entre ambas unidades hidrogeológicas, se encuentra por debajo del sistema acuífero descrito. Bajo el sondeo electromagnético R-08, en el perfil geoelectrico se aprecia esta serie de estructuras con detalle. Cabe mencionar que con la estación gravimétrica 1194 que se encuentra en la misma ubicación, no fue posible observar estas estructuras en el modelo gravimétrico.

- No obstante, bajo el límite administrativo que divide ambos acuíferos, se propone basado en el modelo gravimétrico que existe un espesor sedimentario de 250 m, mientras que el método electromagnético define a más detalle que se trata de un relleno detrítico de 200 m. Por lo tanto se puede decir que tanto el método gravimétrico como el electromagnético muestran correspondencia con el resultado obtenido.

- La unidad geoelectrica principal que compone este espesor de 200 m de sedimentos presenta resistividades que van de 20 a 30 Ohm-m, relacionando este rango resistivo a material de granulometría gruesa como lo pueden ser gravas y arenas gruesas, este tipo de materiales se relacionan a una permeabilidad media. Estas características son propicias para que exista conexión hidráulica dentro de una misma unidad hidrogeológica transmitiéndose agua entre los acuíferos administrativos Río San Miguel y Río Sonora.

- En general, al observar la distribución de las resistividades en el área de estudio se tiene que las resistividades van en aumento a mayor profundidad y ello marca una diferencia con el tipo de litología. Los valores resistivos debajo del relleno se asocian con una roca que tiene calidad de sana y/o poco fracturada que pudiera funcionar como límite de otra unidad hidrogeológica, pero en este caso se estaría hablando de otro acuífero en medio rocoso,



alojado en las rocas que presentan permeabilidad secundaria. Dicha investigación queda fuera del alcance de este trabajo.

- El mismo perfil geoelectrico citado muestra un cambio litológico con respecto al material sedimentario que rellena la cuenca, hacia el lado del acuífero Río San Miguel (NW del perfil) se tiene principalmente depositado material con características resistivas del orden de los 20 a 30 Ohm-m, asociado con material grueso, en general gravas; mientras que del lado del acuífero Río Sonora (SE del perfil) el material depositado presenta la característica de menor resistividad desde ≤ 10 a 20 Ohm-m asociado con material de granulometría fina, en su mayoría arenas y arcillas.

- Los resultados permiten definir que no existen afloramientos de formaciones geológicas en el área que permitan un parteaguas superficial y en el subsuelo no existe un límite hidrogeológico, que restrinja la circulación del flujo subterráneo y la única diferencia se debe a los cambios texturales de la litología que produce diferencias del potencial hidráulico.

Gradiente hidráulico

- El trazo de la dirección del flujo, basado en dos pozos de observación en el área de estudio, puede generar confusión o desconfianza al observar que la separación entre dichos pozos es grande, sin embargo, con base en esta única información si es posible determinar que el flujo del agua viaja del acuífero Río San Miguel hacia el acuífero Río Sonora.

- Al trazar la dirección de flujo en el perfil geoelectrico, se muestra que no existe barrera física dentro del espesor de los primeros 200 m del material sedimentario, existiendo la continuidad de un acuífero libre formado por estos sedimentos, los cuales presentan características de conductividad hidráulica, por lo tanto este material es favorable para transmitir y almacenar agua subterránea.

Pruebas de bombeo

- A partir de las pruebas de bombeo realizadas, el pozo la Casita ubicado del lado del acuífero Río San Miguel donde se tiene depositado material de granulometría gruesa (permeable), presento en menor tiempo su recuperación del nivel estático. Mientras que, el pozo la Noria, ubicado del lado del acuífero Río Sonora donde se tienen materiales de



granulometría más fina (menor permeabilidad) la recuperación fue más lenta, acorde con la permeabilidad de los materiales.

- Los valores de conductividad hidráulica (K) obtenidos de las pruebas de bombeo para ambos pozos fueron comparados con la tabla de valores estimados de “K” para distintos materiales y tipos de rocas según Sander, 1998; A partir de esta tabla dichos valores se asociaron con arenas medias-arenas gruesas para el pozo la Casita localizado en el acuífero Río San Miguel, y arenas arcillosas-arenas finas para el pozo la Noria ubicado del lado del acuífero Río Sonora, este resultado tiene correspondencia con el perfil geoelectrico obtenido, y la interpretación geoelectrica (geofísica) coincide con los parámetros hidráulicos de esos materiales.
- Básicamente ambos pozos presentan valores que se interpretan como un acuífero confinado, por tanto, este resultado se asume como típico del comportamiento del material arcilloso o compacto que forman el sistema acuífero del área.

Calidad de agua subterránea

- Con relación a los resultados de los parámetros físicos que fueron medidos al momento de la toma de muestra de agua, se compararon con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994: “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, el agua de ambos pozos analizados están dentro de los parámetros establecidos por la NOM.
- El agua proveniente del pozo la Casita cuya caracterización hidrogeoquímica pertenece al tipo bicarbonatada sódica, se enriquece en Ca durante su paso hacia el pozo la Noria, cambiando a un agua tipo bicarbonatada Sódica-Cálcica; Teniendo en cuenta que el agua se mueve del acuífero Río San Miguel hacia el acuífero Río Sonora y poniendo atención a la geología del área, muy posiblemente este enriquecimiento se deba a la aparición de los paquetes de arcilla calcárea que se encuentran depositados hacia el SE del área de estudio (acuífero Río Sonora), ya que el Na puede ser adsorbido en las arcillas las cuales tienen una elevada capacidad de intercambio catiónico y pueden ser intercambiados Ca.



6. REFERENCIAS CITADAS

- Allaby, M. (Ed.). (2010). A dictionary of ecology. Oxford University Press.
- American Public Health Association (APHA), (1995). Standard Methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., New York, 769 pp.
- Béjar, M. V. (2007). Drenaje. Editorial Tecnológica de CR.
- Bosch, A. P. (2014). *Nociones de hidrogeología para ambientólogos* (Vol. 7). Universidad Almería.
- Cantos Figuerola, J. (1974). Tratado de geofísica aplicada (No. 551 C3).
- Comisión Nacional del agua (CONAGUA), (1999). Carta hidrológica aguas subterráneas “Hermosillo”, escala 1:1 000 000.
- Comisión Nacional del agua (CONAGUA), (2009). Manual de procedimientos para la delimitación de acuíferos.
- Comisión Nacional del agua (CONAGUA), (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río San Miguel (2625), estado de Sonora.
- Comisión Nacional del agua (CONAGUA), (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río Sonora (2624), estado de Sonora.
- Custodio, E & Llamas, M. R. (1996). Hidrología subterránea. Editorial Omega. Barcelona.
- Damon, P. E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J., & Cochemé, J. J. (1983). El batólito laramide (90–40 Ma) de Sonora. XV Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México: Guadalajara, Jal., Memorias Técnicas, 63-95.
- del Arenal, R. (1978). Carta hidrogeológica del área de actopan-ixmiquilpan, estado de hidalgo. *Revista*, vol, 2(1), 98-103.
- Fetter, C. W. (1994). Applied Hydrogeology. University of Wisconsin-Oshkosh. Cuarta Edición. Estados Unidos.
- González-León, C., & Jacques-Ayala, C. (1988). Estratigrafía de las rocas cretácicas del área de Cerro de Oro. Sonora Central: Boletín del Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 5(1), 2.
- King, R. E. (1939). Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of México. *Geological Society of America Bulletin*, 50(11), 1625-1722.
- López-Gutiérrez, J., Plata, J. L., & Mejías, M. (2013). Caracterización de la divisoria hidrogeológica Guadiana-Júcar en la Llanura Manchega mediante técnicas geológicas geofísicas. *Boletín Geológico y Minero*, 124(3), 381-404.



- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., & Connelly, J. N. (2001). Duration of Late Cretaceous–early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 113(4), 521-531.
- Rangel-Medina, M. (2012). Normatividad y Competencias para la Gestión Integral de Aguas Subterráneas. Programa Nacional De Aguas Subterráneas. Primer Taller Temático Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) Bogotá, Colombia, 29 y 30 noviembre.
- Rodríguez-Castañeda, J. L. (1984). Geology of the Tuape region North central Sonora, Mexico. MS Tesis Univ. Pittsburg.
- Sanders, L. (1998). *A manual of Field Hydrogeology*. Prentice-Hall, 381 pp.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), (1999). Carta Geológico-Minera H12-D22 “Rayón”, escala 1:50 000.
- Talwani, M., Worzel, J. L., & Landisman, M. (1959). Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of geophysical research*, 64(1), 49-59.



7. ANEXO 1

FOTOGRAFIAS LEVANTAMIENTO DE TEMS EN EL ÁREA DE ESTUDIO



Equipo TEM-FAST 48



Sondeo TEM-9



Sondeo TEM-10



Sondeo TEM-11



Sondeo TEM-12



Sondeo TEM-13



Sondeo TEM-12



Sondeo TEM-13



Sondeo TEM-1



Sondeo TEM-2



Sondeo TEM-3



Sondeo TEM-4



Sondeo TEM-5



Sondeo TEM-6



Sondeo TEM-7



Sondeo TEM-8



Sondeo TEM-32



Sondeo TEM-33



Sondeo TEM-34



Sondeo TEM-35



Sondeo TEM-36



Sondeo TEM-37



Sondeo TEM-21



Sondeo TEM-22



Sondeo TEM-19



Sondeo TEM-20



Sondeo TEM-28



Sondeo TEM-29



Sondeo TEM-30



Sondeo TEM-31



Sondeo TEM-23



Sondeo TEM-24



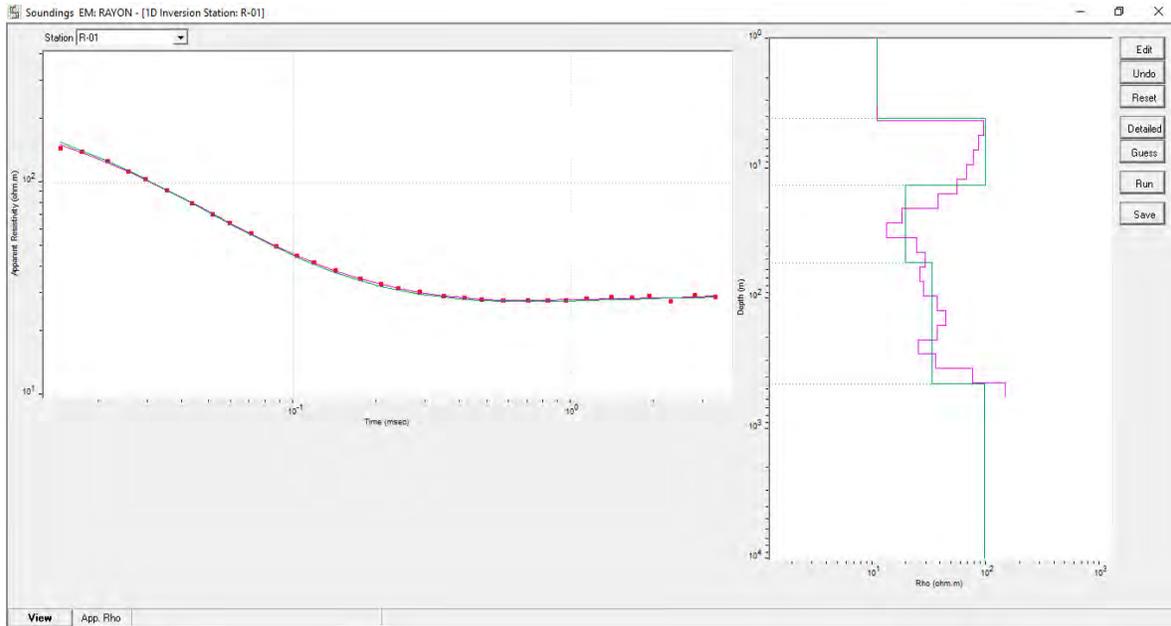
Sondeo TEM-25



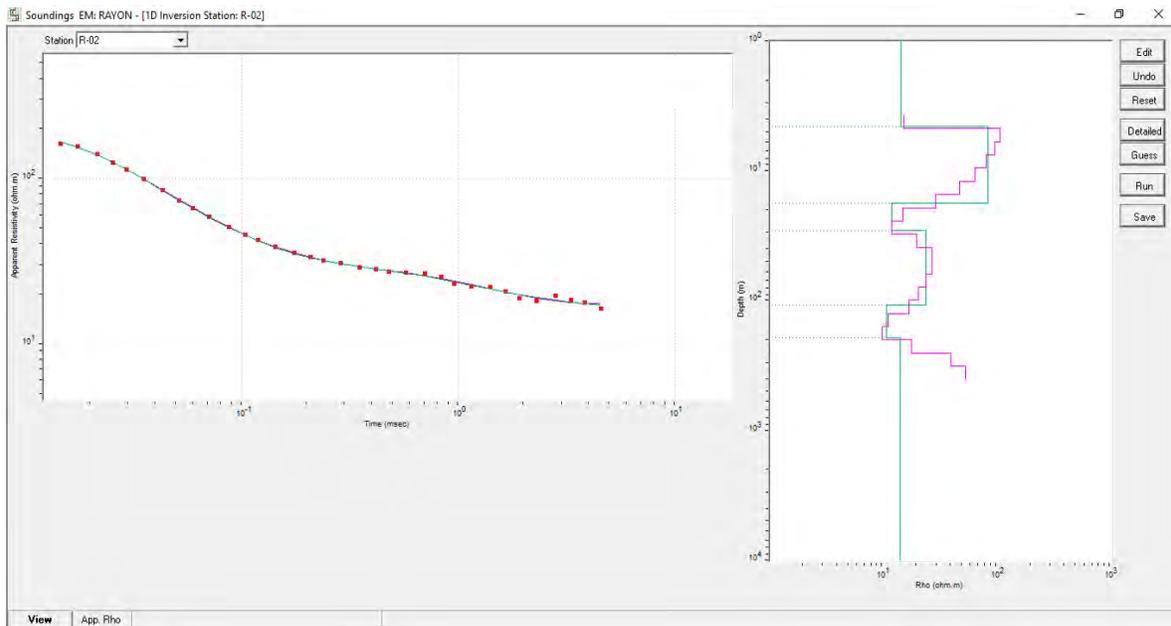
Sondeo TEM-26



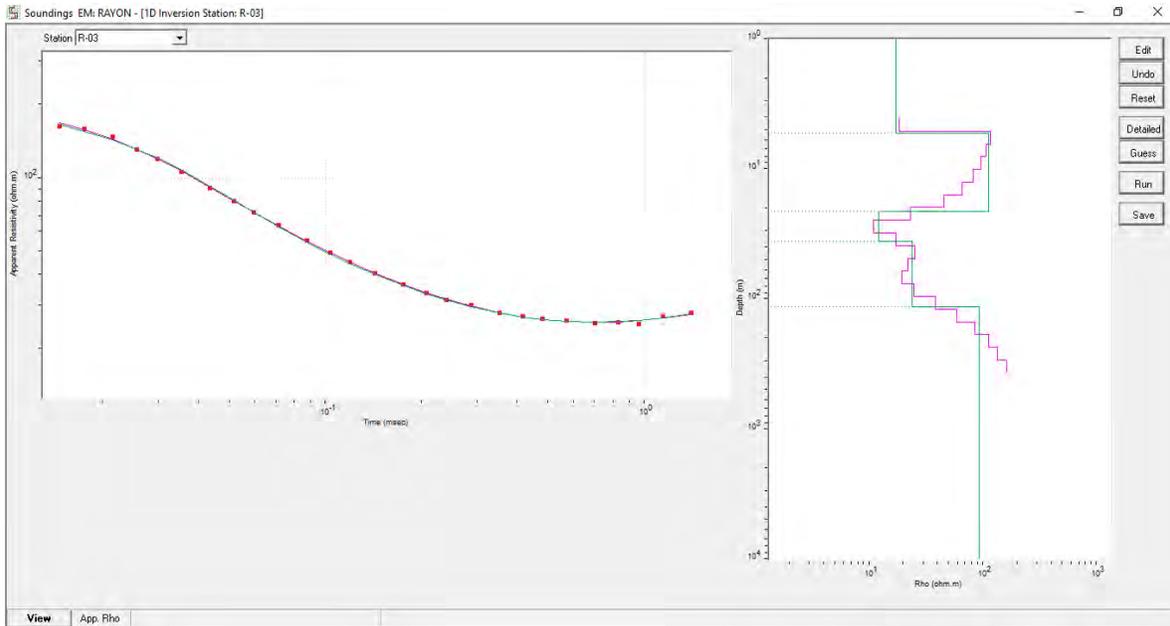
MODELOS UNIDIMENSIONALES 1D



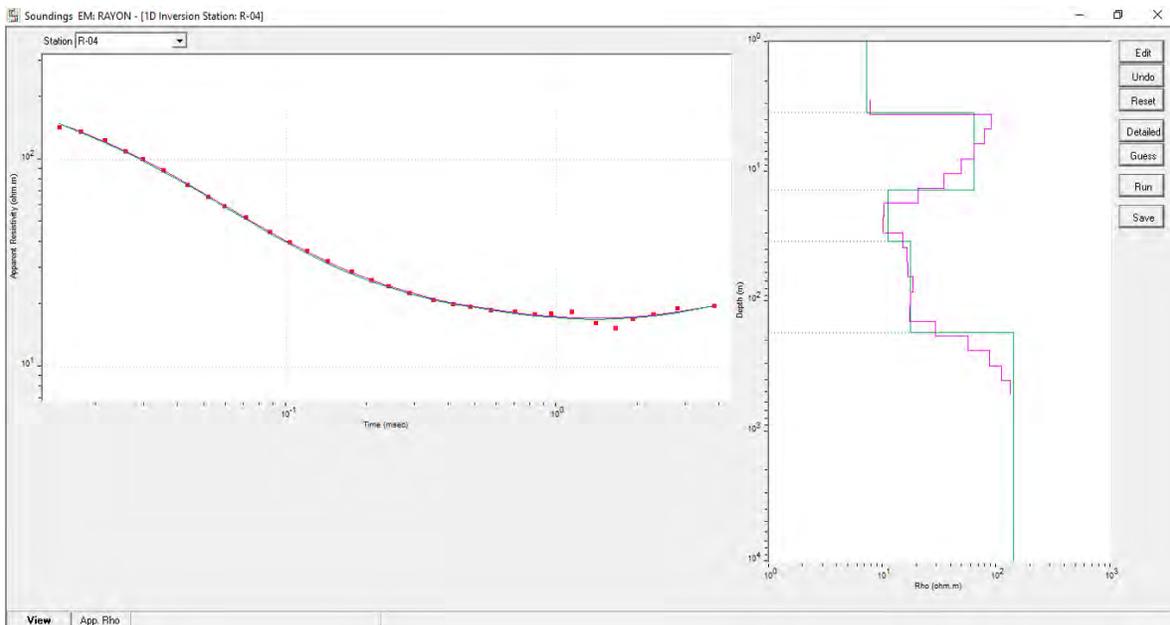
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-01



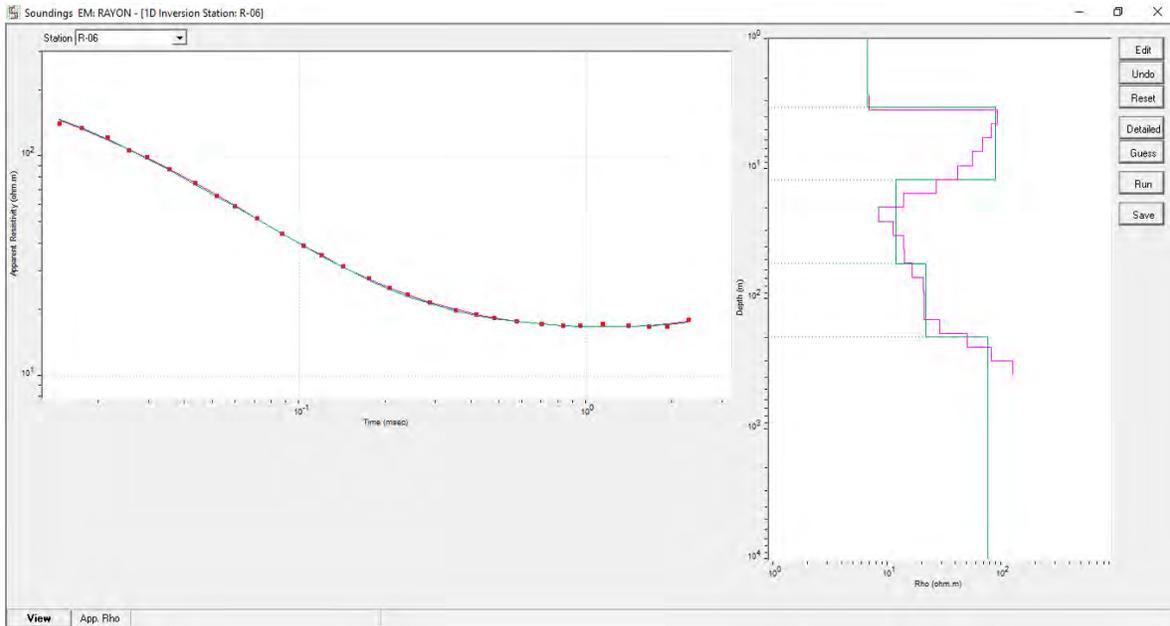
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-02



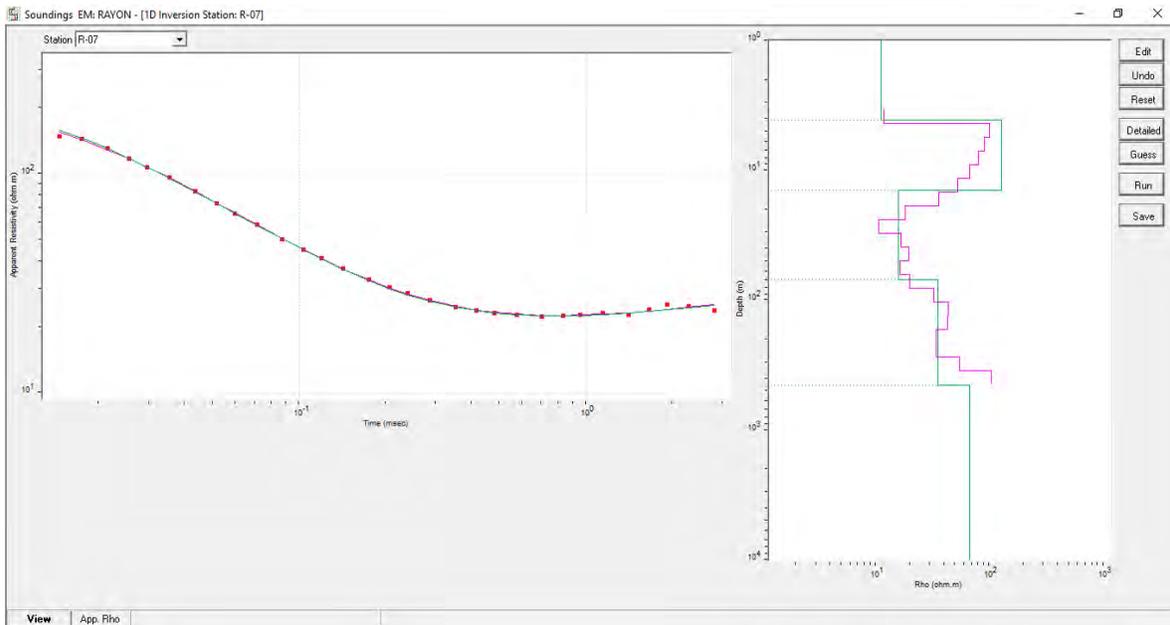
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-03



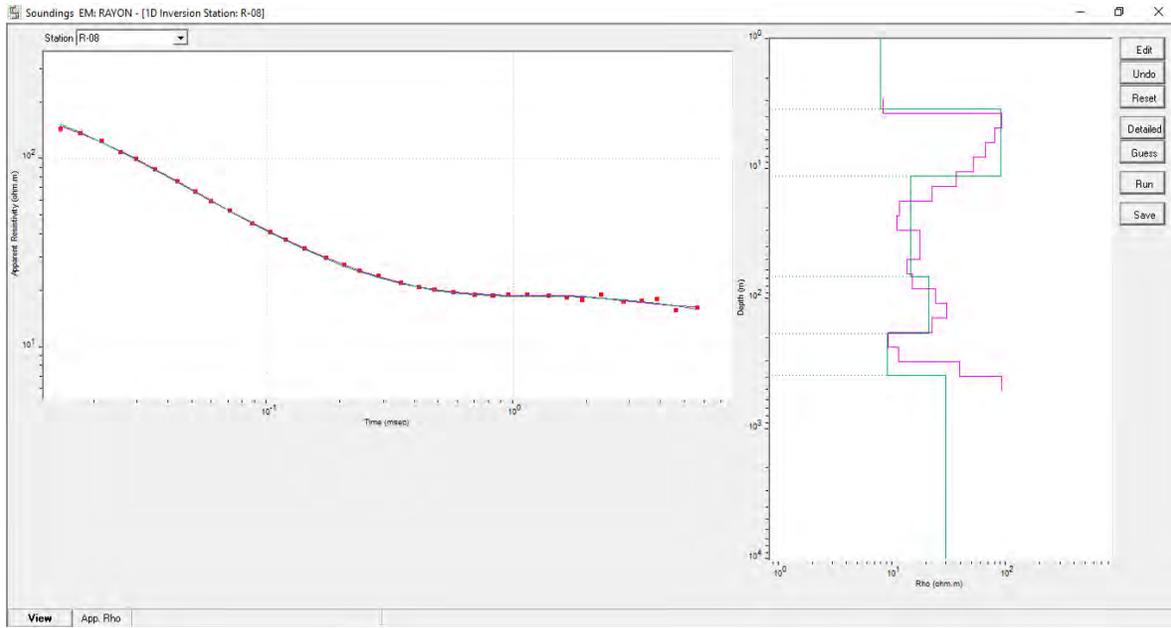
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-04



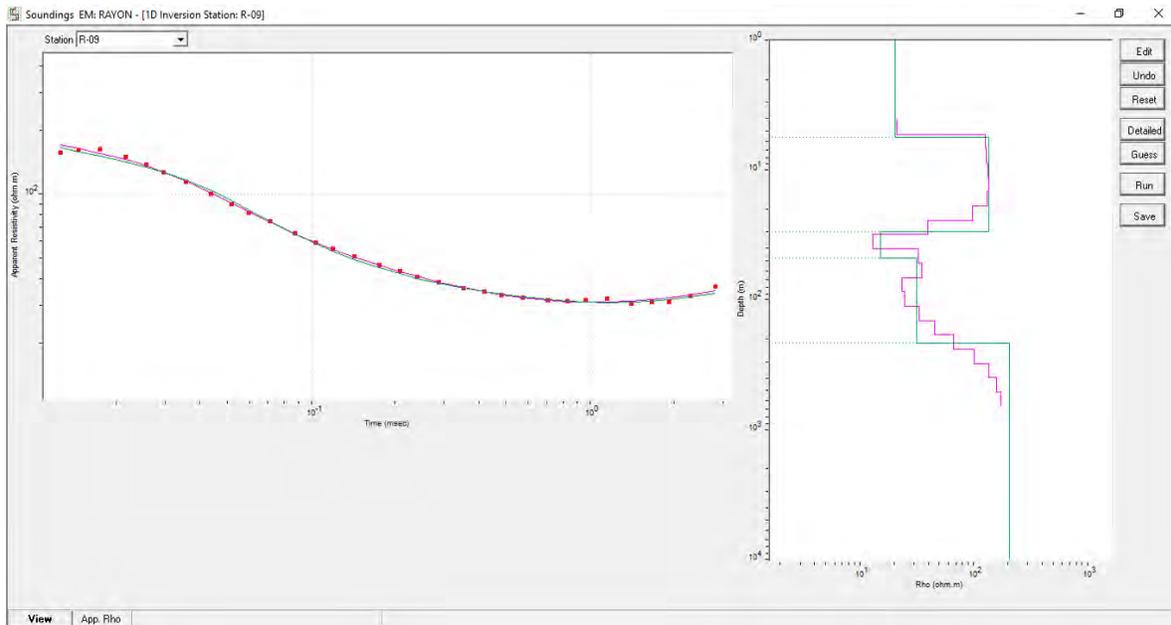
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-06



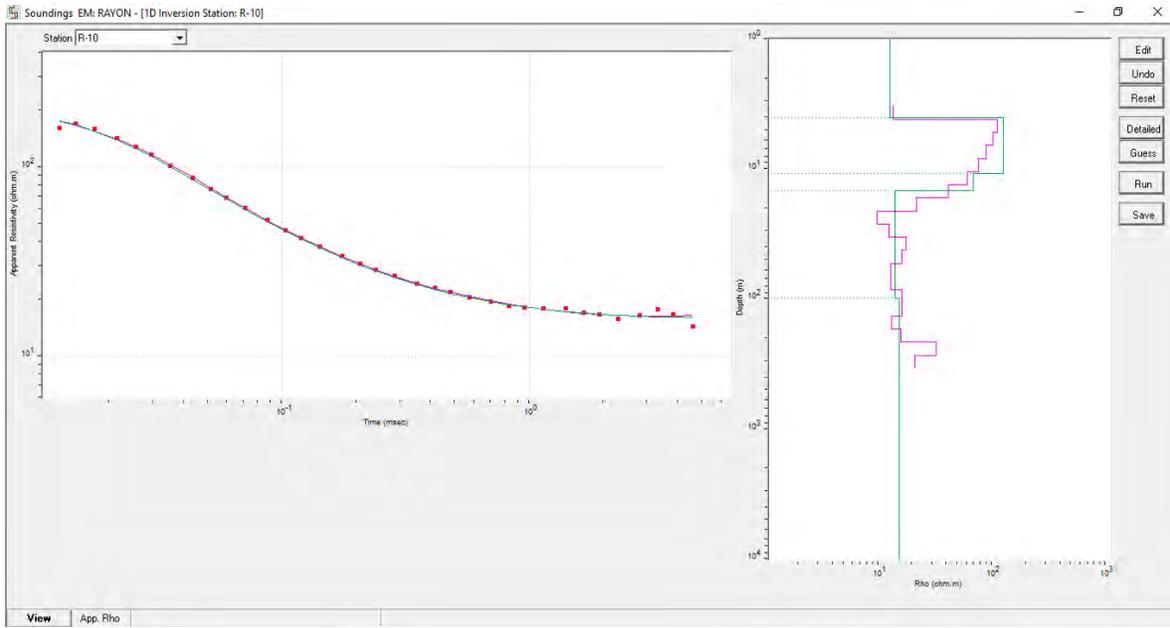
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-07



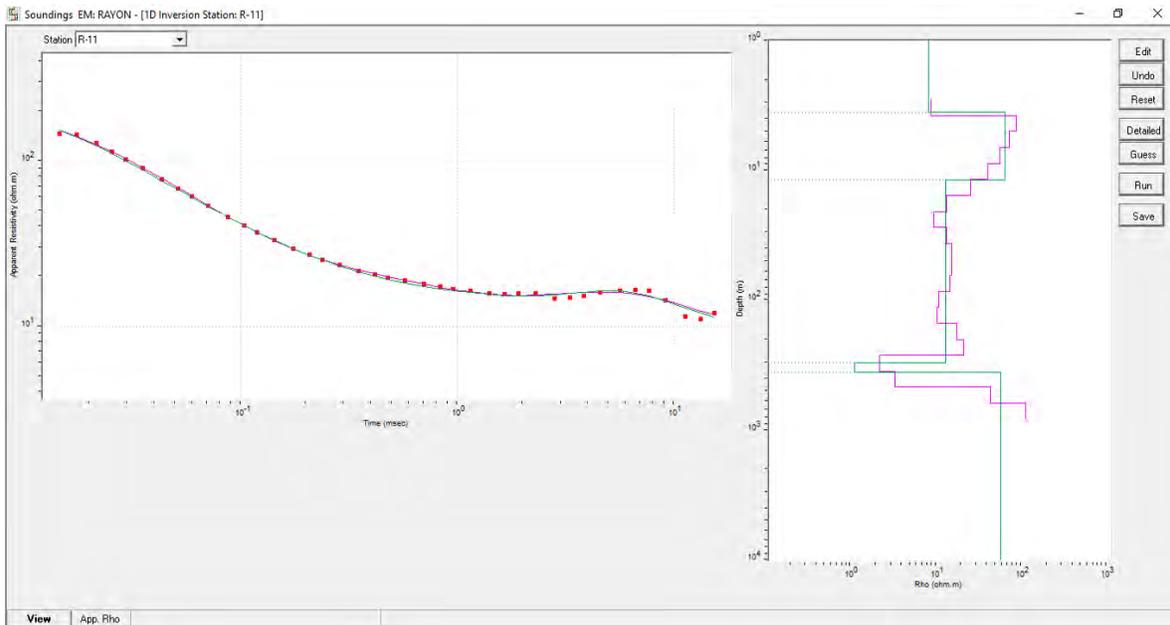
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-08



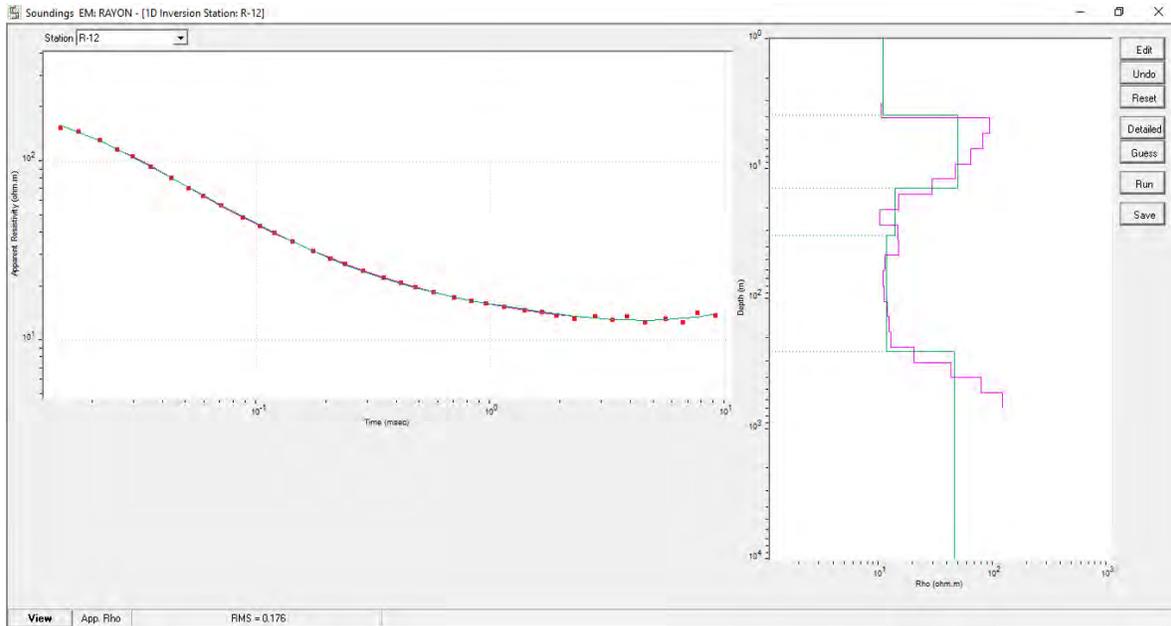
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-09



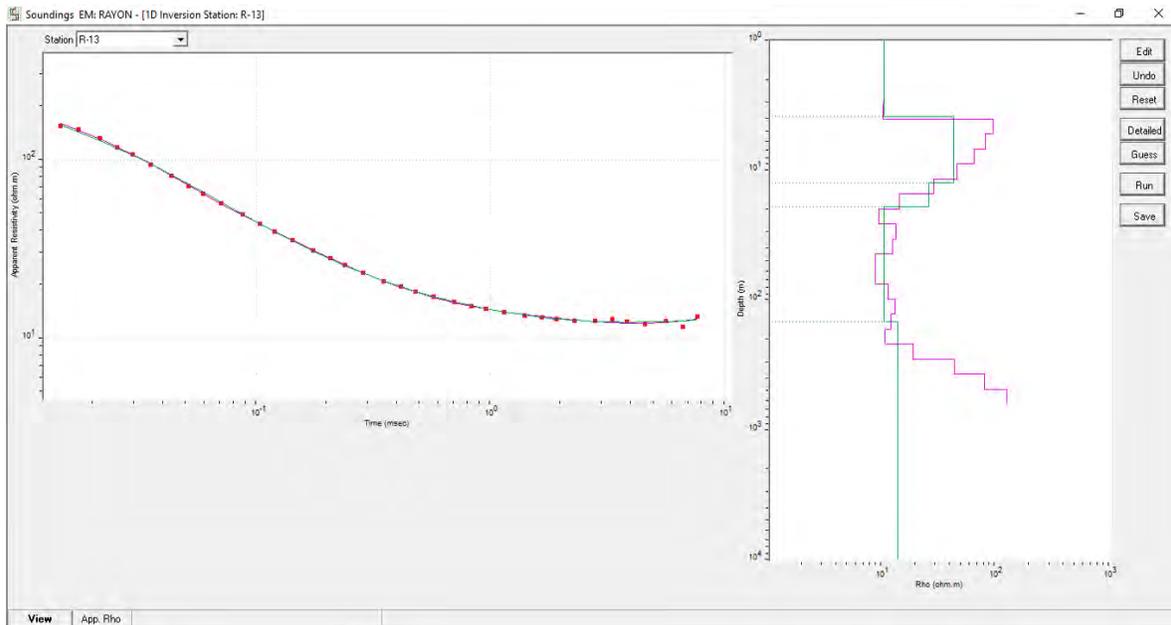
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-10



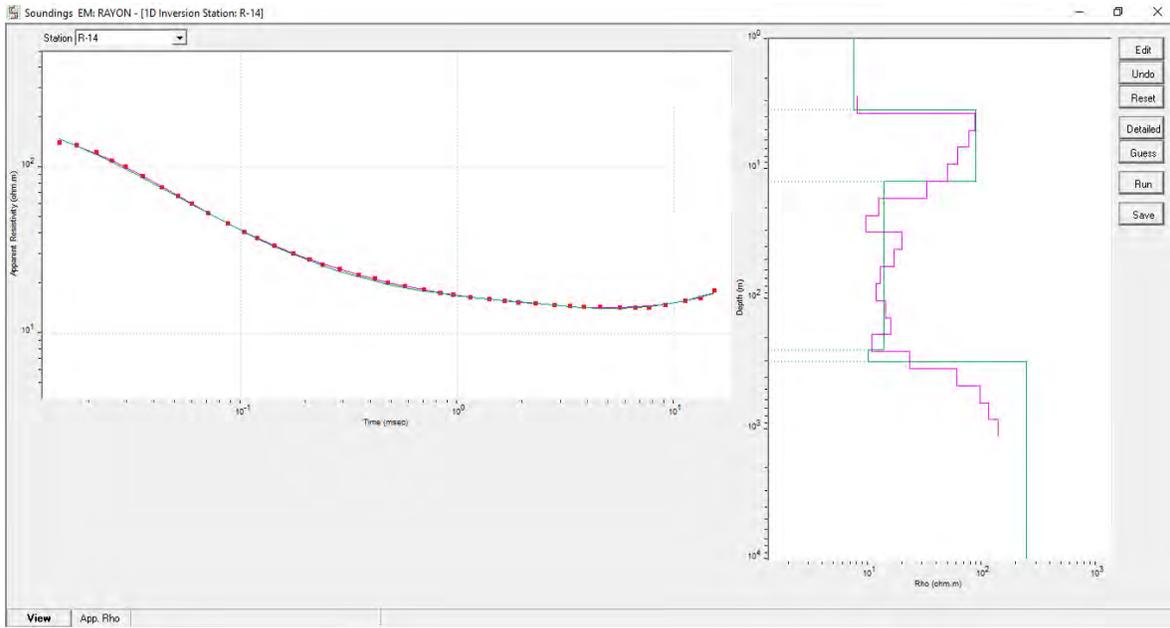
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-11



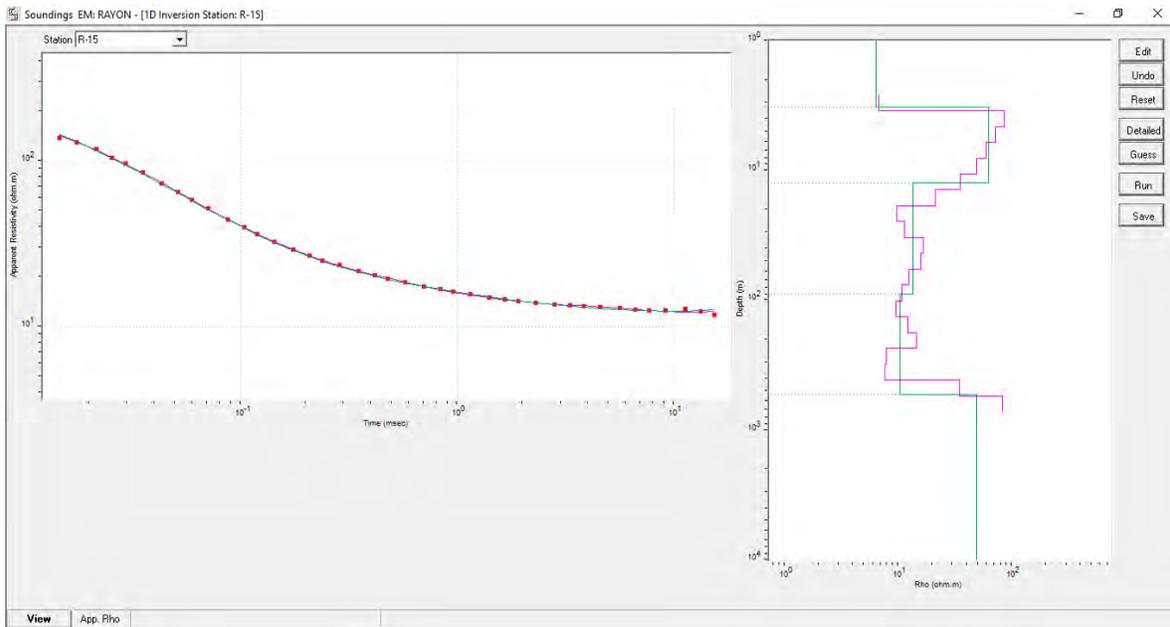
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-12



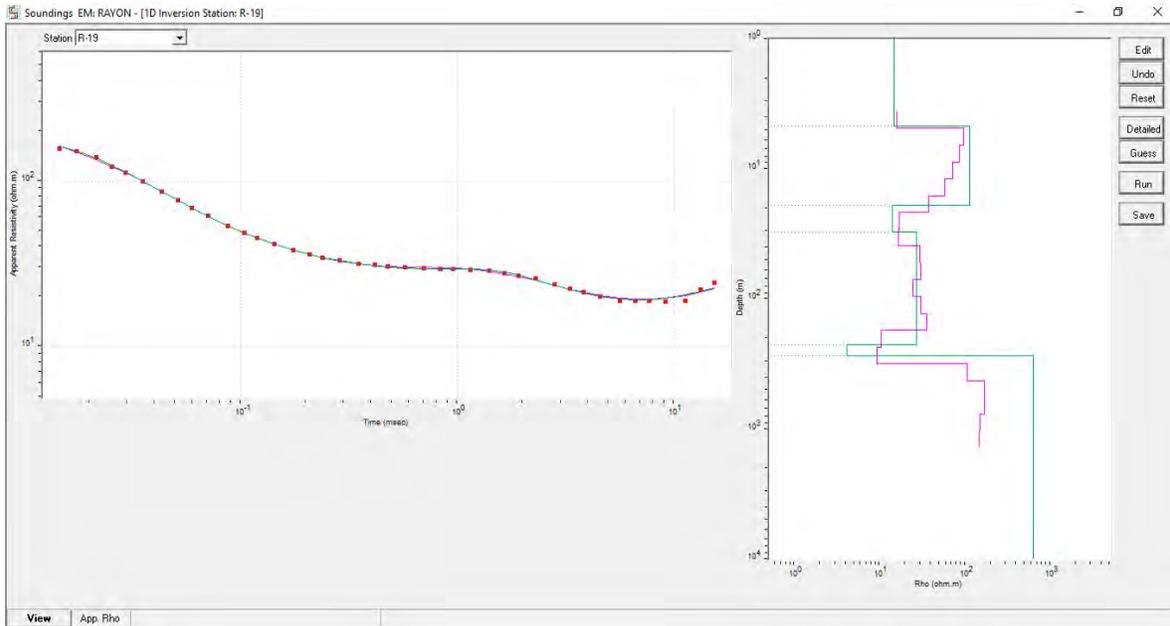
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-13



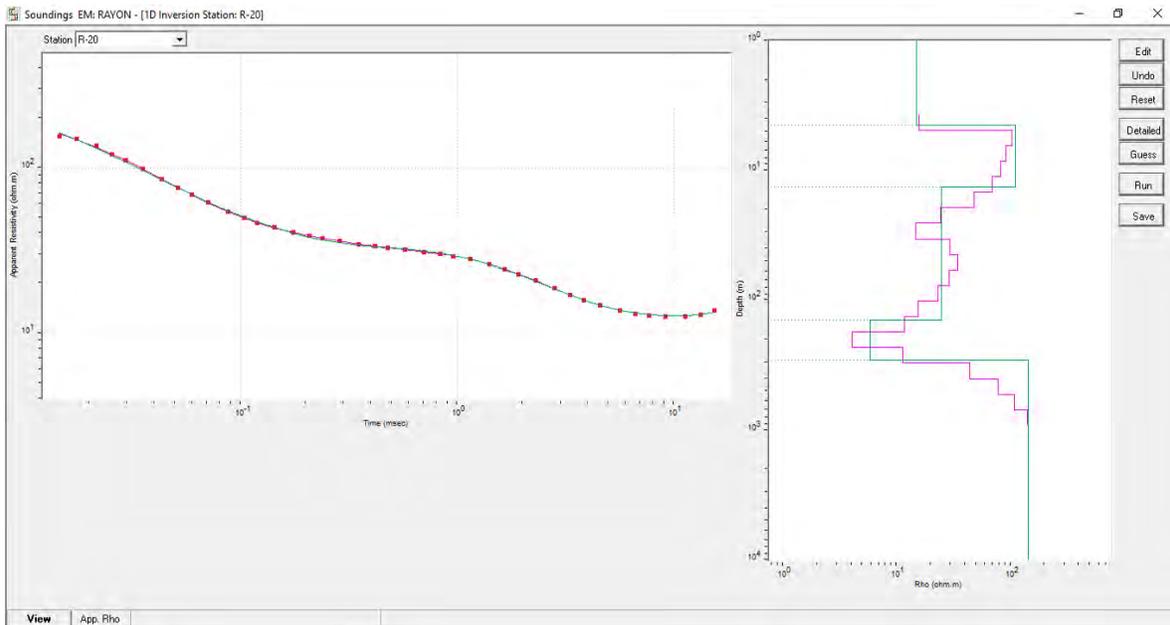
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-14



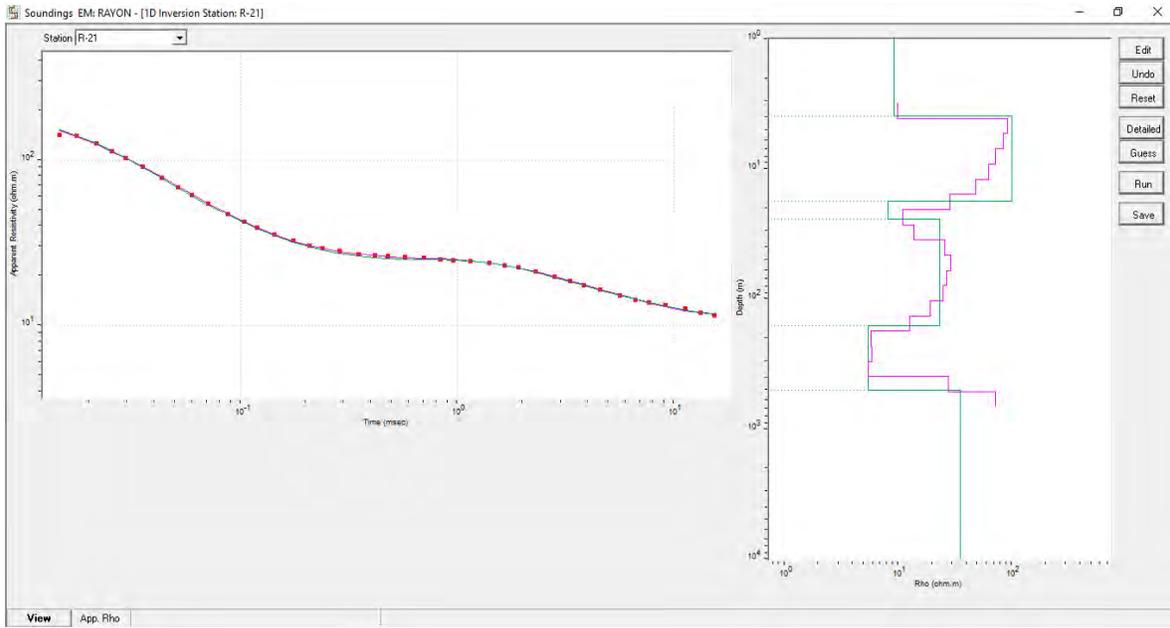
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-15



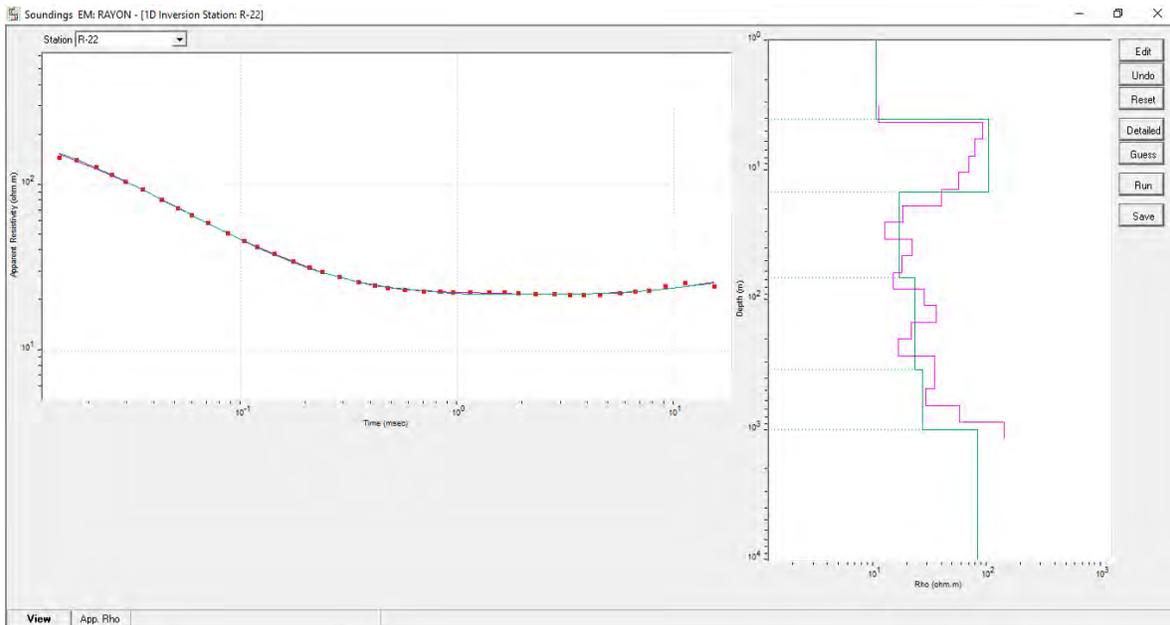
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-19



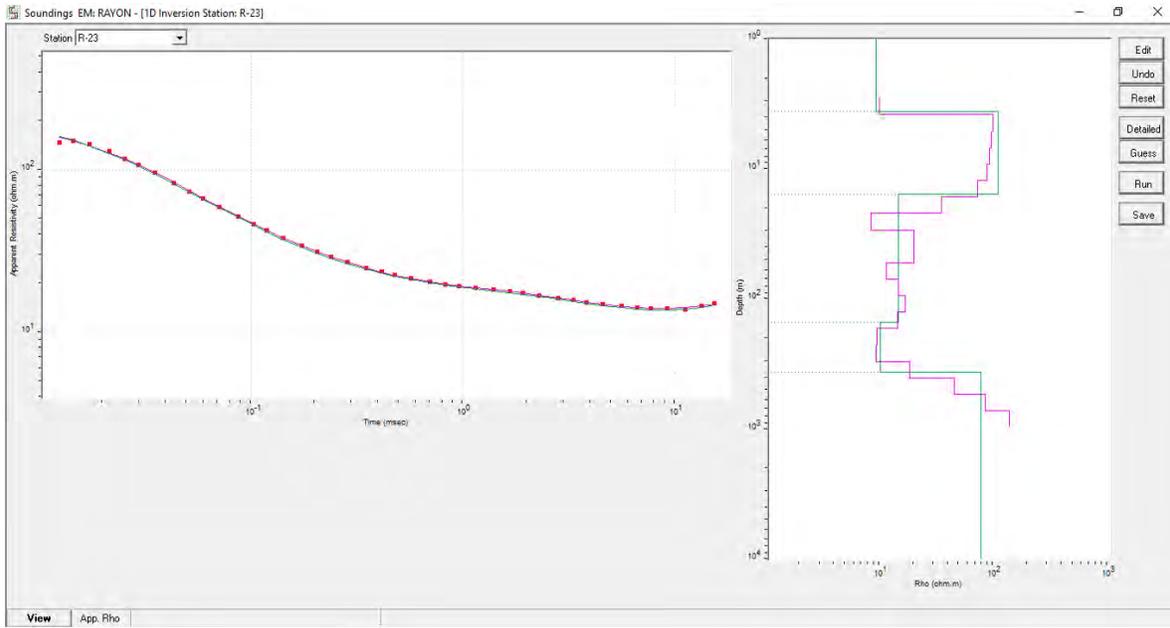
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-20



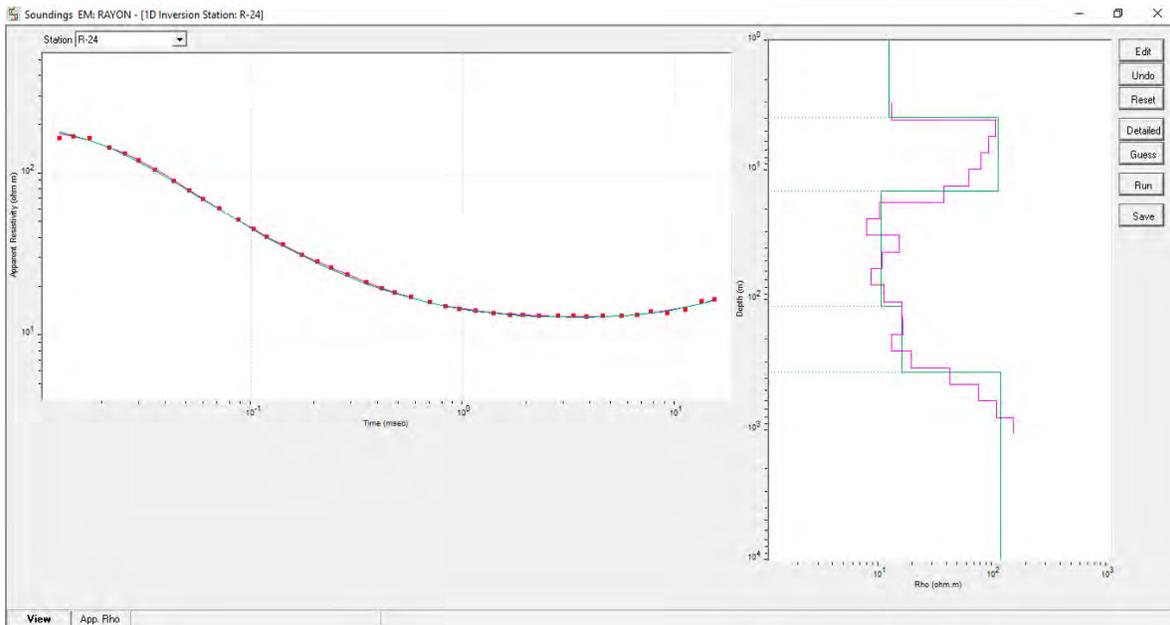
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-21



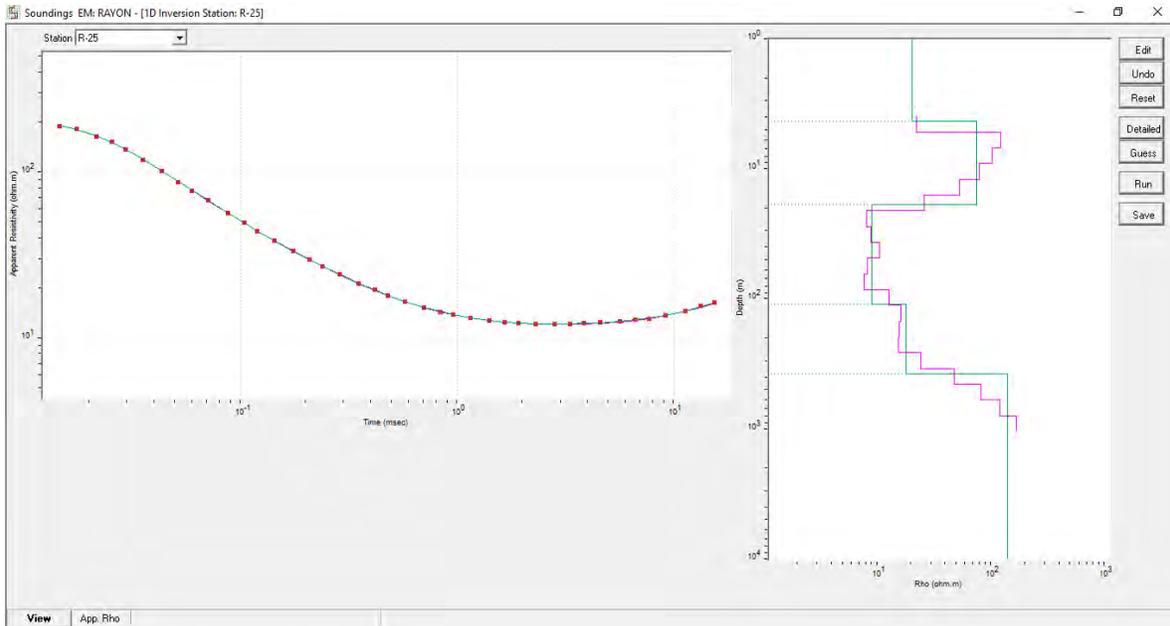
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-22



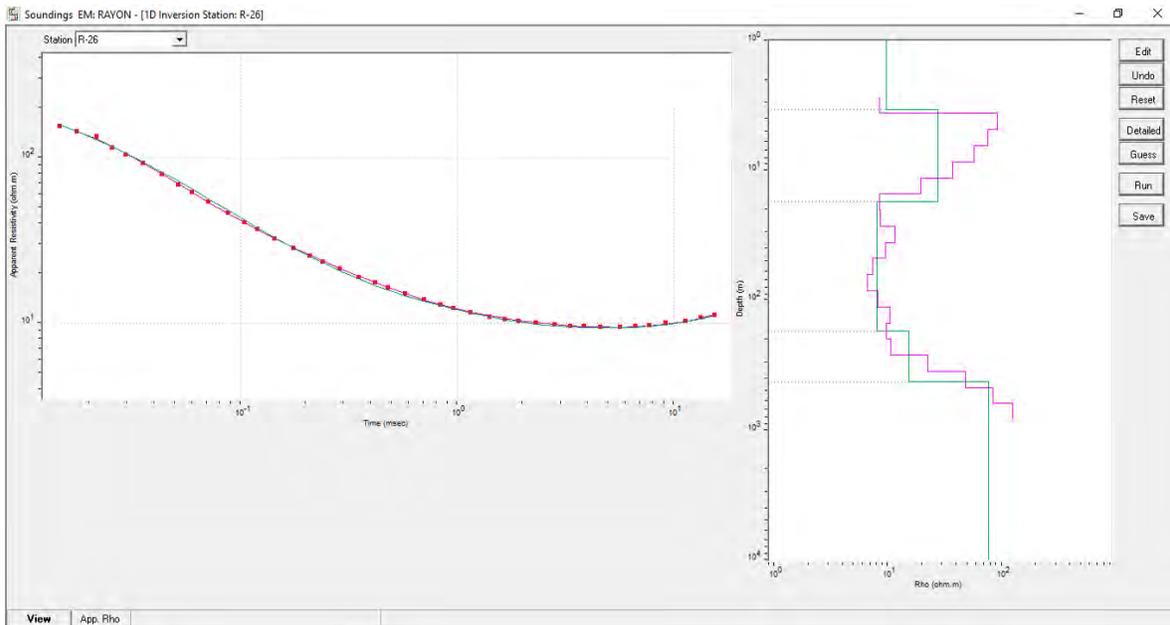
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-23



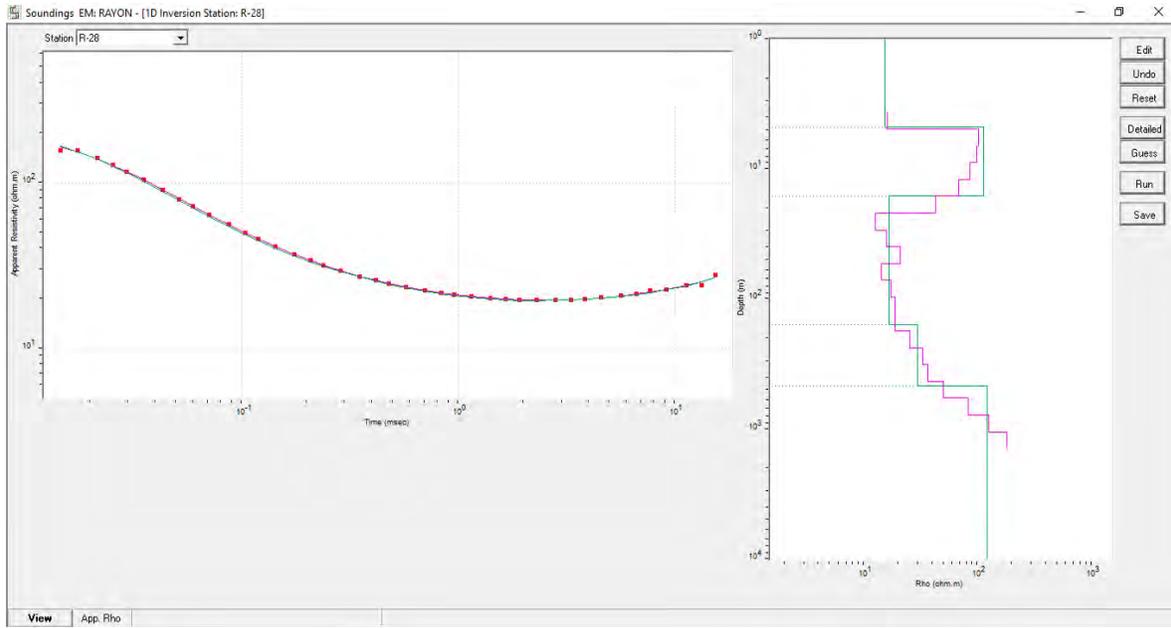
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-24



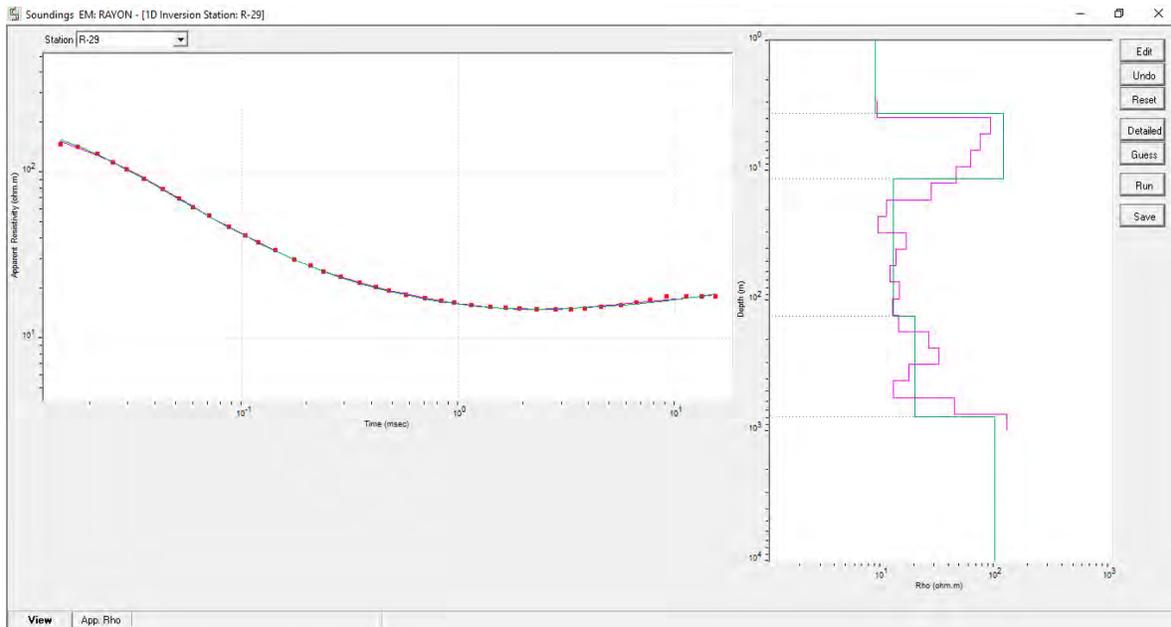
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-25



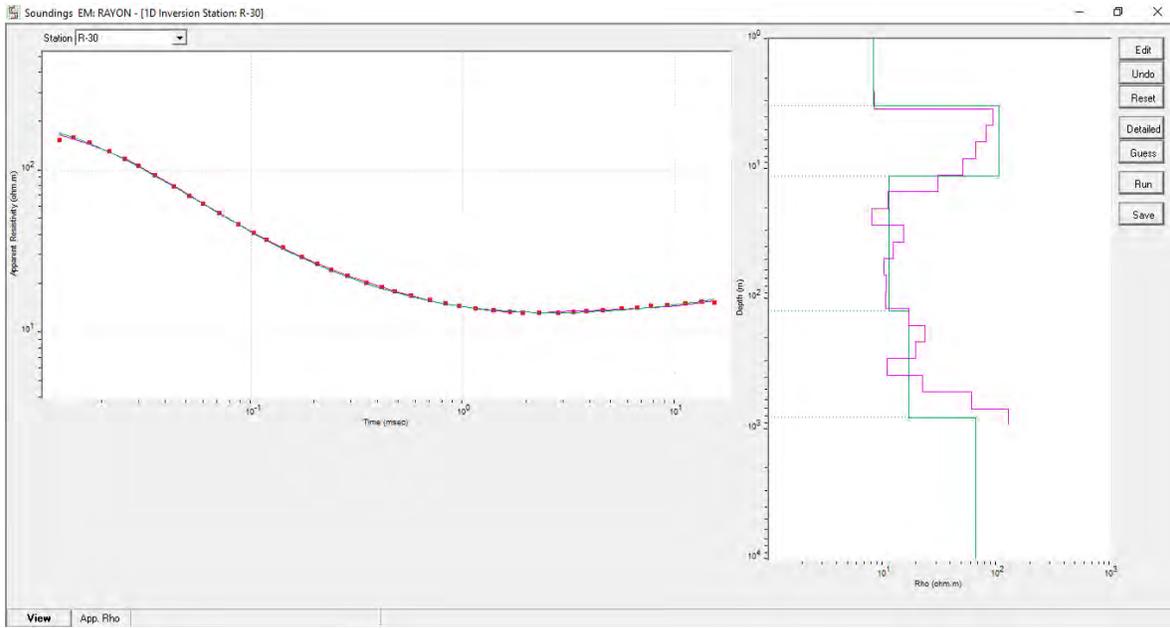
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-26



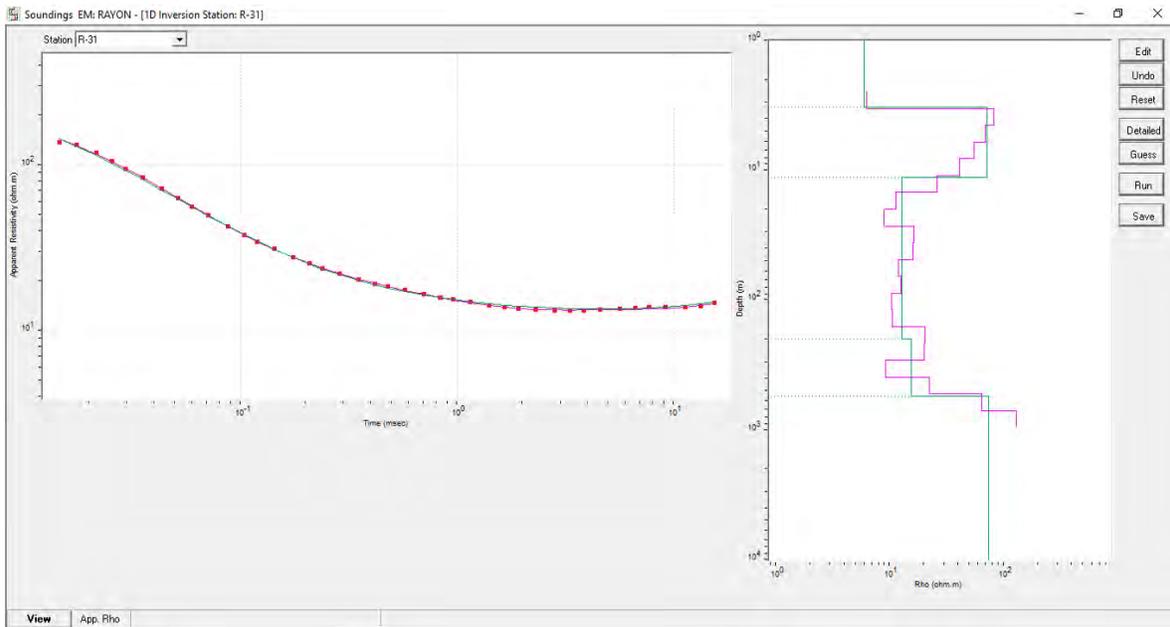
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-28



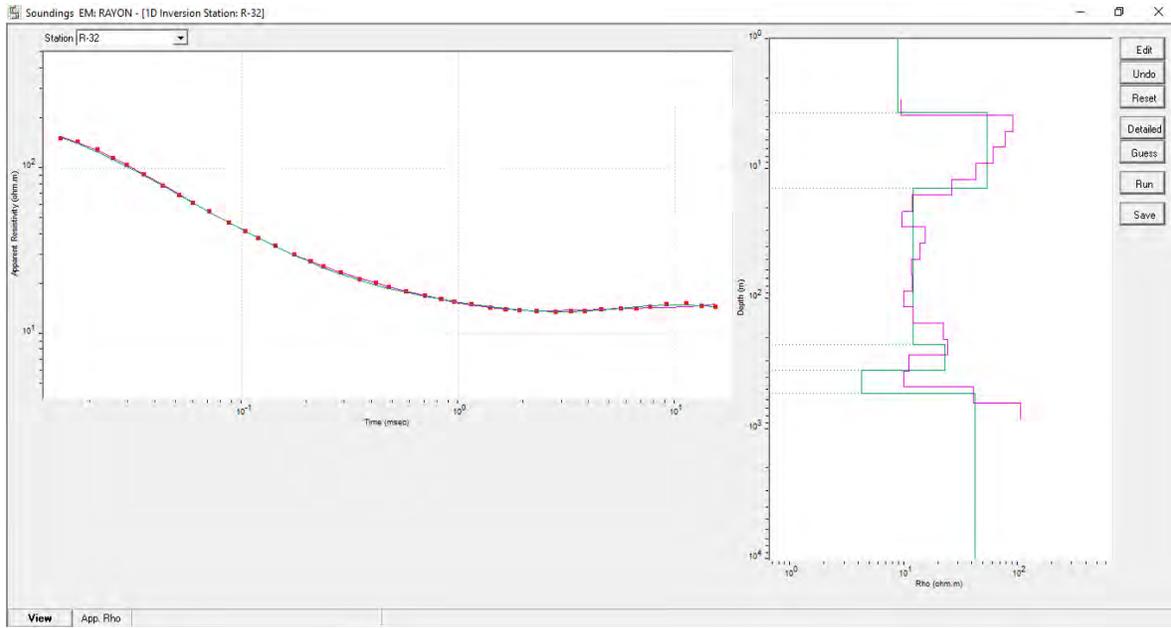
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-29



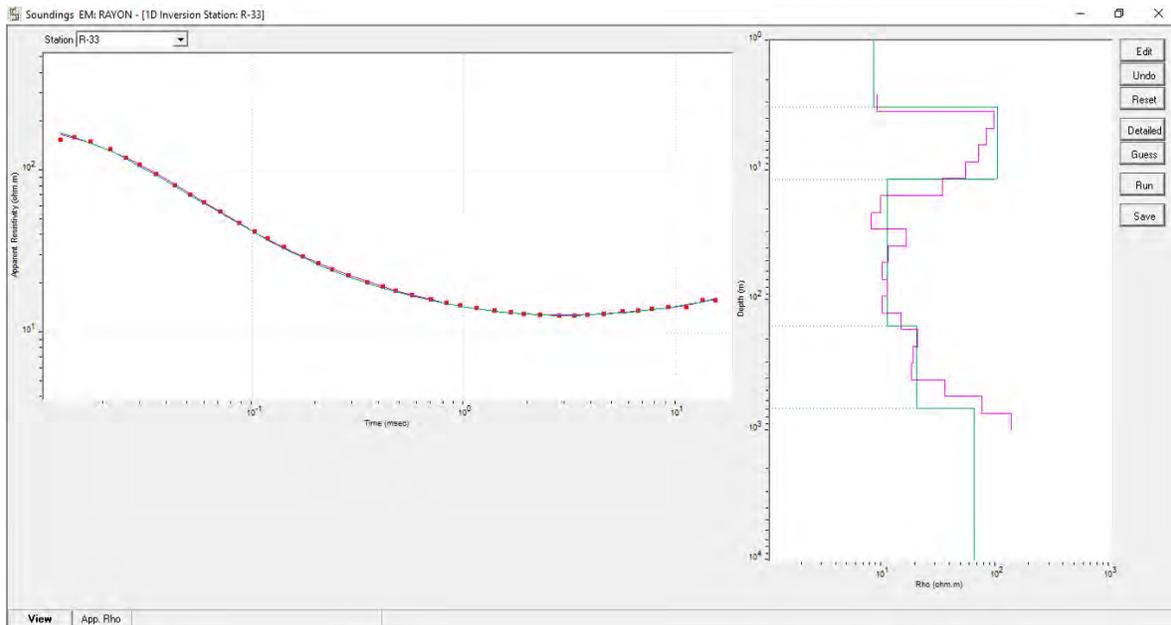
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-30



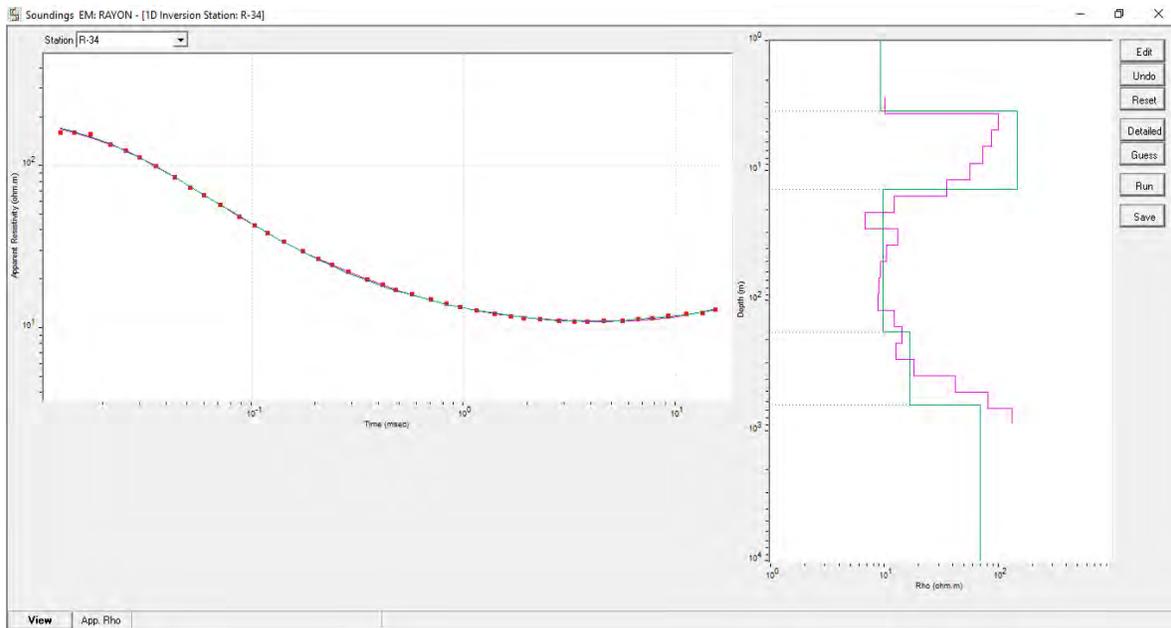
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-31



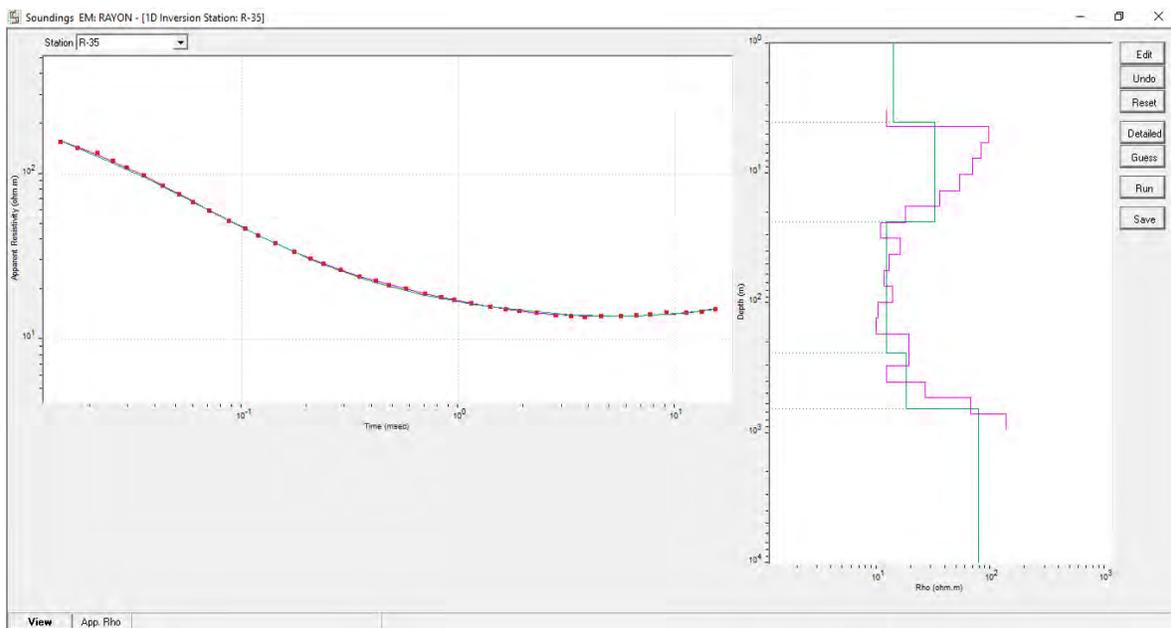
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-32



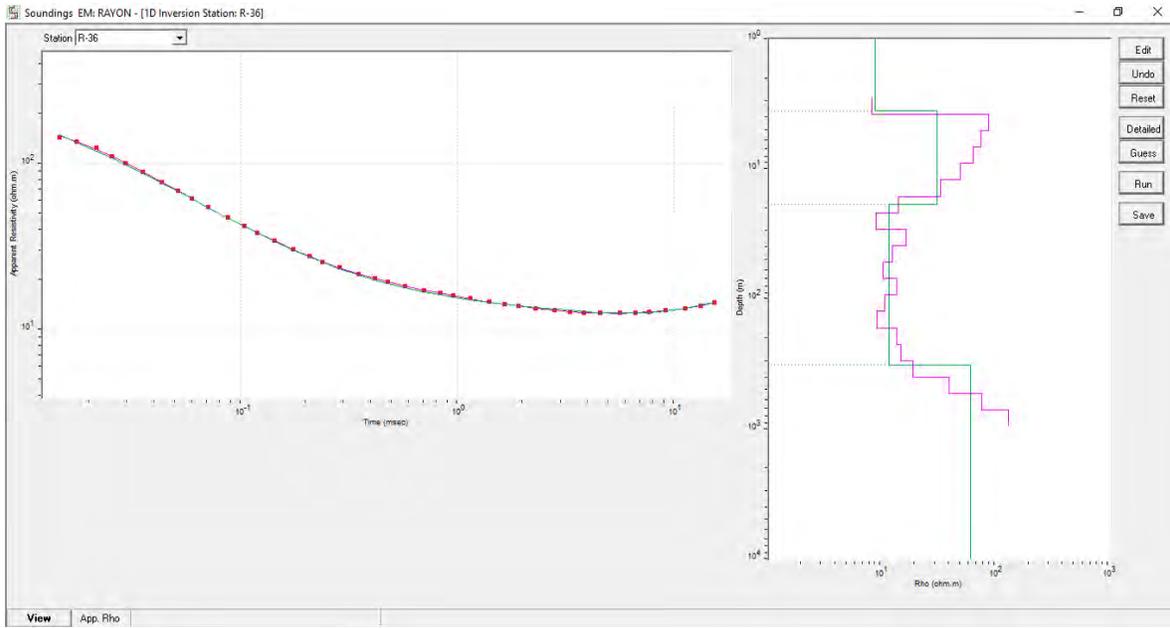
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-33



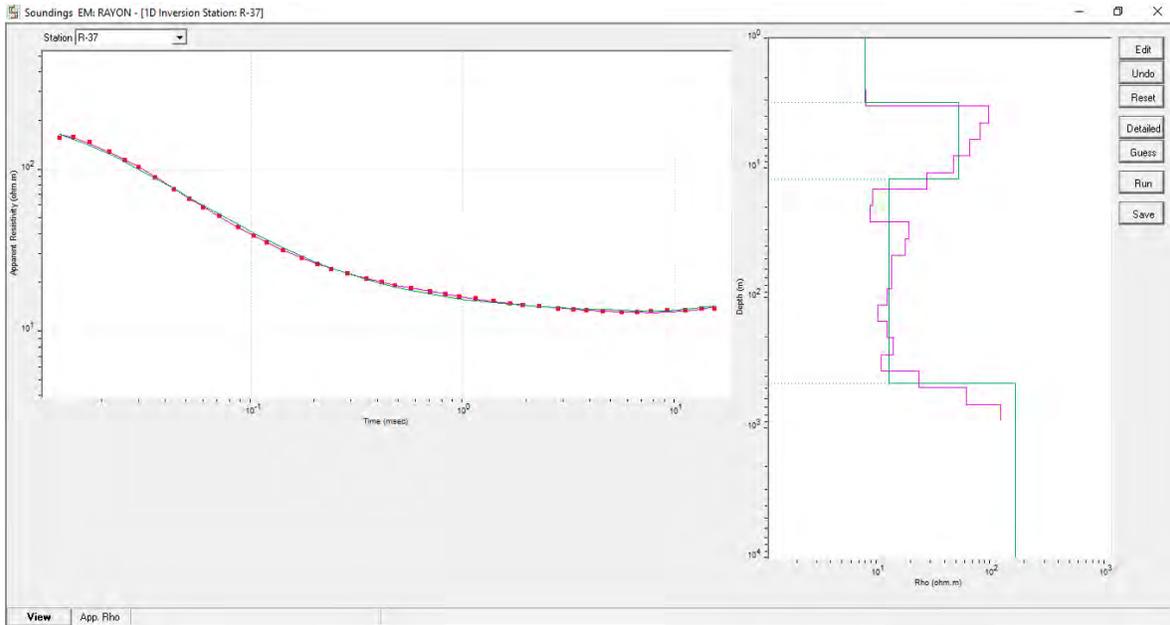
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-34



Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-35



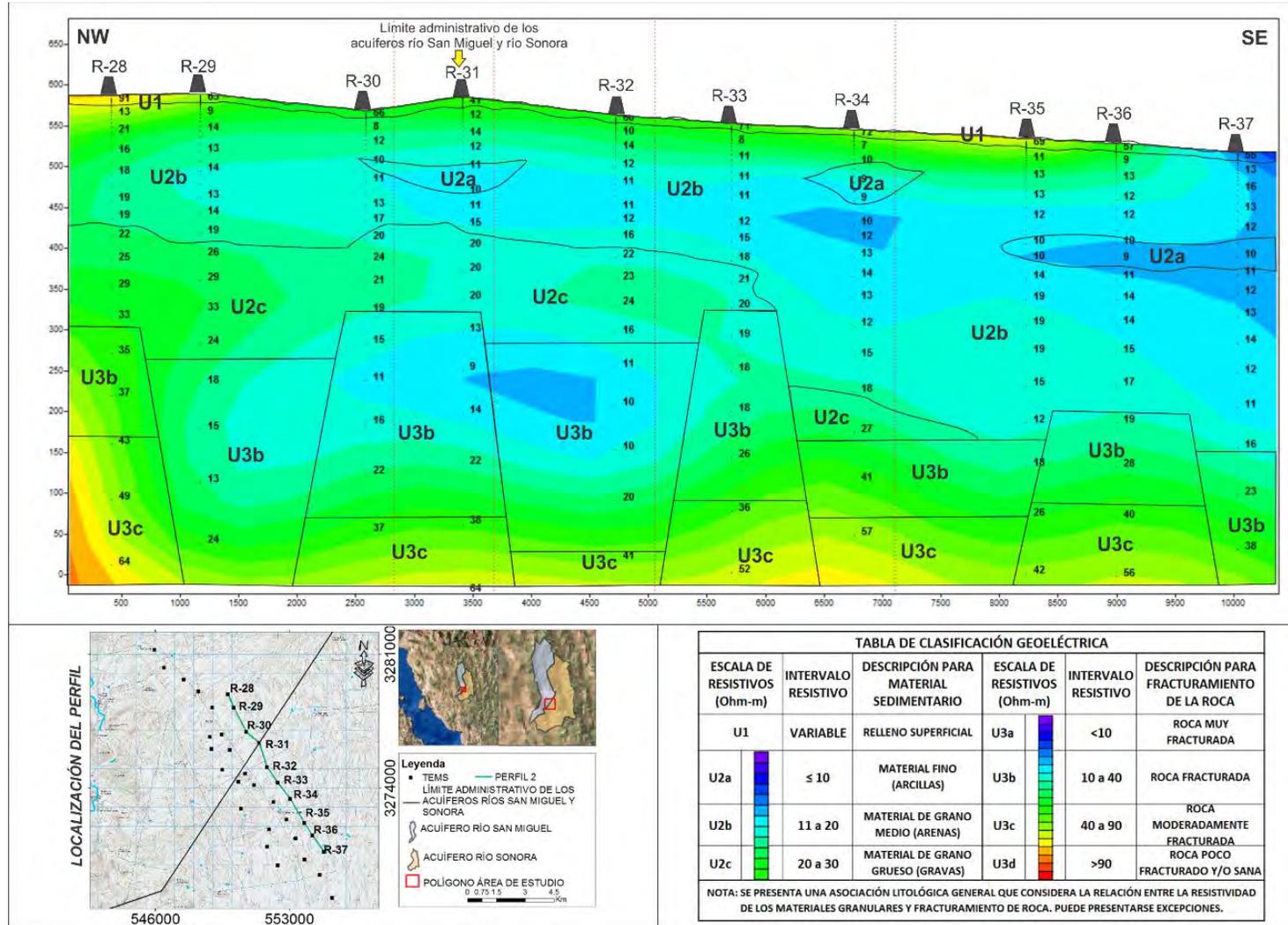
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-36



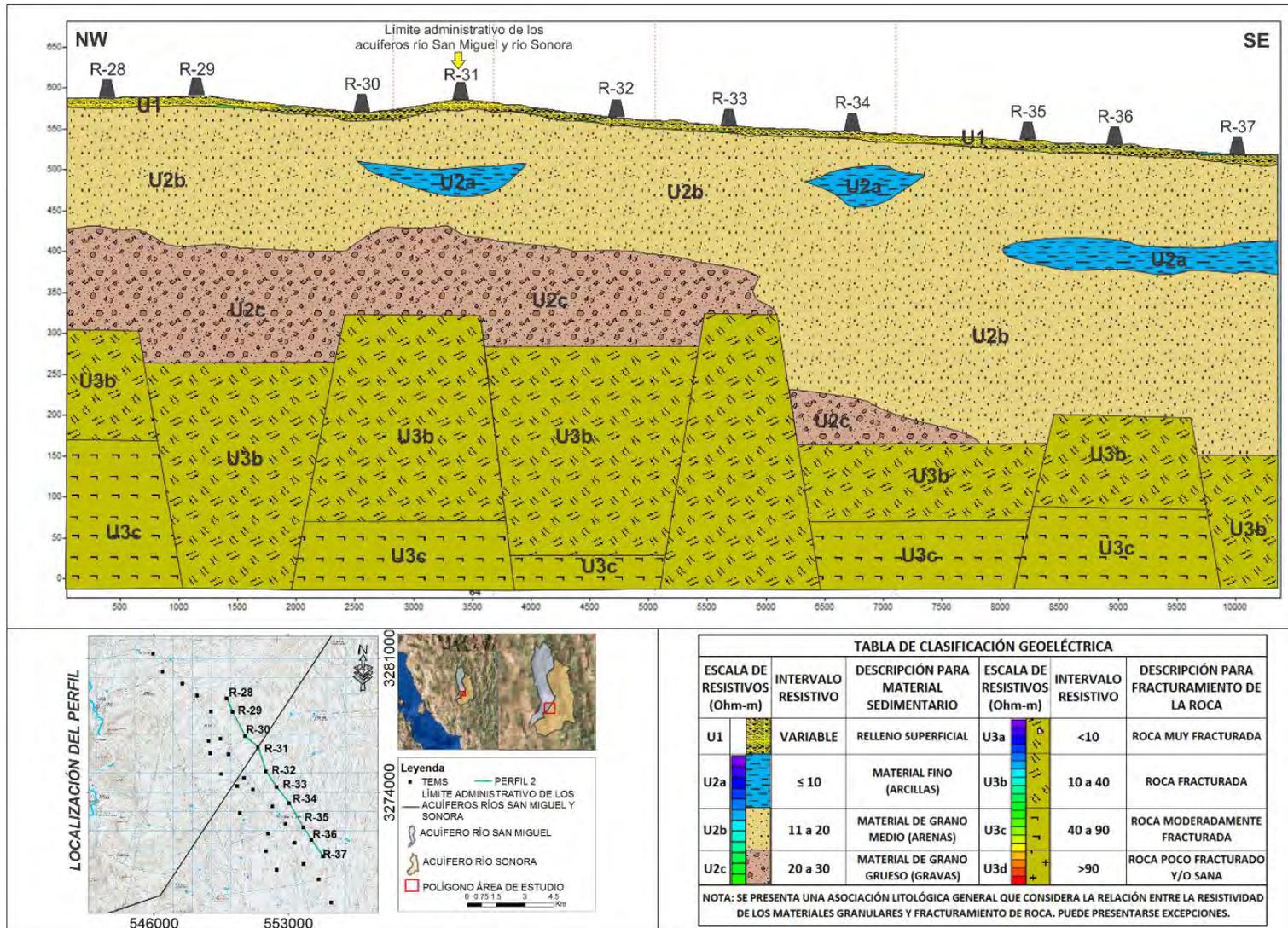
Modelado y suavizado de capas a partir de la inversión tipo Occam, TEM R-37



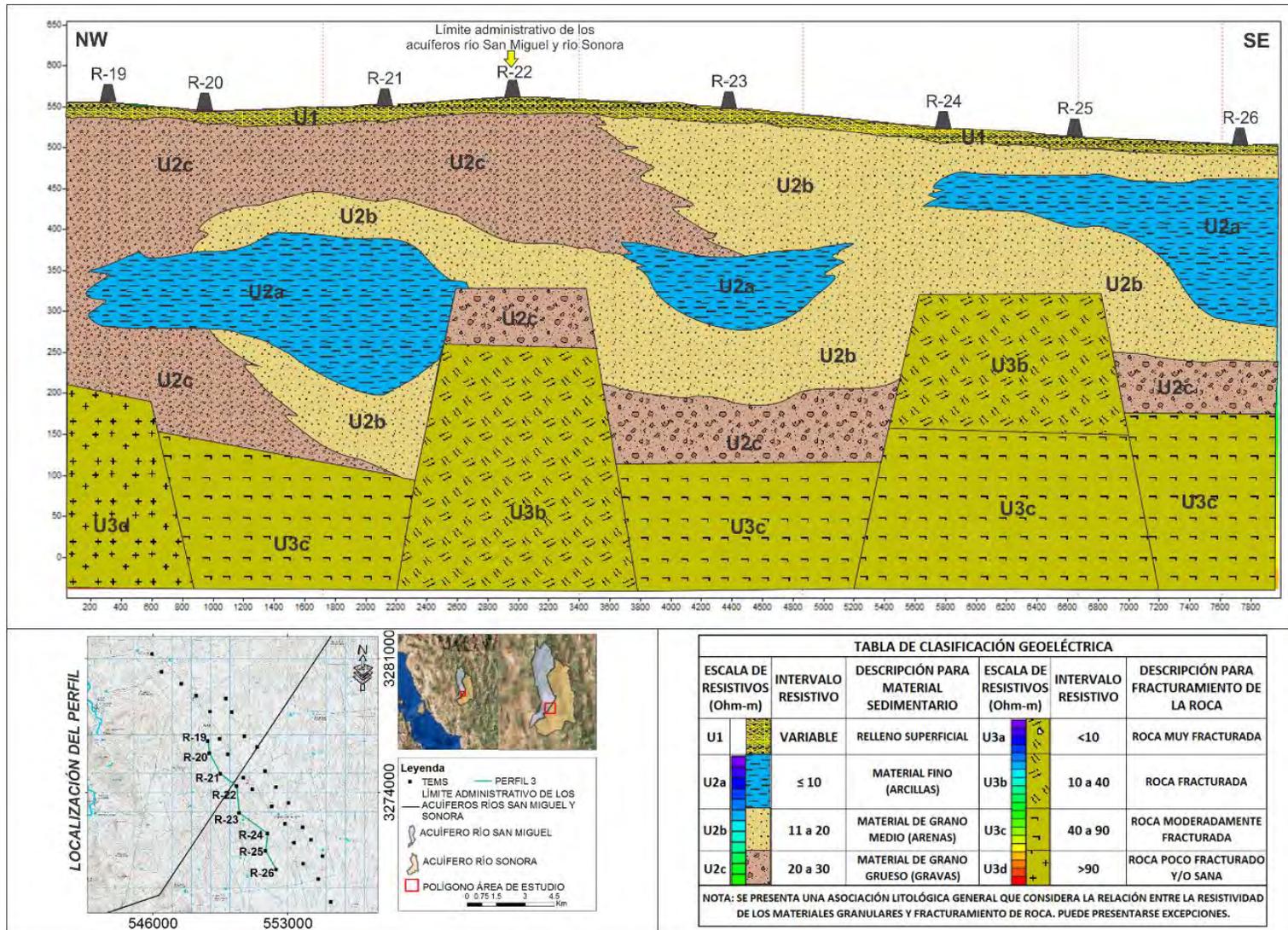
PERFILES RESISTIVOS Y GEOELÉCTRICOS



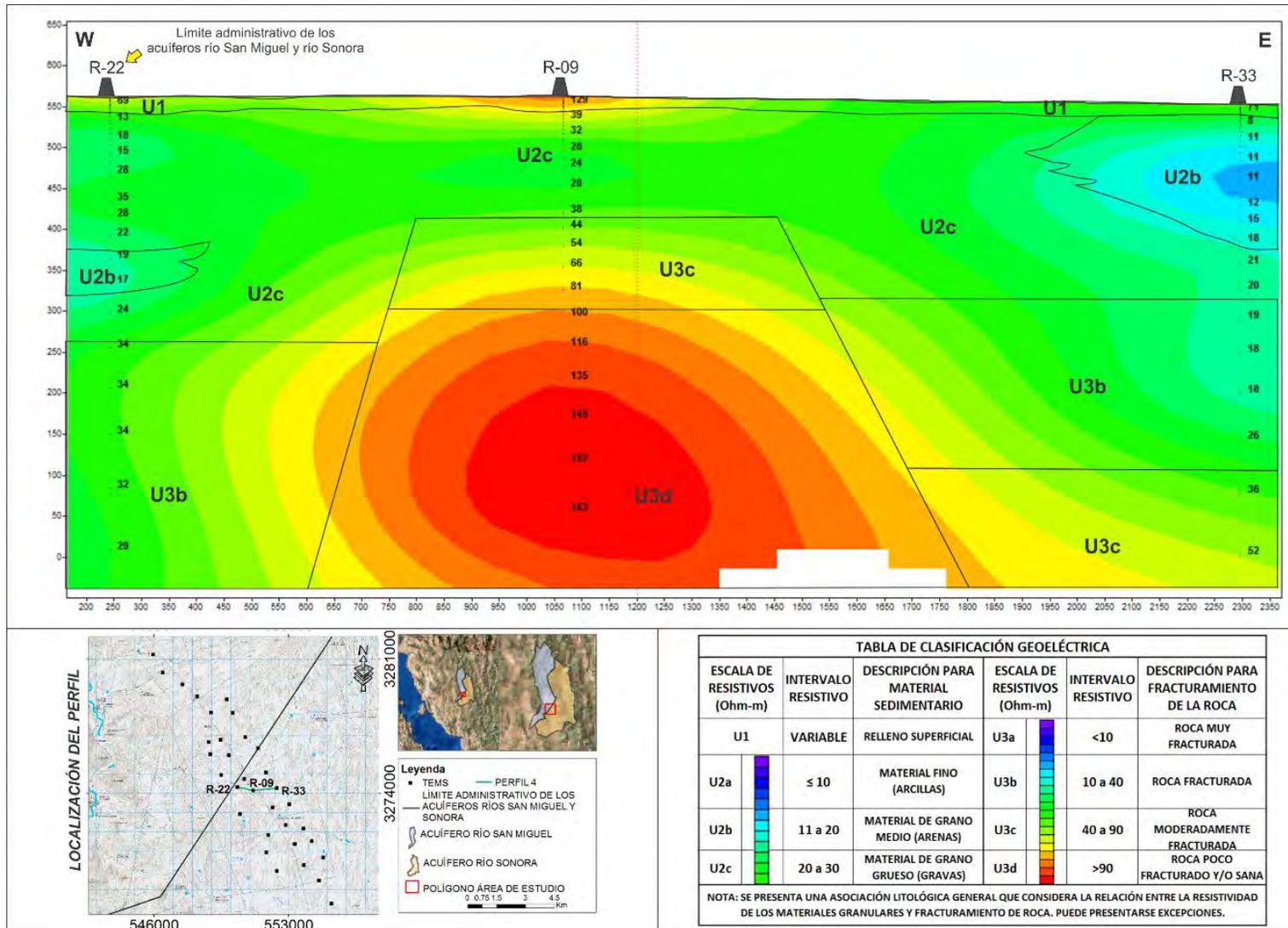
Perfil Resistivo 2



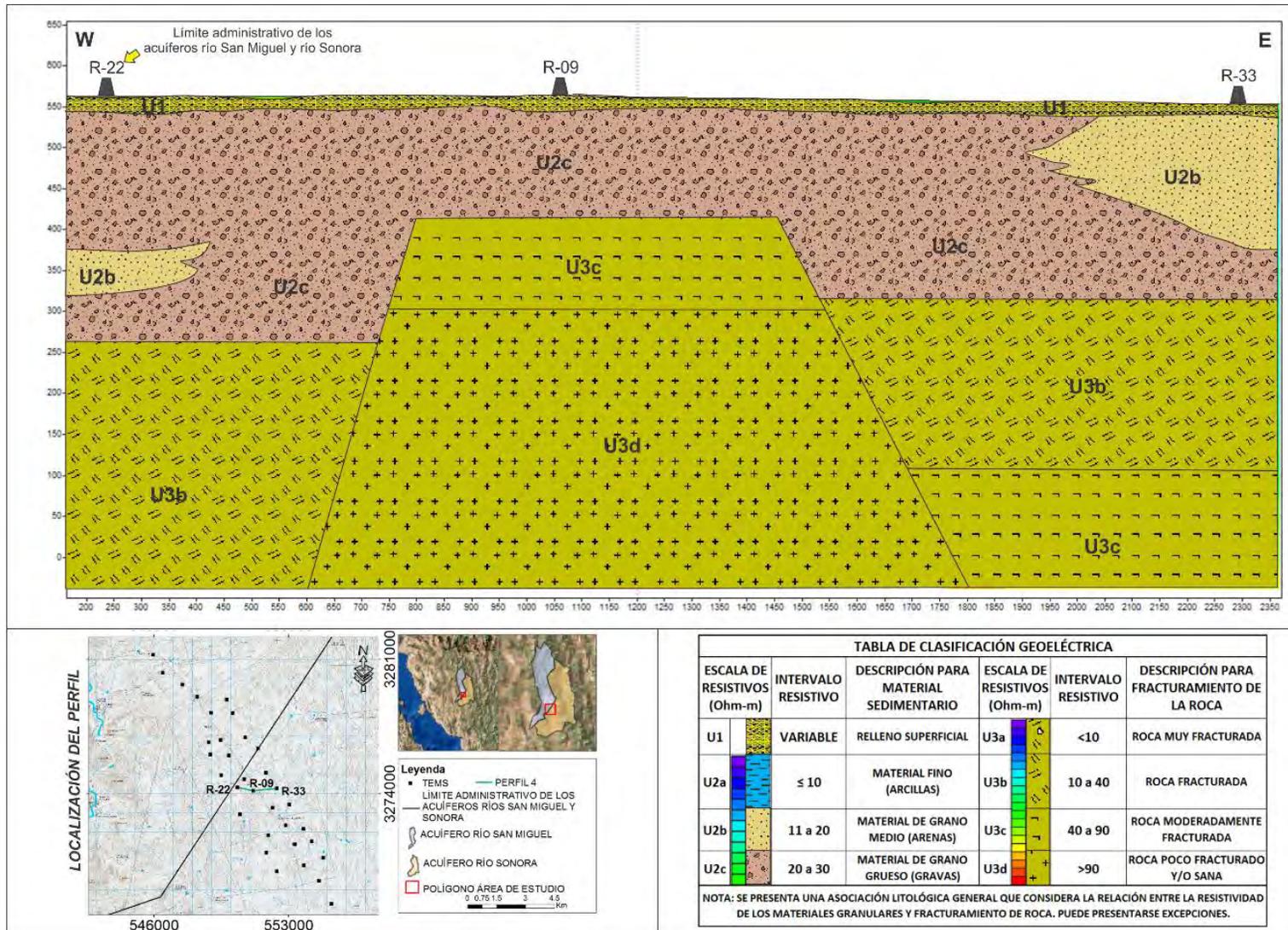
Perfil Geoelectrico 2



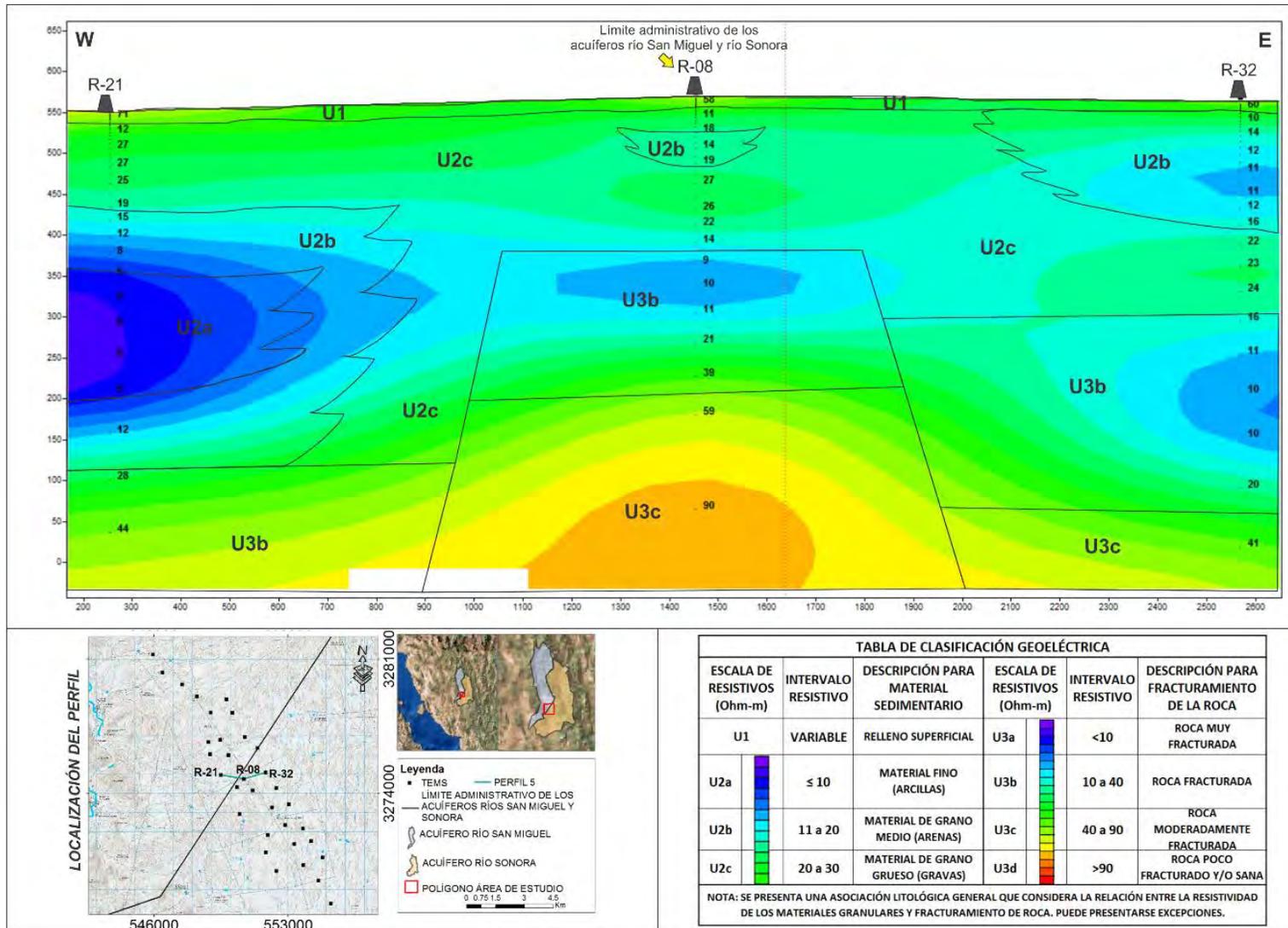
Perfil Geoeléctrico 3



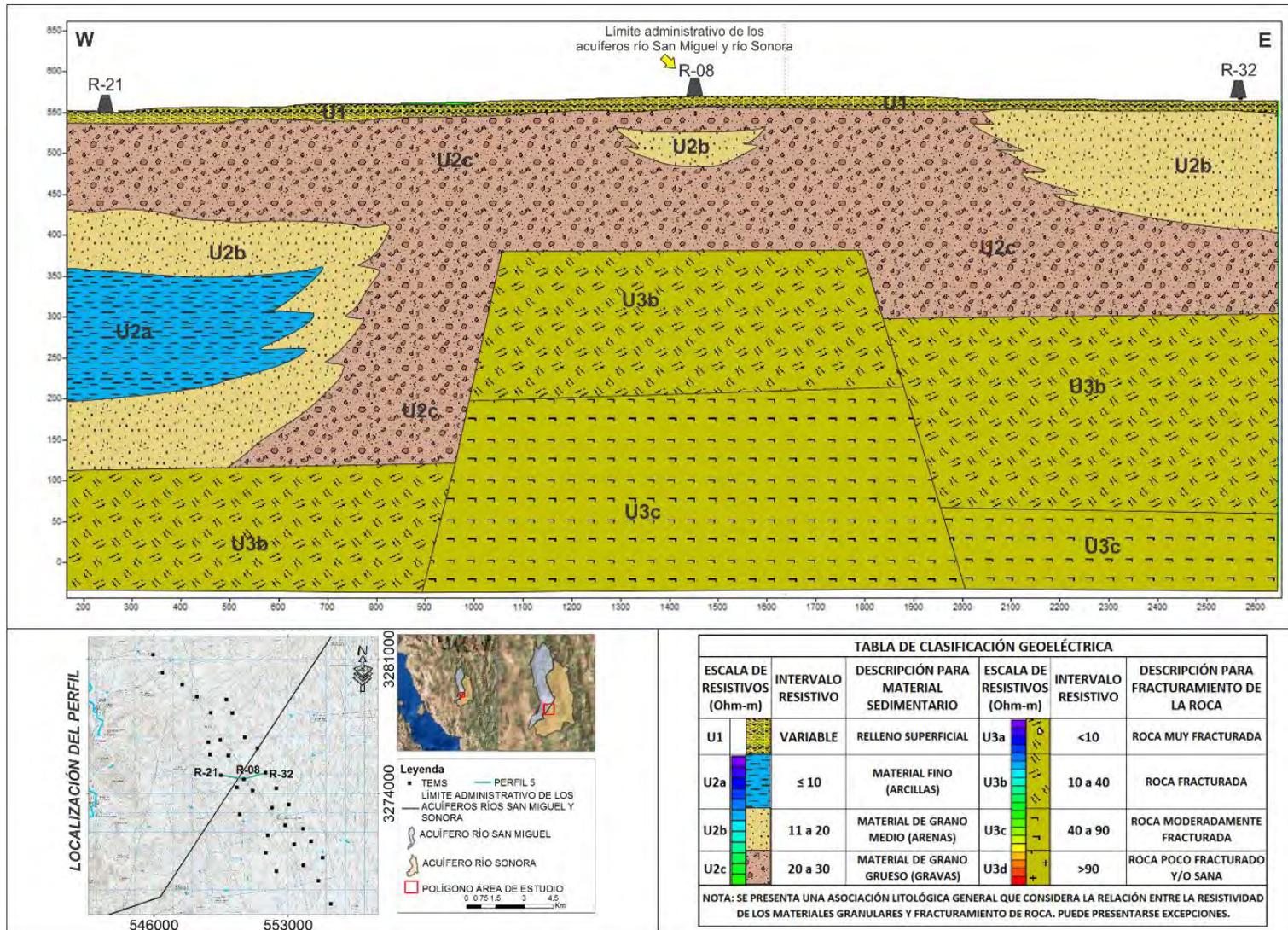
Perfil Resistivo 4



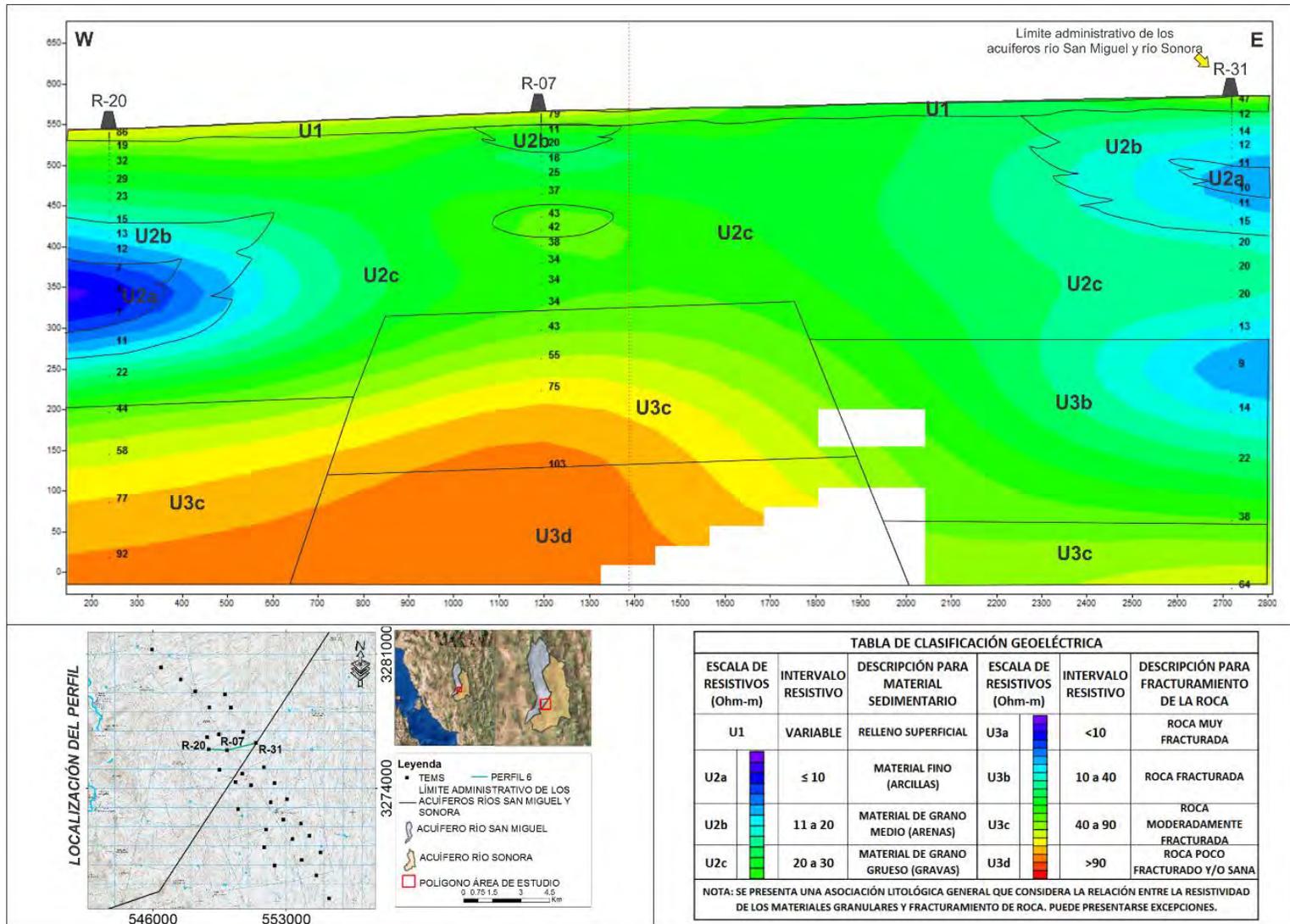
Perfil Geoelectrico 4



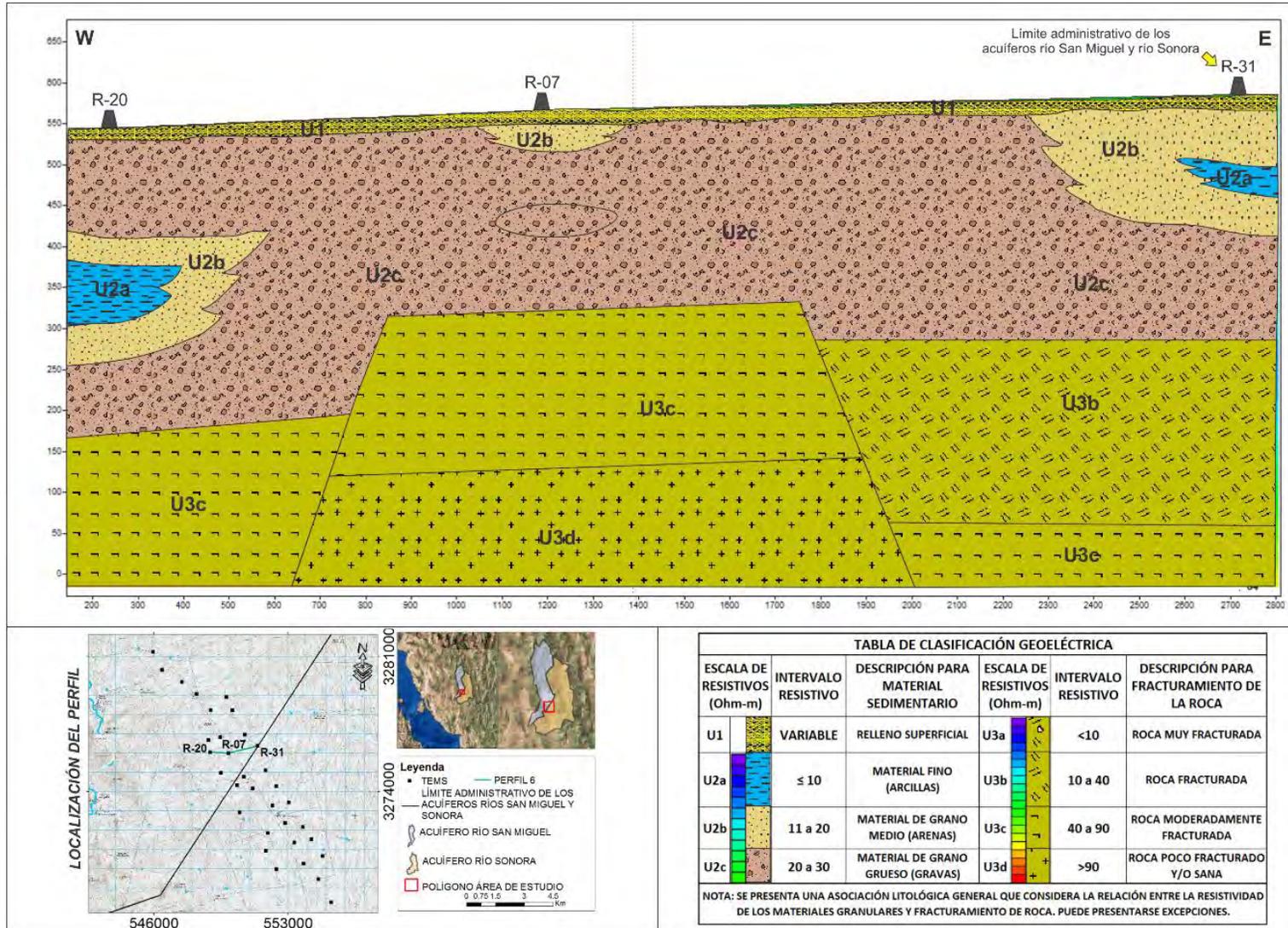
Perfil Resistivo 5



Perfil Geoeléctrico 5



Perfil Resistivo 6

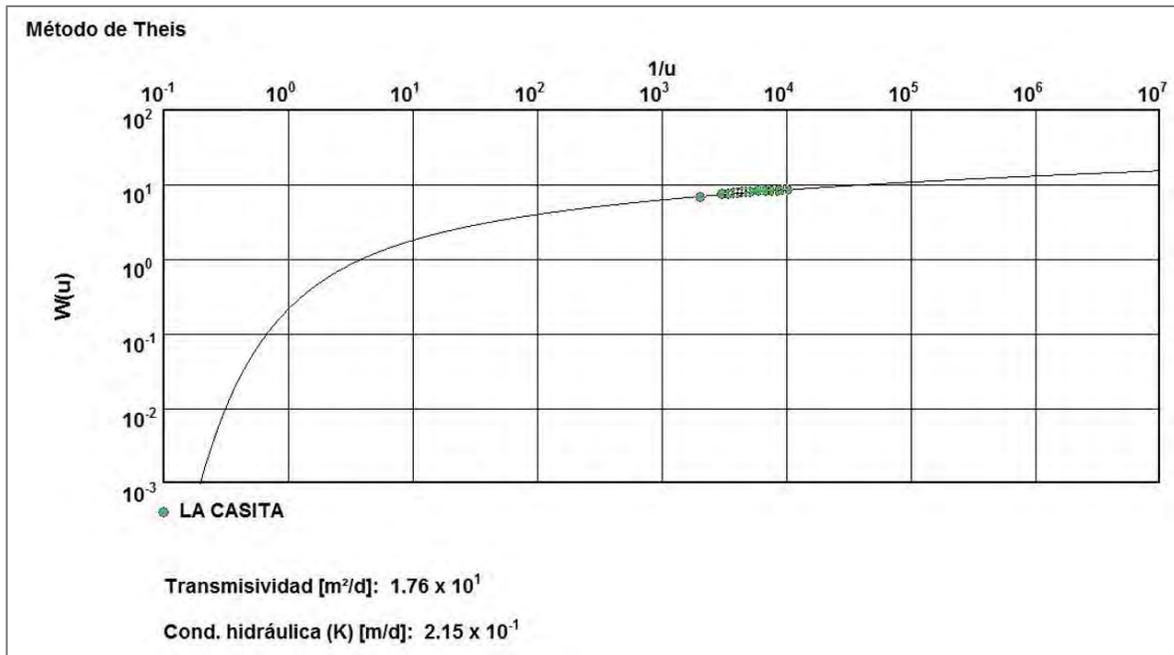


Perfil Geoelectrico 6

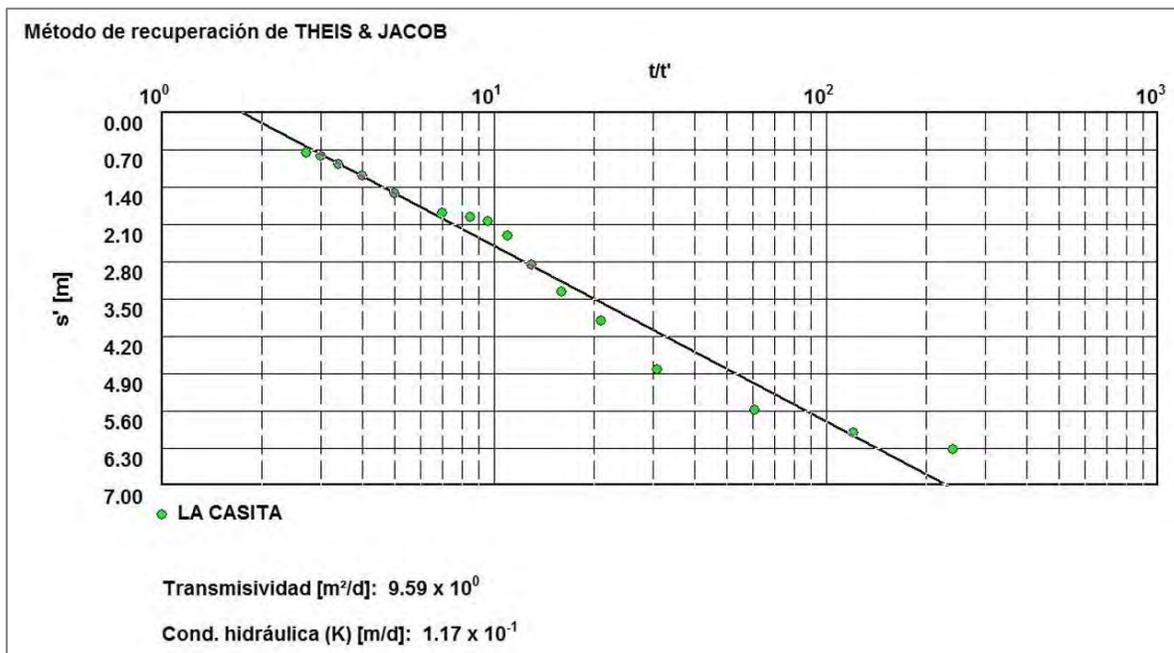


8. ANEXO 2

GRÁFICAS PRUEBA DE BOMBEO POZO LA CASITA



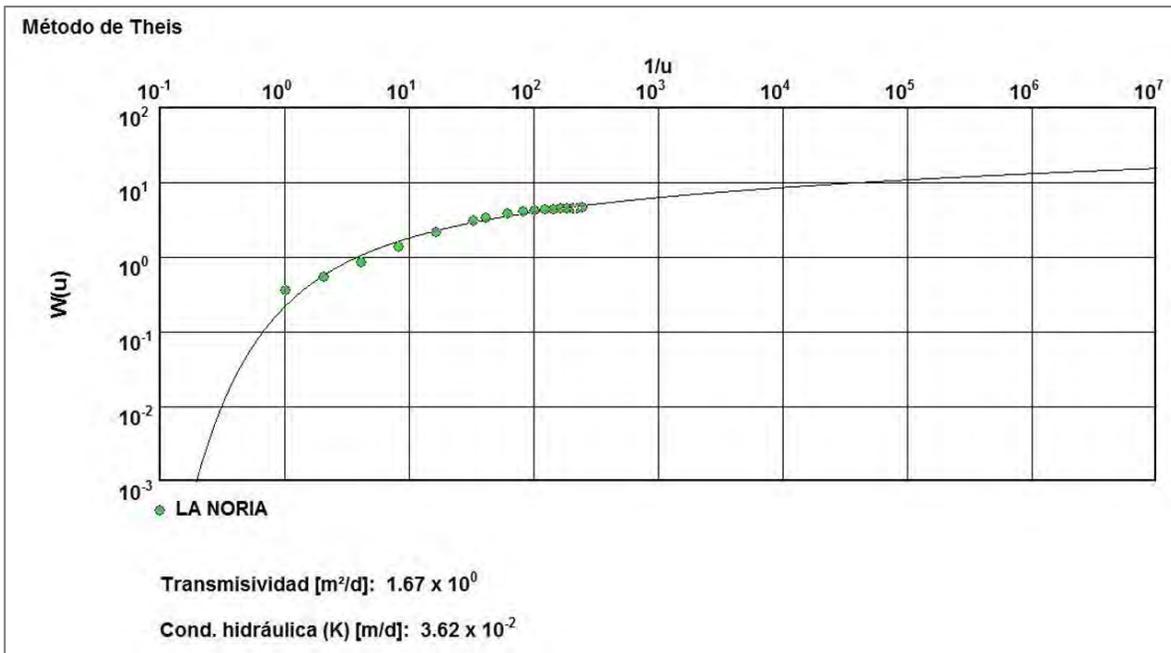
Método Theis para la etapa de abatimiento, el eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical el abatimiento.



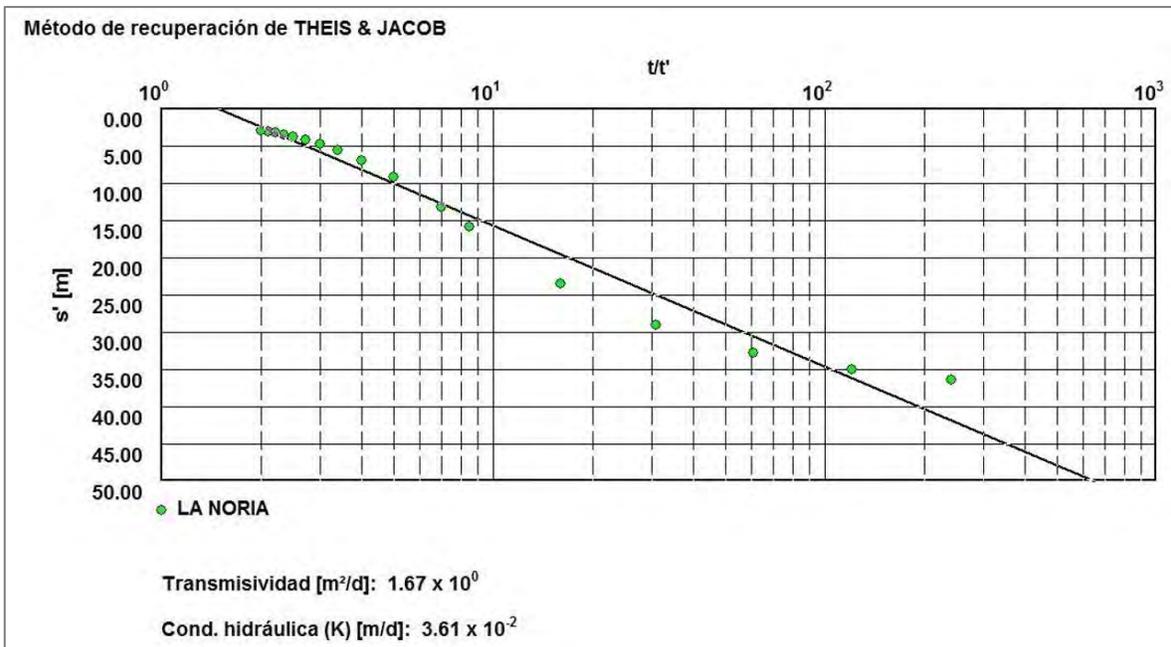
Método de Theis-Jacob para la etapa de recuperación, el eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical el abatimiento residual.



GRÁFICAS PRUEBA DE BOMBEO POZO LA NORIA



Método Theis para la etapa de abatimiento, el eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical el abatimiento.



Método de Theis-Jacob para la etapa de recuperación, el eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical el abatimiento residual.



FOTOGRAFÍAS PRUEBA BOMBEO POZO LA CASITA



FOTOGRAFÍAS PRUEBA BOMBEO POZO LA NORIA





FOTOGRAFÍAS MUESTREO POZO LA CASITA



FOTOGRAFÍAS MUESTREO POZO LA NORIA

