

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

“MODELACIÓN GEOFÍSICA CON SONDEOS
ELECTROMAGNÉTICOS TRANSITORIOS Y
GRAVIMETRÍA DEL DELTA DEL RÍO YAQUI,
SONORA”

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS - GEOLOGÍA

PRESENTA:

Javier Valencia Saucedo



Hermosillo Sonora, Octubre del 2014



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

Hermosillo, Sonora, a 06 de Octubre de 2014

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
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:

**"MODELACIÓN GEOFÍSICA CON SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS
TRANSITORIOS Y GRAVIMETRÍA DEL DELTA DEL RIO YAQUI, SONORA"**

Esto es con el fin de que el alumno: **JAVIER VALENCIA SAUCEDA** pueda presentar su examen de grado para la obtención de su título de Maestría en Ciencias-Geología.

Sin otro en particular quedamos de Usted.

ATENTAMENTE

M.C. Ismael Minjárez Sosa

Director de Tesis

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





"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 07 de octubre de 2014

M.C. Ismael Minjárez Sosa
Director de Tesis

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

"MODELACIÓN GEOFÍSICA CON SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS TRANSITORIOS Y GRAVIMETRÍA DEL DELTA DEL RÍO YAQUI, SONORA"

Esto es con el fin de que el alumno: **VALENCIA SAUCEDA JAVIER** pueda presentar su examen profesional, para la obtención del título de Grado. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

M.C. Francisco Javier Grijalva Noriega	Presidente
Dr. Rogelio Monreal Saavedra	Secretario
M.C. Mario Martínez	Vocal
M.C. Ismael Minjarez Sosa	Vocal

Sin otro en particular quedo de Usted

Atentamente

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
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. Interesado
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

NOMBRE DE LA TESIS:

**"MODELACIÓN GEOFÍSICA CON SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS
TRANSITORIOS Y GRAVIMETRÍA DEL DELTA DEL RÍO YAQUI, SONORA"**

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

JAVIER VALENCIA SAUCEDA

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. 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. 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. Mario Martínez

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. Ismael Minjarez Sosa

Atentamente

Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



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

DEDICATORIA

Principalmente le dedico este paso adelante en vida a mi esposa Gabriela Salas por ser la parte fundamental de mi motivación en el día a día.

A mis hijos María y Javier por sus palabras y risas.

A mi madre por siempre velar por mí.

A mis hermanos Carlos y Sergio Enrique por fungir como mi padre en toda mi vida.

A mis hermanas Sylvia, Sara y Aleida por todo su amor y dar corajes.

Y a mis grandes amigos que siempre de una manera u otra han estado a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por haberme aceptado como becario con número de registro 325293 en el plan de Maestría en Ciencias-Geología, durante el período de Agosto de 2012 a Agosto de 2014.

Al personal del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora por los espacios, medios y equipos proporcionados para el desarrollo de este trabajo.

A mi hermano Carlos Valencia Saucedo por ser un pilar y apoyo incondicional en todas mis actividades y logros profesionales.

A mi director de tesis José Ismael Minjarez Sosa por haber creído en mí en este proyecto y apóyame siempre con mi nuevas ideas.

A mis sinodales Francisco Javier Grijalva, Rogelio Monreal y Mario Martínez por su valiosa colaboración y apoyo en este trabajo académico.

A la maestra Alejandra Montijo González y Alfredo Ochoa por sus consejos y guía profesional.

Y a mis compañeros de trabajo y amigos Alba Martínez, Griselda Minjarez, Oscar Castelo, Iván Ramón Ramírez, Francisco Moreno, Elia y Carolina Tapia, Ismael Minjarez, José Juan Chávez y Gerardo Villaseñor por su apoyo en campo y en gabinete y generar un divertido trabajo en equipo.

A todos, Gracias!!!



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Estudios previos.....	1
1.2. Objetivos.....	2
2. GENERALIDADES DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN	3
2.1. Localización y vías de acceso.....	3
2.2. Hidrología.....	4
2.3. Hidrogeología.....	4
2.4. Parámetros hidrogeológicos.....	5
2.5. Disponibilidad de agua.....	5
2.6. Calidad del agua.....	6
2.7. Fisiografía y geomorfología.....	6
2.8. Contexto geológico regional.....	10
2.9. Estratigrafía.....	10
2.9.1. Cretácico Superior.....	10
2.9.2. Rocas del Terciario.....	11
2.9.2.1. Terciario volcánico.....	11
2.9.2.2. Formación Báucarit.....	12
2.9.2.3. Derrames lávicos.....	13
2.9.2.4. Ensamble sedimentario.....	13
2.9.3. Depósitos aluviales cuaternarios.....	14
2.10. Geología estructural.....	17
2.11. Esquema tectónico regional.....	17
2.12. Geología del subsuelo.....	19
3. REVISIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	20
3.1. El método de sondeos electromagnéticos transitorios.....	20
3.1.1. Detalles sobre la técnica de prospección.....	21
3.2. Gravimetría.....	23
3.2.1. Correcciones.....	24
3.2.1.1. Corrección por deriva instrumental (g_{DI}).....	24
3.2.1.2. Corrección topográfica (C_t).....	25
3.2.1.3. Corrección por latitud (dg/d).....	26
3.2.1.4. Corrección por altura (elevación).....	26
3.2.1.5. Corrección de Bouguer (C.B.).....	27
3.2.2. Separación regional-residual.....	28



3.2.3. Anomalía residual.....	31
3.2.4. Interpretación cualitativa y cuantitativa	32
3.2.5. Ambigüedades en interpretaciones gravimétricas	34
4. EQUIPO Y METODOLOGÍA UTILIZADA	36
4.1. Equipo.....	36
4.1.1. GDP-32 ^{II}	36
4.1.2. Antena magnética TEM/3	36
4.1.3. Transmisor Scintrex/Zonge GGT-3.....	36
4.1.4. Controlador transmisor XMT-32.....	37
4.1.5. Generador ZMG-3	37
4.1.6. Scintrex CG-5 Autograv.....	38
4.2. Metodología	39
4.2.1. Metodología para los estudios electromagnéticos	39
4.2.1.1. Estimación del tiempo de la rampa de corte	40
4.2.1.2. Requerimientos básicos para la adquisición de sondeos electromagnéticos	40
4.2.2. Metodología para los trabajos gravimétricos.....	40
5. RESULTADOS	44
5.1. Sondeos electromagnéticos transitorios.....	44
5.1.1. Mapas resistivos a profundidad	49
5.1.2. Secciones resistivas	52
5.2. Gravimetría	56
5.2.1. Anomalía de Bouguer.....	57
5.2.2. Anomalía de residual.....	59
5.2.3. Profundidad de la cuenca.....	62
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
6.1. Conclusiones	64
6.2. Recomendaciones	67
7. REFERENCIAS CITADAS	69
ANEXOS	
ANEXO I. BASES DE DATOS DE TEM'S.....	A
ANEXO II. MODELOS DE INVERSIÓN DE LOS SONDEOS ADQUIRIDOS.....	B
ANEXO III. MAPAS DE PLANTA DE RESISTIVIDAD	C
ANEXO IV. SECCIONES DE RESISTIVIDAD EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	D
ANEXO V. BASES DE DATOS DE GRAVIMETRÍA	E
ANEXO VI. GRÁFICAS DE REMOCIÓN REGIONAL-RESIDUAL Y SECCIONES GRAVIMÉTRICAS	F



CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.	3
Figura 2. Fisiografía de la cuenca baja de río Yaqui (Gutiérrez H., 2007).	7
Figura 3. Geomorfología de la cuenca baja del río Yaqui (Gutiérrez H. 2007).....	9
Figura 4. Mapa geológico del área de estudio. Tomado del "Estudio de Impacto por el Cambio Climático en el Avance de la Interfase Marina de los Acuíferos Costeros Valle del Yaqui y Cocoraque" (CONAGUA, UNISON. 2011).	15
Figura 5. Columna estratigráfica del acuífero del valle río Yaqui. Tomado del "Estudio de Impacto por el Cambio Climático en el Avance de la Interfase Marina de los Acuíferos Costeros Valle del Yaqui y Cocoraque" (CONAGUA, UNISON). 2011.	16
Figura 6. Representación de un fenómeno electromagnético.	21
Figura 7. Representación del decaimiento temporal de la señal electromagnética en un sondeo TEM.	22
Figura 8. Esquema del circuito que se instala para un sondeo TEM.	23
Figura 9. Un ejemplo de corrección de terreno requiere un región x y y debido a la natural simplicidad de la corrección de Bouguer aplicada en el punto B (Burger, 1992).	25
Figura 10. Plantilla de Hammer (Burger, 1992).	26
Figura 11. Suavizando la gráfica del perfil de la gravedad de Bouguer (Δg), obtenemos un perfil regional (Δg_R), del cual calculamos la anomalía del perfil residual (Δg_L), en la que se ven líneas que sobresalen (residual) o irregularidades del perfil regional.	29
Figura 12. (a) Las líneas suavizadas de la gravedad de Bouguer (contínuas) fueron obtenidas de las líneas de la gravedad regional (punteadas en a y b). Para obtener los valores de la anomalía regional correspondientes a los valores de la gravedad de Bouguer, interpolamos en todos los puntos del mapa (b), calculamos los valores de la anomalía residual y los dibujamos en otro mapa (c), que muestra los patrones de la variación de la anomalía residual.	30
Figura 13. Para una misma intensidad de anomalía, sus lados son tanto más empinados cuánto más superficial es su origen (caso de un cilindro horizontal).....	33
Figura 14. Las anomalías de gravedad pueden ser explicadas con variedades (números infinitos teóricamente) de distribuciones de masas a diferentes profundidades.	34
Figura 15. Equipo GDP-32 ^{II} y antena magnética TEM/3.	36
Figura 16. Equipo transmisor Scintrex/Zonge GGT-3, controlador transmisor XMT-32 y generador ZMG-3.	37
Figura 17. Scintrex Cg-5 Autograv.	38
Figura 18. Ubicación de sondeos electromagnéticos transitorios adquiridos en el área de estudio.	46
Figura 19. Secciones con orientación preferencial oeste – este en el área de estudio.	47
Figura 20. Secciones con orientación preferencial noroeste – sureste en el área de estudio.	47
Figura 21. Secciones con orientación preferencial suroeste – noreste en el área de estudio.	48
Figura 22. Mapa de resistividad a 200 metros de profundidad estimada con smooth inversion en WinGLink.	50



Figura 23. Mapa de resistividad a 350 metros de profundidad estimada con smooth inversion en WinGLink.	51
Figura 24. Mapa de resistividad a 900 metros de profundidad estimada con smooth inversion en WinGLink.	52
Figura 25. Sección resistiva W-E 2 en el área de estudio.	53
Figura 26. Sección resistiva W-E 3 en el área de estudio.	54
Figura 27. Sección resistiva NW-SE 1 en el área de estudio.	55
Figura 28. Sección resistiva SW-NE 1 en el área de estudio.	55
Figura 29. Ubicación de las estaciones gravimétricas en el área de estudio.	56
Figura 30. Modelo de contornos de la anomalía de Bouguer en el área de estudio.	57
Figura 31. Modelo tridimensional de la anomalía de Bouguer en el área de estudio.	58
Figura 32. Modelo tridimensional de la separación de la anomalía de Bouguer y la anomalía residual en el área de estudio.	61
Figura 33. Modelo de contornos a profundidad estimada en el área de estudio.	62
Figura 34. Modelo tridimensional del basamento a profundidad estimada en el área de estudio.	63
Figura 35. Modelo tridimensional del basamento a profundidad estimada con alineamientos estructurales en el área de estudio.	66
Figura 36. Modelo tridimensional del basamento con profundidades de observación de los sondeos electromagnéticos transitorios en el área de estudio.	67

CONTENIDO DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Anomalía de Bouguer.	42
Gráfica 2. Tendencia del regional.	42
Gráfica 3. Separación de perfiles de regional-residual.	43
Gráfica 4. Sección adquirida mediante el programa MATLAB de profundidad estimada del basamento.	43
Gráfica 5. Separación regional-residual de la sección NORTE-SUR 2.	60
Gráfica 6. Anomalía de Bouguer y anomalía residual de la sección NORTE-SUR 2.	60
Gráfica 7. Perfil de la profundidad estimada del basamento de la sección NORTE-SUR 2.	61

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones por sección gravimétrica.	41
Tabla 2. Sondeos adquiridos en el área de estudio.	45
Tabla 3. Sondeos electromagnéticos transitorios por secciones.	48



RESUMEN

La Geofísica como tal comprende diversos métodos de sondeo que van desde las prospecciones eléctricas, la magnetometría, gravimetría y técnicas sísmicas, hasta los métodos de tipo electromagnéticos. Es entonces un campo de estudio heredado de los requerimientos de la exploración, transformándose en un instrumento imprescindible para el levantamiento de importantes concepciones en los ámbitos de la geotermia y de la Hidrogeología. Así, el tipo de mediciones y el procesamiento que se realiza de esos datos, se han convertido en parte fundamental que sustenta los denominados "Modelos Conceptuales" de cualquiera de las ramas de geo-aplicación mencionadas. Tales modelos posteriormente han fungido como la referencia de base para lanzar las propuestas finales vinculadas con la dimensión, ya sea del yacimiento geotérmico como del manto acuífero, la profundidad a la cual se encuentra, la temperatura que lo caracteriza, el contenido de energía que potencialmente puede ser explotable desde el yacimiento geotérmico encontrado, y no menos de las zonas en específico donde se ve más conveniente la perforación de los primeros pozos de exploración o de explotación comercial.

El presente estudio se realizó con la finalidad de generar un modelo tridimensional de la morfología del basamento a profundidad del delta del río Yaqui por medio de métodos geofísicos indirectos como lo es la gravimetría, basados en las diferencias de densidad de las rocas en el subsuelo para poder definir el espesor de los rellenos sedimentarios. Y posteriormente por métodos geofísicos directos en este caso los sondeos electromagnéticos transitorios (TEM's), definir los distintos tipos de materiales depositados por medio de sus características resistivas, así como, sus espesores y profundidades de emplazamiento.

Este trabajo fue realizado durante el periodo Agosto 2012-Agosto del 2014, donde se adquirió la información geofísica de campo seleccionando los sitios propicios para la realización de los sondeos y estaciones gravimétricas de control, tomando como base las características geológicas, hidrogeológicas y geomorfológicas del sitio.

Con lo que respecta a la geología del área de estudio en el valle del río Yaqui, existen unidades estratigráficas cuyas edades varían desde el Cretácico Inferior hasta el Holoceno y la nomenclatura para las unidades estratigráficas está basada principalmente en los trabajos realizados por el Servicio Geológico Mexicano, teniendo así presentes las siguientes rocas de la más antigua a la más reciente: Batolitos Laramídicos, Volcanismo riolítico de la Sierra Madre Occidental, Volcanismo intermedio de dacita-andesita, Formación Báucarit, Depósitos recientes



(Minjarez Sosa *et al.*, 2002; García Cortés y Siqueiros López 2002). Cabe señalar que todos los trabajos de los TEM's se realizaron en áreas despejadas cubiertas de materiales recientes y no se tenían afloramientos de roca cercanos.

Finalmente, con este estudio se obtuvo el modelo tridimensional de la morfología del basamento a profundidad estimada y la ubicación de los sondeos electromagnéticos en este, donde se puede apreciar los espesores y profundidades de los diferentes materiales sedimentarios en secciones longitudinales y transversales al delta del río Yaqui.



1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio se realizó con la finalidad de generar un modelo tridimensional del delta del río Yaqui, por un lado conocer la morfología del basamento a profundidad y posteriormente definir los paquetes de los materiales del relleno sedimentario de la cuenca por medio de métodos electromagnéticos. Este trabajo fue realizado durante el periodo Agosto 2012-Agosto del 2014, donde se adquirió la información geofísica de campo seleccionando los sitios propicios para la realización de los sondeos electromagnéticos con un equipo de recepción GDP 32^{II}, tomando como base las características geológicas, hidrogeológicas y geomorfológicas del sitio, obteniendo así, 23 sondeos efectivos distribuidos estratégicamente en el área con una separación entre ellos de 4 kilómetros aproximadamente para la interpretación de 11 secciones con diferentes orientaciones y así, darse una idea global del área de estudio. En todos los puntos de observación se realizaron espiras transmisoras de 200 X 200 mts (Tx moment de 40,000 m²) alcanzando profundidades de investigación variable hasta de 1,000 metros, aproximadamente. Y finalmente se procedió a elaborar los mapas de resistividad a las diferentes profundidades junto con la elaboración de los perfiles resistivos del área de estudio.

Con lo que respecta al modelo gravimétrico a profundidad del basamento se llevó acabo la recopilación, análisis y depuración de la información bibliográfica del área de estudio, siendo estos más de 1220 estaciones gravimétricas adquiridas de la Base Nacional del INEGI de observaciones en campo, con esto obtuvimos en total cuatro secciones de 26, 36, 28 y 33 estaciones respectivamente con un rumbo preferencial norte-sur iniciando al pie de la Sierra del Bacatete en su porción sur y cerrando las secciones en el afloramiento ubicado al noreste del poblado de Buaysiacobe. Estas secciones tienen una separación entre las estaciones variable de 500 metros a 4 kilómetros de distancia y oscilan entre 50 y 61 kilómetros de longitud con una separación de 4 a 7 kilómetros aproximadamente entre ellas.

Finalmente se obtuvo el modelo tridimensional de la morfología del basamento a profundidad estimada y la ubicación de los sondeos electromagnéticos en este, donde se puede apreciar máximos y mínimos de las anomalías gravimétricas estimando los espesores y profundidades de los diferentes materiales sedimentarios en secciones longitudinales y transversales al delta del río Yaqui.

1.1. Estudios previos

Entre los estudios previos en el área de estudio se destacan los siguientes:

"Metodología para la definición de unidades hidroestratigráficas: caso del acuífero del valle del río Yaqui, Sonora, México" de Monreal Rogelio, Rangel Medina, Grijalva Montoya, Minjarez Sosa y Morales Montaña.



1. "Structure of the rift basins in the central Gulf of California: Kinematic implications for oblique rifting" realizado en la División de Ciencias de la Tierra en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, por Manuel Aragón Arreola, María Morandi, Arturo Martín Barajas, Luis Delgado Argote y Antonio González Fernández.
2. "Hidrogeología de Sonora, México" hecho por Lourdes Vega Granillo, Samantha Cirett Galán; María De la Parra Velasco y Raúl Zavala Juárez.
3. "Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (2640) Valle del Yaqui, estado de Sonora"; de la CONAGUA.
4. "Uso de registros geofísicos y sondeos eléctricos verticales en la modelación de la salinidad y parámetros hidráulicos en el Valle del río Yaqui", de Rosa Gutiérrez.
5. "Hidroestratigrafía del acuífero del Valle del río Yaqui, Sonora", de Adrián Grijalva.
6. "Estudio de actualización geohidrológica del acuífero Valle del Yaqui municipio de Cajeme, Sonora"; de la Universidad de Sonora y la CONAGUA.
7. "Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación de los acuíferos de León, Jiménez-Camargo y Valle del Yaqui", Realizado por Ingeniería Geológica Computarizada, S.A. de C.V.

1.2. Objetivos

Los objetivos de este estudio son:

- a) Modelar la morfología del basamento a profundidad del delta del río Yaqui por medio de métodos geofísicos indirectos como lo es la gravimetría, basados en las diferencias de densidad de las rocas en el subsuelo para poder definir profundidad, estructuras, espesores y geometría de los rellenos sedimentarios.
- b) Y posteriormente por métodos geofísicos directos en este caso, sondeos electromagnéticos transitorios (TEM's), definir los distintos tipos de materiales depositados por medio de sus características resistivas, así como, sus espesores y profundidades de emplazamiento.



2. GENERALIDADES DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN

2.1. Localización y vías de acceso

El área de estudio se encuentra en la porción sur del estado de Sonora, específicamente, dentro de los municipios de San Ignacio Rio Muerto y la parte sur del de Guaymas. Limitándose al norte con la sierra El Bacatete, al sur con el Mar de Cortés, al Oriente con el poblado Campo 60 y al poniente con el golfo de California (Figura 1).

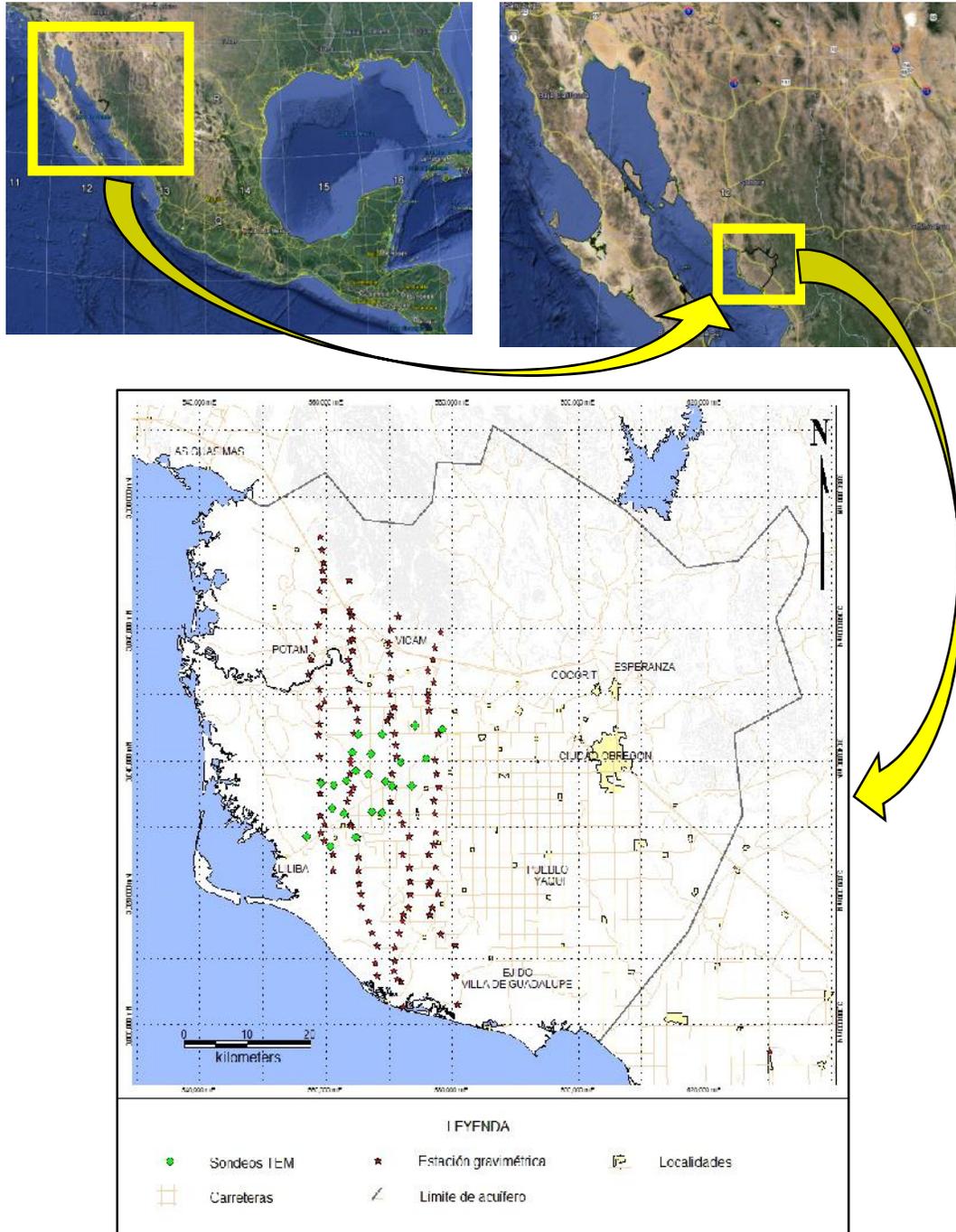


Figura 1. Localización del área de estudio.



Como vías de acceso tenemos la carretera número 15 México-Nogales, que comunica el área de estudio de este a oeste de relieve predominantemente llano en el estado de Sonora, pasado por Empalme, Las Guásimas, Vicam, Esperanza y Ciudad Obregón.

Del poblado de Vicam sale una pequeña carretera que te comunica al sur hasta Isla Lobos y en puntos intermedios comunica a los poblados de Tórim, Oronio, Agraristas de Ciudad Obregón, San Ignacio Rio Muerto, La curva, el Campo 60, estos dentro del área de trabajo.

Con respecto a la comunicación aérea, la ciudad de Obregón cuenta con aeropuerto de vuelos internacionales y nacionales y tiene capacidad para recibir naves de corto y mediano alcance.

2.2. Hidrología

El acuífero del Valle del Yaqui cuenta con una superficie de 1,966 km², sobre la que se ha desarrollado el Distrito de Riego 041 Río Yaqui, en la parte baja de la cuenca del río Yaqui, la más grande e importante de Sonora. El río Yaqui nace en la provincia hidrogeológica de la Sierra Madre Occidental y su cuenca aporta 2,404 Mm³ de escurrimiento al año, que corresponde al 82% del total estatal (INEGI, 2000). La precipitación media anual es de 352 mm, su temperatura media anual es de 22.6°C, la evaporación potencial es de 2,061.51 mm y la evapotranspiración promedio anual es de 370.4 mm (UNISON, 2003).

La región hidrológica del acuífero Valle del Yaqui queda comprendida dentro de la región hidrológica No.9 Sonora sur, en la subregión Río Yaqui y emplazado en la cuenca del río Yaqui. En la zona no es posible distinguir una subcuenca.

2.3. Hidrogeología

En el acuífero del valle del Yaqui, se distingue tres unidades hidrogeológicas: el basamento rocoso totalmente impermeable, una segunda unidad semipermeable de conglomerado y suelo residual sobre la anterior, y una tercera unidad de material aluvial muy permeable que cubre a la anterior.

El basamento está constituido por rocas calcáreas paleozoicas, granito y rocas volcánicas cretácicas (andesita interestratificada con conglomerado y arenisca) y rocas volcánicas cenozoicas (basalto, andesita y riolita).

La unidad semipermeable está formada por aglomerado, arenisca y conglomerado. Su importancia es secundaria, desde el punto de vista de la recarga.

La unidad hidrogeológica más importante está constituida por depósitos del Cuaternario, que cubren toda la planicie del valle, donde se aloja el acuífero regional, y consta de material aluvial y depósitos de talud de granulometría (grava, arena, limo) y transmisividad variables. Su espesor, calculado mediante cortes litológicos de pozos, es en la parte norte y próxima a la presa Álvaro



Obregón del orden de los 25 m, alcanzando los 400 m en el centro-sur del valle. La recarga del acuífero proviene de la infiltración de ríos, presas, red de canales de riego y precipitación. La descarga ocurre verticalmente por bombeo de pozos para uso agrícola y doméstico, flujo subterráneo horizontal hacia la red de drenaje agrícola, río Yaqui, arroyo Cocoraque y hacia el mar (González-Enríquez, 1999).

Existen dos acuíferos independientes en el valle del Yaqui: uno superior, de tipo libre, y debajo, uno regional, que en partes es libre, semiconfinado y confinado, cuya extensión es amplia y su espesor y composición variables (UNISON-CONAGUA, 2003).

2.4. Parámetros hidrogeológicos

La transmisividad consignada por González-Enríquez (1999) para las rocas calcáreas del basamento es de baja a nula ($< 0.003 \text{ m}^2/\text{s}$), y para las rocas graníticas varía de media a baja. Por otro lado, en el estudio de la UNISON (2003a), se consideró un valor de rendimiento específico de 0.11 para la capa superior (espesor de 1 a 5 m, acuífero libre en medio poroso) y capas inferiores (espesor de 35 a 50 m, acuífero semiconfinado en sedimentos continentales), y de 0.9 para el resto de los materiales. La transmisividad fue de $0.0259 \text{ m}^2/\text{s}$, calculada como el promedio aritmético de los valores obtenidos en 142 pruebas de bombeo, y la conductividad hidráulica media se calculó en $8.46 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

2.5. Disponibilidad de agua

El balance hidrológico superficial del río Yaqui resultó negativo, ya que se calcularon 798.44 Mm^3 de precipitación, $5,283.21 \text{ Mm}^3$ de evaporación potencial, 822.80 Mm^3 de evapotranspiración real y -24.36 Mm^3 de precipitación en exceso o escurrimiento. La recarga vertical (1996-2002) se estimó en $646.73 \text{ Mm}^3/\text{a}$, procedente en su mayoría de infiltración de canales no revestidos y, en menor escala, de infiltración de agua de riego agrícola (UNISON, 2003a).

Con datos de CONAGUA (2006), se elaboró un mapa de elevación de niveles estáticos con valores que van de 0.6 hasta 62 msnm, en el que se observa, en distintos lugares, conos de abatimiento, pero también de recuperación. Los abatimientos son producto de las extracciones por bombeo, cuyo promedio fue de 227.68 Mm^3 de 1969 a 2001 y de 352 Mm^3 de 2000 a 2001 (UNISON, 2003a).

De acuerdo con el INEGI (2000), la condición del acuífero es de equilibrio, consignando una recarga de $415.50 \text{ Mm}^3/\text{a}$ y una descarga por bombeo de $354.00 \text{ Mm}^3/\text{a}$.



2.6. Calidad del agua

La calidad del agua superficial del río Yaqui es adecuada para diversos usos, pero la contaminación se concentra en las partes bajas de la cuenca, lo que afecta los desarrollos acuícolas y pesqueros de la costa. Se calcula que los canales que captan las aguas de retorno agrícola drenan 15,474 L/s hacia las costas de los municipios de Guaymas, Bacum, Cajeme y Etchojoa (Celis-Salgado, 1992).

El agua subterránea está contaminada por agroquímicos y salinidad. Se ha detectado plaguicidas (, y -HCH, pp'DDT, pp' y op' DDE, endrín y dieldrín) en pozos de algunos ejidos (González-Enríquez y Canales-Elorduy, 1995). La salinidad varía de 2,500 a 5,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en 360 de los 900 pozos en operación, la que podría deberse a evapotranspiración, evaporitas o intrusión marina (Rangel-Medina *et al.*, 2005).

Además de lo anterior, se ha encontrado otros contaminantes, como Mn, en pozos del valle aluvial del río Yaqui, que surten agua a las ciudades de Guaymas y Empalme y compuestos nitrogenados procedentes de actividades pecuarias (97.67%), agrícolas (1.49%), urbanas (0.52%) e industriales (0.32%), sobre todo en zonas con nivel freático somero y lixiviación de residuos sólidos urbanos, abajo del nivel freático (González-Enríquez y Canales-Elorduy, 1997; Arvizu-Núñez y González-Enríquez, 2005).

Rangel-Medina *et al.* (2005) ubican el agua dulce en áreas cercanas al cauce del río Yaqui, del arroyo Cocoraque y en los paleocauces del subsuelo, siendo las principales familias, de mayor a menor: sulfatadas sódicas, bicarbonatadas sódicas, cloruradas magnésicas y cloruradas cálcicas; además, existen aguas mixtas (mezcla de agua superficial y subterránea con fuentes naturales y antropogénicas). Los mismos autores analizaron isótopos estables (^{18}O y deuterio) y radiactivos (tritio y ^{14}C) en agua, identificando cuatro orígenes principales y edades que van desde agua moderna de infiltración reciente hasta de 24,340 años.

2.7. Fisiografía y geomorfología

El acuífero Valle de Yaqui se encuentra ubicada en la subprovincia fisiográfica denominada Los Deltas de la Provincia Fisiográfica de las Sierras Sepultadas (UNISON-CONAGUA 2003) o Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa (INEGI, 1991), correspondiendo a la Provincia de Llanura Costera del Pacífico (Figura 2). El Valle del Yaqui comprende el delta formado por el río del mismo nombre (CONAGUA, 2009).

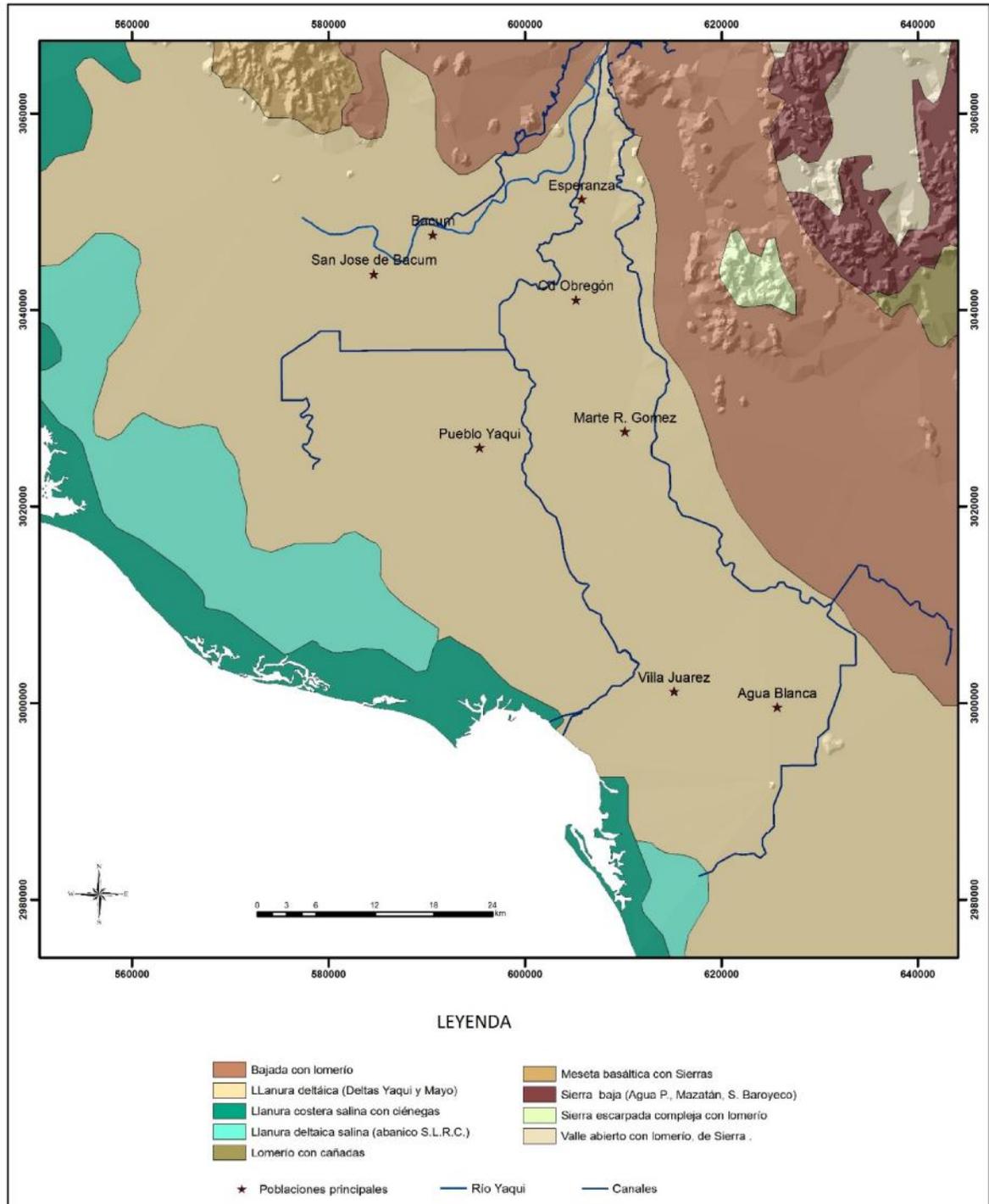


Figura 2. Fisiografía de la cuenca baja de río Yaqui (Gutiérrez H., 2007).

La subprovincia de La Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa que abarca el área de estudio está representada por el delta del río Yaqui donde se encuentra localizado el extenso Distrito de Riego del Río Yaqui. Todo su territorio se encuentra casi a nivel del mar y la mayoría



del mismo está cubierto de material aluvial. La línea de costa es sinuosa con un buen número de bahías y esteros (CONAGUA, UNISON. 2011).

Su subprovincia vecina de Sierras y Llanuras Sonorenses está formada de sierras bajas separadas por llanuras. Tales sierras son más elevadas (700 a 1400 msnm) y más estrechas (rara vez más de 6 km de ancho) en el oriente; y más bajas (de 700 msnm o menos) y más amplias (de 13 a 24 km) en el occidente. En ellas predominan rocas ígneas intrusivas félsicas, aunque también son importantes, particularmente en la parte central de la subprovincia, rocas extrusivas, metamórficas, calizas y conglomerados del Terciario.

Las llanuras están cubiertas en la mayor parte o en toda su extensión de amplios abanicos aluviales (bajadas) que descienden con pendientes suaves desde las sierras colindantes (CONAGUA, UNISON. 2011).

El génesis de ésta estructura sobre el contexto de las Sierras Sepultadas y su vecindad con la subprovincia de las Sierras Pie de Monte y con la misma Sierra Madre Occidental, le dan una situación especial al Valle del Yaqui, aspectos que tienen una incidencia en el comportamiento de los sistemas de flujo regionales y locales (CNA, 1997).

La geomorfología del área se encuentra influida por la forma y disposición del delta del Río Yaqui y por formaciones de origen volcánico que predominan dentro de la región del Valle del Yaqui. Un tipo de relieve que se encuentra en la zona es el endógeno volcánico acumulativo el cual es el resultado de la actividad volcánica del Oligoceno al Plioceno y Pleistoceno; este a su vez se subdivide en el relieve volcánico efusivo donde se agrupan todas las mesetas de lava y derrames que tienden a formar laderas de lava así como ríos de lava, este tipo de relieve tiende a formar zonas muy permeables, en este tipo de relieve se agrupan las grandes mesetas de lava que forman las unidades Tsb y Qb (CNA, 1997).

Dentro del relieve endógeno modelado se incluyen las formas de relieve que fueron originadas en las laderas volcánicas que forman los lomeríos y sierras. Las laderas montañosas volcánico-erosivas incluyen las sierras bajas y lomeríos que se encuentran en la porción nororiental las cuales están formadas por ignimbritas y tobas.

En el relieve exógeno se incluye a los rasgos que son formados por procesos exógenos destructivos, como el intemperismo, erosión y disolución. También se incluyen los procesos exógenos constructivos como los depósitos fluviales, marinos y eólicos. Dentro de estos relieves podemos encontrar el relieve erosivo fluvial que es el generado por procesos de disección del relieve por la acción de corrientes fluviales, cuyo desarrollo se presenta en los valles que rodean al río Yaqui. El relieve acumulativo fluvial es el que se forma en los depósitos del cauce del río Yaqui, como son las llanuras de inundación, terrazas, etc. El relieve acumulativo proluvial es el que corresponde a los llamados conos de deyección o a abanicos aluviales, que son muy



importantes en la zona y se han clasificado como depósitos de pie de monte. El relieve acumulativo marino que corresponde a los depósitos costeros, como son las barras, medanos costeros, tombolos, cantiles, nichos, playas y bancos. Relieve fluviomarino deltaico, es el relieve causado en general por la acción conjunta del relieve acumulativo fluvial con el relieve acumulativo marino, dando lugar a la formación del delta del río Yaqui (Figura 3).

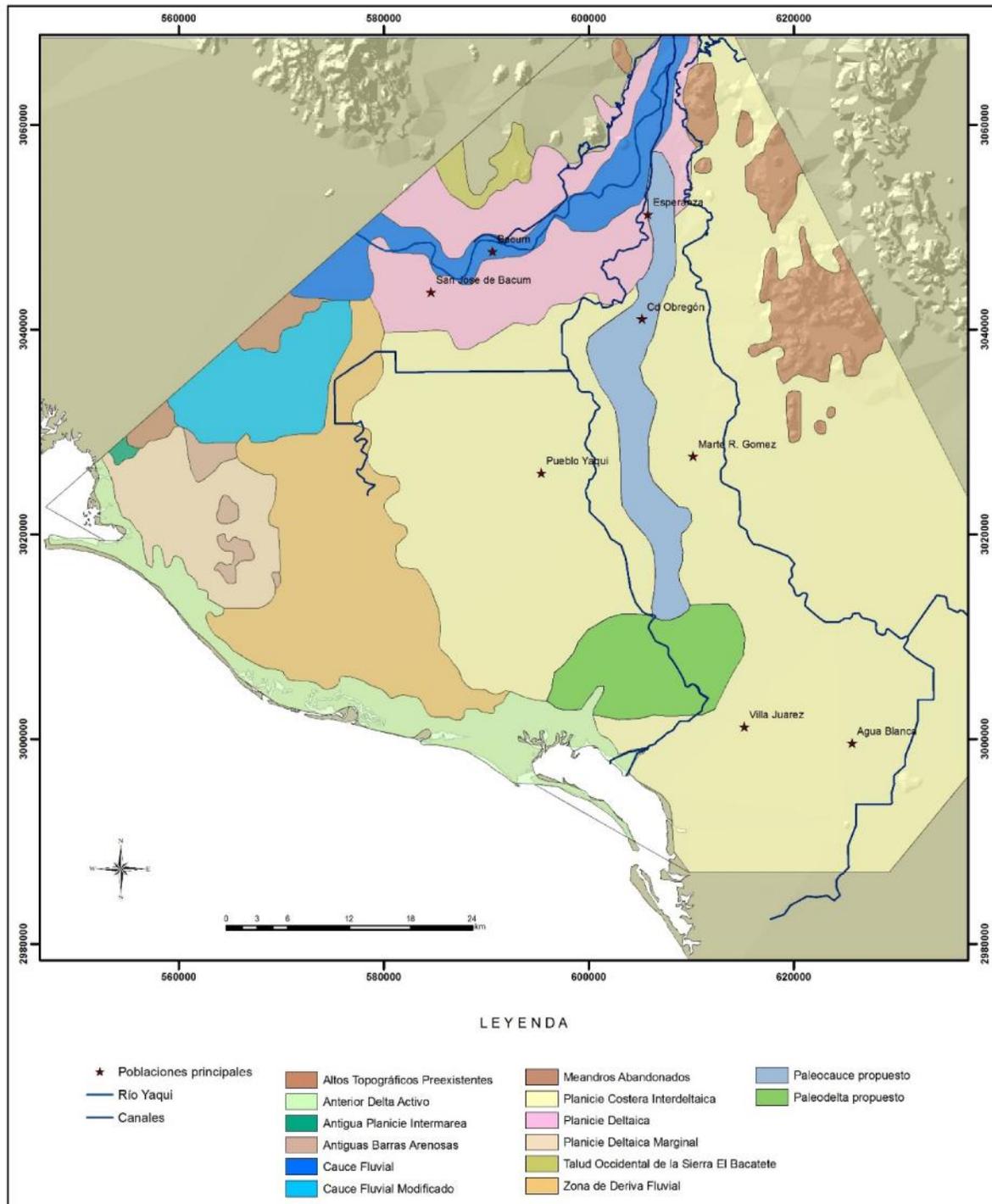


Figura 3. Geomorfología de la cuenca baja del río Yaqui (Gutiérrez H. 2007).



2.8. Contexto geológico regional

Dentro del área de estudio en el valle del río Yaqui, existen unidades estratigráficas cuyas edades varían desde el Cretácico Superior hasta el Holoceno y la nomenclatura tanto formal como informal que se utiliza para las unidades estratigráficas está basada principalmente en los trabajos realizados por el Servicio Geológico Mexicano (antes Consejo de Recursos Minerales) a escala 1:250,000: H12-2 Guaymas, H12-3 Ciudad Obregón y H12-6 Huatabampo. A continuación se enlistan las unidades que afloran en el área de estudio, desde el más antiguo al más reciente: Cretácico Superior (granito-granodiorita); Terciario Oligoceno-Mioceno (tobas e ignimbritas); Terciario Mioceno (conglomerados y volcanoclásticas); Terciario Mioceno (basaltos); Terciario Indiferenciado (volcánicas); Cuaternario - Pleistoceno (conglomerados y areniscas); Reciente (gravas, arenas y arcillas).

2.9. Estratigrafía

La cuenca del Valle del Yaqui se encuentra cubierta casi en su totalidad por rocas ígneas cretácicas y terciarias, conglomerados de fines del Terciario y por depósitos aluviales y residuales del Cuaternario. La secuencia estratigráfica en la región continúa con las manifestaciones volcánicas de fines del Cretácico y del Terciario, períodos en que se originaron una gran diversidad de rocas, si bien la mayor parte de ellas pueden clasificarse dentro de las familias de andesitas, dioritas y riolita-granito. Relacionada con esta actividad ígnea efusiva, se manifestó, también en la zona, la intrusión de cuerpos de naturaleza ácida, de composición granítica.

Posteriormente a la formación de las rocas ígneas aparecen, aún dentro del Terciario, depósitos continentales de la formación Báucarit a los que sobreyacen areniscas y conglomerados.

Los últimos acontecimientos geológicos que efectuaron en la zona fueron la formación de materiales aluviales, depósitos de talud y suelo residual, fenómenos que continúan actualmente.

2.9.1. Cretácico Superior

Ensamble intrusivo superior (KsTpaGr-Gd, KsTeGr-Gd)

Las intrusiones batolíticas de composición granítica-granodiorítica se encuentran distribuidas de forma aislada, principalmente en el flanco occidental de la Sierra Mariquita, en las sierras El Chivato y San Antonio, así como en la porción oriental de la Sierra El Pinito. El batolito presenta variaciones en el color de gris claro-blancuecino a gris-verdoso y rosa, la textura es porfídica y fanerítica de grano medio, constituido de feldespato potásico, albita-oligoclasa, cuarzo, biotita, con minerales de alteración como sericita, clorita y hematita. Este cuerpo batolítico ha sido



fechado por varios investigadores, obteniéndose edades de 64 Ma por los métodos U-Pb, Rb-Sr y Sm-Nd (Wodzicki, 1995), y de 64 ± 3 Ma y 69 ± 1 Ma utilizando el método U-Pb (Anderson y Silver, 1977).

Esta unidad es parte del Batolito Laramide de Sonora (90-40 Ma) definido por Damon *et al.* (1983), como una serie de intrusiones félsicas emplazadas desde el Cretácico Tardío y hasta el Eoceno, los cuales caracterizan al arco magmático mesozoico terciario en Sonora. Estos intrusivos representan la continuación hacia el sur del cinturón batolítico del oeste norteamericano.

2.9.2. Rocas del Terciario

En este período se observa actividad ígnea la cual se manifiesta por medio de coladas lávicas de composición andesítica y riolítica, por el depósito de materiales piroclásticos y por la intrusión de cuerpos graníticos.

Terminada la actividad volcánica, el área fue sometida a un período de fuerte erosión que originó los conglomerados de la Formación Báucarit y las areniscas suprayacentes.

2.9.2.1. Terciario volcánico

En esta unidad se agrupan todas las variedades de rocas volcánicas que se originaron en el Terciario, las que ocupan la mayor parte de las serranías que rodean al valle y cuya composición varía de basalto a andesita y riolita. No fue posible establecer una secuela dentro de estas rocas, en virtud de que no muestran una sucesión litológica y estratigráfica definida, que pueda ser reconocida entre un afloramiento y otro.

Los basaltos y las andesitas son las más abundantes y se presentan como rocas de color gris oscuro a negro e intemperizan frecuentemente en tonos cafés. Entre las diferentes coladas se encuentran derrames de tobas andesíticas de color gris claro a rosado y aglomerados que intemperizan a café rojizo. Hacia la parte superior de la formación son más frecuentes las rocas riolíticas, que se encuentran generalmente formando mesetas y a veces picos aislados. Predominan en esta secuencia las tobas consolidadas, aglomerados y derrames lávicos. Las tobas de color blanco amarillento están generalmente muy consolidadas, los aglomerados de color rosado, presentan fragmentos líticos de 3 a 4 cm. de diámetro, mientras que los derrames riolíticos, cuya coloración varía de gris a rojizo, presentan fenocristales de cuarzo y plagioclasa.



Andesita – toba andesítica (TpaeA-TA)

Dentro del área aflora una serie de secuencias volcánicas de composición principalmente intermedia y ácida constituidas por andesitas, tobas andesíticas, las cuales son correlacionables con el grupo Nacozeni.

Grupo Yécora

Riolita – dacita (To(?)R-Da), ignimbrita – toba riolítica (Tolg-RT)

De edad Oligoceno y Mioceno, este grupo contiene una serie de secuencias volcánicas, volcanoclásticas y piroclásticas de composición principalmente ácida e intermedia, constituida por ignimbritas, tobas riolíticas, riolitas y dacitas. Tienen un color que varía de gris claro a gris rojizo con textura porfídica.

Andesita – dacita (TmA-Da)

Del Mioceno aflora una secuencia volcánica representada por andesitas y dacitas con características de flujos de lava de carácter intermedio y ácido, presentan una textura compacta masiva con matriz afanítica, las andesitas presentan un color café grisáceo con cristales de hornblenda y la dacita se presenta rojiza de textura fanerítica equigranular. Estas rocas pueden ser correlacionadas con las andesitas La Espuela y la unidad dacítica El Mezquite del Mioceno 15.3-22.7 Ma (Mora A.G., 1992) de la Sierra de Santa Úrsula.

2.9.2.2. Formación Báucarit

El nombre de la Formación Báucarit fue propuesto para aquellas rocas constituidas por aglomerados y areniscas de estratificación uniforme que se encuentran en la localidad de Báucarit, Sonora, a lo largo del río Cedros. En la zona, esta formación sobreyace discordantemente a las rocas volcánicas anteriores. Hacia la base de la formación se pueden también observar, interestratificadas con los conglomerados, coladas basálticas y aglomerados mientras que en la parte superior se encuentran algunas capas de areniscas.

Toba riolítica – riolita (TmTR-R), toba riolítica – basalto (TmTR-B)

Dentro del área de estudio la Formación Baucarit está representada en parte por una serie volcánica ácida compuesta por tobas riolíticas y riolitas, su color es pardo que cambia de tonalidad por intemperismo; por lo general esta unidad se encuentra bien consolidada y es correlacionable con la parte superior del conglomerado Báucarit de edad Mioceno. Estas rocas representan una sedimentación continental ligada a la distensión terciaria de Cuencas y Sierras.



2.9.2.3. Derrames lávicos

Basalto – andesita (TmB-A)

Esta secuencia incluye además andesitas basálticas, brechas y aglomerados basálticos estas rocas fueron denominadas "basaltos antiguos" por Johnpeer (1979). Presentan una textura fina y una coloración gris oscuro a negra y generalmente se le encuentra con vesículas rellenas de calcita y sílice, existe un fechamiento de 17.8 ± 5 Ma.

Basalto (TmB)

Del Mioceno Tardío y caracterizados por presentarse como derrames y brechas que varían a andesita basáltica, la textura es siempre afanítica con poco olivino en pequeños cristales, aunque también los hay de carácter toleítico, presentan vesículas parcialmente rellenas por calcita o sílice, Esta unidad puede correlacionarse con el basalto Las Trincheras de la sierra de Santa Úrsula fechados en 8.5 a 10.3 Ma. Esta secuencia es correlacionable con el llamado Basalto Sierra Oscura.

2.9.2.4. Ensamble sedimentario

Sobreyaciendo concordantemente a las rocas anteriormente descritas se encuentra aflorando a lo largo del río Yaqui, aguas abajo del vertedor de la Presa Álvaro Obregón y en el cauce del Arroyo Cedros, entre el Rosario y Quiriego, una formación constituida por una alternancia de conglomerados y areniscas. Los conglomerados se encuentran sobre todo a lo largo del Arroyo Cedros y se presentan como una roca de color amarillento a rojizo muy cementada en la que los fragmentos subredondeados presentan un diámetro de 5 a 30 cm. A la altura de Quiriego, siempre en el cauce del arroyo Cedros, esta formación está constituida por una potente sección de areniscas de grano fino, poco compactadas, en las que observan alternancias de capas limosas y una estratificación bien marcada. Aguas abajo del vertedor de la Presa Álvaro Obregón estas rocas están constituidas por una arenisca de grano grueso algo compactado, en estratos horizontales de 30 a 50 cm. de espesor.

Conglomerado polimíctico-arenisca (TmCgp-Ar), conglomerado polimíctico-basalto (TmCgp-B)

Durante el Mioceno se desarrolló una sedimentación en ambientes de abanicos aluviales, sistemas fluviales y lacustres, influenciados grandemente por una actividad volcánica bimodal correspondiente al grupo Rosario, compuesta por conglomerados polimícticos, areniscas y Basaltos. Su color es pardo que cambia de tonalidad por intemperismo; por lo general esta unidad se encuentra bien consolidada. Estas rocas representan una sedimentación continental



ligada a la distensión terciaria de Cuencas y Sierras.

Conglomerado polimíctico-arenisca (TplCgp-Ar)

Del Plioceno al Holoceno se desarrolla una amplia actividad erosiva y se originan secuencias fluviales y fluviodeltáicas de sedimentos mal consolidados y no consolidados, que están incluidos en el grupo Sonora.

2.9.3. Depósitos aluviales cuaternarios

Continúa la actividad erosiva en este período y expone materiales que se están depositando en el área, estando constituidos por depósitos de talud, materiales aluviales y suelo vegetal. Estos sedimentos son el producto de la destrucción de todas las rocas que se encuentran expuestas a los diversos agentes de la erosión.

Adicional a estos sedimentos, encontramos una secuencia sedimentaria compuesta por conglomerados en asociación con areniscas, dichos conglomerados se observan mal consolidados (**conglomerado polimíctico-arenisca (QptCgp-Ar), conglomerado polimíctico (QptCgp)**).

La granulometría de los depósitos aluviales varía desde grava gruesa y arenas (**grava – arena (Qptgr-ar)**) en los márgenes del río Yaqui y material de tipo aluvial como son **arenas y limos y arcillas (Qhoar, Qholm-ar)** en el resto del valle. También es observable depósitos de litoral que consisten de arena con bioclastos de coral, espículas de equinodermos, gasterópodos, ostrácodos, pelecípodos y esponjas (**Qholi**); además de **material palustre (Qhopa), lacustre (Qhola), eólico (Qhoeo) y aluvión (Qhoal)**.

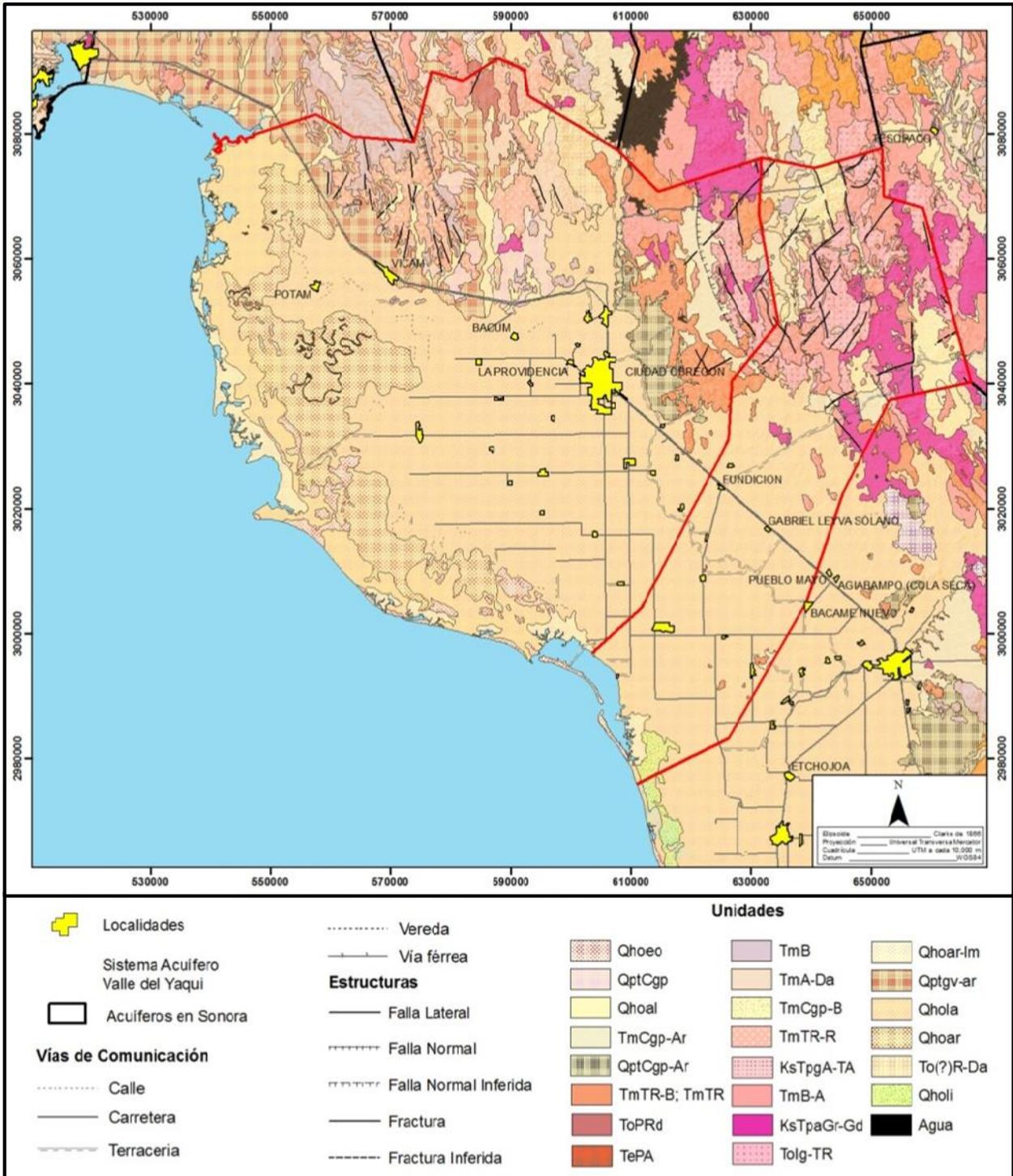


Figura 4. Mapa geológico del área de estudio. Tomado del "Estudio de Impacto por el Cambio Climático en el Avance de la Interfase Marina de los Acuíferos Costeros Valle del Yaqui y Cocoraque" (CONAGUA, UNISON. 2011).

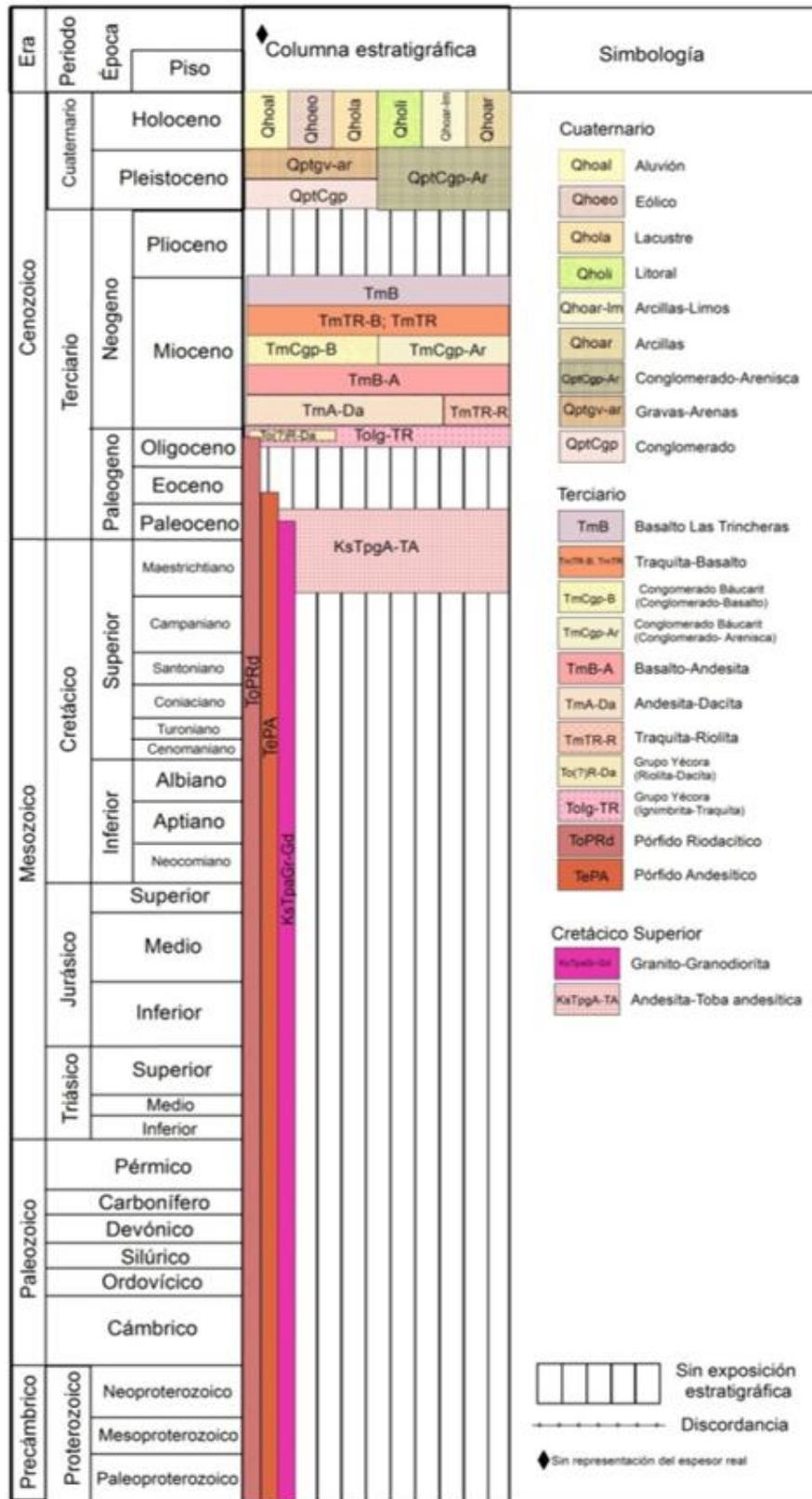


Figura 5. Columna estratigráfica del acuífero del valle río Yaqui. Tomado del "Estudio de Impacto por el Cambio Climático en el Avance de la Interfase Marina de los Acuíferos Costeros Valle del Yaqui y Cocoraque" (CONAGUA, UNISON). 2011.



2.10. Geología estructural

En la zona del acuífero valle del Yaqui, se tienen estructuras principalmente en la parte norte del mismo, teniendo como principal dirección de las fallas NW-SE, aunque también se tiene un gran número de fallas con una dirección perpendiculares a estas, pero son en menor frecuencia. El área de la parte sureste de Sonora es principalmente afectada por el sistema de fallas de San Andrés. Las fallas son principalmente normales, así como un seguimiento o paralelismo con las fracturas que se dan en el mismo.

Se aprecian dos arreglos de fracturas, el más importante coincide con la dirección del rumbo de las rocas del terciario volcánico y de la Formación Báucarit, es decir en dirección casi N-S que manifiestan el evento distensivo del Terciario Medio a Superior, que inició la apertura del golfo de California. El otro arreglo principal, se asocia con lineamientos que al parecer son expresión de fracturas profundas de la corteza, y coincide con la dirección de río Yaqui cuando fluye sobre las porciones elevadas, antes de su salida a la llanura deltaica, en donde cambia de dirección hacia el oeste.

Las mesetas basálticas y volcanes escudo que indican fracturamiento profundo de la corteza, se encuentran en la sierra del Bacatete con orientación NW -SE, que de acuerdo con la literatura (Morán *et al*, 1984), se asocia a los eventos distensivos de la apertura del golfo de California.

El rasgo estructural general E-W encontrado en el área, ha sido también observado más al sur (Fredrikson y Henry, 1972; Mullan, 1978; Henry, 1986), es por ello que se le da una importancia regional. Henry (1986), las ha atribuido a una convergencia oblicua entre las placas Norteamericana y Farallón hace poco menos de 100 Ma. Aun así, este marco tectónico no alcanza a explicar los pliegues de ejes subverticales. En este sentido, es interesante notar que ciertos autores han postulado que en alguna parte del área deben de existir una o varias estructuras fundamentales que yuxtapongan ya sea dos o más 'terrenos tectónicos' al cratón norteamericano (Ortega-Gutiérrez *et al*, 1994). El tipo de acresión de estos 'terrenos' es aún tema de debate, pero las reconstrucciones más aceptadas sugieren que esta porción de México debió haber actuado como una gran zona de cizallamiento de tipo transcurrente durante la apertura del golfo de California (Pilger, 1978). Se sugiere que el sur-oeste del área fue originalmente el marco de una margen continental activa, destruida eventualmente por la colisión de diferentes terrenos tectónicos que yacieron más al sur-oeste, y luego sufrieron las consecuencias de la apertura del Golfo de California.

2.11. Esquema tectónico regional

La parte topográficamente más alta de la cuenca del río Yaqui alcanza 3,200 msnm, en la Sierra Madre Occidental donde nacen los principales escurrimientos, predominan rocas



volcánicas extrusivas de composición ácida a intermedia, generalmente ignimbritas, solo existen pequeñas áreas muy localizadas de basaltos hacia el límite con los Estados Unidos. En la parte media de la cuenca, las principales elevaciones están constituidas por mármoles y calizas silicificadas y rocas intrusivas graníticas de edad Cretácica. En esta parte de la cuenca existen fosas tectónicas, cuyos límites con los otros elementos presentan contrastes topográficamente notables; tal es el caso de la falla El Novillo, que constituye el límite septentrional de la fosa de ese nombre, y que en la parte noroeste de la región delimita un quiebre topográfico que separa relieves de menos de 500 msnm de otros que llegan a superar los 1,700 msnm

El río corre a través de varios elementos tectónicos, cortando macizos rocosos homogéneos o corriendo a lo largo de discontinuidades o fallas; únicamente en un 45% de su desarrollo corre a través de las fosas tectónicas, lo que quiere decir que la orogenia que dio origen a las fosas antes citadas no afectó en forma determinante el antiguo cauce del río. Los mayores gradientes del río se observan dentro de las fosas tectónicas, que es donde se localizan los "rápidos", lo que confirma que el cauce del río dentro de estos elementos es más joven que en el resto de su desarrollo.

Teóricamente, por regla general, los mayores volúmenes de acarreo se localizan en los cauces más antiguos, donde el río tiene mayor tiempo de trabajo. Esto ha sido corroborado por métodos geofísicos, con los que se observó que los mayores espesores de acarreo se localizan en los poblados de Soyopa, Mezquite y Tufanito, donde las rocas constituyen cañones de amplitud menor a 300 m y alturas diversas que no rebasan 500 m desde el cauce; mientras que los menores espesores se localizan en las proximidades de los poblados de Tónichi, La Dura y El Realito, donde por las características geológicas de la roca encajonante (Formación Báucarit), contenida dentro de las fosas tectónicas, los valles labrados son más amplios llegando en ocasiones a cerca de 500 m.

Con el análisis de observaciones geológicas, se puede aseverar que el río Yaqui existía antes del levantamiento tectónico de los intrusivos granodioríticos Cretácicos, habiéndose desarrollado en rocas depositadas por encima de estos intrusivos, ya que generalmente los corta en vez de rodearlos.

Esto confirma la hipótesis de que los cauces labrados fuera de las fosas tectónicas son más antiguos que los que se han desarrollado dentro de estos elementos, y que los espesores de bajas y medianas velocidades detectados por geofísica fuera del cauce del río y que han sido asociadas a roca fracturada, alterada y aluvión, podrían ser los acarreo acumulados en el antiguo cauce del río (paleocauce).



2.12. Geología del subsuelo

En la zona se han llevado a cabo diferentes estudios para conocer la geología del subsuelo, se cuenta con cortes litológicos de pozos, sondeos eléctricos verticales y estudios gravimétricos entre otros. En el estudio de UNISON-CONAGUA 2003, mencionan que del análisis de diferentes métodos determinaron que la distribución del comportamiento de la resistividad a diferentes profundidades muestra una distribución heterogénea para los materiales que albergan al sistema acuífero, para diferentes profundidades se encontraron amplias zonas con valores inferiores a 5 ohm-m, típico de materiales arcillosos o bien, saturados con agua de mala calidad. Además deducen que el subsuelo del valle del Yaqui está conformado por una gran fosa tectónica (fosa Obregón) orientada norte-sur, el arroyo Cocoraque representa una fosa tectónica que pierde continuidad hacia el suroeste, los espesores de los materiales de relleno superan los 1000 metros, pero el espesor del acuífero es del orden de los 200 a 300 metros.



3. REVISIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS

La geofísica es la ciencia que estudia los fenómenos físicos que se producen en nuestro planeta, tales como la gravedad de la Tierra, la propagación de ondas mecánicas en la corteza terrestre, la transmisión de ondas electromagnéticas a través de medios materiales. Así, ella puede definirse como la aplicación de la física y la geología al estudio de los materiales que conforman la corteza terrestre y de los campos de fuerza que surgen de ella y que se hacen manifiestos en el medio que la rodea.

Las prospecciones geofísicas son metodologías que se desarrollan mediante equipos de medición sofisticados y a través de los cuales se buscan los efectos producidos por rocas y minerales en las denominadas áreas anómalas, siendo las más estudiadas: la fuerza de atracción gravitatoria, la desintegración radiactiva, las corrientes eléctricas espontáneas, la resistividad de los suelos, la rapidez con la que viajan las ondas sísmicas, etc.

De ese modo, el mapeo de una anomalía geofísica puede significar el descubrimiento de una formación geológica apta para un fin específico. Además, la información detallada obtenida desde una prospección permite caracterizar cuantitativamente el terreno bajo análisis de acuerdo con ciertos parámetros físicos que se establecen como referencia, lo cual se torna en un valioso apoyo para tomar decisiones correctas relacionadas con el uso del suelo.

3.1. El método de sondeos electromagnéticos transitorios

Todos los métodos inductivos EM se basan en un principio físico que es común para todos: un campo primario (ya sea natural o artificial) se hace incidir sobre la Tierra. Este puede ser hecho por el hombre o por fuentes naturales. En este caso, la geometría de la onda puede ser plana y generada por un transmisor dipolar (TX). Pero esta, al ser una onda variable, tiene predefinido su comportamiento en el tiempo a partir de un frecuencia armónica o un mediante un pulso. Adicionalmente, aparece en escena un campo secundario, inducido por el campo principal antes mencionado. Se inducen así corrientes parásitas, cambiando la amplitud y la fase de la onda resultante que se trata de monitorear a través de un receptor (RX).

En una primera aproximación, la Tierra se puede considerar como una estructura conductora mientras que el aire es un cuerpo con resistividad muy alta o conductividad nula.

El campo electromagnético total que se mide a través del receptor (RX) es en realidad la suma de los campos primario y secundario. Mediciones superficiales o en la cercanía de pozos rastrean el campo eléctrico total E y/o los campos magnéticos H , razón por la que se coloca el receptor RX en línea o en un sistema de puntos que da origen a una grid o rejilla de datos. Tales mediciones se pueden hacer como una función de la frecuencia o el tiempo (Figura 5).

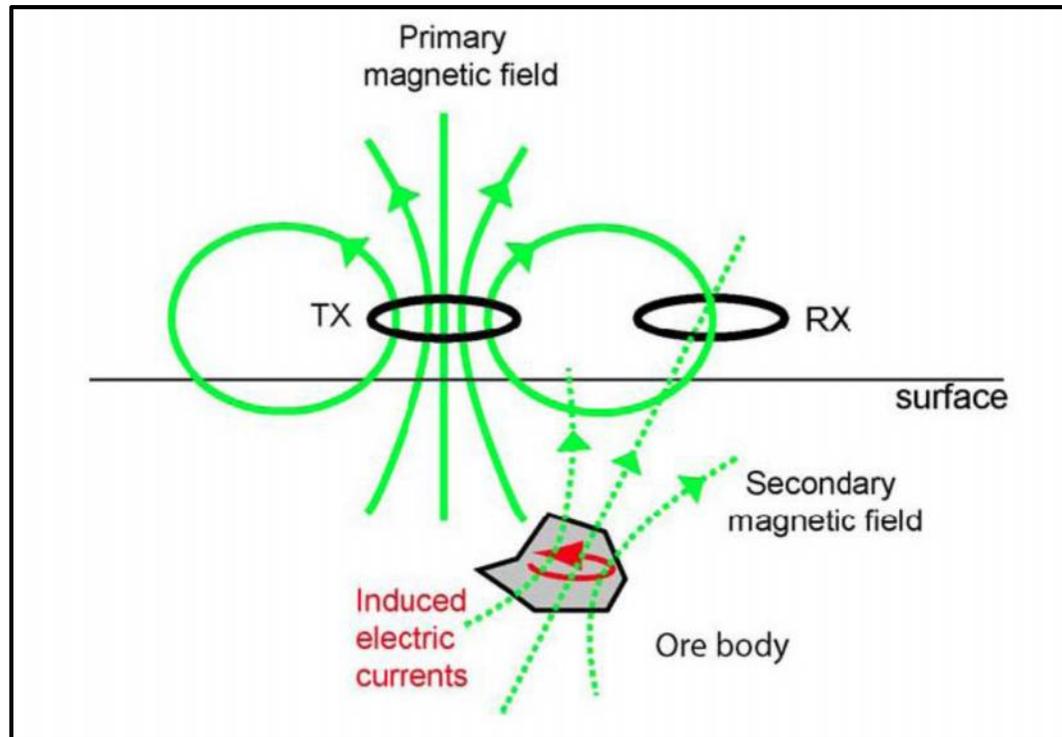


Figura 6. Representación de un fenómeno electromagnético.

3.1.1. Detalles sobre la técnica de prospección

Un problema significativo con muchas prospecciones electromagnéticas es que un campo secundario comparativamente pequeño debe ser censado en presencia de un campo primario muy grande, lo cual conlleva una consecuente disminución de precisión. Este problema es superado mediante los sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo, algunas veces llamados "Campos Transientes o Pulsos EM", por utilizar un campo primario que no es continuo sino más bien conformado por una serie de pulsos separados por ciertos periodos de inactividad.

Así, el campo secundario inducido por el primario es sólo medido durante el intervalo en que el primario se encuentra ausente. De ese modo, las corrientes parásitas inducidas en un conductor sub-superficial tienden a difundirse interiormente hacia su centro cuando el campo inducido es disipado gradualmente por las pérdidas de calor provenientes de la resistividad del material. Sin embargo, dentro de cuerpos altamente conductores, las corrientes de Eddy circulan solamente alrededor del contorno del cuerpo, decayendo por ello de forma muy lenta. Midiéndose entonces la tasa de decaimiento de las corrientes parásitas menguantes se logra un medio no sólo para localizar cuerpos anómalos conductivos, sino también para estimar su conductividad (Figura 7).

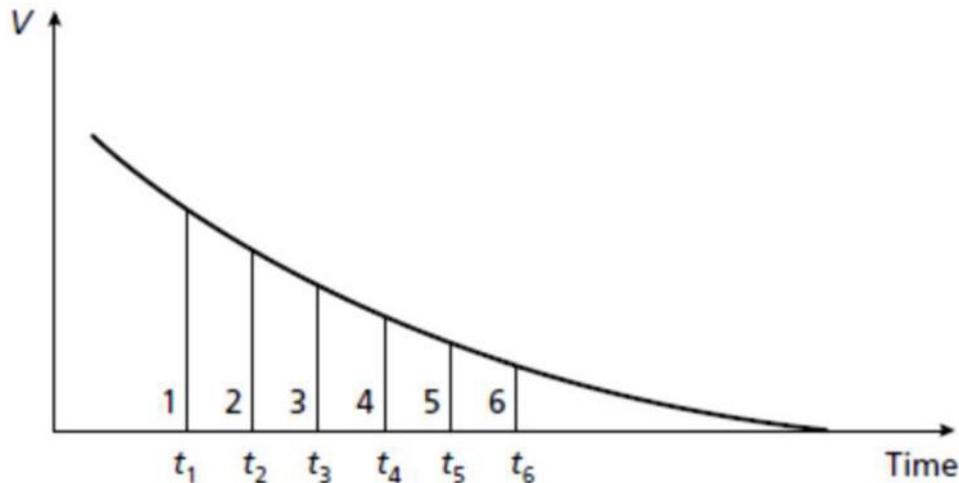


Figura 7. Representación del decaimiento temporal de la señal electromagnética en un sondeo TEM.

Con esto, vale la pena destacar que el análisis del decaimiento del campo secundario es equivalente a la evaluación de la respuesta provocada por una onda electromagnética continua constituida por un determinado número de frecuencias, con lo que el procesamiento de un sondeo TEM conduce necesariamente a las mismas relaciones de tratamiento que para ondas continuas EM.

Precisamente, mediciones repetidas pueden programarse en una modalidad análoga al sondeo de ondas sísmicas para efectos de mejorar la razón de señal/ruido.

El método electromagnético es una técnica de sondeo versátil y eficiente, pero sufre de algunos inconvenientes, uno de los más destacables radica en su capacidad de penetración limitada.

La técnica de sondeo TDEM o "time domain electromagnetic" es un método para la prospección del subsuelo muy útil por su sensibilidad para revelar contrastes finos de resistividades, superar la necesidad de campos primarios elevados, así como ayudar en la corrección del Static Shift que se requiere en el método de profundidad magnetoteléurico.

El equipo necesario para la realización de este tipo de sondeos comprende: un sistema de cables y conectores que conforman un lazo transmisor desde el cual se envían pulsos transitorios electromagnéticos mediante una Unidad de control y procesamiento Central que, auxiliada por una batería de alimentación provoca una señal que busca registrarse en una bobina conductora central (Figura 8).

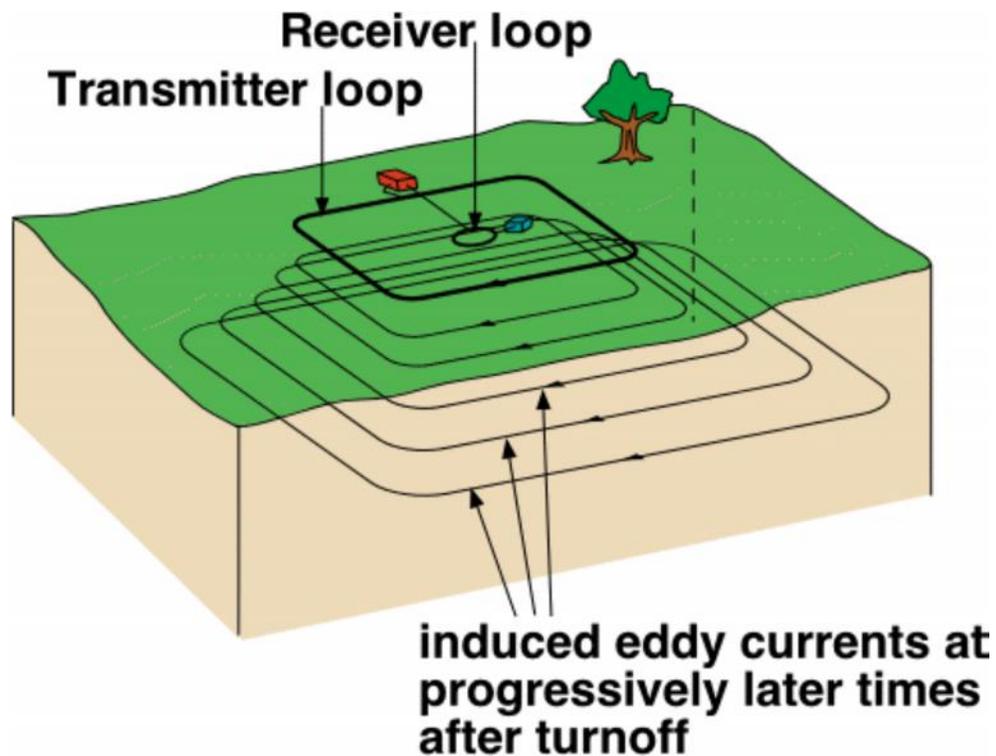


Figura 8. Esquema del circuito que se instala para un sondeo TEM.

3.2. Gravimetría

El método gravimétrico de prospección, se basa en mediciones de las variaciones espaciales de la gravedad causadas por cambios laterales en la densidad de los materiales. El campo gravitatorio terrestre, o gravedad, no es más que un caso particular de la Ley de Atracción Universal por lo que el peso de un cuerpo, es igual a la atracción de la Tierra sobre dicho cuerpo, es decir, aplicando la Ley de Newton:

$$g = G (M * m / r^2)$$

Donde m y M son las masas del cuerpo considerado y de la Tierra respectivamente; r el radio terrestre; G la constante gravitacional universal, igual a $20/3 * 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} * \text{s}^2$ y g la aceleración de la gravedad.

La prospección gravimétrica consiste en medir g aplicando a los valores brutos (observados) un cierto número de correcciones para eliminar la influencia de otros cuerpos celestes, efectos superficiales (topografía, latitud, elevación, etc.) y forma de la tierra con objeto de obtener las anomalías cuyo origen se deba únicamente a variaciones de densidad en el subsuelo. Este método arroja excelentes resultados en el estudio de cuencas sedimentarias terciarias-



cuaternarias como es el caso del delta de río Yaqui, donde el contraste de propiedades físicas (densidad) entre relleno aluvial-basamento es considerable.

Definiciones de gravedad

La gravedad normal g_n , es decir el campo gravitacional normal de la Tierra se refiere al elipsoide de rotación, se calcula con la fórmula internacional de gravedad, la cual se basa en un valor absoluto de $g = 981.274 \text{ cm/s}^2$ (gal):

$$g_n = 978.049 (1 + 0.0052884 \text{ sen}^2 \phi - 0.0000059 \text{ sen}^2 2\phi)$$

Donde:

ϕ = latitud geográfica.

La gravedad en la estación base (g_B) se refiere al valor de la gravedad medido inicialmente, o al promedio de todas las mediciones de gravedad efectuadas en intervalos de tiempo definidos, durante el período de tiempo en que se realizaron todas las mediciones:

$$g_B = (g_{B1} + g_{B2} + g_{B3} + \dots + g_{Bn}) / n$$

Por último, la gravedad en la estación de observación o gravedad observada (g_{OB}) se refiere al valor de gravedad medido en cada estación de observación.

3.2.1. Correcciones

3.2.1.1. Corrección por deriva instrumental (g_{DI})

Cuando se repite una medición por un gravímetro en el mismo lugar y bajo las mismas circunstancias varias veces en el mismo día, se obtienen distintas lecturas, variando unos 0.001 mGal. Estas variaciones se deben a los resortes y fibras de torsión no perfectamente elásticos de los gravímetros, al efecto de la temperatura y a la influencia de las mareas. La deriva del instrumento se corrige observando los valores de la gravedad correspondientes a la estación base en intervalos discretos de tiempo durante el intervalo de tiempo en que se realizan todas las mediciones. Es importante señalar que la primera medición y la última se deben de realizar en la estación base.

Se grafican las variaciones de gravedad observadas en la estación base construyendo una curva de las variaciones de gravedad en la estación base en función del tiempo. Se elige un valor como valor de referencia, por ejemplo el primero observado en la estación base. Los valores para corregir los valores observados, son las variaciones de la gravedad con respecto al valor



de referencia en los instantes de medición en las estaciones de observación. Se les encuentra por interpolación. Se toma la variación "valor interpolado–valor de referencia" correspondiente a la estación base en el instante de medición en la estación de observación. En caso de que el valor interpolado sea mayor al valor de referencia se resta la variación del valor observado en la respectiva estación de observación, por el contrario, si el valor interpolado es menor al valor de referencia se suma la variación del valor observado en la respectiva estación de observación. Inicialmente, se calcula la constante por deriva de la siguiente manera:

$$\text{Constante por deriva (c1)} = \text{valor de g en (mGals)} / \text{tiempo (min, h)} = \text{mGals/tiempo}$$

Luego, para eliminar tiempo:

$$\text{Constante por deriva (c1)} = (\text{mGals/tiempo}) * \text{tiempo} = \text{mGals}$$

$$\text{Corrección por deriva (g2)} = \text{gOB} + \text{c1}$$

3.2.1.2. Corrección topográfica (C_t)

Se considera el efecto de atracción de masa dado por la topografía (valles y montañas) de alrededor de la estación, tanto las situadas por encima de la estación como las depresiones situadas debajo de la estación, pero como este material en realidad no existe, debemos sumar su atracción para compensar (Figura 9).

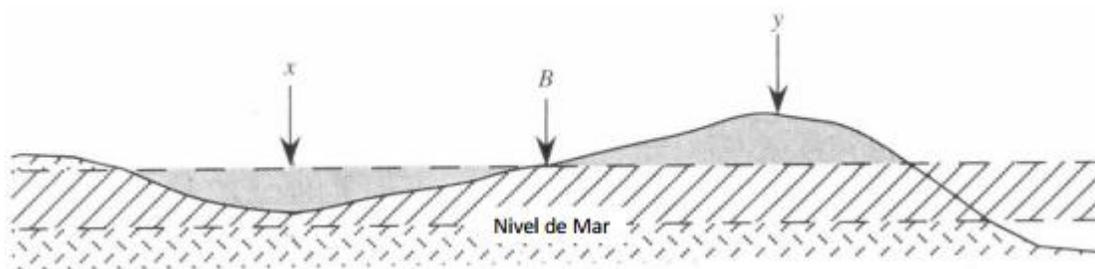


Figura 9. Un ejemplo de corrección de terreno requiere un región x y y debido a la natural simplicidad de la corrección de Bouguer aplicada en el punto B (Burger, 1992).

Por lo tanto, la corrección topográfica se suma siempre, ya se trate de un valle o de una montaña, ya que éstos generan cierta atracción a la estación tomada. Esta corrección se obtiene usando unos gráficos que consisten en una serie de círculos concéntricos alrededor de la estación dividida en sectores, como indica la Figura 10. Estos gráficos se sobreponen al mapa



topográfico, de donde se deduce dicha altura media y con ayuda de unas tablas ya calculadas por Hammer (1939) se hallan los efectos gravimétricos debido a cada uno de los prismas que tienen de base estos sectores y altura.

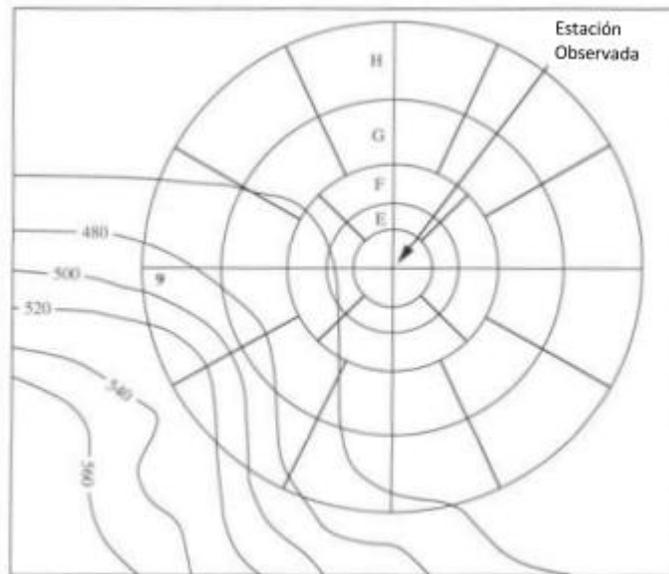


Figura 10. Plantilla de Hammer (Burger, 1992).

3.2.1.3. Corrección por latitud (dg/d)

La fuerza centrífuga debida a la rotación de la Tierra y su aplanamiento causa una variación de g con la latitud. Así, g vale 978,000 mGals en el Ecuador y 983,000 mGals en los Polos.

A lo largo de un meridiano, la variación o constante de latitud C.L. (dg/d) de g viene dada por:

$$C.L. = (0.0081 * \sin 2 \theta) \text{ mGals} / 10 \text{ m de distancia N-S}$$

Donde:

θ = latitud geográfica de la estación base.

Esta variación, nula en el Ecuador ($\theta = 0$) y en los Polos ($2\theta = 180^\circ$), alcanza un valor de 0.1 mGal por cada 123 m de desplazamiento en dirección N-S a los 45° de latitud.

3.2.1.4. Corrección por altura (elevación)

La intensidad de la gravedad varía en relación inversa al cuadrado de la distancia 'Centro de la Tierra- Estación de observación'. Refiriendo la variación de la gravedad al modelo esférico de la Tierra en reposo, el nivel de referencia dista 6,367.5 km (igual al radio de la Tierra) respecto al centro de la Tierra.



$$C.A. = 2 \cdot \frac{M_{Tierra}}{(r_{Tierra})^3} \cdot h = h \cdot 0.3086 \text{ mGal} / \text{m}$$

Donde:

$$= \text{constante de gravitación} = 6.67 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$M_{Tierra} = 5.977 \times 10^{27} \text{ g}$$

$$r_{Tierra} = 6,367.5 \text{ km}$$

h = altura ó distancia acumulada (msnm)

C.A. recibe un signo positivo para estaciones de observación situadas encima del nivel de referencia y signo negativo para las situadas debajo del nivel de referencia.

Aplicando el modelo del elipsoide terrestre resultaría un valor de corrección, que coincide con el valor introducido en los tres primeros decimales. Para lograr una precisión de 0.01 mGal para las observaciones gravimétricas, las diferencias de altura con respecto al nivel del mar deberían ser conocidas con un error menor a 4 cm.

Al efecto de la altura se le denomina efecto de aire libre, puesto que las masas de roca presentes o no, entre el nivel de referencia y el nivel de la estación de observación no influyen. Así, tenemos que:

Anomalía de aire libre o de Faye (A.A.L.) = correc. por latitud (C.L.) + correc. por altura (C.A.), mGals (estaciones de observación encima del nivel del mar)

Anomalía de aire libre (A.A.L.) = correc. por latitud (C.L.) - correc. por altura (C.A.), mGals (estaciones de observación debajo del nivel del mar)

3.2.1.5. Corrección de Bouguer (C.B.)

La Corrección de la Losa de Bouguer elimina el efecto de las masas de roca ubicadas entre el nivel de referencia y la estación de observación. Las masas de roca ejercen una atracción gravitatoria extra en una estación de observación situada a una altura mayor a la de la estación base. El incremento esperado de la atracción gravitatoria debido a las rocas ubicadas entre el nivel de referencia y el nivel de la estación de observación, a menudo se modela utilizando la hipótesis de que se puede aproximar la roca con una losa horizontal de dimensiones infinitas y de densidad uniforme, cuyo piso coincide con el nivel de referencia y cuyo techo está al nivel de la estación de observación.

Para cuantificar el efecto de Bouguer se emplea la fórmula siguiente:

$$\text{Corrección de Bouguer (C.B.)} = 2 \cdot (3.14159) \cdot \rho \cdot h \text{ (mGal)} =$$

$$\text{Corrección de Bouguer (C.B.)} = 0.04191 \cdot \rho \cdot h \text{ (mGal)}$$



Donde:

= constante de gravitación = $6.67 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-2}$

= densidad de las masas de rocas ubicadas entre el nivel de referencia y el de la estación de observación (g/cm^3)

h = diferencia de altura entre el nivel de referencia y el de la estación de observación (m)

La corrección con la losa de Bouguer, se resta del valor observado en la estación de observación, en el caso que la estación de observación esté por encima de la estación base, y se suma al valor observado en caso de que la estación de observación se sitúe por debajo del nivel de referencia. Referente a los signos, la corrección por altura o de aire libre, siempre lleva el signo opuesto al signo aplicado a la corrección de la losa de Bouguer.

La corrección con la losa de Bouguer se basa en una densidad uniforme, que se supone para las masas rocosas ubicadas entre el nivel de referencia y el nivel de la estación de observación. La mayoría de los casos reales no cumple esta condición. Por ejemplo, en un área con rocas sedimentarias, constituida por una secuencia de estratos horizontales de distintas densidades, se puede modificar la fórmula para la corrección de Bouguer de la manera siguiente:

C.B. = $0.04191 (d_1 \times a_1 + d_2 \times a_2 + d_3 \times a_3 + \dots + d_i \times a_i)$ (mGal)

Donde:

d_1 a d_i = densidades de los estratos 1 a i

a_1 a a_i = ancho (potencia) de los estratos 1 a i

La anomalía de Bouguer (A.B.) se calcula de la siguiente manera:

Anomalía de Bouguer (A.B.) = anomalía de aire libre (A.A.L.) –

Corrección de Bouguer (C.B.), mGals

3.2.2. Separación regional-residual

En el valor de la gravedad de Bouguer se combinan los efectos de muchas características geológicas. Cualquier patrón de variación visto en un mapa de gravedad de Bouguer, es la suma de las atracciones de las fuentes locales, cercanas o distantes. Es imposible medir anomalías de alguna fuente, que no sean afectadas por otras anomalías. Ciertamente, en ocasiones una fuente es tan dominante que la distorsión de su anomalía a causa de otras anomalías es menor. En otros lugares, anomalías que indican estructuras de interés particular, casi siempre están completamente ocultas.

Los geofísicos han aportado mucha información acerca del problema relacionado con la separación de anomalías locales y residuales. Sin embargo, no hay forma de realizar una separación perfecta. Los geofísicos han desarrollado métodos para la separación de



características principales de anomalías diferentes. Estos métodos son ampliamente empleados para hacer más claro el estudio de anomalías ocultas, las cuales normalmente son muy difíciles de detectar. A continuación, se explican brevemente los métodos del suavizado de perfiles y contornos de separación, pero hay que tomar en cuenta que existen también otros métodos como el computado de pesos promedio y computado de anomalías causadas por fuentes previamente conocidas.

Las anomalías locales y regionales pueden ser separadas por suavizado de la siguiente manera. Primero, el geofísico debe separar a partir de la apariencia del perfil o del mapa de contornos, la parte regional que no está afectada por irregularidades locales. Esto se realiza efectuando un bosquejo de las líneas que pasan a través de las variaciones locales y conectan sólo las partes más curvas del perfil o línea de contorno. En la Figura 11 se observa como la línea punteada conecta sólo las partes del perfil que representan una variación regional, de acuerdo al juicio del geofísico. El valor regional de la gravedad (Ag_R) puede entonces ser leído de la línea punteada al pasar por cada estación de observación. Estos valores son restados de los valores de la gravedad de Bouguer en esos puntos para obtener los valores locales de la gravedad (Ag_L) a lo largo del perfil.

$$Ag_L = Ag_B - Ag_R$$

Entonces, estos valores se grafican, para mostrar por separado la anomalía de la gravedad local.

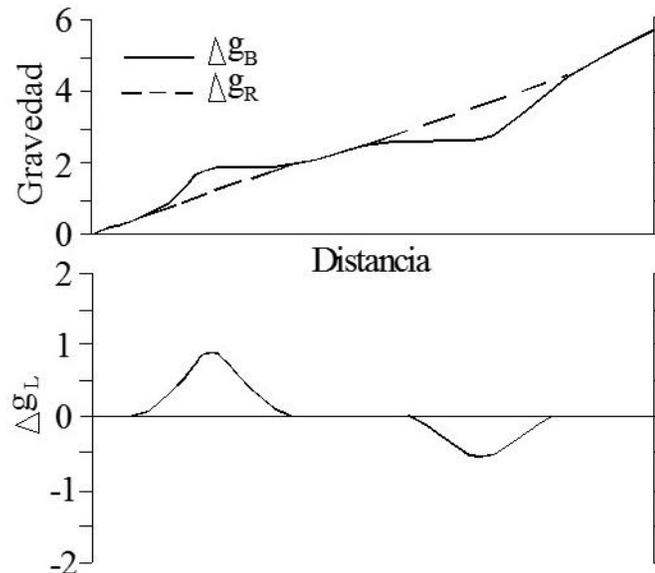


Figura 11. Suavizando la gráfica del perfil de la gravedad de Bouguer (Ug), obtenemos un perfil regional (Ug_R), del cual calculamos la anomalía del perfil residual (Ug_L), en la que se ven líneas que sobresalen (residual) o irregularidades del perfil regional.

Cabe señalar que no existe una forma exacta de trazar la línea punteada. Es difícil que dos geofísicos coincidan exactamente en el trazo de la línea. Pero es posible que dos juicios coincidan, cuando el patrón regional es más ancho y las anomalías simples locales son fáciles de reconocer. Por el contrario, se tendrán muchas diferencias de opinión, cuando las anomalías locales sean pequeñas y las fuentes de dimensiones intermedias, aunadas al patrón regional.

En la Figura 12 se tiene un ejemplo de suavizado de contornos en un mapa de gravedad de Bouguer. Aquí se puede observar que en algunas partes las líneas de contornos son más curvas que otras. Estas curvas también representan irregularidades locales. En la Figura 12a se muestran las líneas punteadas que pasan por alto las irregularidades locales, sin embargo, se unen suavemente con cada uno de los contornos de la gravedad de Bouguer. En la Figura 12b se observan únicamente las líneas punteadas para señalar el campo de la anomalía regional. El valor de la anomalía regional (Ag_R) se puede encontrar por interpolación entre las líneas punteadas en cada estación de observación. Entonces podemos utilizar este valor y el correspondiente a la gravedad de Bouguer (Ag_B) para calcular la gravedad local (Ag_L) con la ecuación: $Ag_L = Ag_B - Ag_R$, para cada estación de observación. Estos valores se trazan (fig. 12c) para trazar el mapa que muestra las anomalías locales de gravedad.

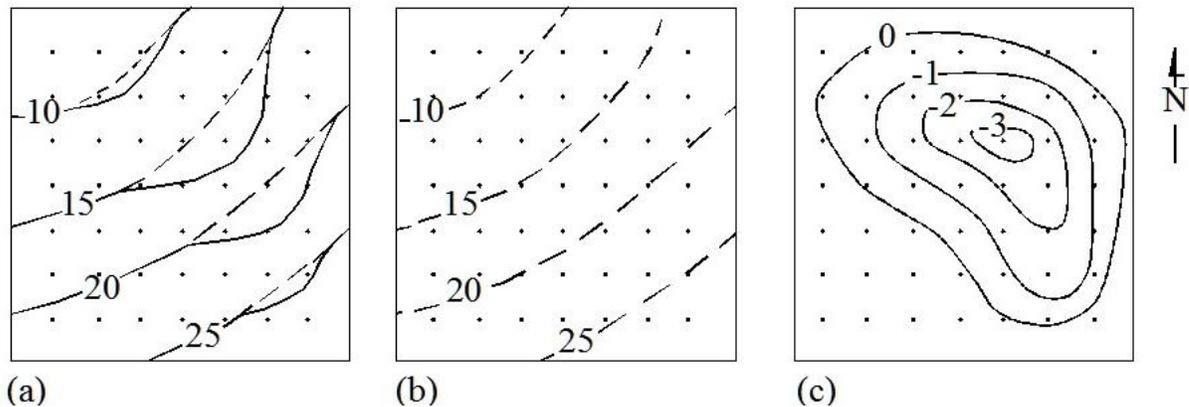


Figura 12. (a) Las líneas suavizadas de la gravedad de Bouguer (contínuas) fueron obtenidas de las líneas de la gravedad regional (punteadas en a y b). Para obtener los valores de la anomalía regional correspondientes a los valores de la gravedad de Bouguer, interpolamos en todos los puntos del mapa (b), calculamos los valores de la anomalía residual y los dibujamos en otro mapa (c), que muestra los patrones de la variación de la anomalía residual.

No se puede esperar que el suavizado de contornos, al igual que el de perfiles, separen exactamente las anomalías locales y regionales. Nadie sabe con precisión, exactamente donde trazar cada contorno regional y al igual que en los perfiles, es difícil que dos resultados sean



exactamente iguales. En estudios donde existen patrones relativamente simples, los mapas de contornos realizados por diferentes geofísicos no difieren mucho uno del otro. Sólo cuando los patrones del contorno se vuelven complicados, ocurren diferencias de opiniones significantes.

La separación de anomalías regionales y locales por suavizado de contornos, es una técnica muy tardada. Este método es imparcial para el análisis de patrones complicados de la variación de la gravedad de Bouguer en áreas muy extensas. Los esquemas para la estimación de los valores de las anomalías regionales en una localidad donde existe un promedio de los valores del área circundante, son de mayor utilidad. Debido a que estos esquemas han sido programados para procesarse en programas de computadora, los cálculos necesarios pueden efectuarse rápidamente para mapas que abarcan grandes extensiones de área.

La gran variedad de esquemas de promedios pueden ser aplicados con menor dificultad si los valores de la gravedad de Bouguer son conocidos en un espaciamiento de intervalos sobre un área. Para la mayoría de las mediciones de la gravedad, las mediciones efectuadas a lo largo de caminos difíciles o en otros lugares, provocan espaciamentos irregulares. Por lo tanto, es comúnmente práctico determinar valores de la anomalía de Bouguer en enrejados cuadrados de puntos, antes de tratar de separar las anomalías regionales y locales. Esto se puede realizar dibujando un enrejado apropiado de puntos o intersecciones de líneas sobre un mapa de contornos de la gravedad de Bouguer. Entonces el valor de cada punto o línea de intersección puede ser encontrado por interpolación. El espaciamiento debe de ser escogido, de manera que todos los patrones de los contornos puedan ser reproducidos de los valores del enrejado. Debido al tiempo que requiere esta técnica para interpolar cada valor del enrejado, se han preparado programas de computadora para este propósito. Cuando un valor de la gravedad de Bouguer dado y las posiciones de las estaciones de observación son irregulares, la computadora escoge el lugar más cercano a cada punto del enrejado y efectúa la interpolación.

3.2.3. Anomalía residual

El procedimiento directo, en la interpretación cuantitativa de las anomalías residuales, se basa en la suposición de que el basamento es de una densidad uniforme. Esto es particularmente relevante cuando la interface entre dos materiales de diferente densidad ha sido identificada por medios de técnicas ajenas a la gravimetría. El objetivo en estos casos, es determinar el relieve del basamento, comparado con las variaciones observadas en los valores de las anomalías residuales. El método usual es calcular el basamento equivalente a determinada profundidad y remplazarlo por la superficie topográfica (Grant y West, 1965).



Para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$G_{RES} = 2 \quad G \quad h$$

Donde:

G_{RES} : Anomalía residual

G: Contante de gravitación universal (6.67×10^{-8} dinas cm^2 / g^2)

: Constante de densidad

h: Elevación de la estación

Dicho esto, cuando hablamos de la interpretación cuantitativa de anomalías residuales, nos referimos a que estas representan el relieve del basamento de densidad uniforme a determinada profundidad, el cual esta arropado por una capa de materiales con características físicas diferentes (densidad), por lo que existe un contraste entre ambas unidades.

Basándonos en lo anterior, podemos considerar el área de estudio con una similitud a lo descrito, ya que tenemos todo el paquete de relleno sedimentario en la cuenca en contraste del basamento que aflora en la sierra del Bacatete.

3.2.4. Interpretación cualitativa y cuantitativa

Comúnmente en la práctica, los datos de la gravedad y de otros campos potenciales son adquiridos a lo largo de series de perfiles paralelos. De esta manera, los datos pueden ser vistos o interpretados como perfiles o en dos direcciones como mapas isoanómalos de contornos. Para un grupo de un gran número de datos, el uso de la computadora para la elaboración de contornos es muy común debido a que el enrejado es un factor necesario al momento de efectuar los contornos y provee datos en una forma fácil al momento de realizar la separación de las anomalías residuales y regionales.

La presentación y análisis de los datos en forma de perfil tiene algunas ventajas. La interpretación de perfiles es teóricamente válida si la fuente de la anomalía es perpendicular al perfil y en dos dimensiones. En la práctica, la interpretación en dos dimensiones es considerada razonable, cuando los contornos de la anomalía son alargados en dirección horizontal, de manera que la longitud en esa dirección es al menos dos veces el espesor de la anomalía. La interpretación de perfiles es también utilizada como paso inicial para la modelación en tres dimensiones de mapas de curvas isoanómalas.

El objetivo de la interpretación gravimétrica es deducir de varias características anómalas, la localización y forma de estructuras subterráneas las cuales provocan disturbios en la gravedad. Para este propósito, los datos tienen que ser analizados por técnicas confiables de interpretación, cuya selección es a veces difícil.

La prospección gravimétrica es ante todo un método de reconocimiento, y la interpretación cuantitativa, en el caso de una gran cuenca sedimentaria en donde no existe ninguna perforación, es prácticamente imposible. En estas condiciones hay que limitarse a efectuar una interpretación cualitativa que permita delimitar las zonas donde vale la pena proseguir los trabajos de investigación. Una vez efectuadas las primeras perforaciones, se conocen las líneas generales de la geología de la cuenca, y es posible emprender una interpretación cuantitativa.

Cuando se efectúan los estudios de detalle (estructura en una cuenca sedimentaria, zonas de trituración, etc.), se suele tener al comienzo del trabajo elementos de juicio suficientes para proceder inmediatamente a una interpretación cuantitativa.

Una interpretación rápida de un mapa gravimétrico de reconocimiento se puede realizar recordando que las anomalías positivas debidas a un exceso de masa corresponden a coladas de lava, a engrosamientos de las series calizas, a anticlinales calcáreos ó a levantamientos del zócalo; las anomalías negativas hay que atribuir las a engrosamientos de las series arenosas, areniscas, arcillas o margas y también a depósitos de sal. También hay que tener en cuenta que las anomalías superficiales son más estrechas que las de origen profundo (Figura 13).

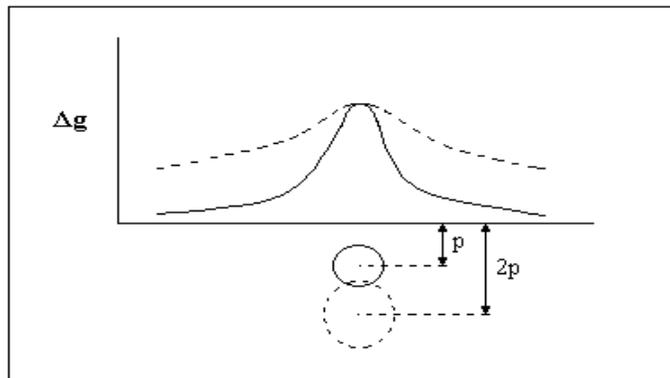


Figura 13. Para una misma intensidad de anomalía, sus lados son tanto más empinados cuánto más superficial es su origen (caso de un cilindro horizontal).

La interpretación cuantitativa se realiza partiendo del mapa de anomalías residuales o del de gradiente vertical. El trabajo se efectúa calculando por tanteo anomalías teóricas idénticas a las observadas, o bien con ayuda de ábacos. Este último método es el más empleado, pues actualmente existen ábacos para todas las formas geométricas sencillas. La interpretación comienza por la clasificación de los terrenos en dos o tres grupos, de acuerdo con su densidad media, distinta para cada uno de los grupos. El cálculo de estas densidades medias se hace, de ser posible, partiendo de medidas en muestras, por calibrado en una perforación o por el registro de una testificación de densidades.

3.2.5. Ambigüedades en interpretaciones gravimétricas

Existen dos características del campo gravitatorio, las cuales hacen que una interpretación sea casi imposible. La primera es que el valor medido de la gravedad (g) y después la anomalía reducida (Ag_B) en cualquier estación, representa el efecto superpuesto de muchas masas distribuidas a varias profundidades. El mapa de gravedad de Bouguer casi nunca representa una fotografía de una anomalía simple, sino que prácticamente siempre, es una combinación relativa de anomalías de forma y espesor cuyas fuentes causantes están a diferentes profundidades. La interpretación puede, por lo tanto, sólo proceder después de que las contribuciones de las diferentes fuentes sean separadas por diferentes técnicas.

La segunda y más seria dificultad en la interpretación gravimétrica, es la determinación mediante el efecto, el cual es un problema inverso de la teoría del campo de potencial. Para una distribución de masas dada, es fácil determinar su efecto de gravedad, pero el problema inverso no tiene solución única. Para una distribución de anomalía de gravedad dada cerca de o en la superficie de la Tierra, puede ser encontrado un número infinito de distribución de masas, que producen la misma anomalía.

La Figura 14 muestra como una anomalía de gravedad dada puede ser explicada por cualquiera de las distribuciones alternativas de masas (Casos 1-3) mostrando un contraste de densidad diferente (ρ), con respecto al material circundante. La misma Figura 14, también muestra otro tipo de ambigüedades que suceden con la información acerca del contraste de densidad. Si asumimos que la anomalía resulta de un cuerpo de forma esférica, varios tipos de interpretaciones de la medida de la esfera son posibles, aunque únicamente se pueda determinar la masa anómala (producto, $V\rho$). Este tipo de ambigüedades no puede ser resuelto a menos que ρ sea conocido confiablemente.

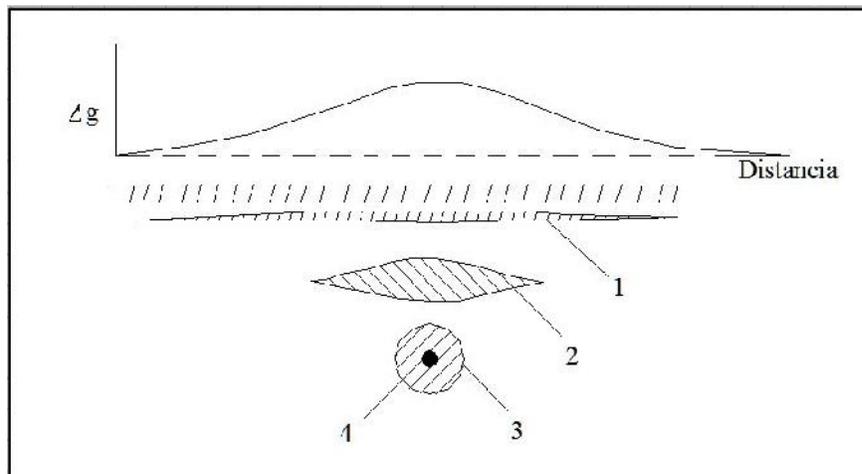


Figura 14. Las anomalías de gravedad pueden ser explicadas con variedades (números infinitos teóricamente) de distribuciones de masas a diferentes profundidades.



Esta información, a primera vista, puede hacer parecer que la interpretación es un gran problema. De cualquier modo, en la práctica, la situación no es tan imposible. La intuición geológica y la lógica constantemente dominan las soluciones de muchas formas, y la información adicional, como la posible densidad o profundidad del cuerpo en cuestión, pueden disminuir el rango de posibilidades. Además, si cualquier información independiente, obtenida de datos sísmicos o barrenos está disponible, el número de variables pueden ser reducidas hasta el punto donde la solución final tenga una validez práctica.



4. EQUIPO Y METODOLOGÍA UTILIZADA

4.1. Equipo

4.1.1. GDP-32^{II}

Un procesador de datos geofísicos GDP-32^{II}, es un receptor universal multi-canal diseñado para adquirir virtualmente cualquier tipo de datos electromagnéticos o eléctricos desde DC (corriente continua). Su diseño enfatiza la flexibilidad del software, la óptima calidad de datos, practicidad y dureza en condiciones severas de uso en campo. Los programas para operarlo son almacenados en un disco flash interno y son seleccionables por software. Este equipo opera en dominio de frecuencia y dominio de tiempo y pueden seleccionarse 26 frecuencias en intervalos binarios entre 0.000121 Hz y 8 KHz de ancho de banda. En su carcasa acepta un máximo de 6 canales analógicos (Figura 15).

4.1.2. Antena magnética TEM/3

Una antena magnética TEM/3 con salida activa diferencial (3 hilos), la debe tener los dos cables de señal conectados a los terminales de entrada rojo y negro y el cable de tierra conectado al COM en el panel lateral analógico del GDP-32^{II}. Esta antena se puede utilizar dentro o fuera del bucle o espira de transmisión para las mediciones de transitorios (Figura 15).



Figura 15. Equipo GDP-32^{II} y antena magnética TEM/3.

4.1.3. Transmisor Scintrex/Zonge GGT-3

El transmisor es un Scintrex/Zonge GGT-3 de corriente continua en el dominio de tiempo, portátil en una caja soldada de aluminio endurecido muy resistente, el cual soporta temperaturas de funcionamiento de -40° a 55° C y una humedad de funcionamiento de 0 a 90%, sin



condensación. Puede conducir un bucle o dipolo a tierra y tiene un rango de tensión de salida de 50 a 1000 V y una corriente de salida de 0,1 a 15 A con una estabilidad de la corriente: $\pm 0,1\%$ (Figura 16).

4.1.4. Controlador transmisor XMT-32

Un controlador transmisor XMT-32 el cual consta de un microprocesador controlado con memoria para almacenar periódicamente tablas programadas para el control automático del transmisor y un sincronizador con calibrador interno. Este tiene la capacidad para dominio del tiempo o de frecuencia con ciclo de ocupación del 50% o 100% de ciclos y se encuentra en una caja sellada de aluminio con baterías de 12 V para más de 10 horas de operación continuas, soportando temperaturas extremas que van en el rango de -40° a 60° C. Además cuenta con un visualizador LCD de frecuencia o voltaje de salida (Figura 16).

4.1.5. Generador ZMG-3

La plata generadora es una ZMG-3 de combustible a gasolina, portátil de campo, que genera 120-208 V de corriente altera y una frecuencia de hasta 400 Hz (Figura 16)..



Figura 16. Equipo transmisor Scintrex/Zonge GGT-3, controlador transmisor XMT-32 y generador ZMG-3.

Y el cable para las espiras es de calibre 16 y 18 de 400 metros de longitud cada uno de ellos.



4.1.6. Scintrex CG-5 Autograv

El gravímetro Scintrex CG-5 Autograv es un gravímetro relativo del tipo lineal, con una resolución de 1 μGal , una repetibilidad de menos de 10 μGal y un rango operacional de más de 8000 mGal (Scintrex Limited, 2009); su diseño incluye una serie de microprocesadores, los cuales posibilitan la automatización de las mediciones y su procesamiento en tiempo real. El gravímetro CG-5 mide a una frecuencia de 6 Hz durante un período de tiempo definido por el usuario, el cual como mínimo es de 1 segundo (Figura 17).

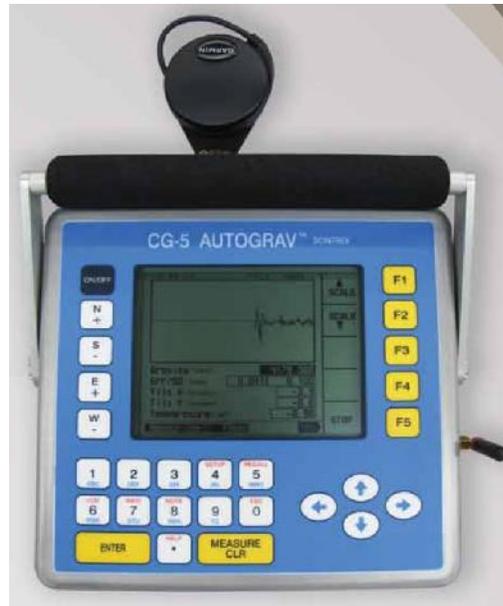


Figura 17. Scintrex Cg-5 Autograv.

Puede utilizarse en dos formas: modo levantamiento para la adquisición de mediciones discretas, y el modo cíclico para el registro continuo de datos. El elemento sensor se basa en un sistema elástico de cuarzo fundido en el cual la fuerza gravitacional sobre la masa de prueba es balanceada por un resorte y una pequeña fuerza electrostática restauradora.

La deriva instrumental (drift) en estos instrumentos, debido al inevitable estiramiento del resorte bajo tensión y su imperfecta recuperación, alcanza algunas décimas de miliGal por día. Este drift es en general lineal en el intervalo de unas pocas horas siempre y cuando el transporte sea cuidadoso (Scintrex Limited, 2009) y puede ser removido de las lecturas realizando reocupaciones frecuentes de estaciones; es una característica propia de cada equipo y en muchos casos su magnitud es variable en el tiempo (Merlet *et al.*, 2008) al igual que el factor de calibración (Bonvalot *et al.*, 1998; Riccardi *et al.*, 2008).

Los errores en las lecturas de gravedad en una estación dada no sólo son afectados por factores instrumentales (drift, ruido electrónico, efectos de inclinación) sino también por otros de



naturaleza ambiental (mareas terrestres, temperatura y presión atmosférica, sismicidad, estabilidad y ruido del sitio, viento). Estos errores son de magnitud variable en el tiempo y deben ser corregidos para asegurar la repetibilidad de las mediciones (Bonvalot *et al.*, 1998). Así mismo, varios estudios han demostrado que los mismos factores ambientales afectan de modo diferente a cada instrumento en particular (Bonvalot *et al.*, 1998).

Entre sus usos más comunes está la exploración minera, vulcanología, exploración de gas y aceite, en ingenios civiles, evidentemente en estudios regionales de la gravedad y en sondeos marinos y aéreos.

4.2. Metodología

4.2.1. Metodología para los estudios electromagnéticos

Para los estudios de los sondeos electromagnéticos transitorios (TEM's), se dividieron esencialmente en dos etapas principales:

La primera fue la adquisición en campo de la información geofísica, donde inicialmente se llevó a cabo la selección de los sitios propicios para la realización de los sondeos con un equipo de recepción GDP 32^{II} construido por Zonge Engineering, tomando como base las características geológicas, hidrogeológicas y geomorfológicas del sitio, donde se logró obtener 23 sondeos efectivos distribuidos estratégicamente en el área con una separación entre ellos de 4 kilómetros aproximadamente para la interpretación de 11 secciones con diferentes orientaciones y así, darse una idea global del área en cuestión. En todos los puntos de observación se realizaron espiras transmisoras de 200 X 200 metros (Tx moment de 40,000 m²).

Y una segunda etapa donde se contemplan todos los trabajos de gabinete respectivos a recopilación de información e interpretación de los datos observados, llevando a cabo toda la integración, validación, modelado e interpretación de los datos obtenidos en campo de los sondeos electromagnéticos transitorios, teniendo como resultado mapas de resistividad a profundidad que van de 50 a 900 metros y 11 secciones con diversos rumbos, procesadas mediante el programa WINGLINK con el método de smooth inversión.

Hay que tener presente que para la realización de los sondeos electromagnéticos transitorios necesitamos la existencia de un campo magnético primario, él cual es el que se origina cuando se aplica corriente sobre una bobina trasmisora, este generará un campo magnético alterno llamado campo primario; transmitiéndose por todas partes incluido al subsuelo. Este campo magnético alternativo induce una corriente alterna a través de los minerales conductores creando un nuevo campo magnético llamado campo secundario. Lo que la bobina receptora recibe es la combinación del campo primario y secundario.



El arreglo para la adquisición de la información es el denominado "In Loop ", con una resistencia de 15.5 ohms en el circuito o espira, el cual nos da un Tx Delay de 73 μ s, con las anteriores características se logró una intensidad de corriente que variaba entre 9.61 a 11.42 amperes.

El sistema de sondeos TEM consta de un transmisor y un receptor. El transmisor es una espira cuadrada de cable aislado apoyado en el suelo. El receptor es una bobina de varias espiras y núcleo de aire que se coloca en el centro de la espira anterior. Las dimensiones de la espira transmisora fueron de 200 x 200 metros, para profundidades de investigación de hasta 1,000 metros, en frecuencias de 0.5 hasta 32 Hz, utilizando de 64 hasta 1024 ciclos en 1, 2 y 3 stacks ocasionalmente.

4.2.1.1. Estimación del tiempo de la rampa de corte

Un punto que es importante mencionar es que si no se tiene un medidor del tiempo de la rampa de corte para la serie de transmisores GGT, la siguiente ecuación proporciona una buena estimación del tiempo de salida:

$$T = \frac{2 * L^{1.25}}{5 + R}$$

L = longitud del lado del bucle o espira (metros)

R = resistencia del bucle o espira (ohmios)

T = tiempo de apagado o de la rampa de corte (microsegundos)

4.2.1.2. Requerimientos básicos para la adquisición de sondeos electromagnéticos

- Estabilización y sincronización de los equipos GDP 32^{II} y XMT-32.
- Tendido de cable para espira transmisora y cálculo de Tx delay.
- Conexión de transmisor Zonge GGT-3 con XMT-32 y planta de energía ZMG-3 de combustible a gasolina.
- Arranque de planta, calibración de frecuencia y voltaje de salida al transmisor y observación de la corriente en la espira transmisora.
- Instalación de antena receptora y conexión a equipo GDP 32^{II}.
- Adquisición de datos en campo.

4.2.2. Metodología para los trabajos gravimétricos

Lo que respecta al estudio gravimétrico lo podemos dividir en dos escenarios principales, los



cuales son:

Trabajo de gabinete. En esta etapa inicial, se llevó acabo la recopilación y análisis de la información bibliográfica del área de estudio, donde se obtuvieron más de 1220 estaciones gravimétricas adquiridas por el INEGI de observaciones en campo. Una vez analizada, depurada y estructurada la información disponible, se escogieron estratégicamente 123 estaciones para utilizar en este trabajo.

Con esto se obtuvo un total de cuatro secciones con un rumbo preferencial norte-sur iniciando al pie de la sierra del Bacatete en su porción sur y cerrando las secciones en el afloramiento ubicado al noreste del poblado de Buaysiacobe. Cabe señalar que el punto de cierre de todas las secciones que se utilizó fue el mismo ya que este es el afloramiento más cercano al sur del área de estudio.

El número de estaciones por perfil se da en la siguiente tabla:

SECCIONES GRAVIMÉTRICAS	
NOMBRE	ESTACIONES
SECNS	26
SECNS1	36
SECNS2	28
SECNS3	33

Tabla 1. Estaciones por sección gravimétrica.

Las cuatro secciones tienen una separación entre cada estación que va de 500 metros a 4 kilómetros y oscilan entre 50 y 61 kilómetros de longitud con una separación de 4 a 7 kilómetros aproximadamente entre ellas.

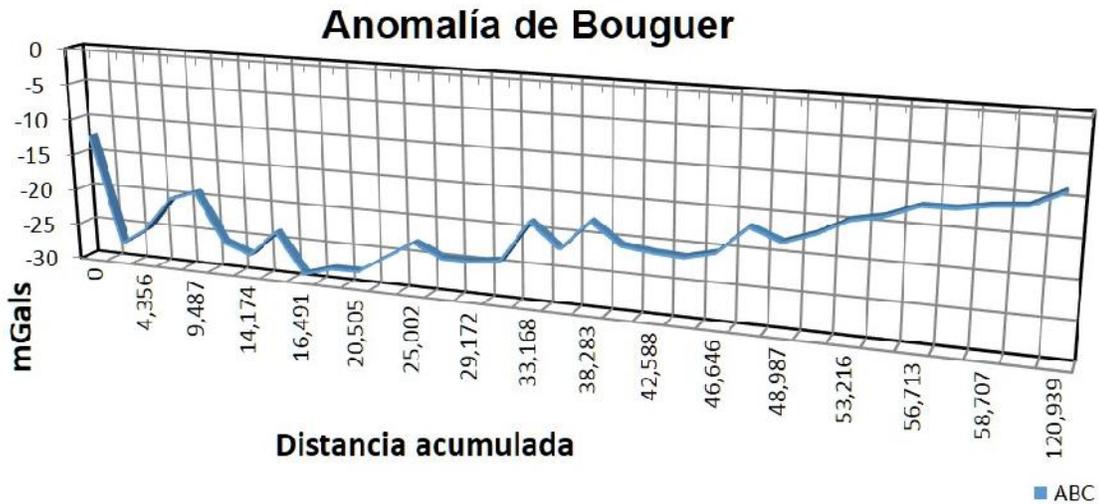
Como una segunda etapa en gabinete, ya terminando todo el análisis, depuración y estructuración de la información disponible, se realizaron todas las correcciones gravimétricas siguientes a todas las estaciones.

- Corrección por latitud (CL). Debido a la rotación de la tierra y abultamiento ecuatorial.
- Corrección por elevación (CE) Aquí el resultado de esta corrección se suma a la lectura de campo cuando la estación se localiza sobre el nivel de datum y se resta cuando está debajo de él.
- Corrección de Bouguer (CB). Como principio básico, esta corrección asume la existencia de una placa horizontal de extensión infinita y de densidad uniforme entre el datum y la estación de observación.



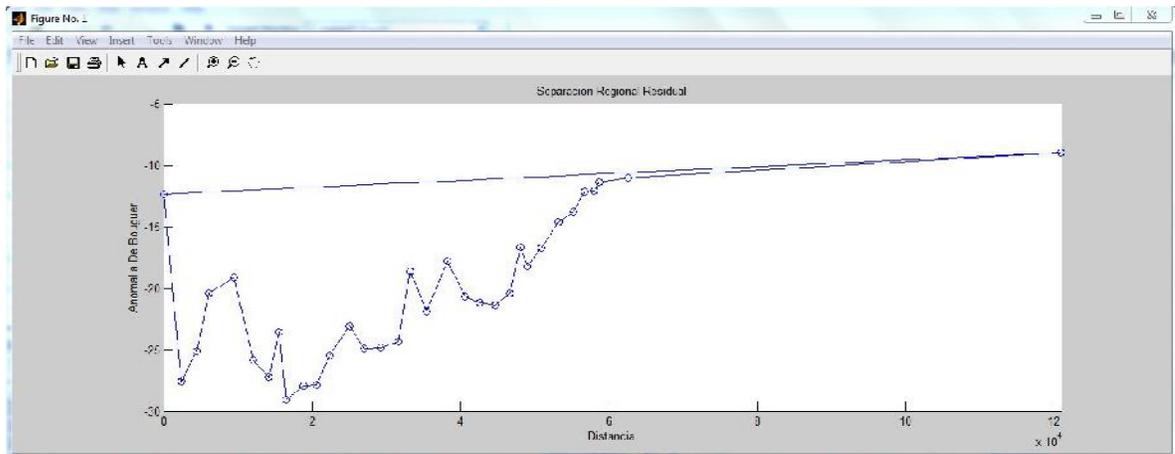
- Corrección topográfica (CT) el exceso de masa (montañas), causa una reducción en las lecturas del gravímetro, mientras que el déficit de masa (valles), generan un aumento de las lecturas, esta corrección será siempre positiva.

Continuando el proceso, se obtuvieron las anomalías Bouguer (AB) para cada una de las secciones ya corregidas como se muestra en la Gráfica 1. En este capítulo solo se muestra el ejemplo de una sección SECNS2, el resto de las secciones se encuentran en el Anexo VI.

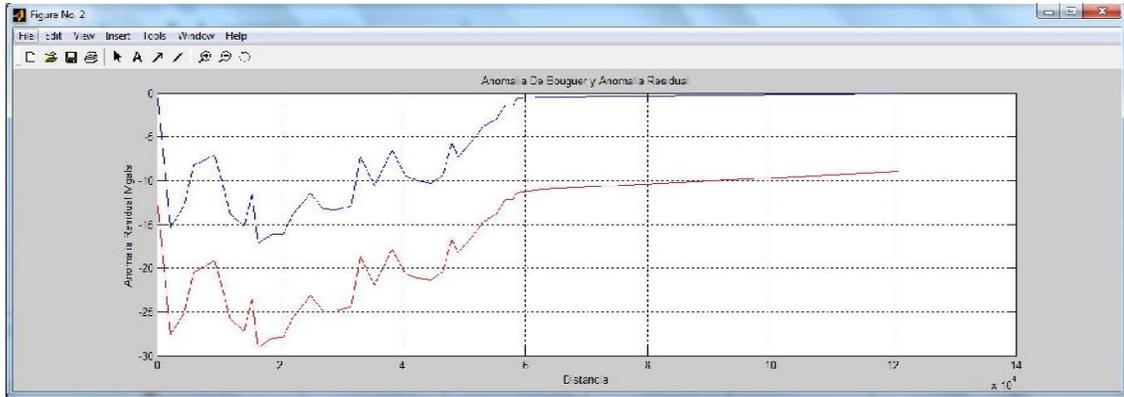


Gráfica 1. Anomalía de Bouguer.

Posteriormente por medio del método de suavizado de perfiles regional-residual en el programa de MATLAB obtenemos la gráfica de la tendencia del regional (Gráfica 2) y la gráfica de la remoción de perfiles regional-residual donde se observa la anomalía de Bouguer y la anomalía residual (Gráfica 3).



Gráfica 2. Tendencia del regional.

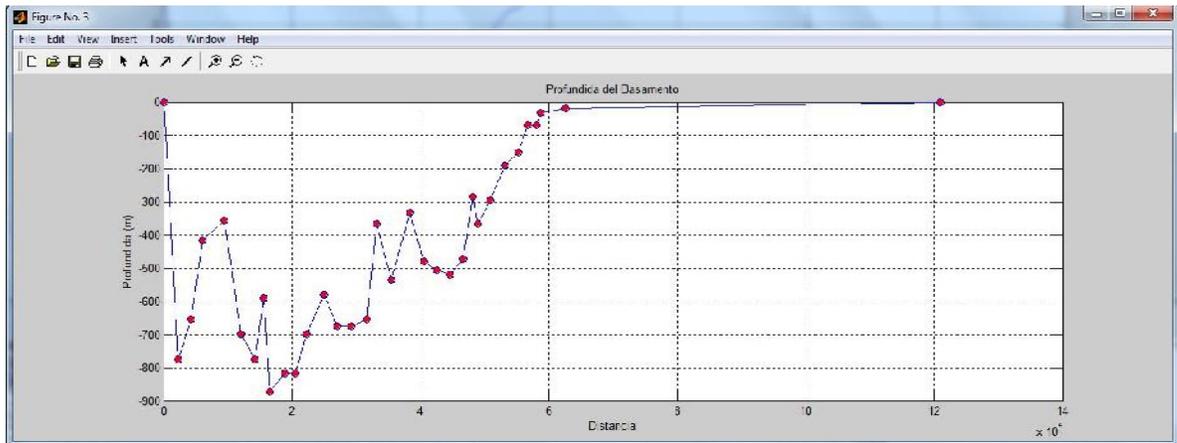


Gráfica 3. Separación de perfiles de regional-residual.

Y finalmente se pudo obtener la profundidad estimada para cada estación, mediante el programa matemático de MATLAB el cual utiliza la siguiente expresión:

$$G_{RES} = 2 \quad G \quad h$$

Y nos da resultados por sección como el que se muestra en la Gráfica 4.



Gráfica 4. Sección adquirida mediante el programa MATLAB de profundidad estimada del basamento.

Ya realizado todo este procedimiento, se hizo el modelo tridimensional en el programa Oasis Montaj obteniendo así, la visualización de la morfología del basamento a profundidad estimada a detalle.



5. RESULTADOS

5.1. Sondeos electromagnéticos transitorios

El método de sondeos electromagnéticos transitorios es en el dominio tiempo, esto quiere decir, que se mide en diferentes ventanas o aperturas de la antena en el tiempo. El equipo necesario consiste en un transmisor que inyecta corriente en una espira o bucle (una antena hecha con un cuadrado de cable) de distintas dimensiones (dependiendo de la profundidad a la que se quiere llegar en el estudio, el área a cubrir y los niveles de ruido ambiental) y un receptor (una antena).

La corriente que se inyecta en la espira es una corriente en forma de ciclo alternando la polaridad. Las medidas en el receptor se miden durante el tiempo en que no se está inyectando corriente, de forma que solo están presentes los campos secundarios. Se crea un campo magnético por la inyección de corriente en la espira y durante el tiempo en que no hay corriente se mide con la antena receptora el voltaje generado por la difusión de la energía inducida. Normalmente los intervalos de tiempo de caída en que no se inyecta corriente varían desde 30 microsegundos a cientos de milisegundos para exploraciones profundas. Es fundamental sincronizar el transmisor y el receptor, para realmente medir solo en los intervalos de tiempo en que no se está inyectando corriente en la espira.

La topografía del terreno si es abrupta puede afectar negativamente a las medidas, ya que se asume que el bucle transmisor y la antena receptora se sitúan sobre superficies paralelas. En este estudio la topografía es bastante plana en todos los casos, por lo que no tenemos este problema.

Y como ya comentamos, se utilizaron solo espiras como transmisores de 200 x 200 metros.

Los resultados de los TEM's se muestran en la Tabla 2, siendo 23 sondeos efectivos en el área de estudio con los diferentes parámetros de profundidad de investigación alcanzada, frecuencia, ciclos, resistencias, voltaje y corriente, entre otros. Además podemos observar en la Figura 18 la ubicación física de los sondeos electromagnéticos transitorios.



TEM	ID	RECEPTOR		TRANSMISOR				Z	PROF	FREC	CY	CRES	VOLT	FREC	AMPERS
		X	Y	X	Y	X	Y								
YAQ6	YAQUI6	569320.00	3036791.00	569206.00	3036875.00	10.00	451.00	1.00	256.00	510.00	117.80	413.00	10.67		
YAQ7	YAQUI7	570513.00	3036173.00	570610.00	3036085.00	6.00	516.00	1.00	256.00	543.00	117.50	412.00	10.60		
YAQ8	YAQUI8	573521.00	3036213.00	573626.00	3036127.00	9.00	913.00	1.00	256.00	527.00	118.20	413.00	10.50		
YAQ9	YAQUI9	559153.00	3036591.00	559253.00	3036685.00	9.00	416.00	0.50	128.00	516.00	118.00	414.00	10.30		
YAQ10	YAQUI10	563208.00	3036990.00	563304.00	3036913.00	9.00	409.00	0.50	128.00	532.00	117.90	412.00	11.00		
YAQ11	YAQUI11	565029.00	3043997.00	564946.00	3044074.00	12.00	456.00	1.00	256.00	587.00	118.00	413.00	10.44		
YAQ12	YAQUI12	568825.00	3043943.00	568929.00	3044047.00	21.00	622.00	1.00	128.00	554.00	118.10	412.00	10.03		
YAQ13	YAQUI13	578431.00	3044827.00	578326.00	3044738.00	30.00	679.00	1.00	128.00	560.00	117.80	413.00	10.43		
YAQ14	YAQUI14	574081.00	3045312.00	573989.00	3045208.00	25.00	734.00	2.00	256.00	593.00	117.80	410.00	10.40		
YAQ15	YAQUI15	566638.00	3037921.00	566749.00	3038023.00	11.00	1000.00	1.00	128.00	576.00	118.10	417.00	10.40		
YAQ16	YAQUI16	556925.00	3028493.00	556938.00	3028363.00	3.00	504.00	0.50	128.00	576.00	118.60	414.00	10.96		
YAQ17	YAQUI17	564643.00	3028403.00	564568.00	3028494.00	11.00	900.00	0.50	128.00	516.00	118.50	413.00	10.38		
YAQ18	YAQUI18	560657.00	3027072.00	560566.00	3027156.00	7.00	389.00	0.50	128.00	582.00	118.00	413.00	10.40		
YAQ19	YAQUI19	562731.00	3032064.00	562645.00	3031968.00	7.00	470.00	0.50	128.00	598.00	117.70	414.00	11.00		
YAQ20	YAQUI20	567177.00	3032341.00	567074.00	3032255.00	7.00	654.00	0.50	128.00	543.00	118.30	416.00	10.30		
YAQ21	YAQUI21	568886.00	3032133.00	568791.00	3032040.00	6.00	628.00	0.50	64.00	505.00	118.20	412.00	11.00		
YAQ22	YAQUI22	560885.00	3032796.00	560774.00	3032706.00	4.00	782.00	0.50	64.00	510.00	118.20	411.00	10.80		
YAQ23	YAQUI23	561122.00	3036328.00	561121.00	3036203.00	7.00	801.00	0.50	64.00	494.00	118.10	413.00	11.20		
YAQ24	YAQUI24	564636.00	3038475.00	564719.00	3038366.00	9.00	592.00	0.50	64.00	647.00	118.30	414.00	11.30		
YAQ25	YAQUI25	567102.00	3041052.00	567007.00	3041147.00	6.00	619.00	0.50	64.00	527.00	118.20	411.00	11.42		
YAQ26	YAQUI26	575800.00	3040381.00	575900.00	3040281.00	16.00	705.00	1.00	128.00	532.00	118.60	413.00	10.32		
YAQ27	YAQUI27	571751.00	3039808.00	571639.00	3039908.00	14.00	657.00	1.00	128.00	609.00	118.30	411.00	10.32		
YAQ28	YAQUI28	564076.00	3041325.00	563978.00	3041234.00	10.00	655.00	1.00	128.00	521.00	118.10	413.00	9.61		

Tabla 2. Sondeos adquiridos en el área de estudio.

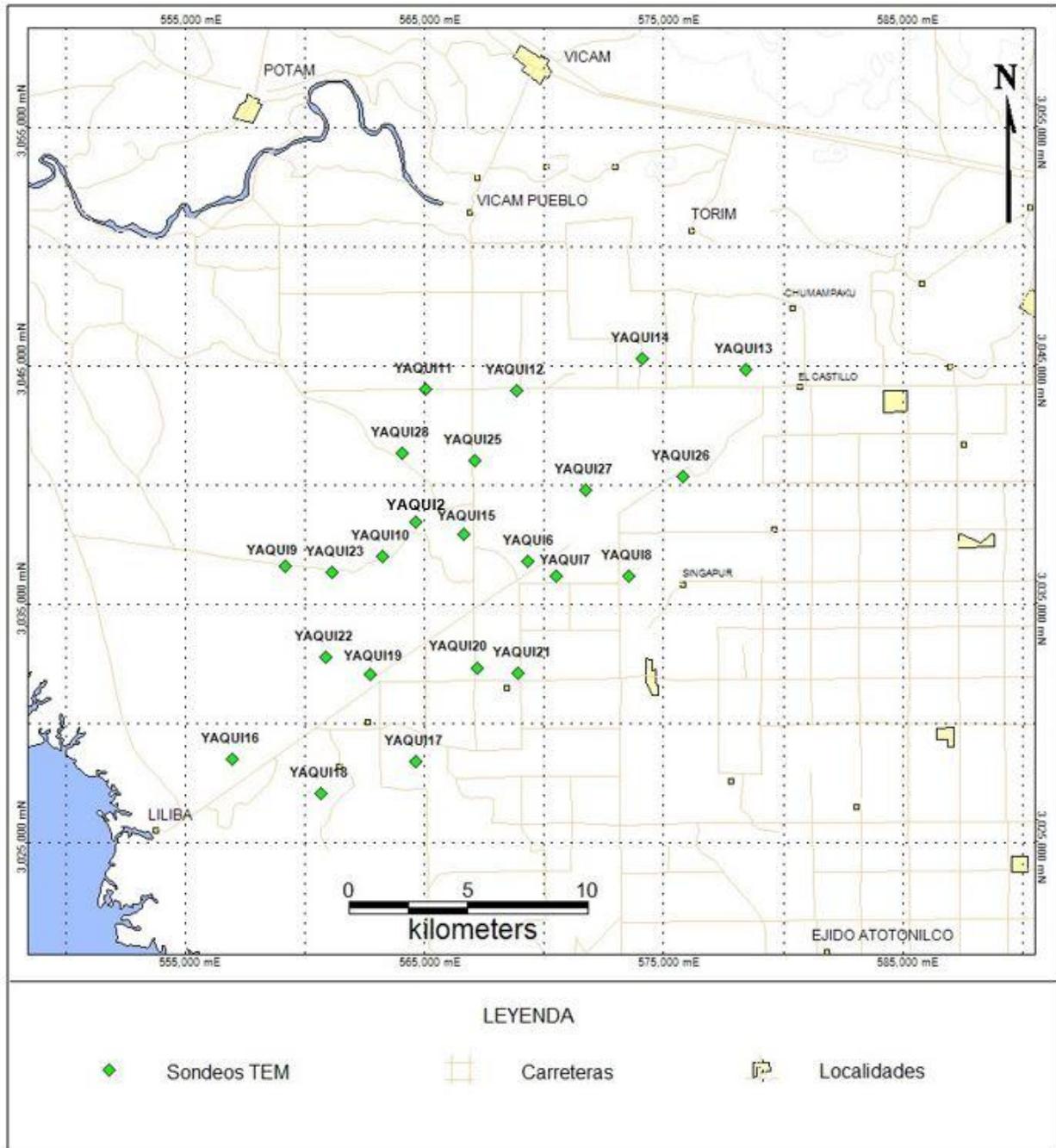


Figura 18. Ubicación de sondeos electromagnéticos transitorios adquiridos en el área de estudio.

Los anteriores sondeos se utilizaron para agruparlos en líneas de sección con tres orientaciones preferenciales: secciones con orientación preferencial oeste – este, noroeste – sureste y suroeste – noreste (Figuras 19, 20 y 21).

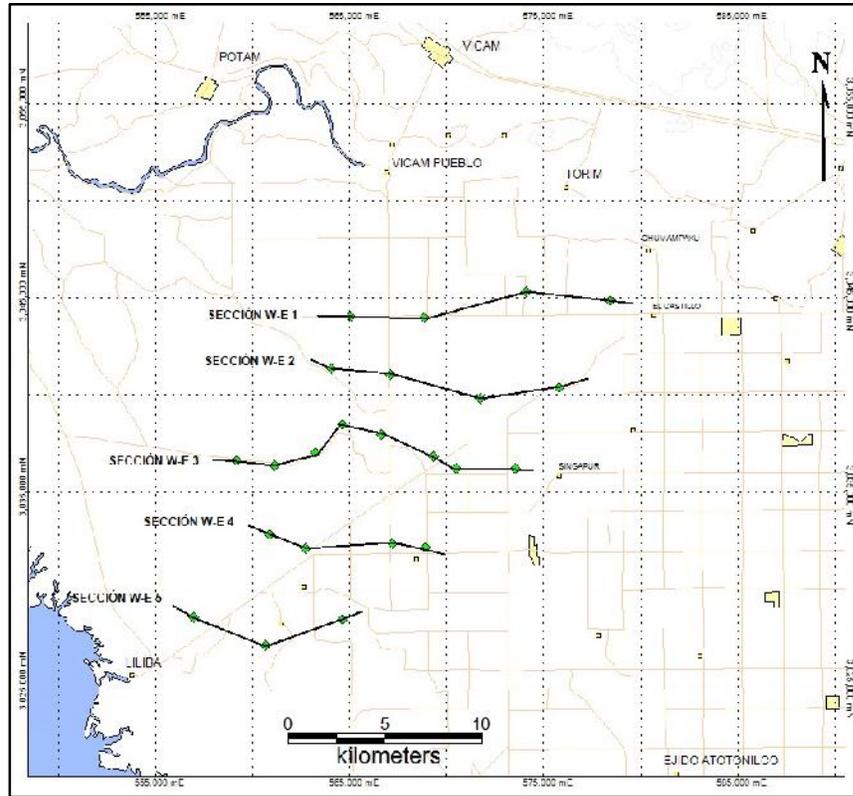


Figura 19. Secciones con orientación preferencial oeste – este en el área de estudio.

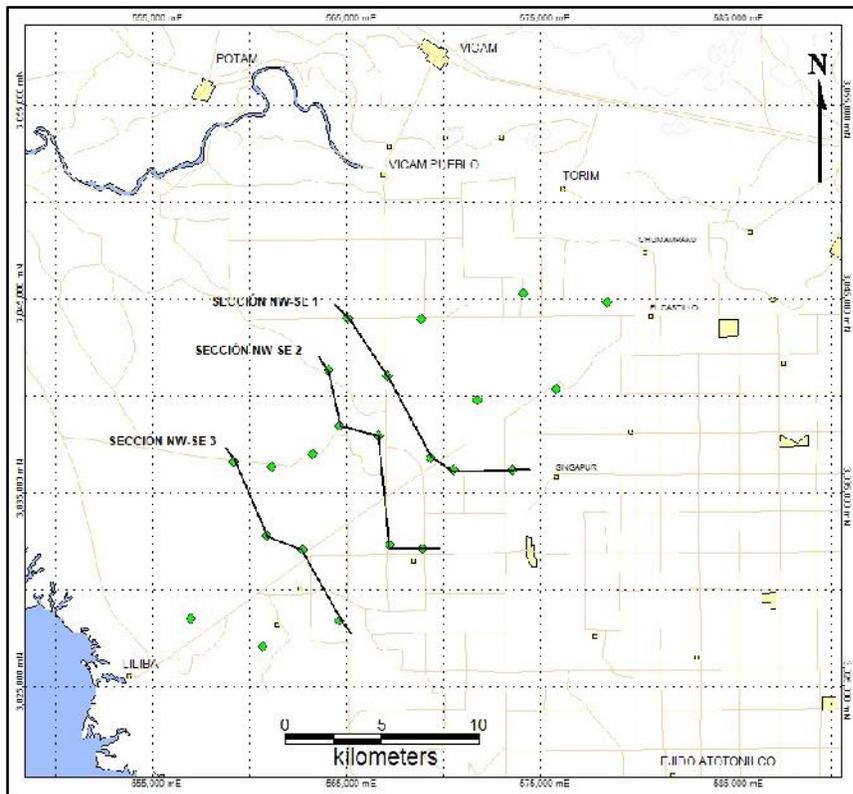


Figura 20. Secciones con orientación preferencial noroeste – sureste en el área de estudio.

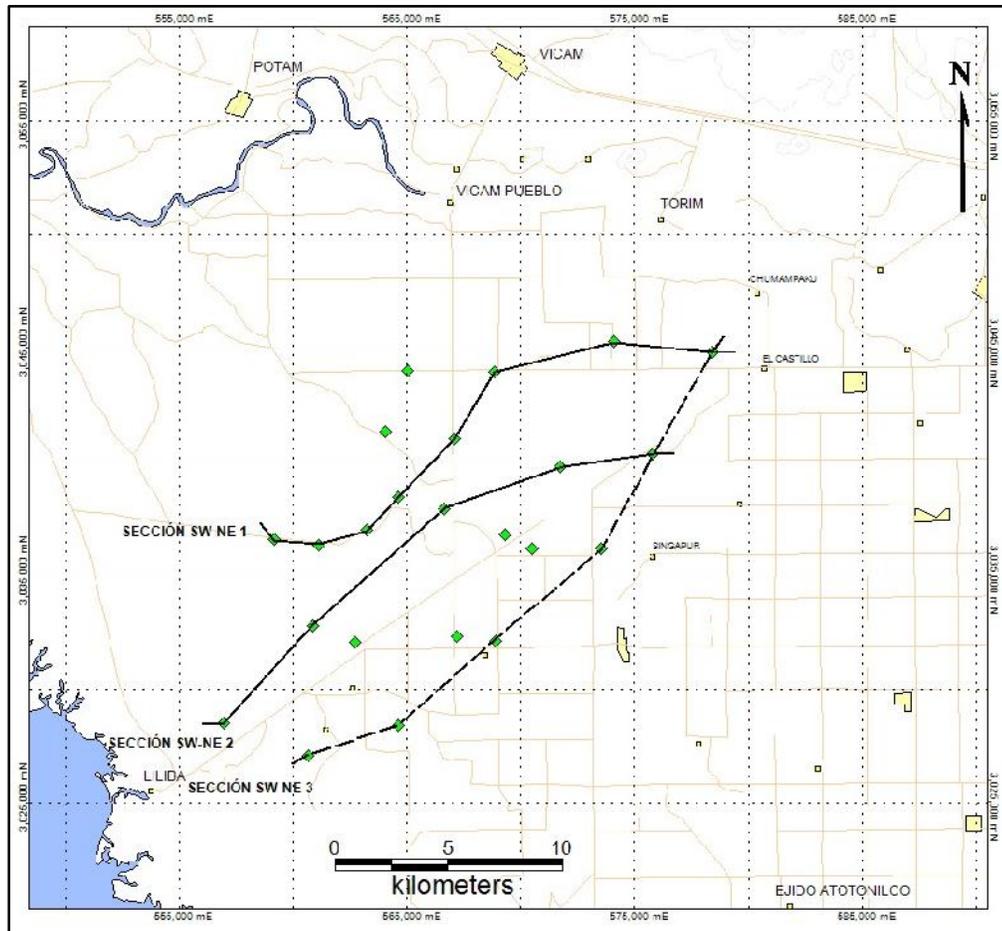


Figura 21. Secciones con orientación preferencial suroeste – noreste en el área de estudio.

Para poder definir las secciones anteriores se tomaron de la siguiente relación de sondeos, lo cual, lo podemos observar en la Tabla 3.

		SECCIONES										
		SEC W-E 1	SEC W-E 2	SEC W-E 3	SEC W-E 4	SEC W-E 5	SEC SW-NE 1	SEC SW-NE 2	SEC SW-NE 3	SEC NW-SE 1	SEC NW-SE 2	SEC NW-SE 3
SONDEOS	YAQUI 11	YAQUI 28	YAQUI 9	YAQUI 22	YAQUI 16	YAQUI 9	YAQUI 16	YAQUI 18	YAQUI 11	YAQUI 28	YAQUI 9	
	YAQUI 12	YAQUI 25	YAQUI 23	YAQUI 19	YAQUI 18	YAQUI 23	YAQUI 22	YAQUI 17	YAQUI 25	YAQUI 24	YAQUI 22	
	YAQUI 14	YAQUI 27	YAQUI 10	YAQUI 20	YAQUI 17	YAQUI 10	YAQUI 15	YAQUI 21	YAQUI 6	YAQUI 15	YAQUI 19	
	YAQUI 13	YAQUI 26	YAQUI 24	YAQUI 21		YAQUI 24	YAQUI 27	YAQUI 8	YAQUI 7	YAQUI 20	YAQUI 17	
			YAQUI 15			YAQUI 25	YAQUI 26	YAQUI 26	YAQUI 8	YAQUI 21		
			YAQUI 6			YAQUI 12		YAQUI 13				
			YAQUI 7			YAQUI 14						
			YAQUI 8			YAQUI 13						

Tabla 3. Sondeos electromagnéticos transitorios por secciones.

Los resultados los podemos observar en dos presentaciones:

- Mapas de resistividad a profundidades estimadas, describiendo las más importantes, ya que van de 50 hasta 1000 metros pero se encuentran todas en el Anexo III.
- Secciones resistivas más importantes elaboradas en el área de los sondeos, el resto de las secciones se encuentran en el Anexo IV.



Los modelos de inversión suavizados convierten los datos medidos en perfiles de resistividad respecto a la profundidad. Los datos observados de tiempos se utilizan en cada estación para determinar el modelo de partida o inicial que es un modelo de capas horizontales.

El espesor de las capas se determina calculando la profundidad de penetración del campo fuente para cada ventana de tiempos. La resistividad de cada capa se ajusta iterativamente hasta que la diferencia entre el modelo y los datos observados se ajusta al error determinado, siempre que sea consistente con un contraste suavizado. El contraste suavizado limita la variación de resistividad entre las distintas capas.

Existen dos parámetros en los modelos que determinan el tipo de resultado, estos son el peso que se le da al modelo inicial y el peso que se le da al suavizado. El peso del modelo inicial puede variar entre 0.001 y 100, siendo los valores más altos los que calculan modelos más parecidos al modelo inicial y los más bajos al contrario. Cuanto más alto es el peso del suavizado, menos contrastes son permitidos en el modelo; si el valor es muy bajo los cambios serán muy bruscos. En todos los casos se debe jugar con estos parámetros para crear modelos con errores bajos pero reales geológicamente.

El resultado de un modelo de suavizado es un conjunto de resistividades estimadas que varían suavemente con la profundidad. La variación lateral es calculada invirtiendo sucesivamente las estaciones a lo largo de un perfil, en el caso como este, que se midieron las estaciones en línea. Los resultados para una línea completa se presentan en una pseudo-sección con los contornos de resistividades.

5.1.1. Mapas resistivos a profundidad

Basándonos en los resultados de este trabajo, claramente podemos apreciar en los mapas de resistividad más someros (hasta los 250 metros de profundidad aproximadamente) que están controlados por materiales bajamente resistivos y estos predominan hacia la porción noreste del área hasta altas profundidades.

Sin embargo, a partir de los 150 metros de profundidad estimada se comienza a notar un fuerte contraste de entre la porción oriente del poniente notándose como parteaguas el punto del sondeo YAQUI 19, donde geológicamente hablando podemos apreciar una separación (línea roja) de materiales arcillosos en la parte oriente de materiales de arena, arena arcillosa, arcilla y gravilla (Figura 22).

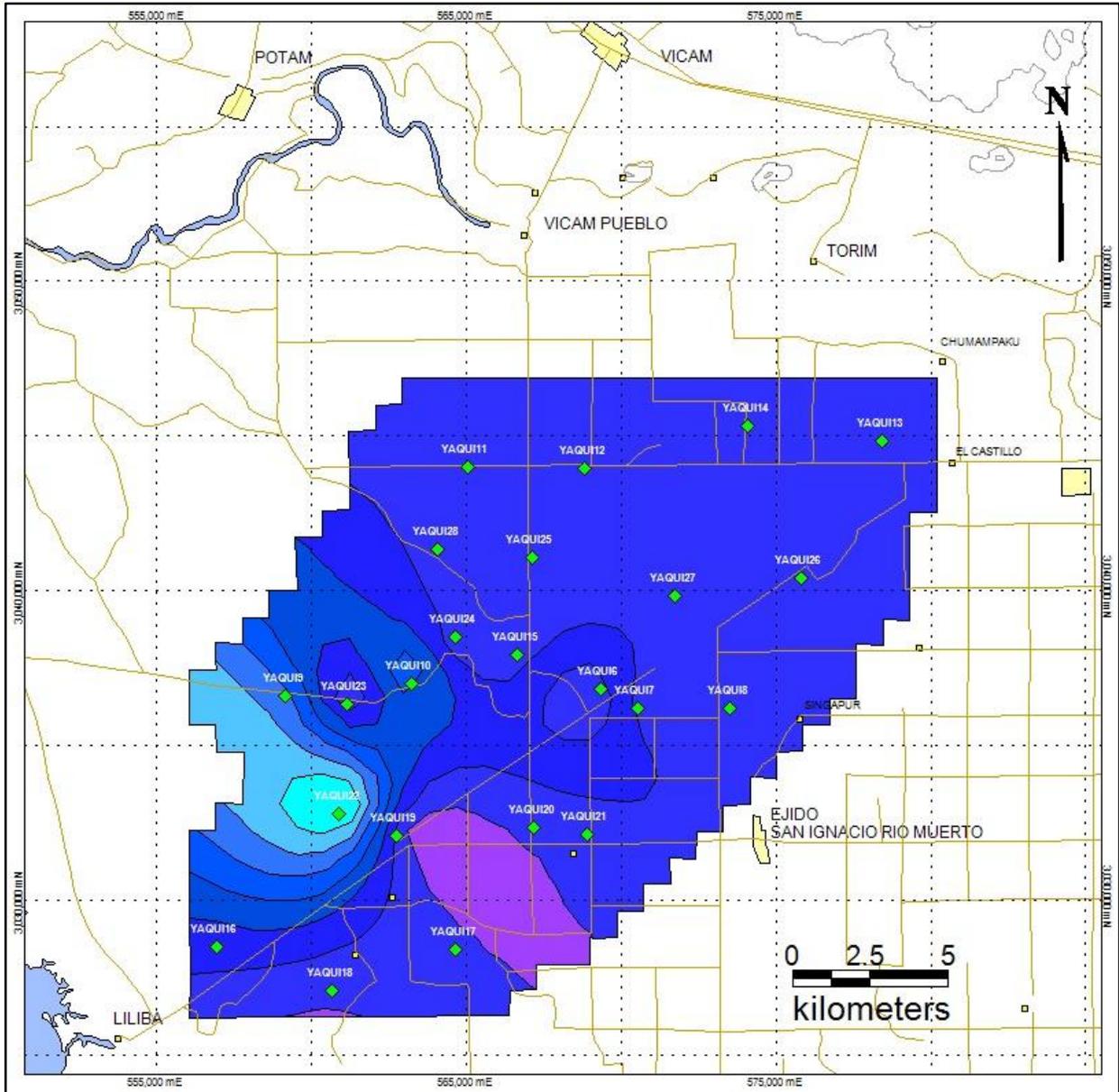


Figura 22. Mapa de resistividad a 200 metros de profundidad estimada con smooth inversion en WinGLink.

Si continuamos profundizando en el área, observamos que a partir de los 300 metros encontramos una creciente en los materiales de arena y arena arcillosa distribuyéndose en por toda la porción poniente del área, acentuándose en la zona suroeste y una creciente resistividad en el área del sondeo YAQUI 6, teniendo alineaciones preferenciales noreste – suroeste (líneas rojas), esto nos habla posiblemente, de los movimientos que han tenido los materiales de depósito en el transcurso del tiempo geológico (Figura 23).

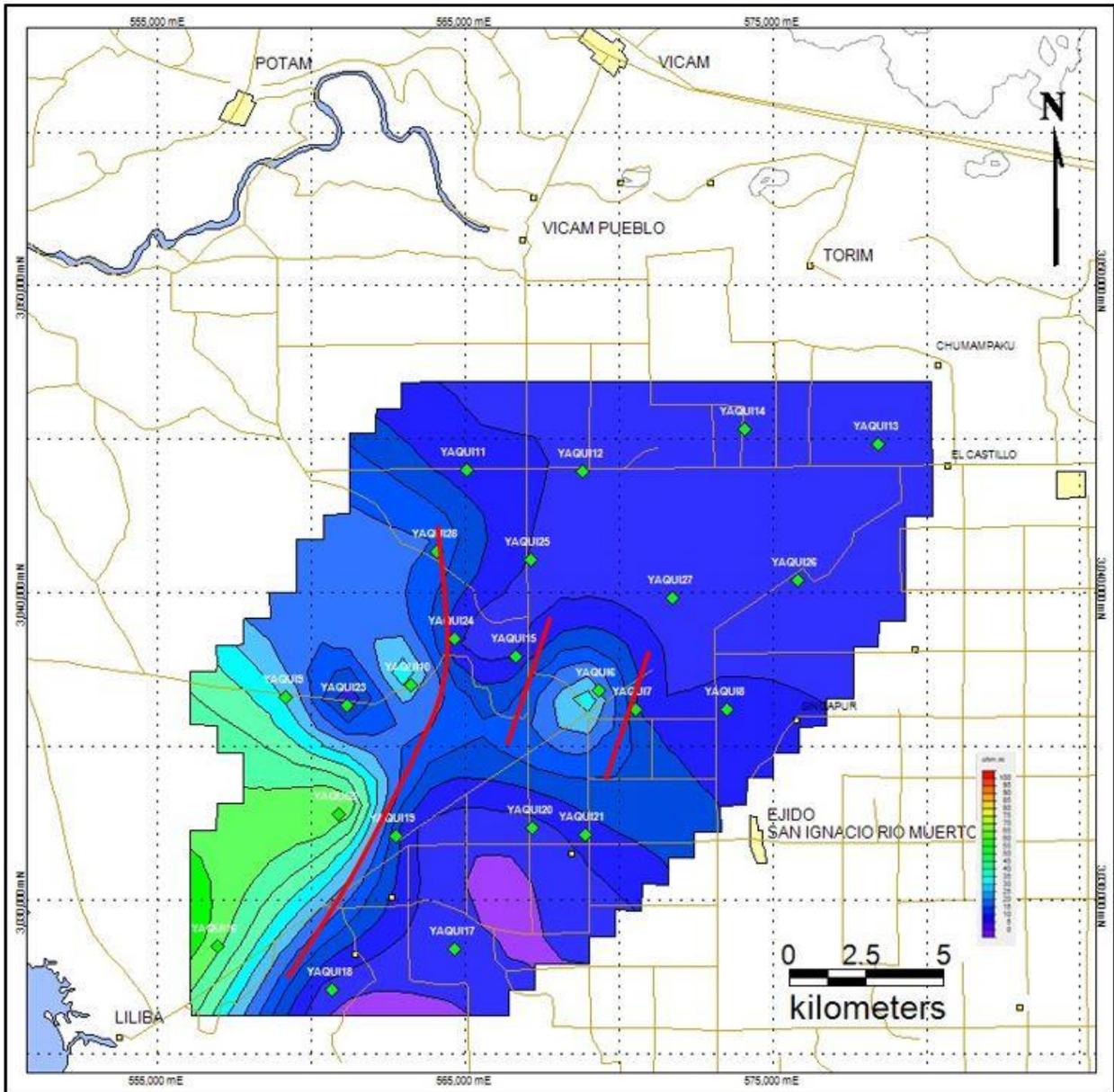


Figura 23. Mapa de resistividad a 350 metros de profundidad estimada con smooth inversion en WinGLink.

Posteriormente, se observa ya a profundidades estimadas mayores de 600 metros como la zona poniente del área está controlada por los materiales de altas resistividades mientras que en la porción noreste los materiales conservan resistividades bajas a muy bajas, sin embargo en la zona de los sondeos YAQUI 6, YAQUI 7 y YAQUI 21 del lado este se observa una creciente en la resistividad de los materiales. Aun así, se sigue conservando el alineamiento preferencial noreste – suroeste (líneas rojas) entre los materiales, con esto se puede especular la diferencia entre los ambientes fluviales en la porción oeste de los aluviales en el este (Figura 24).

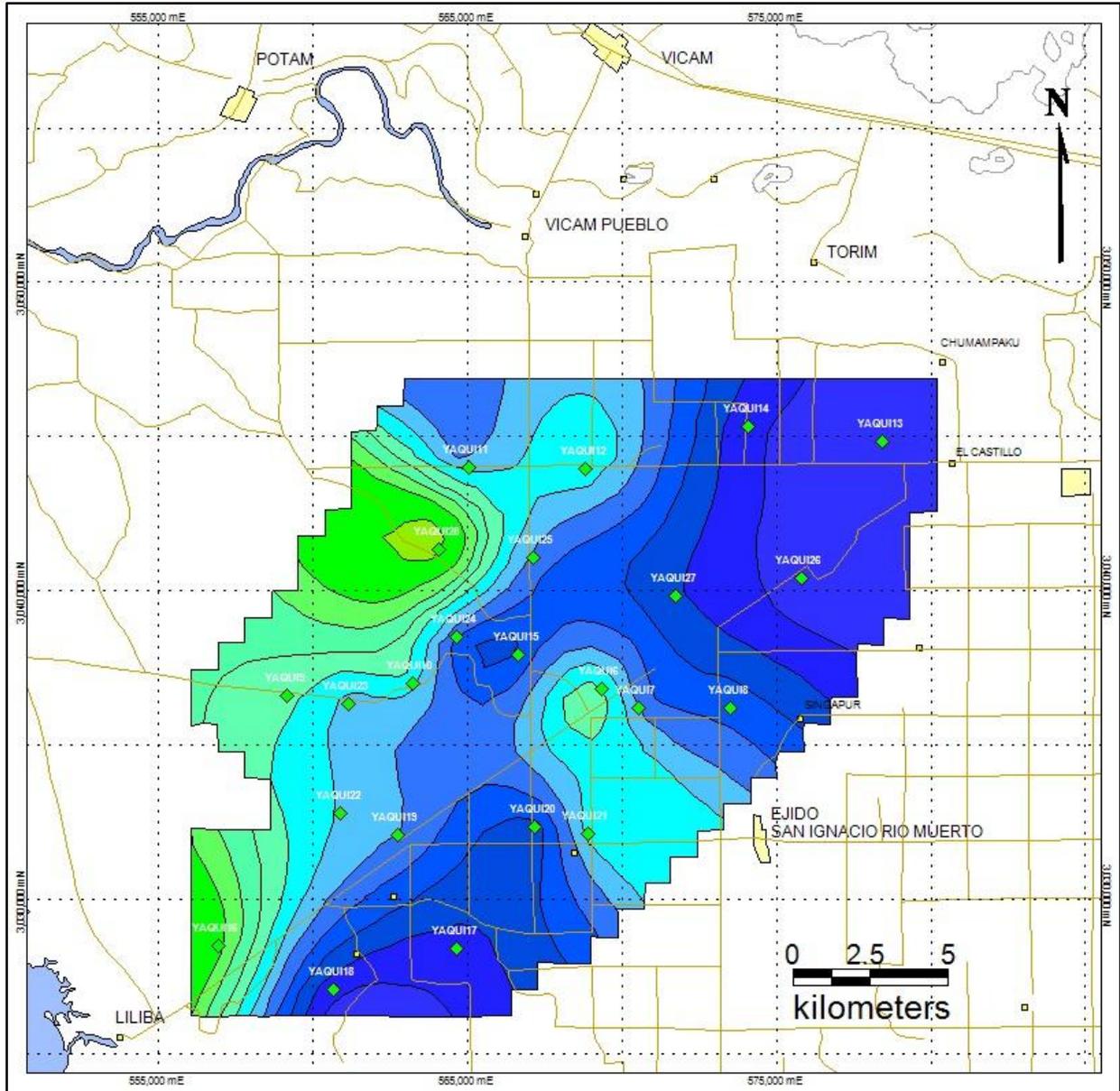


Figura 24. Mapa de resistividad a 900 metros de profundidad estimada con smooth inversion en WinGLink.

5.1.2. Secciones resistivas

Así mismo, en las diferentes secciones adquiridas con orientación oeste – este, podemos observar los contrastes resistivos dentro del área de estudio, como por ejemplo en la sección W-E 2 (Figura 25), donde en las partes someras hasta los 250 metros se aprecian materiales arcillosos de muy bajos resistivos en el orden de los 0.2 a los 4 ohm-metro, de espesores que varían entre los 60 y 100 metros en la parte oeste, que probablemente podrían coincidir con la bibliografía de la llamada “arcilla azul” ya que en estudios anteriores comentan sobre una capa

de arcilla azul con microfósiles, cuyo espesor es de 160 m cerca de la costa, acuñándose hacia la parte alta del valle de Guaymas, Sonora (Vega Granillo L. *et al*; 2011).

Y a partir de los 250 metros aproximadamente, en la parte oeste tenemos intercalaciones de resistividades que varían de 20 omh-metro hasta superiores de 65 omh-metro hacia el basamento, esto es indicativo de materiales que van cambiando gradualmente su tamaño de grano desde arenas arcillosas, arena, grava y gravillas no consolidadas a semiconsolidadas. En contraste la porción este de la sección nos indica que no hay cambios tan drásticos en las resistividades, si no que se mantiene en materiales de arcillosos a arenas arcillosas de fuertes espesores que rebasa el orden de 400 metros, pudiendo inferir probablemente la diferenciación de los ambientes de depósito del relleno sedimentario (línea discontinua roja).

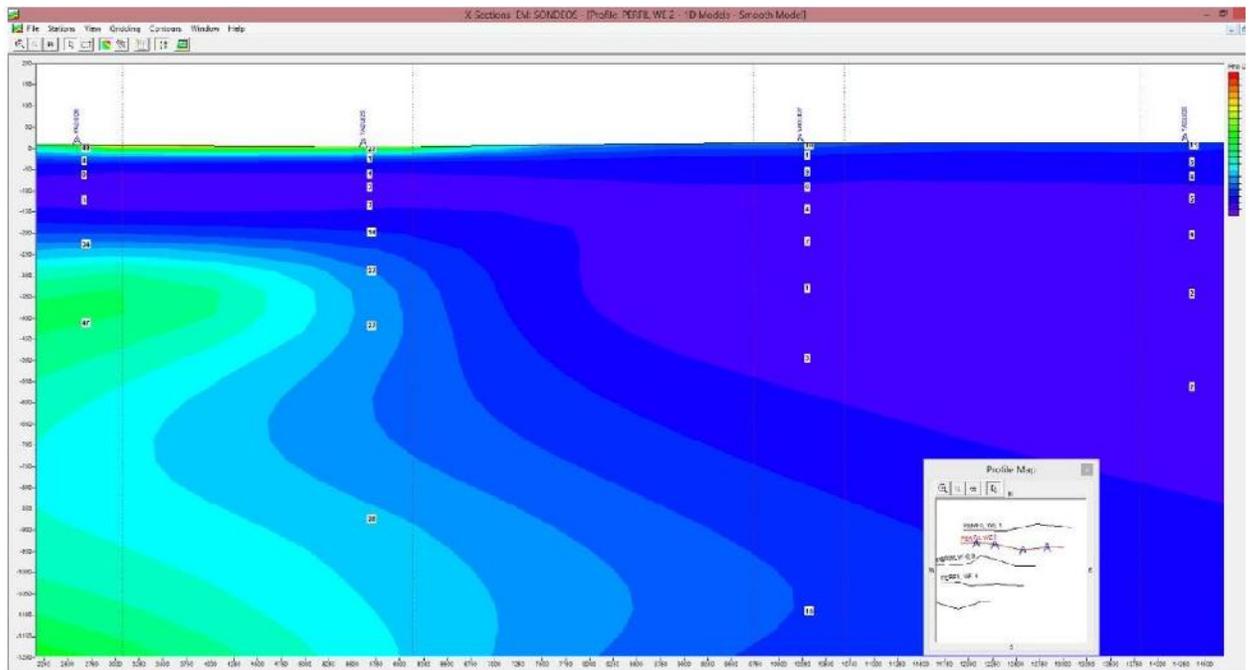


Figura 25. Sección resistiva W-E 2 en el área de estudio.

Y así, al ir aproximándonos a la región central del área que es donde tenemos más cerrado el mallado de los sondeos, nos encontramos con estructuras en los materiales características de expresiones distensivas, esto lo podemos inferir debido a la respuesta de los materiales interpretada, como es el caso de la sección W-E 3 (Figura 26), donde claramente se puede apreciar estructuras de fallamiento normal (líneas discontinuas rojas) desde los 250 metros de profundidad estimada aproximadamente.

Cabe destacar que en las secciones del norte del área el espaciamiento de los sondeos electromagnéticos va de 4 hasta 6 kilómetros de distancia debido al acceso y disponibilidad en la superficie para las espiras transmisoras y en las secciones de la parte central los espaciamiento de las estaciones está en el orden de los 2 ó 3 kilómetros a lo más distanciado, esto claramente nos da como resultado, un mayor detalle en el momento de las inversiones, correlaciones e interpretaciones para el área de estudio.

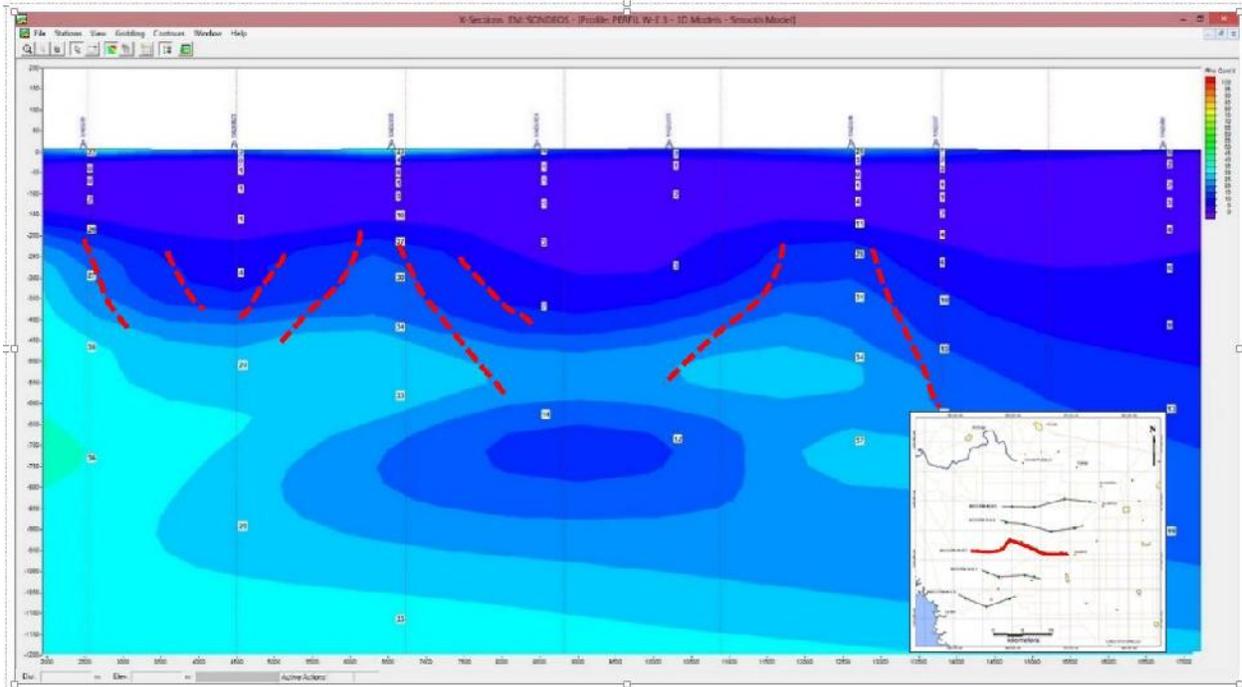


Figura 26. Sección resistiva W-E 3 en el área de estudio.

Por otro lado, tenemos las secciones de orientación preferencial NW–SE donde se puede observar más claramente los materiales someros inferiores a 5 ohm-metro de resistividad por arriba de los 300 metros de profundidad estimada y con espesores estimados variantes de los 60 metros a los 250 metros aproximadamente, además observamos estructuras a profundidades estimadas mayores a los 250 metros de altos resistivos coincidiendo con los levantamientos del basamento en la gravimetría, un ejemplo de esto es la sección NW–SE 1 (Figura 27).

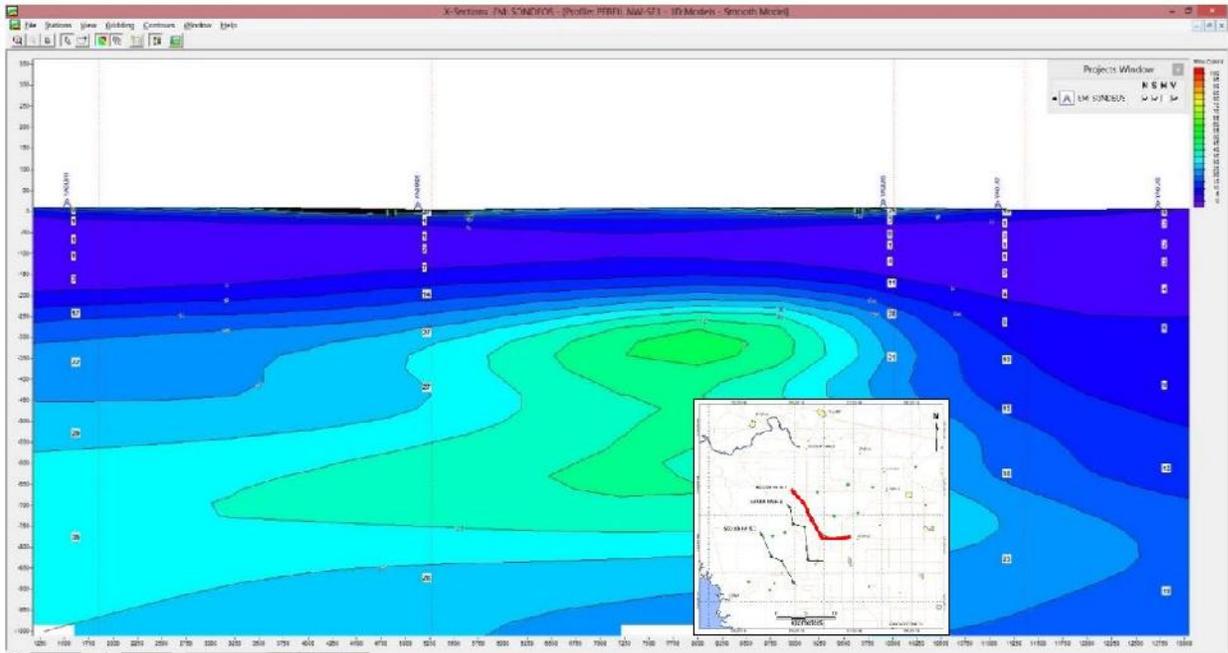


Figura 27. Sección resistiva NW-SE 1 en el área de estudio.

Finalmente, tenemos que en las secciones de orientación preferencial SW-NE, como es el caso de la sección SW-NE 1 (Figura 28), volvemos apreciar las estructuras de carácter distensivo en la porción poniente del área (líneas discontinuas rojas).

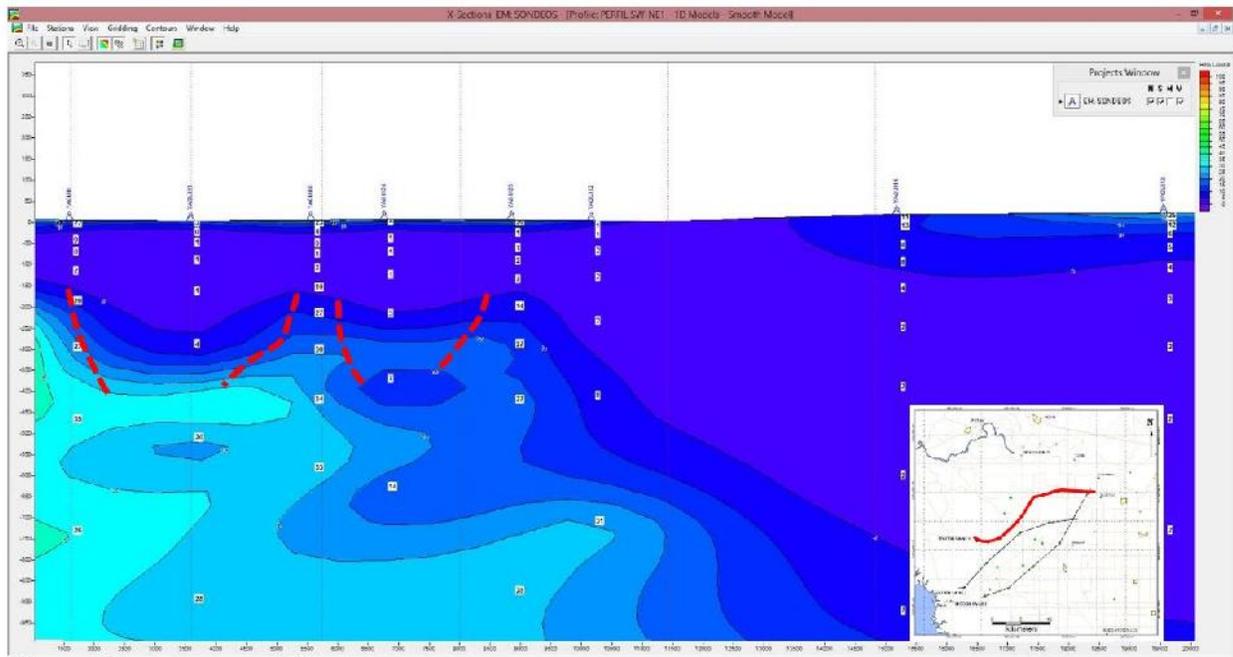


Figura 28. Sección resistiva SW-NE 1 en el área de estudio.



5.2. Gravimetría

Por otro lado, con los resultados de 123 estaciones de la gravimetría adquirida (Figura 29) y después de haber aplicado todas las correcciones correspondientes a todas las estaciones gravimétricas, se concluyeron en cuatro secciones, las cuales tienen una separación entre cada estación que va de 500 metros a 4 kilómetros y oscilan entre 50 y 61 kilómetros de longitud con una separación de 4 a 7 kilómetros aproximadamente entre ellas.

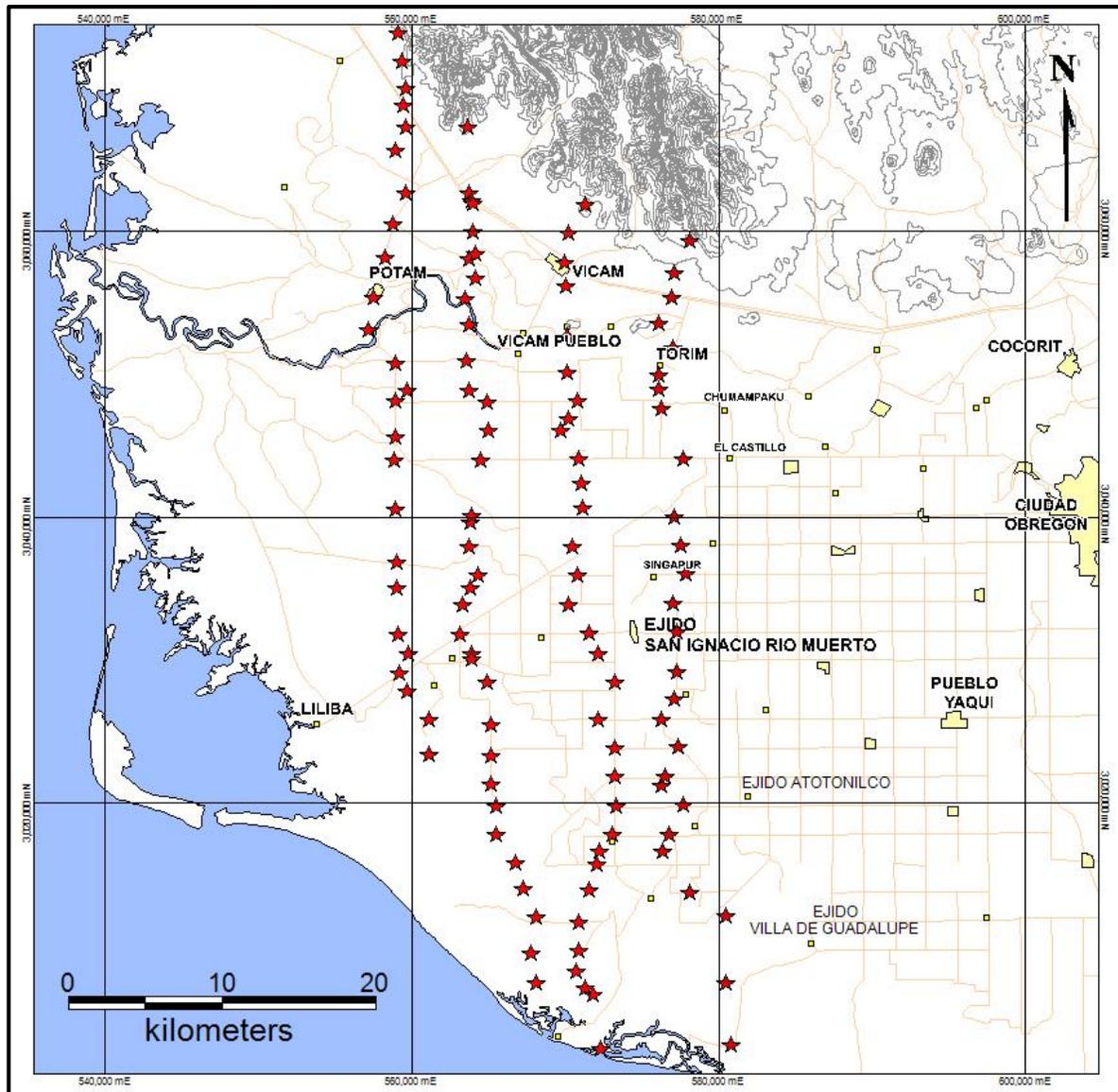


Figura 29. Ubicación de las estaciones gravimétricas en el área de estudio.

5.2.1. Anomalía de Bouguer

Con todos los datos gravimétricos se generó inicialmente el mapa de contornos de la anomalía de Bouguer (Figura 30) y posteriormente el modelo tridimensional de la misma anomalía (Figura 31), mostrando la distribución espacial de esta. Los software de Oasis Montaj y Surfer 8 fueron en los que se llevó a cabo la interpolación de los datos por medio del método de Kriging, teniendo como resultado modelos muy similares, dicho esto, la Figuras tridimensionales empleadas en esta tesis son totalmente del software Oasis Montaj por su mejor resolución en 3D y visualizadas en los mapas de contornos por el software MapInfo.

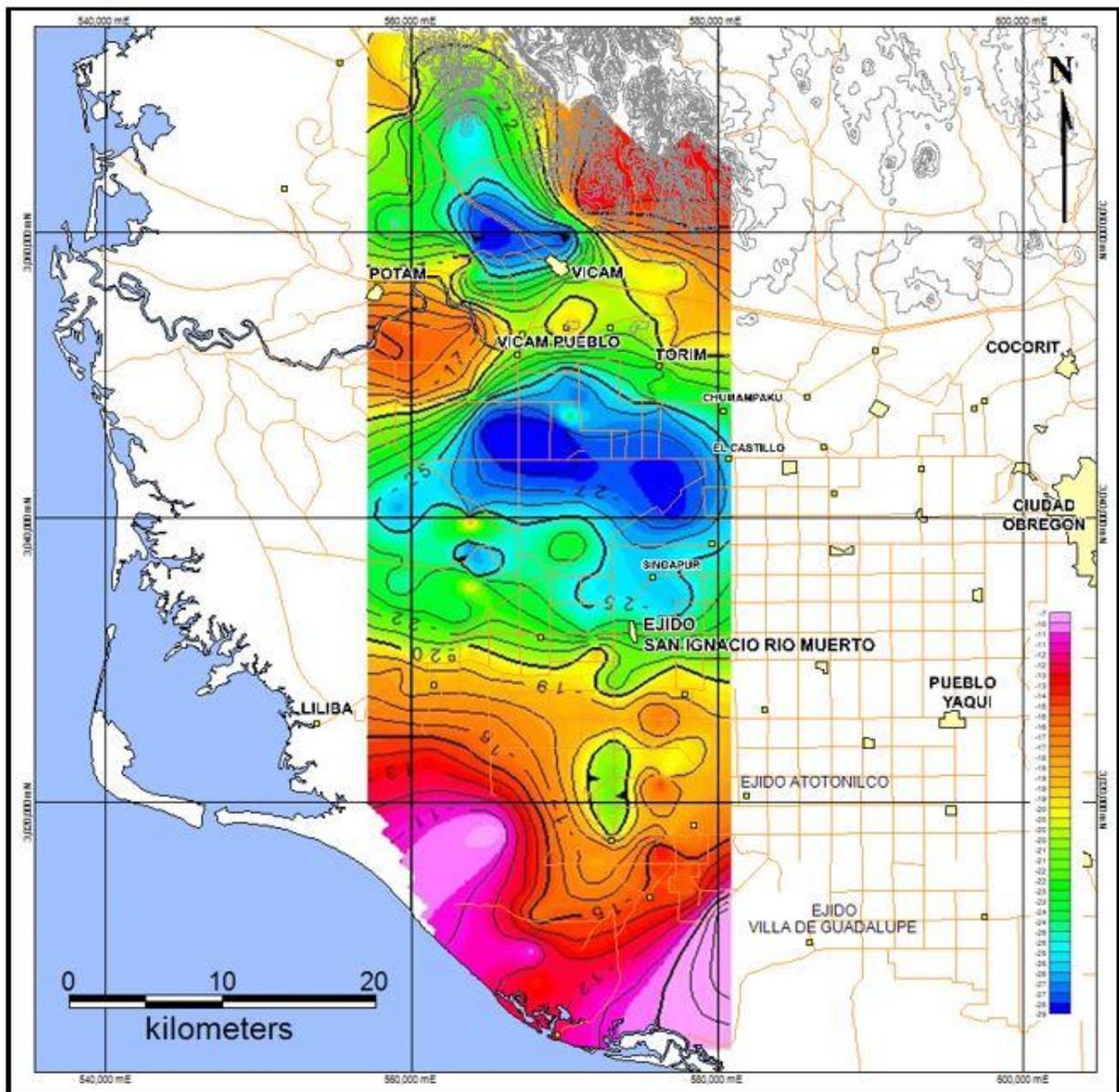


Figura 30. Modelo de contornos de la anomalía de Bouguer en el área de estudio.

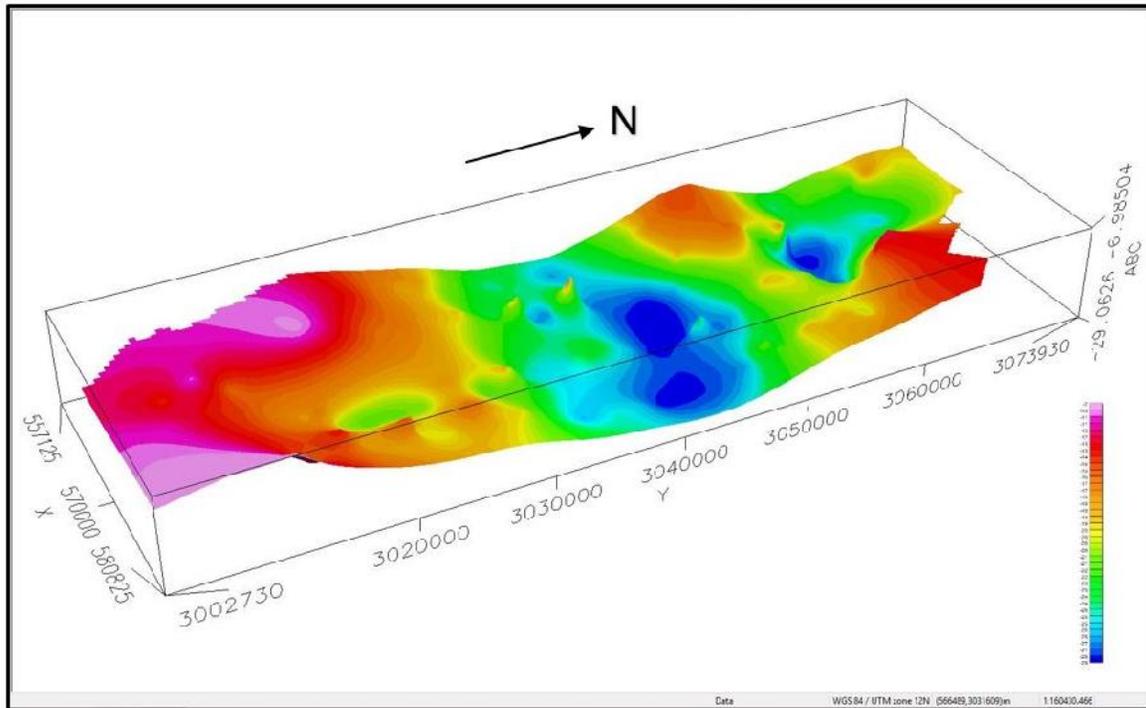


Figura 31. Modelo tridimensional de la anomalía de Bouguer en el área de estudio.

Después de la reducción de los datos, las anomalías máximas fueron de -6.9710 mGals y mínimas de -29.0570 mGals, evidentemente observamos que a medida que nos acercamos a las zonas serranas en los afloramientos litológicos de la sierra del Bacatete al norte, hacia las Guásimas hacia el noroeste y hacia la parte de la línea de costa en el poblado de Lobos en el área de estudio, las anomalías se incrementan y al aproximarnos a la parte central del área por el poblado de Oronio y 8 kilómetros al sur de este, se observan los valores más bajos de dicha anomalía.

Como ya es sabido, en las interpretaciones gravimétricas existe una relación inversa entre los valores de la profundidad contra los de la anomalía de Bouguer, esto es, que mientras mayor sea el valor de la anomalía de Bouguer en cada estación, la profundidad estimada será menor en dicha estación y viceversa.

Ya teniendo el modelo tridimensional de la anomalía de Bouguer, que este, nos representa la morfología del basamento, podemos observar que en la parte central del área y norte-noroeste tenemos los valores mínimos de la anomalía de Bouguer de van de -20 mGals hasta los -29 mGals que son las zonas más profundas del delta del río Yaqui, estas zonas tienen una cierta alineación preferencial norte-sur/noroeste-sureste de una extensión de aproximadamente 44 kilómetros con un pequeño alto gravimétrico en la parte central con un valor de -18 mGals, con el cual podemos hacer la separación de una fosa al norponiente del área y otra área de fosas en



la parte central, siendo estas últimas la más profundas.

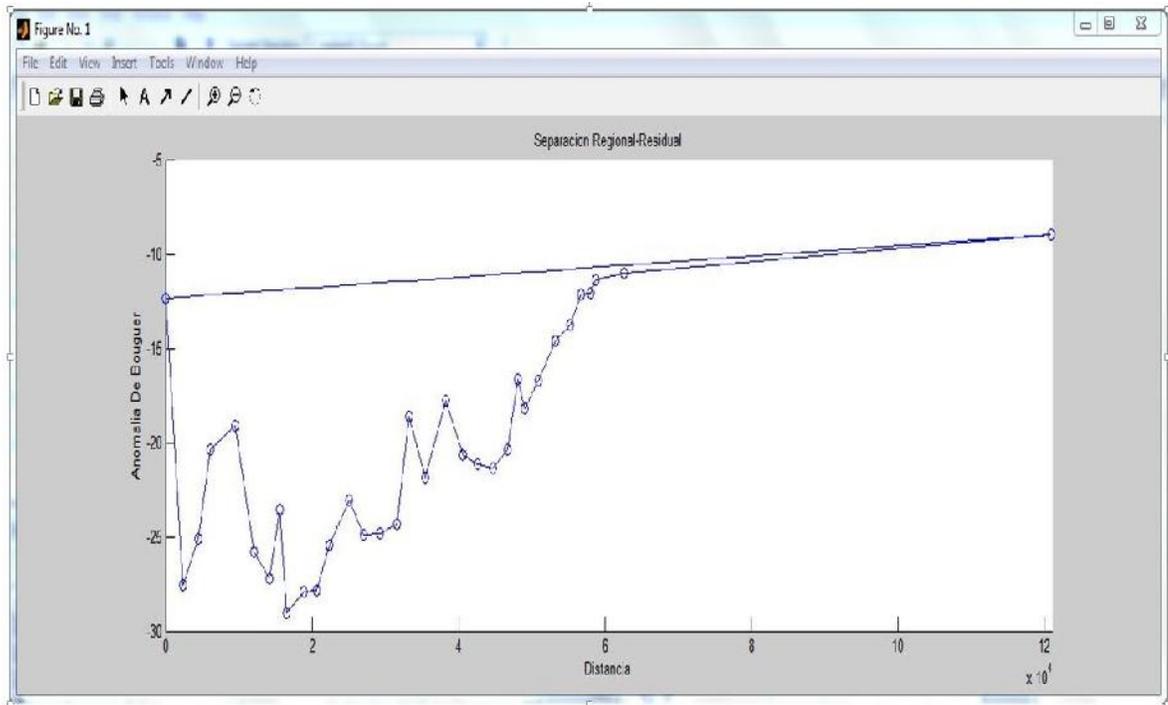
Específicamente, la fosa del noroeste del área tiene una extensión de aproximadamente 18 kilómetros y un ancho W-E de 7 kilómetros siendo su anomalía más baja de -27.427 mGals ubicada entre los poblados de Potam y Vícam, por otro lado, tenemos las fosas centrales con una extensión de aproximadamente de 23 kilómetros y una aptitud de más de 25 kilómetros donde tenemos los valores mínimos de -28 y -29 mGals.

Es importante destacar que el alto gravimétrico observado entre las fosas representa un somerización del basamento en esa área y en términos geohidrológicos se puede representar como un parteaguas en el acuífero regional, y que estos, actúen como independientes. Sin embargo, esta conjetura tendría que ser respaldada por estudios de piezometría en el área en cuestión, ya que si los niveles estuvieran por encima de este alto gravimétrico existe una posibilidad muy alta de que ambas partes se encuentren interconectados entre sí.

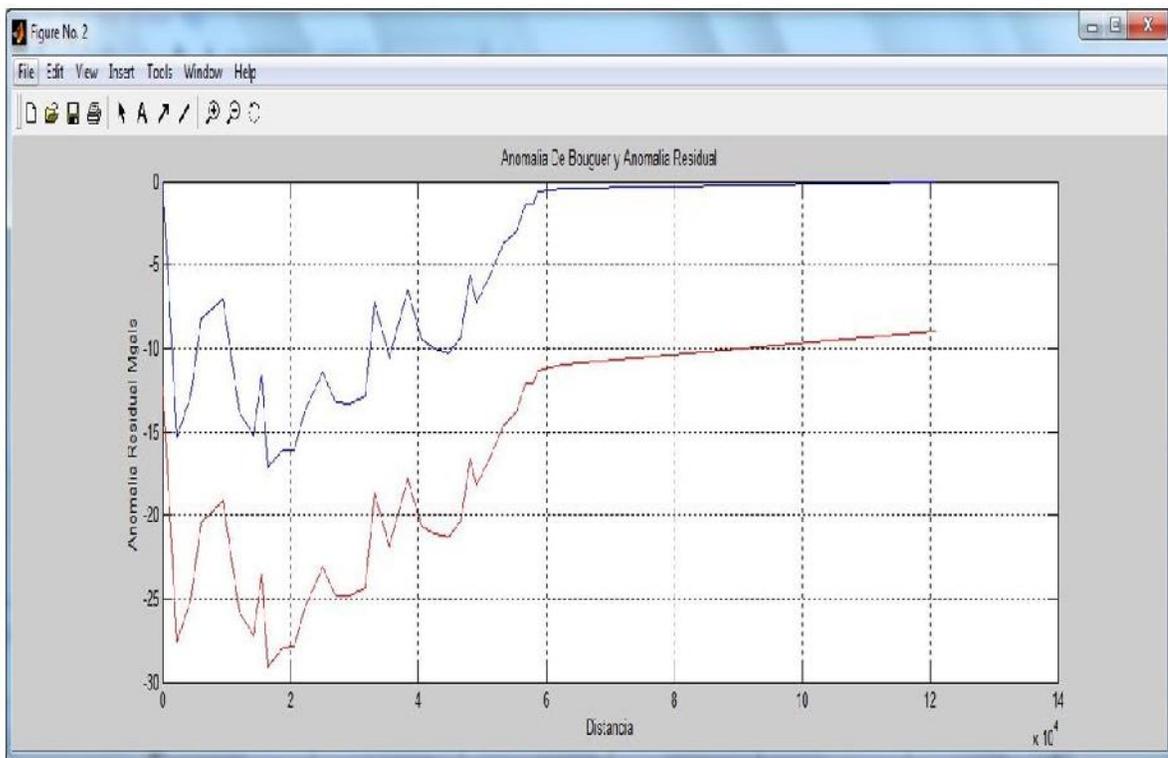
5.2.2. Anomalía de residual

Lo que respecta a la anomalía residual en los resultados, estando conscientes de lo ya mencionado en la revisión de los métodos geofísicos, se realizó por medio de suavizado de perfiles regional-residual mediante el programa matemático MATLAB para cada una de las secciones gravimétricas obtenidas.

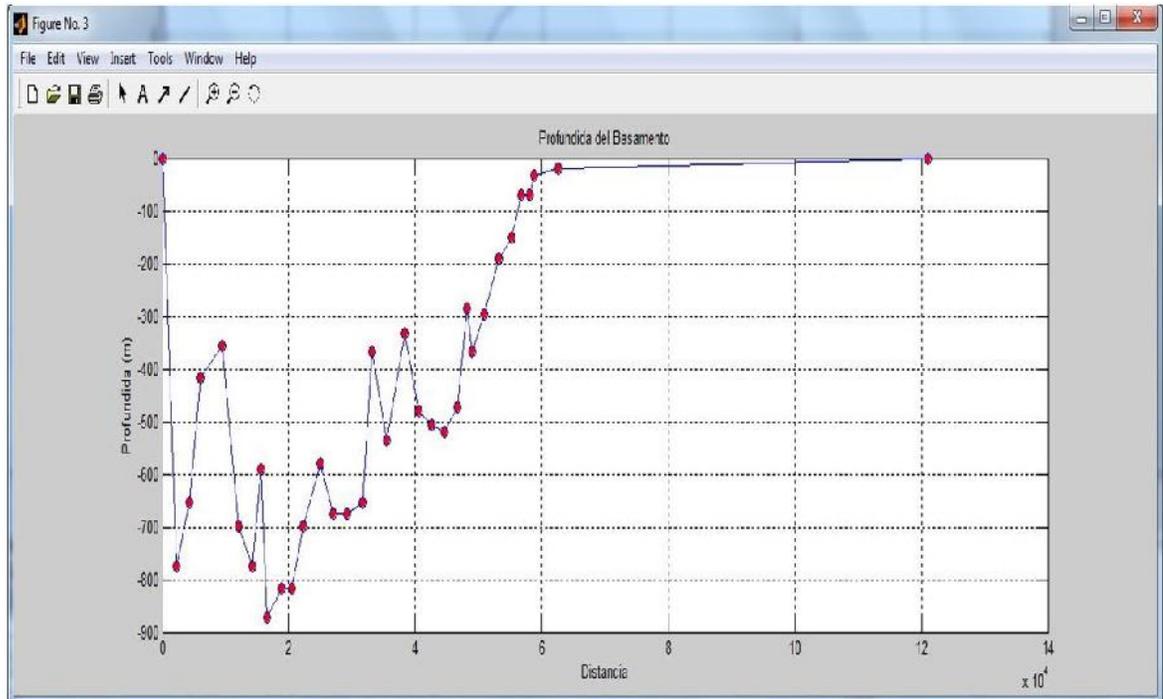
A continuación solo se muestra las gráficas de "separación regional-residual" (Gráfica 5), "anomalía de Bouguer y anomalía residual" (Gráfica 6) y "perfil de la profundidad estimada del basamento" (Gráfica 7) obtenidas para la sección NORTE-SUR 2 en el área de estudio. El resto de perfiles y gráficas de las demás secciones se encuentran en el Anexo VI (Gráficas de remoción regional-residual y secciones gravimétricas).



Gráfica 5. Separación regional-residual de la sección NORTE-SUR 2.



Gráfica 6. Anomalia de Bouguer y anomalía residual de la sección NORTE-SUR 2



Gráfica 7. Perfil de la profundidad estimada del basamento de la sección NORTE-SUR 2

Después de obtener todos los valores de la remoción para todas las estaciones gravimétricas en el área de estudio, se realizó un modelo tridimensional de la separación de estas superficies realizadas mediante el programa Oasis Montaj, la cual se muestra a continuación (Figura 32).

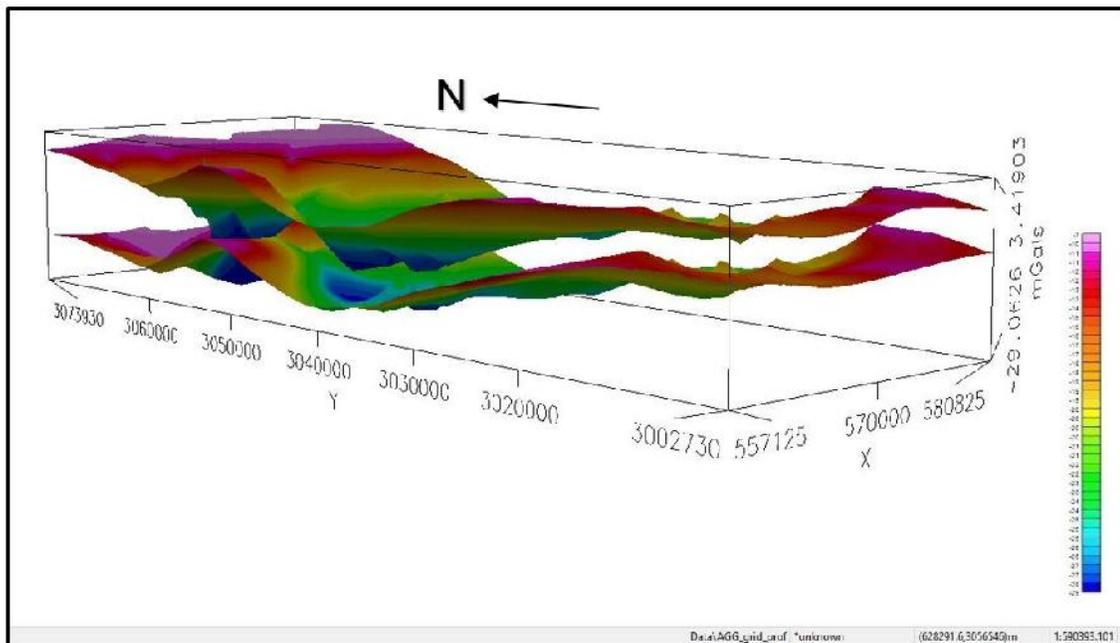


Figura 32. Modelo tridimensional de la separación de la anomalía de Bouguer y la anomalía residual en el área de estudio.



5.2.3. Profundidad de la cuenca

Al igual que los cálculos de la remoción regional-residual, el cálculo para la profundidad estimada de la cuenca en cada estación gravimétrica fue por medio del programa MATLAB por medio de la losa de Bouguer, para finalmente, obtener un mapa de contornos a profundidad estimada del basamento en el área de estudio en el software de MapInfo (Figura 33), todos los datos de dichos cálculos por secciones se encuentran en los Anexo V (Bases de datos de gravimetría).

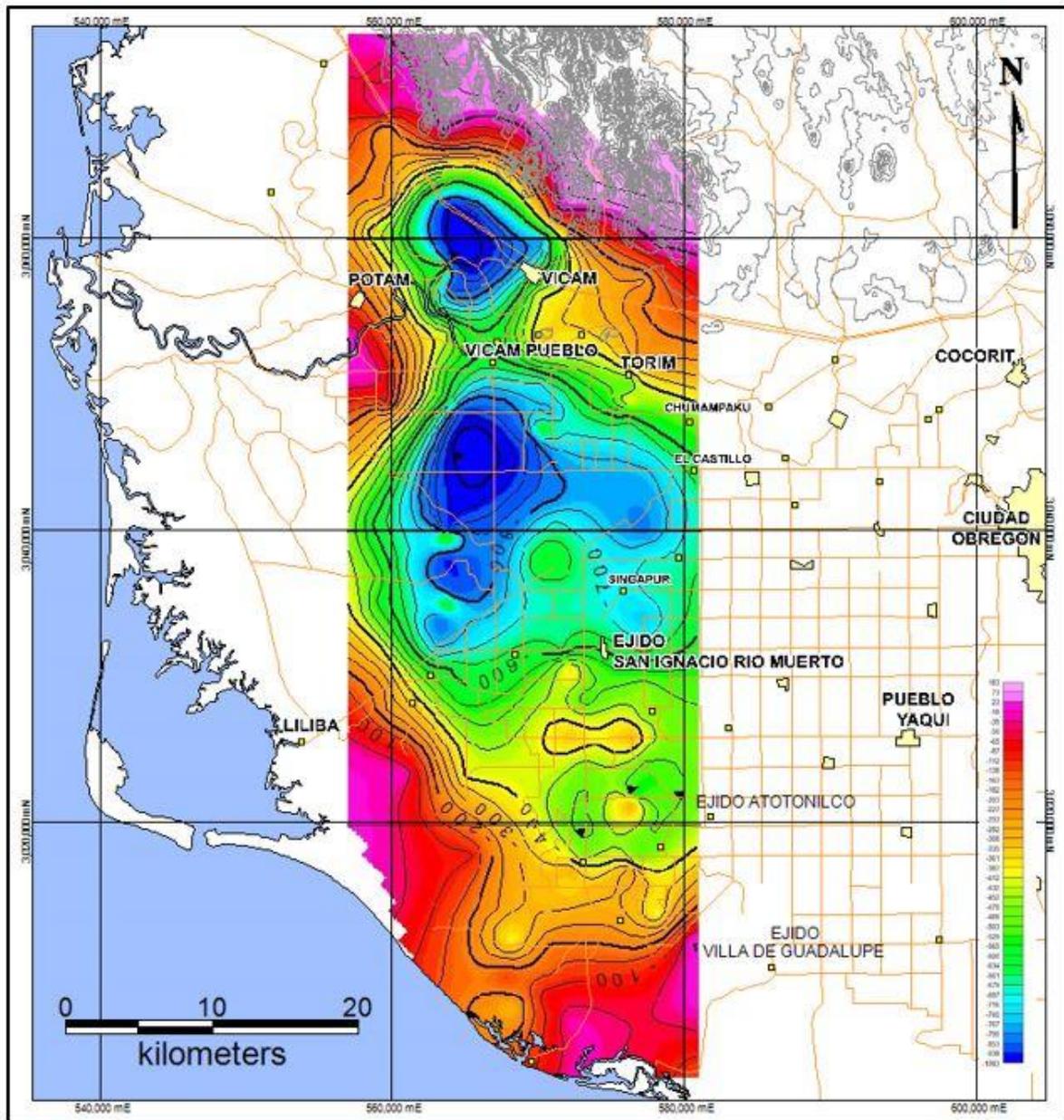


Figura 33. Modelo de contornos a profundidad estimada en el área de estudio.



Podemos observar rápidamente que las mayores profundidades estimadas en la cuenca se encuentran en la parte central y norte-noroeste, como lo habíamos comentado al observar el mapa de contornos de la anomalía de Bouguer, sin embargo, ya podemos decir que la profundidad mayor estimada la tenemos en la fosa central con una profundidad de 1084 metros, mientras que la fosa del norte alcanza los 1027 metros de profundidad estimada con valores de anomalía de -21.35 mGals y -20.25 mGals respectivamente, con esto, podemos tener una relación de 51 metros aproximadamente por mGal en la zona central del área de estudio.

Por último se muestra la configuración geométrica del basamento a profundidad en un modelo tridimensional mediante el software Oasis Montaj (Figura 34).

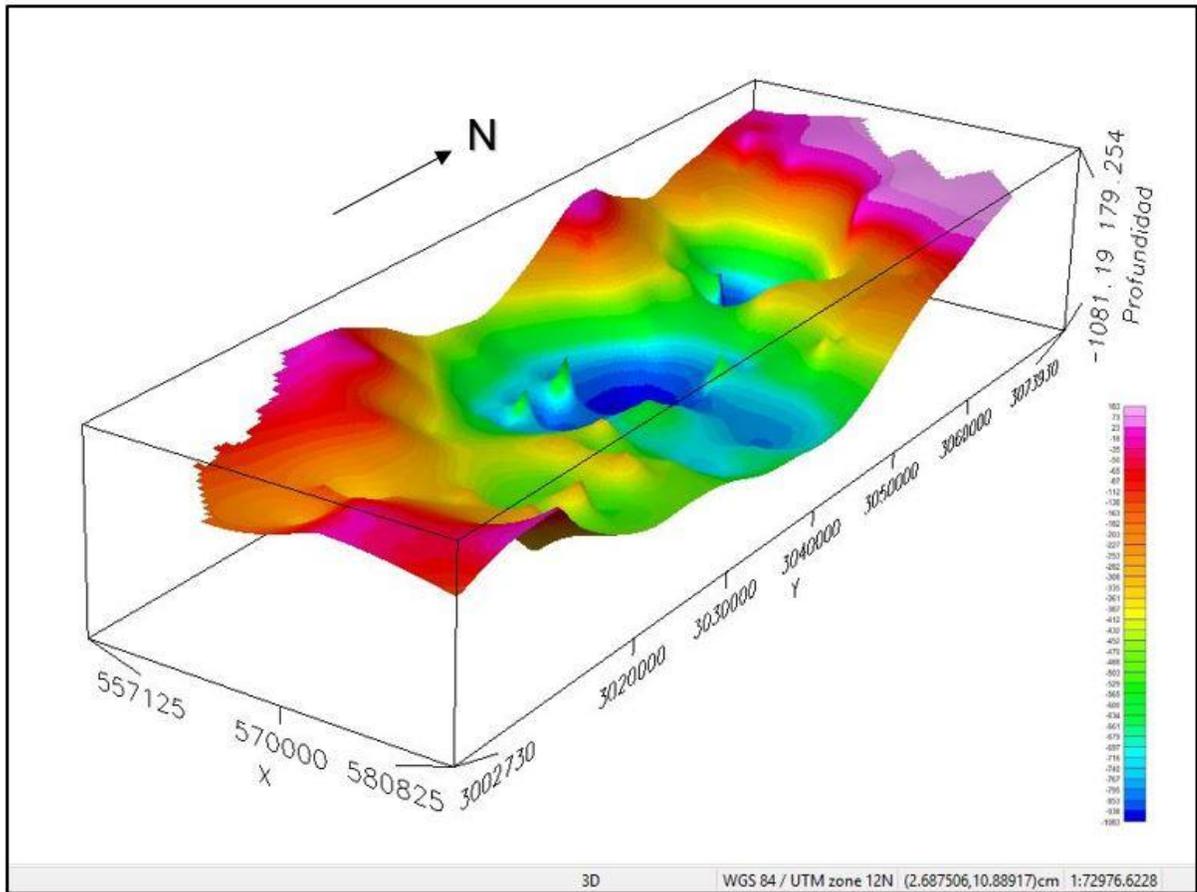


Figura 34. Modelo tridimensional del basamento a profundidad estimada en el área de estudio.



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Con este estudio podemos concluir en base a los objetivos previamente establecidos lo siguiente:

En lo que respecta a los sondeos electromagnéticos transitorios, se obtuvieron muy buenos resultados en base a la profundidad de investigación en el área de estudio, ya que se pudieron observar emplazamiento de materiales e incluso por debajo del basamento observado en los sondeos y corroborado con el método gravimétrico, como es el caso del sondeo YAQUI 23 en donde tenemos una diferencia entre los métodos para el basamento menor a los 100 metros.

También se corroboró de la existencia y extensión en el área de estudio de materiales bajamente resistivos correlacionables con lo que llaman en la bibliografía "arcilla azul" en áreas aledañas hacia el poniente del área de trabajo, la cual, se aprecia en las partes someras del relleno sedimentario del delta del río Yaqui con espesores variantes de 60 hasta los 200 metros.

En las secciones donde se tuvo más oportunidad de adquirir sondeos electromagnéticos debido a la disponibilidad de áreas en superficie (espaciamiento de sondeos de no más de 3 kilómetros), se lograron apreciar estructuras de origen distensivas (fallamiento normal) como lo son las secciones resistivas SW-NE 1 y W-E 3. De igual forma, en los mapas de resistividad a profundidad se observaron rasgos importantes como lo son la diferencia de materiales entre la parte este de la parte oeste teniendo como punto central el sondeo YAQUI 19 aproximadamente, esto se le puede atribuir a distintos tipos de ambientes sedimentarios como lo son los lagunares y deltaicos.

Aunado a esto, a partir de los 300 metros de profundidad estimada encontramos un alineamiento preferencial norte – sur de los materiales de resistividades superiores de los 10 a 15 ohms-metro (porción oeste) en contraste de los materiales de las resistividades bajas a muy bajas (porción este) cambiando su orientación progresivamente hasta llegar a una alineación noreste – suroeste a los 900 metros de profundidad estimada aproximadamente, con esto, podemos especular que se debe a la trayectoria que ha tenido a través del tiempo geológico el delta del río Yaqui, sin embargo, en la zona de los sondeos YAQUI 6, YAQUI 7 y YAQUI 21 del lado este se observa una creciente en la resistividad de los materiales. Aun así, se sigue conservando el alineamiento.



Por otro lado, en la morfología del basamento del delta del río Yaqui se encuentra una fosa principal en la parte central del área de estudio, la cual tiene valores de -29 mGals en la anomalía de Bouguer, correspondiendo a una profundidad estimada de 1084 metros aproximadamente, esta tiene una extensión de aproximadamente de 23 kilómetros y una aptitud de más de 25 kilómetros con una orientación preferencial noroeste - sureste, la cual se encuentra limitada al norte con un alto gravimétrico de -18 mGals correspondiente a 550 metros de profundidad estimada aproximadamente, al sur se delimita con el levantamiento del basamento a medida que nos acercamos a la línea de costa, al poniente se puede apreciar otra delimitación por el levantamiento del basamento, pero al oriente no se tiene un límite específico, ya que el mayado gravimétrico no alcanzó a delimitar la fosa.

La fosa más pequeña ubicada al norte - noroeste del área de estudio tiene una extensión de aproximadamente 18 kilómetros y un ancho W-E de 7 kilómetros siendo su anomalía más baja de -27.427 mGals que corresponde a los 1027 metros de profundidad estimada y está ubicada entre los poblados de Potam y Vícam. Se delimita al norte y oriente con la sierra del Bacatete, al sur con un alto gravimétrico correspondiente a 550 metros de profundidad estimada y al poniente con el levantamiento del basamento. Dicho lo anterior, podemos coincidir con el "Estudio de Actualización Geohidrológica del Acuífero Valle del Yaqui Municipio de Cajeme, Sonora" de Monreal *et al*; 2003, con respecto a fosas en la porción poniente e incluso con los cálculos de profundidades.

Además, la geometría del basamento elaborada en este estudio nos permite distinguir una serie de estructuras sepultadas con orientaciones noroeste - sureste y en menor proporción suroeste - noreste (Figura 35). Donde se puede especular que el origen de estas cuencas es debido a procesos distensivos relacionadas con la apertura del golfo de California, ya que tanto en las secciones de los sondeos electromagnéticos como en el modelado tridimensional gravimétrico se observan evidencias de estos.

Geohidrológicamente se puede decir que las mejores áreas en donde se tienen rellenos sedimentarios potentes en el orden de 1000 metros de profundidad estimada, es en la parte central - poniente y en la región noroeste del delta del río Yaqui.

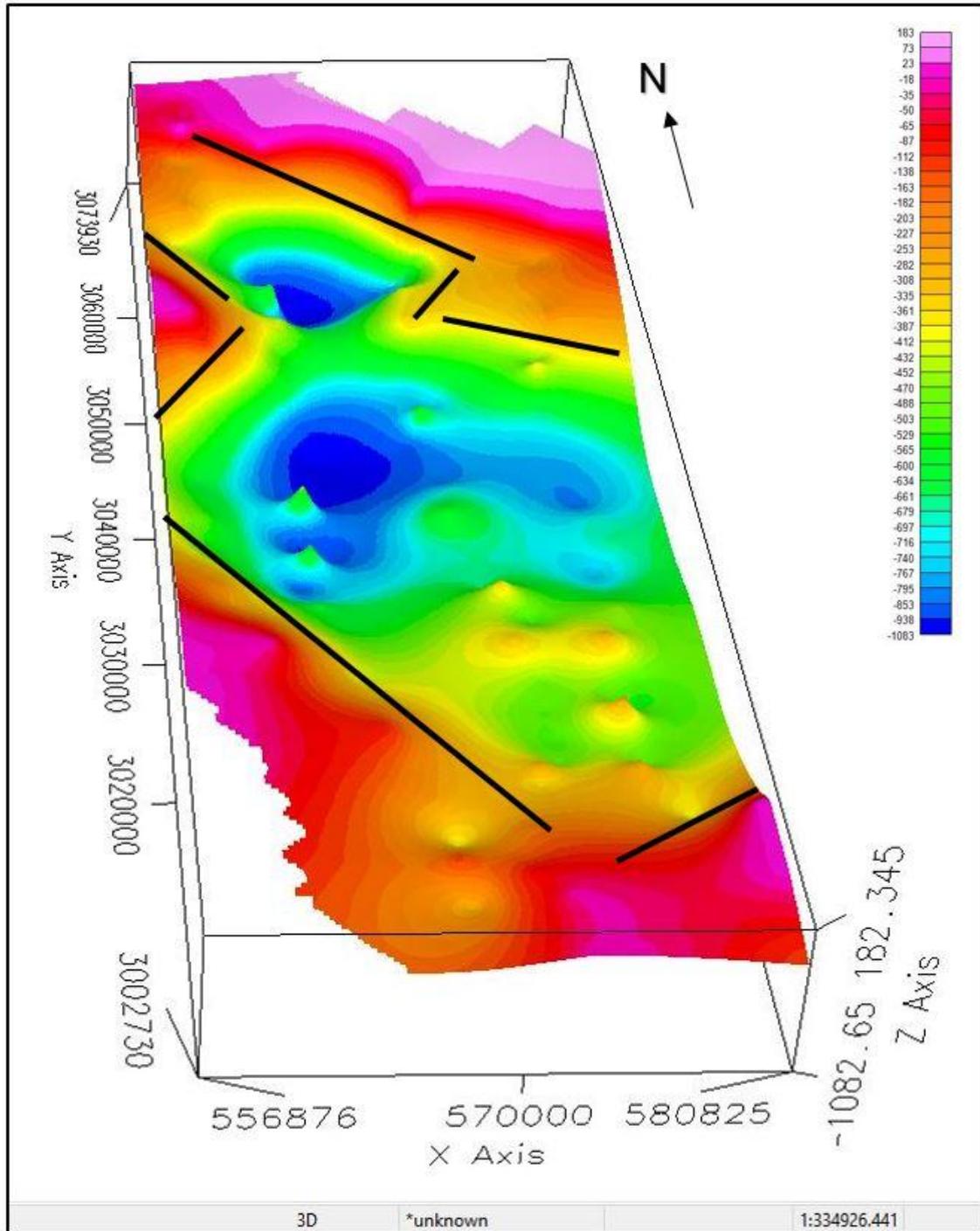


Figura 35. Modelo tridimensional del basamento a profundidad estimada con alineamientos estructurales en el área de estudio.

Por último se presenta el producto final de este trabajo, que es poder mostrar gráficamente todos los datos procesados adquiridos en campo, en un modelo tridimensional del basamento con profundidades de observación de los sondeos electromagnéticos transitorios en el área de estudio (Figura 36).

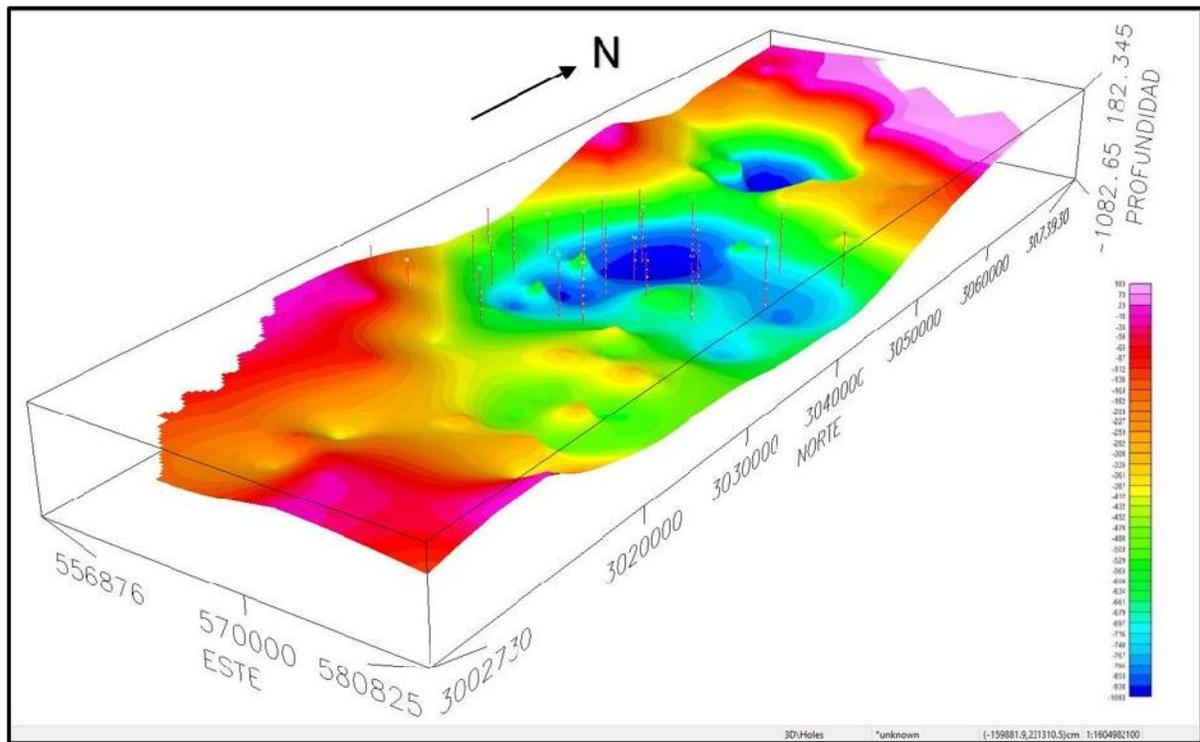


Figura 36. Modelo tridimensional del basamento con profundidades de observación de los sondeos electromagnéticos transitorios en el área de estudio.

6.2. Recomendaciones

Las recomendaciones de este trabajo para los futuros trabajos en esta misma área son las siguientes.

Sería de vital importancia que se realizaran cortes litológicos de pozo a profundidad para poder corroborar y ratificar, tanto los diferentes tipos de materiales del relleno sedimentario en el delta del río Yaqui y en medida de lo posible alcanzar a cortar basamento, sin embargo, las respuestas de los sondeos electromagnéticos coinciden en la mayoría de los casos con la respuesta gravimétrica.

En este trabajo no se pudo delimitar la parte oriente de la fosa mayor ubicada en el centro del área de estudio, debido a que las secciones gravimétricas interpretadas no llegaron a dicha área, en este sentido, sería muy recomendable hacer más levantamientos gravimétricos acercándonos cada vez más a la Ciudad de Obregón, Sonora; y con esto poder definir dicho límite de la fosa en cuestión.



Otro punto sería, realizar más sondeos electromagnéticos en la zona noreste del delta del río Yaqui para obtener correlaciones e interpretaciones más detalladas de los materiales depositados en el relleno sedimentario, en específico, los materiales de resistividades bajas y así realizar una caracterización más fina de dichos materiales. Una buena opción sería realizar espiras más pequeñas para detallar todas las partes someras.

Además, para darle continuidad a los trabajos de caracterización de los rellenos sedimentarios en el delta del río Yaqui, es conveniente continuar con un mallado de sondeos electromagnéticos en la fosa más pequeña ubicada al noroeste del área de estudio, en la cual, en este trabajo no se realizó ningún sondeo, ya que no se sabía específicamente de su presencia.

Por último, es imprescindible cerrar los espaciamientos de los sondeos electromagnéticos transitorios a no más de tres kilómetros, para futuros levantamientos de campo ya que observamos que se pierde detalle en las estructuras regionales del relleno sedimentario.



7. REFERENCIAS CITADAS

- Anderson, T.H., Silver, L.T.**, 1977. U-Pb isotope ages of granitic plutons near Cananea, Sonora: *Economic Geology*, v. 72; p. 827-836.
- Arvizu Núñez, Jesús y González Enríquez, Rodrigo**, 2005. Contaminación por lixiviados de un vertedero de residuos sólidos urbanos en una zona del acuífero del valle del Yaqui, Sonora: Asociación Geohidrológica Mexicana, V Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Son., p. 29. (resumen).
- Bonvalot, S., M. Diament and G. Gabalda**, 1998. Continuous gravity recording with Scintrex CG-3M meters: a promising tool for monitoring active zones. *Geophys. Jour. Int.*, v. 135 (2), p. 470-494.
- Burger H. Robert**, 1992. *Exploration Geophysisc of the Shallow Subsurface*. Prentice Hall.
- Celis-Salgado, Patricia**, 1992. Diagnóstico de la contaminación del agua en el estado de Sonora: Hermosillo, Ecología, Recursos Naturales y Medio Ambiente en Sonora, p. 165–187.
- CNA**, 1997. Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación de los acuíferos de León, Jiménez-Camargo y Valle del Yaqui, Realizado por Ingeniería Geológica Computarizada, S.A. de C.V.
- CONAGUA**, 2006. Datos meteorológicos y de paros de bombeo de los acuíferos de Caborca, Costa de Hermosillo, Guaymas y El Yaqui: Hermosillo, Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal en Sonora, Subgerencia Administración del Agua, archivos digitales (inéditos).
- CONAGUA**, 2009. Actualización De La Disponibilidad Media Anual De Agua Subterránea Acuífero (2640) Valle Del Yaqui, Estado De Sonora. Publicada en el diario oficial de la federación el 28 de agosto de 2009. p. 33.
- CONAGUA, UNISON**. 2011. Estudio de Impacto por el Cambio Climático en el Avance de la Interfase Marina de los Acuíferos Costeros Valle del Yaqui y Cocoraque. Primer Informe. Hermosillo, Sonora.
- Damon, P.E., et al.**, 1983. El Batolito Larámide (90-40 Ma) de Sonora: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Convención Nacional, Guadalajara, Jal., Memorias.
- Fernández R. Isla, Verges Yolanda, Pérez Luis, Mora Emilio**, 2006. Estudio Mediante Sondeos Electromagneticos En El Dominio De Tiempos Con Fines Hidrogeológicos En La Laguna De Fuente De Piedra (Málaga). *Geognosia* p.77.
- Fredrikson, G. y Henry C. D.**, 1972. Memoria Geología del área de Mazatlán, II Convención Nacional Sociedad Geológica Mexicana, p. 146-147.
- González Enríquez, Rodrigo**, 1999. Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero del Valle del Yaqui, Sonora: Universidad de Sonora, Departamento de Agricultura y Ganadería, III Seminario de Acuíferos Costeros de Sonora, Empalme, Sonora, p. 73–77 (resumen).



- González Enríquez, Rodrigo, y Canales Elorduy, A.G.**, 1995. Contaminación por plaguicidas en el acuífero del Valle del Yaqui, in Restrepo, I., ed., Agua, salud y derechos humanos: México, D.F., Comisión Nacional de Derechos Humanos, p. 203–219.
- González Enríquez, Rodrigo, y Canales Elorduy, A.G.**, 1997. Alternativas para reducir la presencia de manganeso en el agua potable para Guaymas-Empalme, procedente del acuífero del valle aluvial del Río Yaqui, Sonora, México: Universidad de Sonora, Departamento de Agricultura y Ganadería, I Seminario de Acuíferos Costeros de Sonora, Hermosillo, p. 83 (resumen).
- Grant F. S. and West G. F.** 1965. Interpretation theory in applied geophysics. McGrawHill, New York N.Y., p. 583.
- Grijalva A.** 2008. Hidroestratigrafía Del Acuífero Del Valle Del Río Yaqui, Sonora. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora.
- Gutiérrez Rosa.** 2007. Uso De Registros Geofísicos Y Sondeos Eléctricos Verticales En La Modelación De La Salinidad Y Parámetros Hidráulicos En El Valle Del Río Yaqui. Tesis de Maestría en Ciencias Geología. Universidad de Sonora.
- Hammer S.**, 1939. Terrain corrections for gravimeter stations. *Geophysics*, 4, p. 184–194.
- Henry, C. D.**, 1986. East-northeast-trending structures in western Mexico: evidence for oblique convergence in the late Mesozoic: *Geology*, v. 14, no. 4, p. 314–317.
- INEGI**, 1991. Carta Fisiográfica. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- INEGI**, 2000, Síntesis de Información Geográfica del Estado de Sonora: Aguascalientes, Ags., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Secretaría de Programación y Presupuesto, p. 88.
- Johnpeer, G.D., Sheridan, M.F., and Wilson, R.T.**, 1979. Geology of the coastal region near Guaymas, Sonora. *Bol. Depto. Geol. UniSon*, v.2, n1, p. 1-15, Hermosillo, Sonora, México.
- Manuel Aragón-Arreola, María Morandi, Arturo Martín-Barajas, Luis Delgado-Argote, Antonio González-Fernández**, 2005. Structure of the rift basins in the central Gulf of California: Kinematic implications for oblique rifting. División de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Laboratorio de Geofísica.
- Menjívar R.** 2013. Implementación De Sondeos Tdem Para La Caracterización Del Acuífero Superficial En La Zona Aledaña Al Campo Geotérmico De San Vicente. Diplomado de especialización en geotermia-2013. Universidad de El Salvador. p. 30.
- Merlet, S., A. Kopaev, M. Diament, G. Geneves, A. Landragin and F. P. Dos Santos**, 2008. Micro-gravity investigations for the LNE watt balance project. *Metrologia* 45 (3), p. 265-274.
- Monreal Rogelio y Otros.** 2003. "Estudio de Actualización Geohidrológica del Acuífero Valle del Yaqui Municipio de Cajeme, Sonora". Informe Final. Comisión Nacional del Agua. P. 147.



- Monreal Rogelio, Rangel Medina, Grijalva Montoya, Minjarez Sosa, Morales Montaña**, 2011. Metodología Para La Definición De Unidades Hidroestratigráficas: Caso Del Acuífero Del Valle Del Río Yaqui, Sonora, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 63, núm. 1, p. 119-135.
- Mora, A.G.**, 1992. History of Cenozoic magmatism in the Sierra Santa Ursula, Sonora, Mexico, master of arts thesis, Department of Geology, University of Texas, Austin, p 153.
- Morán, Z. D. J.** 1984. Geología de la República Mexicana. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. P. 88.
- Mullan, H.S.**, 1978. Evolution of the Nevadan orogen in northwestern Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 89, p. 1175-1188.
- Ortega-Gutiérrez, F., Sedlock, R. L., Speed, R. C.**, 1994. Phanerozoic tectonic evolution of Mexico, en Speed, R. C. (ed.), Phanerozoic evolution of North American continent-ocean transition: Boulder, Colorado, Geological Society of America, DNAG Continent-Ocean Transect Volume, p. 265-306.
- Pilger, R.**, 1978. Tectonic controls of late Cretaceous sedimentation, western interior, USA: Nature 274, p. 653-657.
- Rangel Medina, Miguel; Minjárez Sosa, J.I.; Monreal Saavedra, Rogelio; Gutiérrez Heredia, R.E.; y Grijalva Noriega, F.J.**, 2005. Geoquímica de la salinidad y origen del agua subterránea en el acuífero del Valle del Yaqui, Sonora, México: Asociación Geohidrológica Mexicana, V Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Hermosillo, p. 113-114 (resumen).
- Riccardi, U., G. Berrino, G. Corrado and J. Hinderer**, 2008. Strategies in the processing and analysis of continuous gravity record in active volcanic areas: the case of Mt. Vesuvius. Annals of Geophysics, 51(1), p. 67-85.
- Romero P. F.** 2006. Caracterización gravimétrica del subsuelo en el área San Pedro – Mesa del Seri, Municipio de Hermosillo, Sonora; México. Tesis de Maestro en Ciencias Geología. Universidad de Sonora. P. 62.
- Romero Padilla F., Valencia Saucedo J.**, Aplicación de métodos geofísicos (gravimetría y resistividad) sobre el cauce del Río Sonora, Ejido La Habana: Hermosillo, Sonora, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de licenciatura, Junio 2003, p. 98.
- Scintrex a división of LR, Zonge Engineering and Research Organization, Inc.** 1998. Scintrex/Zonge GGT-3 Transmitter. Zonge International, Tucson AZ. USA & Scintrex Concord, Ontario, Canada.
- Scintrex Limited**, 2009. CG5 Scintrex autograv system Operation Manual, Scintrex Limited, Concord, Ont., Canada, p. 311.
- Silvia Miranda, Alfredo Herrada, María Cristina Pacino**, 2013. Respuesta instrumental del gravímetro scintrex autograv Cg-5 (s/n 40484) en modos continuo y relevamiento. Asociación Argentina de Geofisicos y Geodestas. GEOACTA 38(1): p. 1-14.



- UNISON**, 2003a. Piezometría y censo de aprovechamientos de los acuíferos ubicados en las partes medias de las cuencas de los ríos Yaqui y Mayo, Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Informe final, p. 65. (inédito).
- UNISON, CONAGUA**, 2003. Estudio de actualización geohidrológica del acuífero "Valle del Yaqui", Municipio de Cajeme, Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Informe final, Dto. Riego Río Yaqui, p. 147.
- Vega-Granillo E.L.; Cirett-Galán Samantha; De la Parra-Velasco M.L.H.; y Zavala- Juárez Raúl**, 2011. Hidrogeología de Sonora, México, in Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 9, p. 57–88.
- Wodzicki, W.A.**, 1995. The evolution of Laramide igneous rocks and porphyry copper mineralization in the Cananea district, Sonora, Mexico: Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson Arizona, p. 181.
- Zonge Engineering**, 2002. GDP-32II Manual de instrucciones. Zonge International, Tucson AZ. USA.
- Zonge Engineering**, 2003. Zonge GGT-3 geophysical transmitter maintenance and repair manual. Zonge International, Tucson AZ. USA.
- Zonge Engineering**, 2013. Specifications for the TEM/3 magnetic antenna. Zonge International, Tucson AZ. USA.



ANEXOS



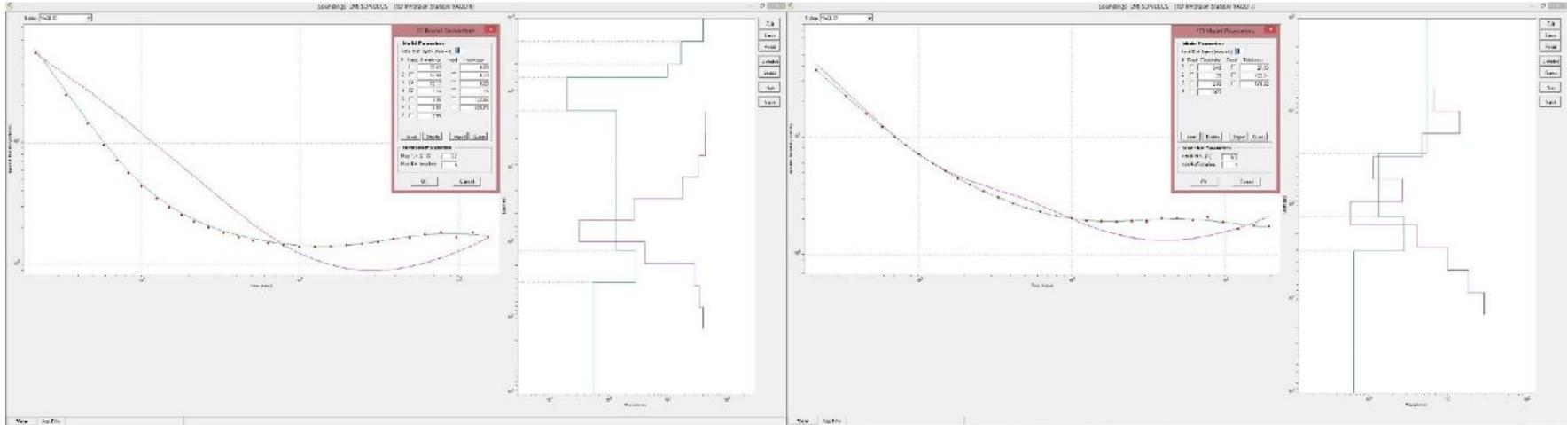
ANEXO I. BASES DE DATOS DE TEM'S

En este anexo enlistamos todos los sondeos efectivos en el área de estudio, así como, la información adquirida en campo por sondeo con todos los parámetros en el header de cada TEM.

TEM	ID	RECEPTOR		TRANSMISOR		Z	PROF	FREC	CY	CRES	VOLT	FREC	AMPERS
		X	Y	X	Y								
YAQ6	YAQUI6	569320.00	3036791.00	569206.00	3036875.00	10.00	451.00	1.00	256.00	510.00	117.80	413.00	10.67
YAQ7	YAQUI7	570513.00	3036173.00	570610.00	3036085.00	6.00	516.00	1.00	256.00	543.00	117.50	412.00	10.60
YAQ8	YAQUI8	573521.00	3036213.00	573626.00	3036127.00	9.00	913.00	1.00	256.00	527.00	118.20	413.00	10.50
YAQ9	YAQUI9	559153.00	3036591.00	559253.00	3036685.00	9.00	416.00	0.50	128.00	516.00	118.00	414.00	10.30
YAQ10	YAQUI10	563208.00	3036990.00	563304.00	3036913.00	9.00	409.00	0.50	128.00	532.00	117.90	412.00	11.00
YAQ11	YAQUI11	565029.00	3043997.00	564946.00	3044074.00	12.00	456.00	1.00	256.00	587.00	118.00	413.00	10.44
YAQ12	YAQUI12	568825.00	3043943.00	568929.00	3044047.00	21.00	622.00	1.00	128.00	554.00	118.10	412.00	10.03
YAQ13	YAQUI13	578431.00	3044827.00	578326.00	3044738.00	30.00	679.00	1.00	128.00	560.00	117.80	413.00	10.43
YAQ14	YAQUI14	574081.00	3045312.00	573989.00	3045208.00	25.00	734.00	2.00	256.00	593.00	117.80	410.00	10.40
YAQ15	YAQUI15	566638.00	3037921.00	566749.00	3038023.00	11.00	1000.00	1.00	128.00	576.00	118.10	417.00	10.40
YAQ16	YAQUI16	556925.00	3028493.00	556938.00	3028363.00	3.00	504.00	0.50	128.00	576.00	118.60	414.00	10.96
YAQ17	YAQUI17	564643.00	3028403.00	564568.00	3028494.00	11.00	900.00	0.50	128.00	516.00	118.50	413.00	10.38
YAQ18	YAQUI18	560657.00	3027072.00	560566.00	3027156.00	7.00	389.00	0.50	128.00	582.00	118.00	413.00	10.40
YAQ19	YAQUI19	562731.00	3032064.00	562645.00	3031968.00	7.00	470.00	0.50	128.00	598.00	117.70	414.00	11.00
YAQ20	YAQUI20	567177.00	3032341.00	567074.00	3032255.00	7.00	654.00	0.50	128.00	543.00	118.30	416.00	10.30
YAQ21	YAQUI21	568886.00	3032133.00	568791.00	3032040.00	6.00	628.00	0.50	64.00	505.00	118.20	412.00	11.00
YAQ22	YAQUI22	560885.00	3032796.00	560774.00	3032706.00	4.00	782.00	0.50	64.00	510.00	118.20	411.00	10.80
YAQ23	YAQUI23	561122.00	3036328.00	561121.00	3036203.00	7.00	801.00	0.50	64.00	494.00	118.10	413.00	11.20
YAQ24	YAQUI24	564636.00	3038475.00	564719.00	3038366.00	9.00	592.00	0.50	64.00	647.00	118.30	414.00	11.30
YAQ25	YAQUI25	567102.00	3041052.00	567007.00	3041147.00	6.00	619.00	0.50	64.00	527.00	118.20	411.00	11.42
YAQ26	YAQUI26	575800.00	3040381.00	575900.00	3040281.00	16.00	705.00	1.00	128.00	532.00	118.60	413.00	10.32
YAQ27	YAQUI27	571751.00	3039808.00	571639.00	3039908.00	14.00	657.00	1.00	128.00	609.00	118.30	411.00	10.32
YAQ28	YAQUI28	564076.00	3041325.00	563978.00	3041234.00	10.00	655.00	1.00	128.00	521.00	118.10	413.00	9.61

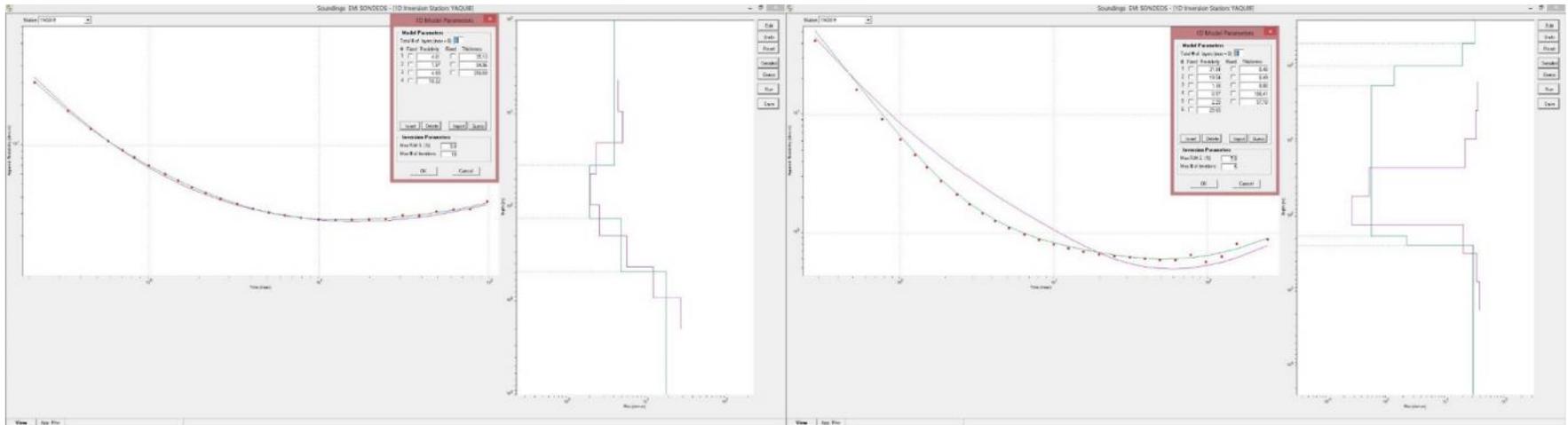


ANEXO II. MODELOS DE INVERSIÓN DE LOS SONDEOS ADQUIRIDOS



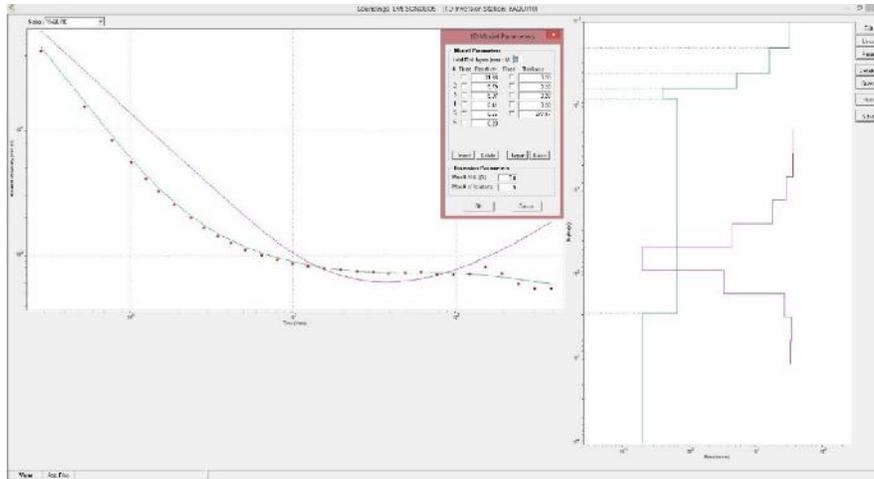
Inversión del sondeo YAQUI 6

Inversión del sondeo YAQUI 7

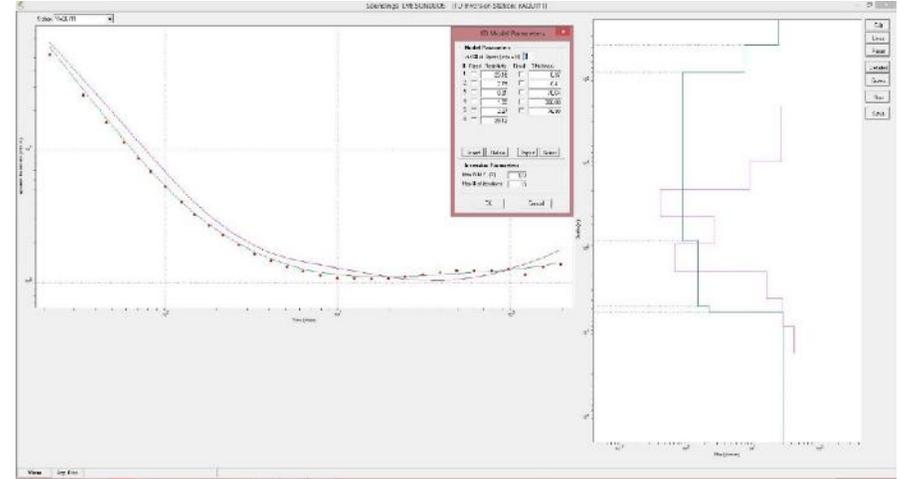


Inversión del sondeo YAQUI 8

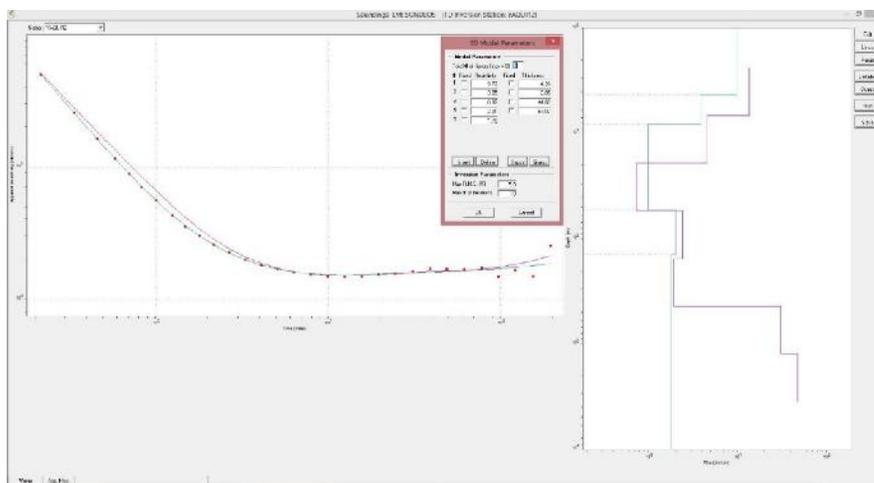
Inversión del sondeo YAQUI 9



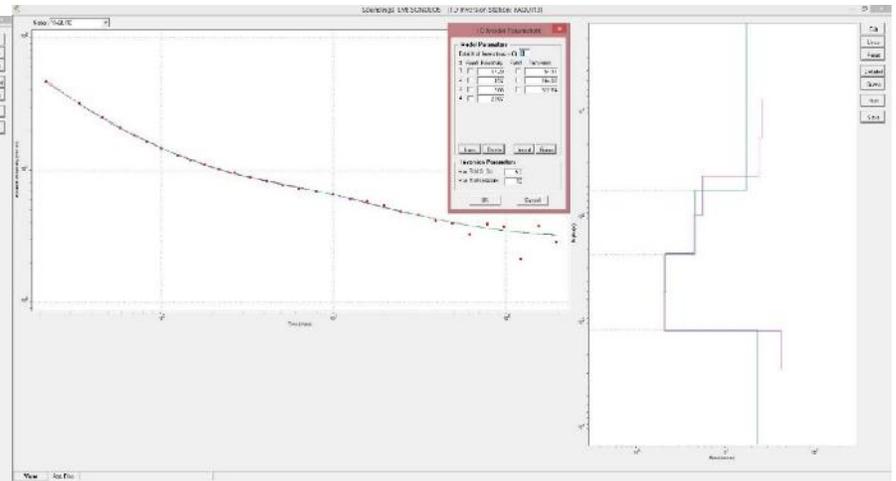
Inversión del sondeo YAQUI 10



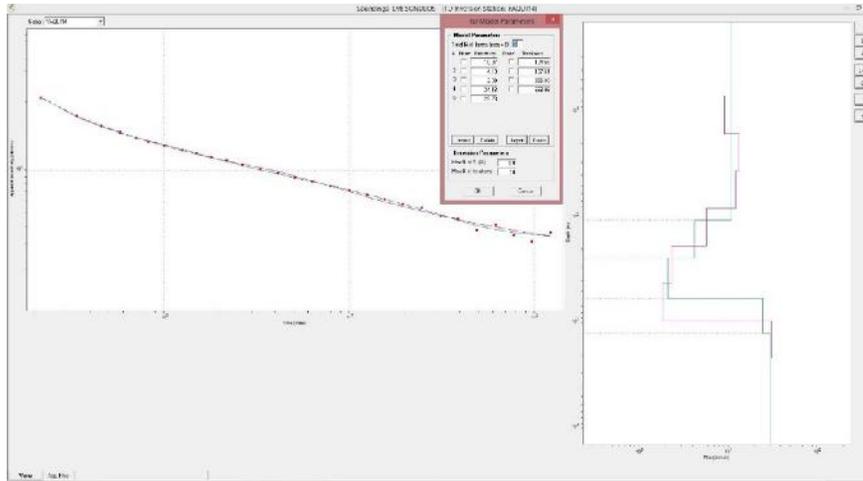
Inversión del sondeo YAQUI 11



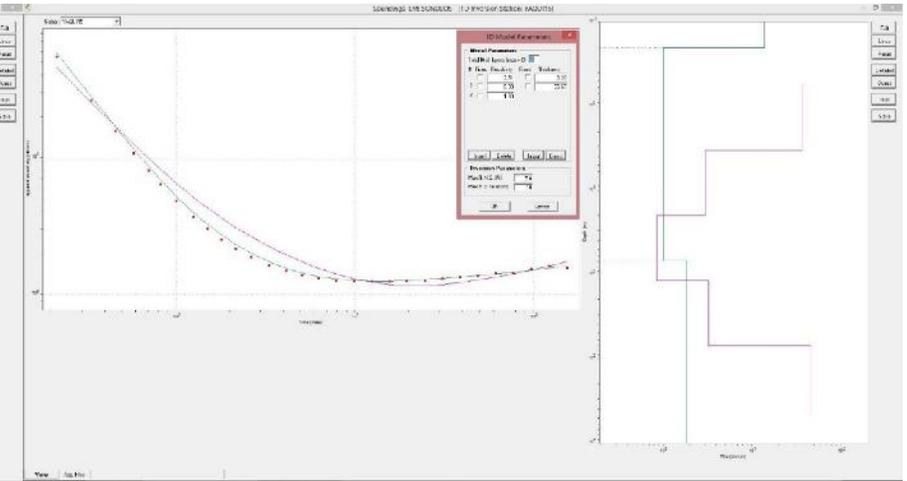
Inversión del sondeo YAQUI 12



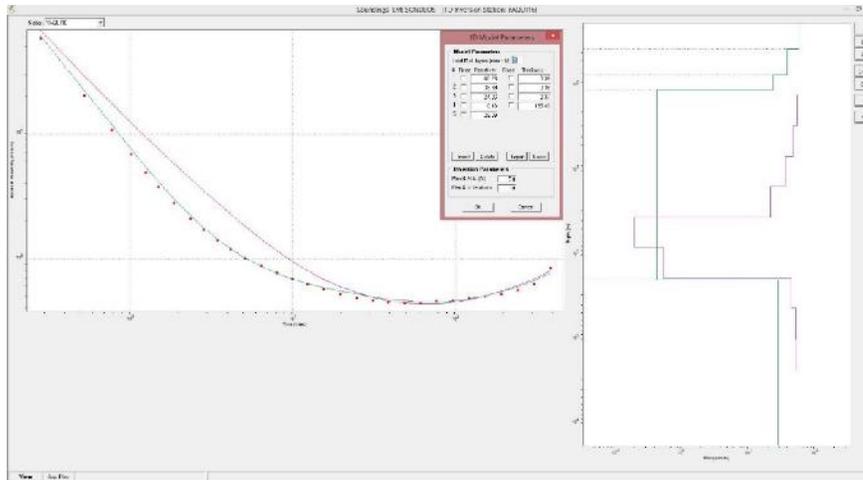
Inversión del sondeo YAQUI 13



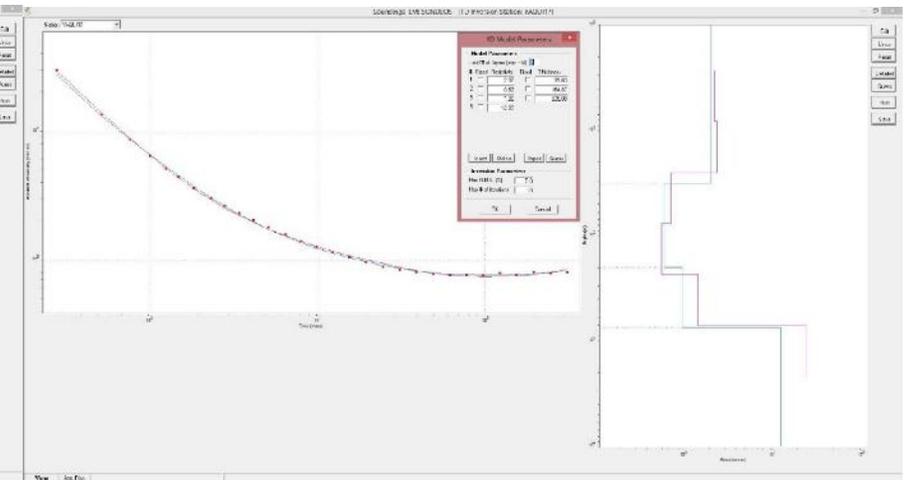
Inversión del sondeo YAQUI 14



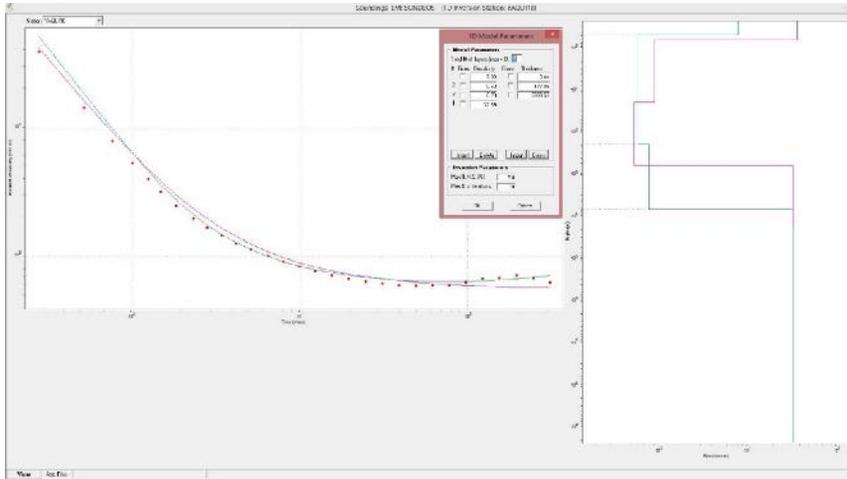
Inversión del sondeo YAQUI 15



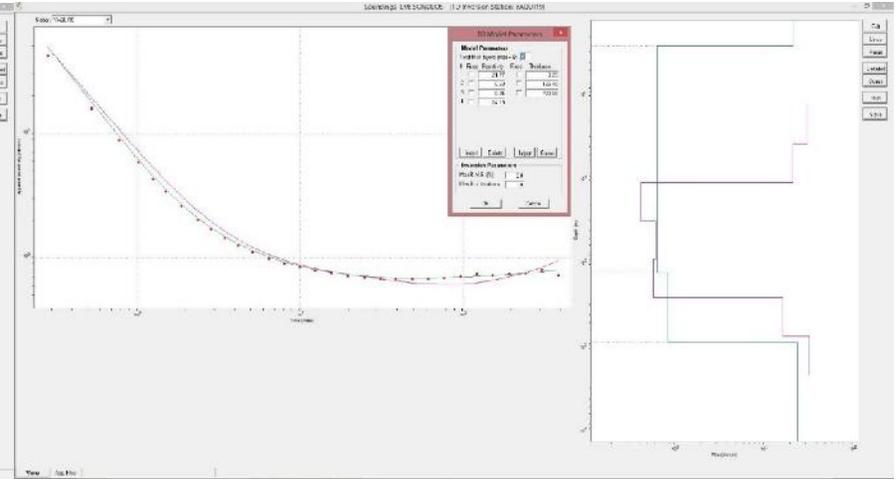
Inversión del sondeo YAQUI 16



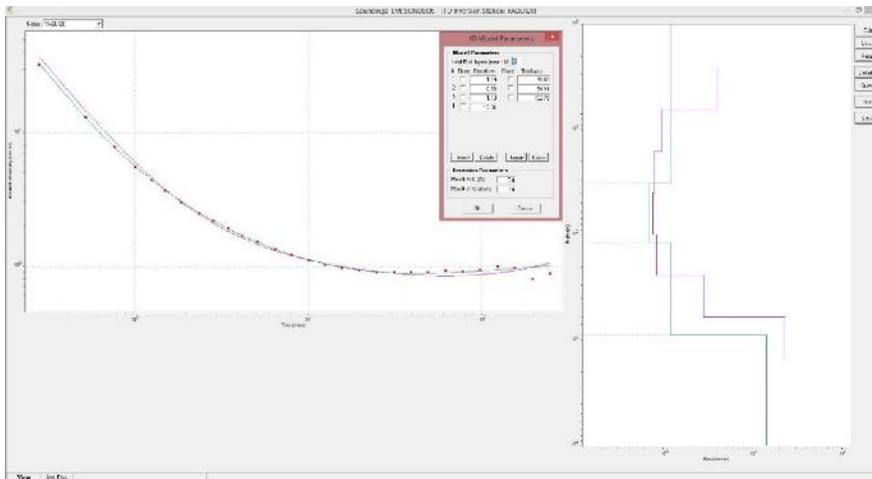
Inversión del sondeo YAQUI 17



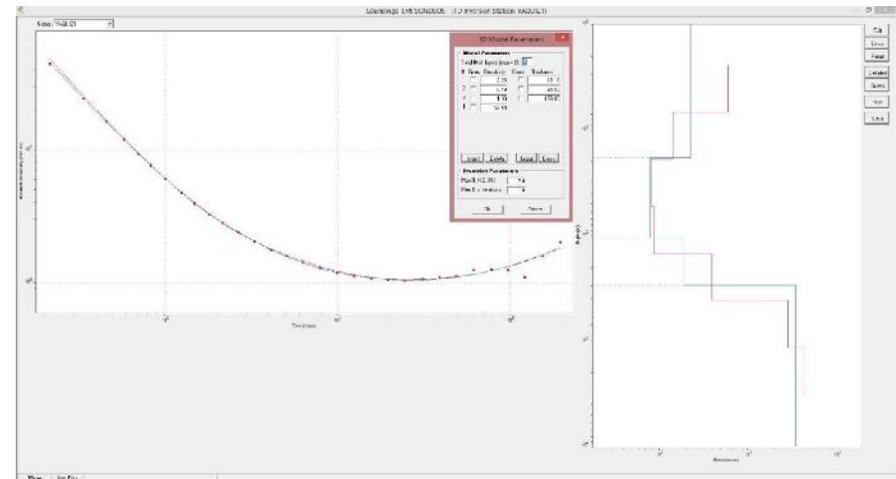
Inversión del sondeo YAQUI 18



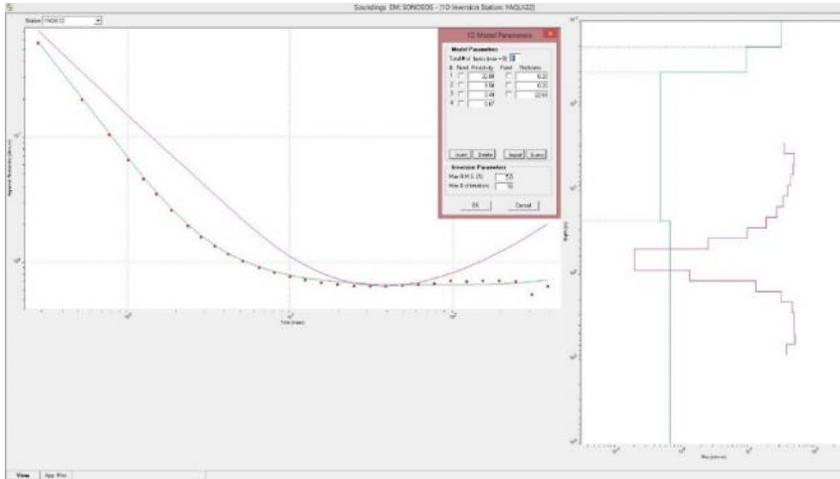
Inversión del sondeo YAQUI 19



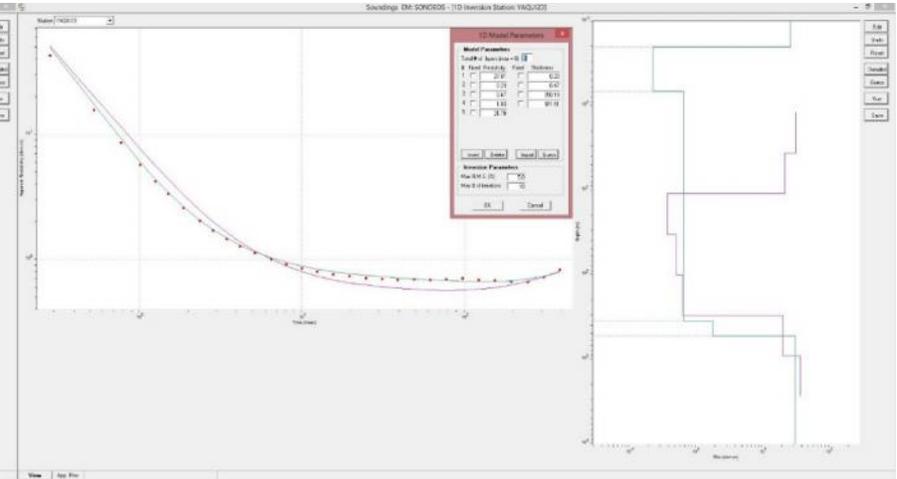
Inversión del sondeo YAQUI 20



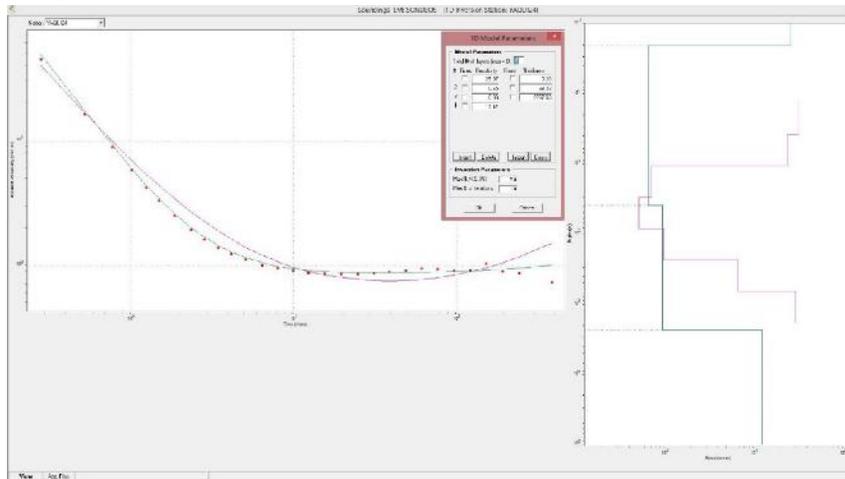
Inversión del sondeo YAQUI 21



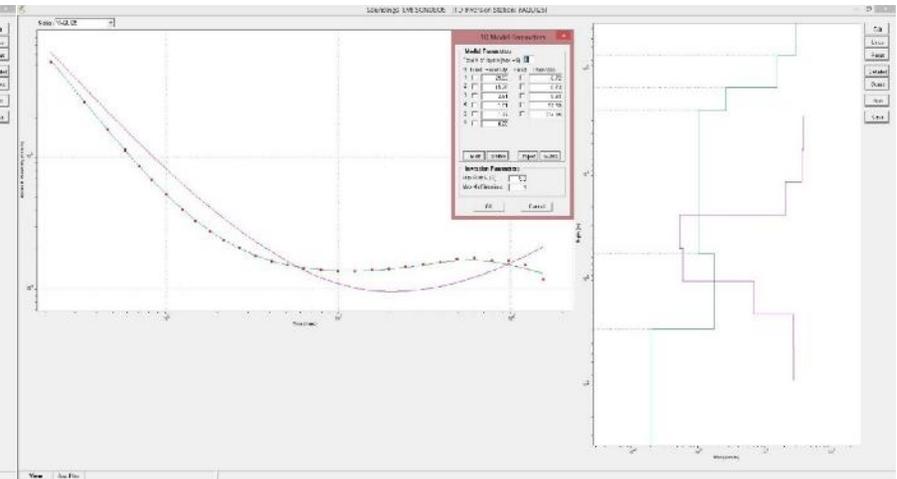
Inversión del sondeo YAQUI 22



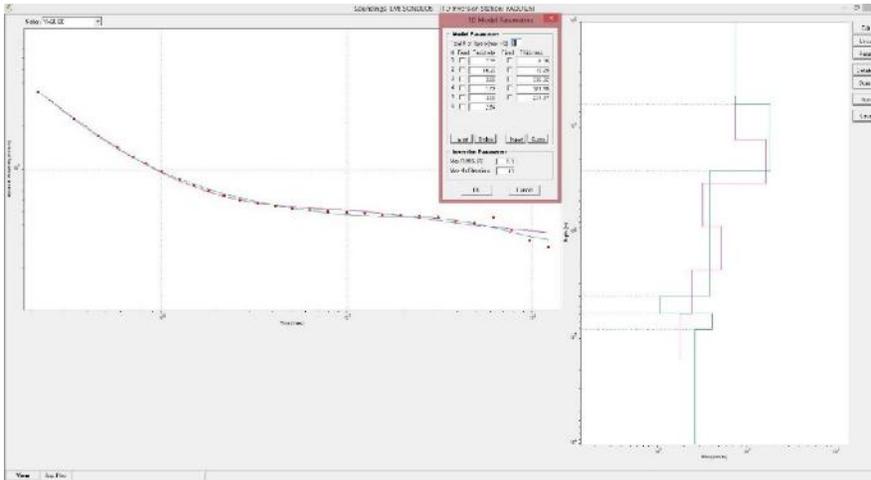
Inversión del sondeo YAQUI 23



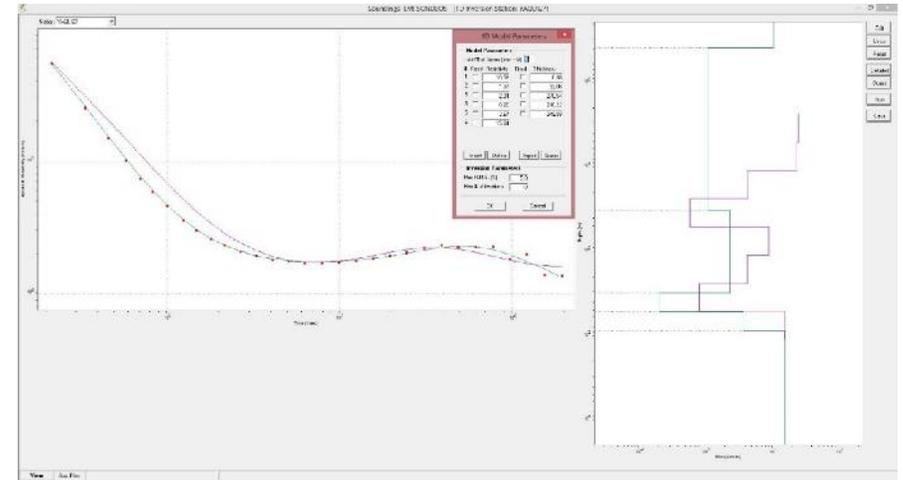
Inversión del sondeo YAQUI 24



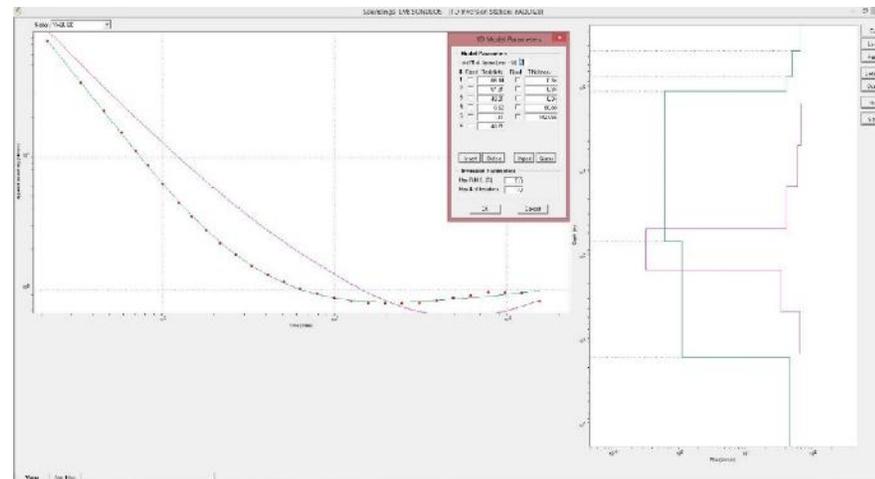
Inversión del sondeo YAQUI 25



Inversión del sondeo YAQUI 26



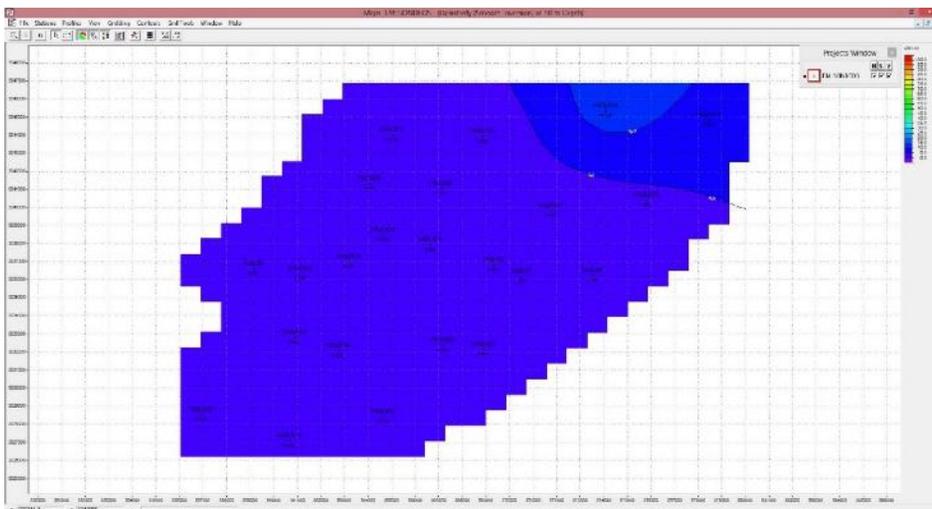
Inversión del sondeo YAQUI 27



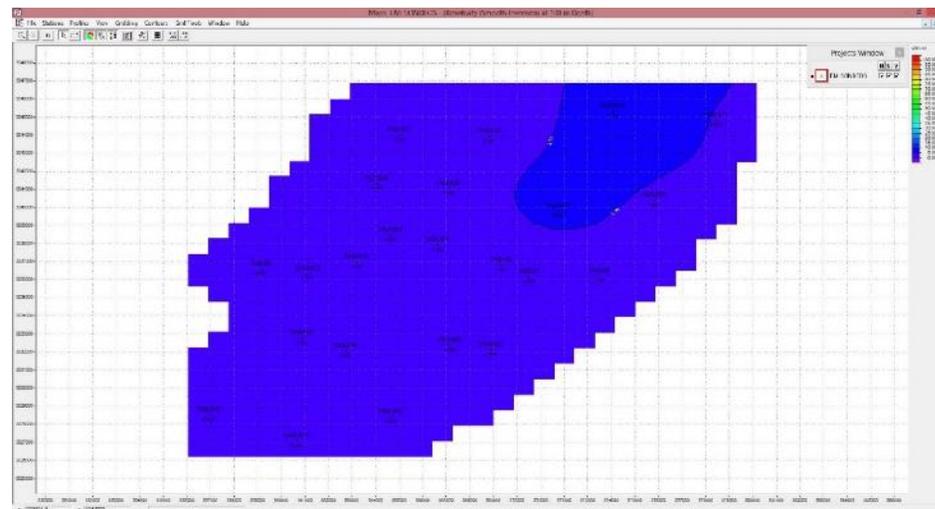
Inversión del sondeo YAQUI 28



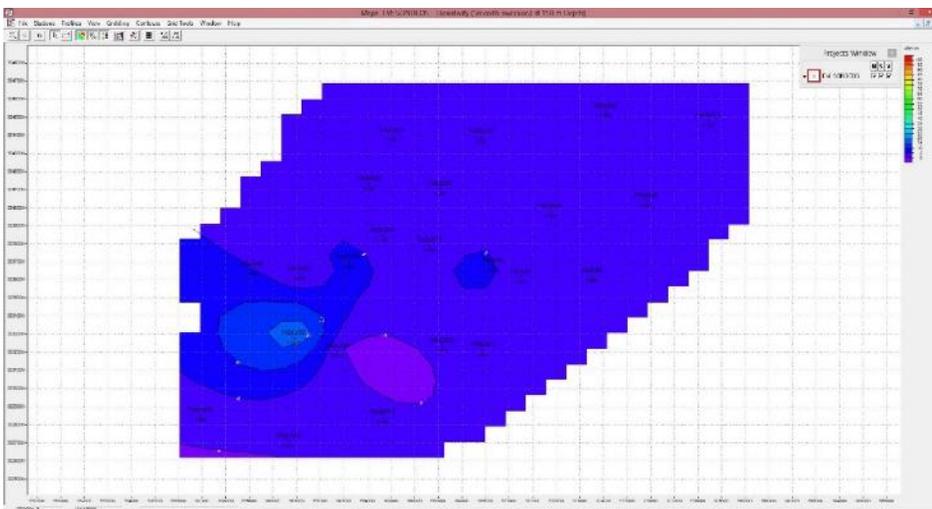
ANEXO III. MAPAS DE PLANTA DE RESISTIVIDAD



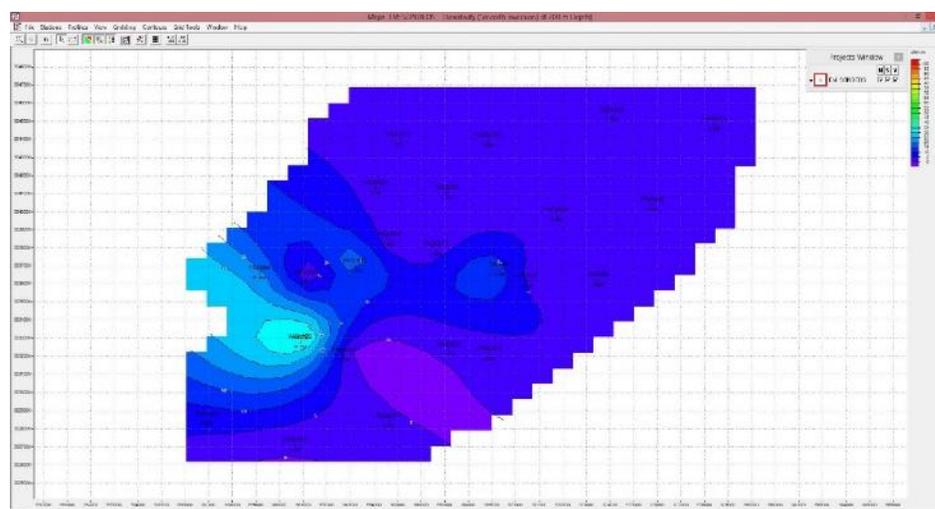
Mapa de resistividad a 50 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink



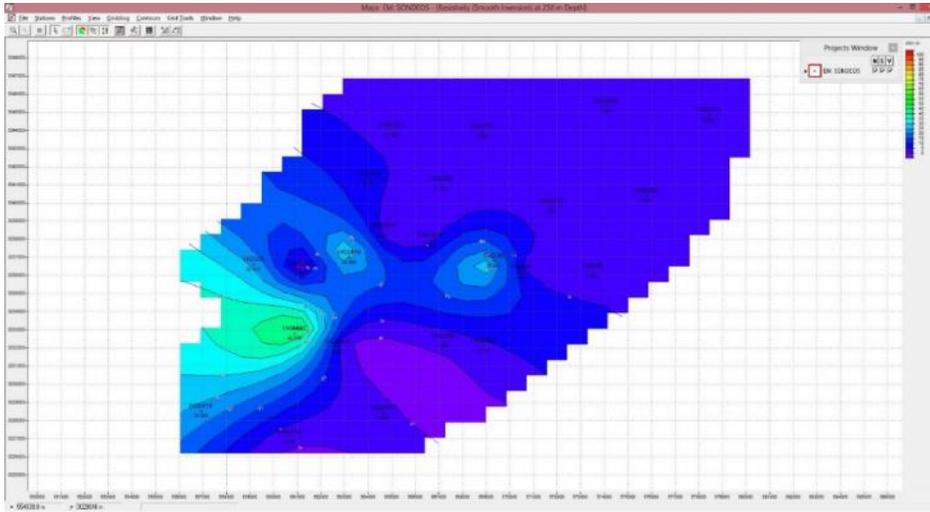
Mapa de resistividad a 100 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink



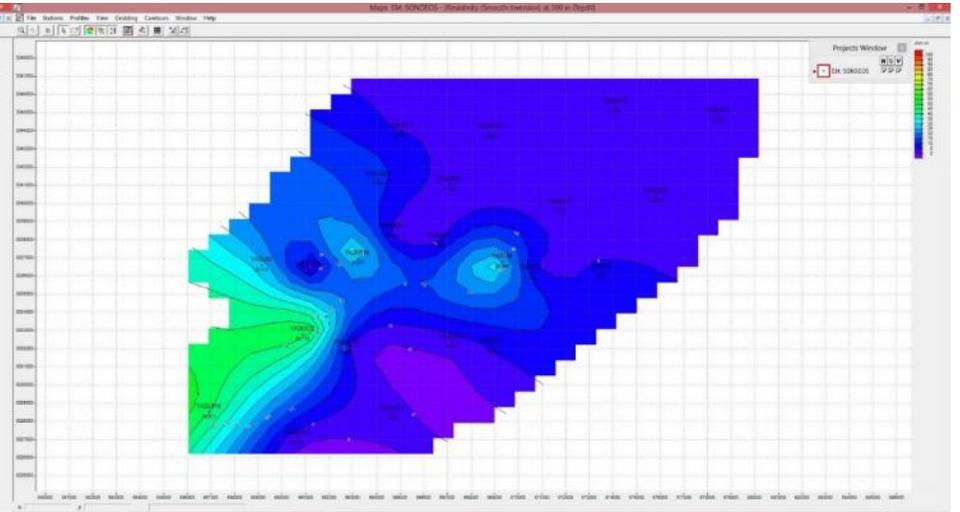
Mapa de resistividad a 150 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink



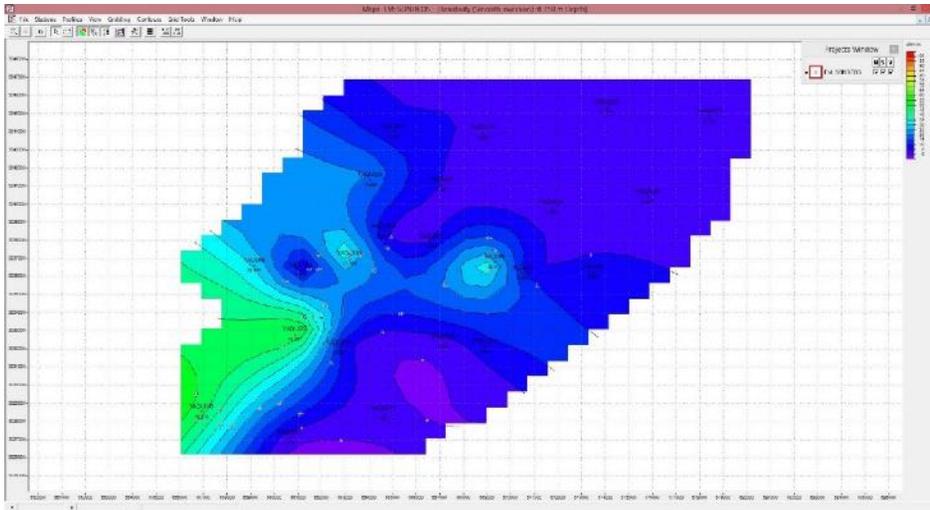
Mapa de resistividad a 200 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink



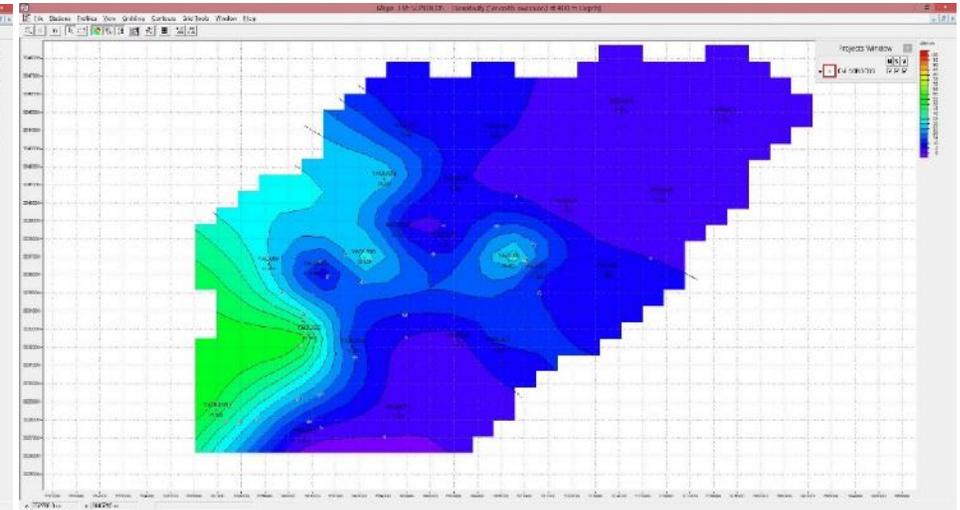
Mapa de resistividad a 250 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink



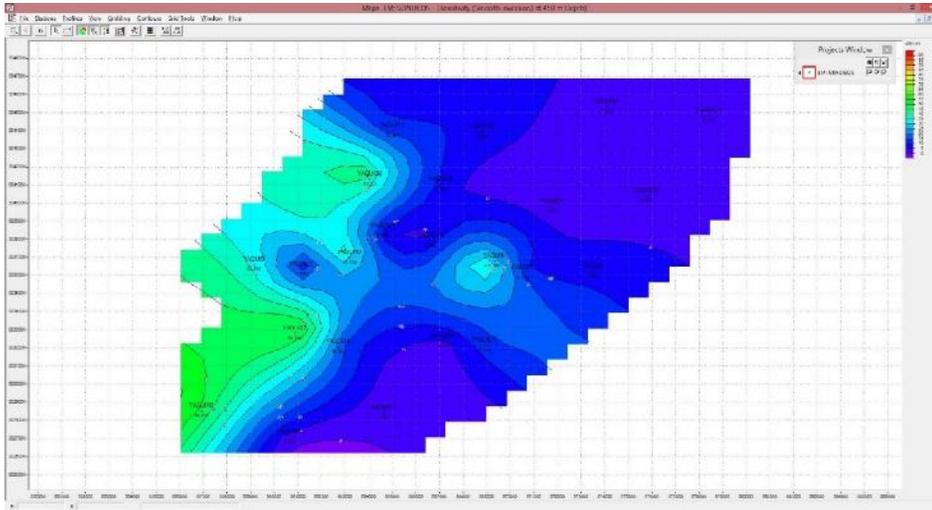
Mapa de resistividad a 300 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink



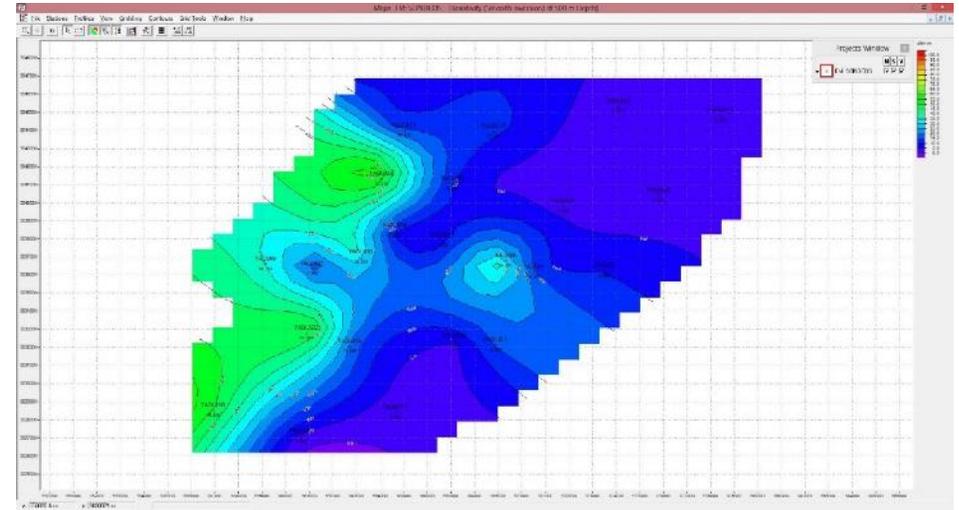
Mapa de resistividad a 350 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink



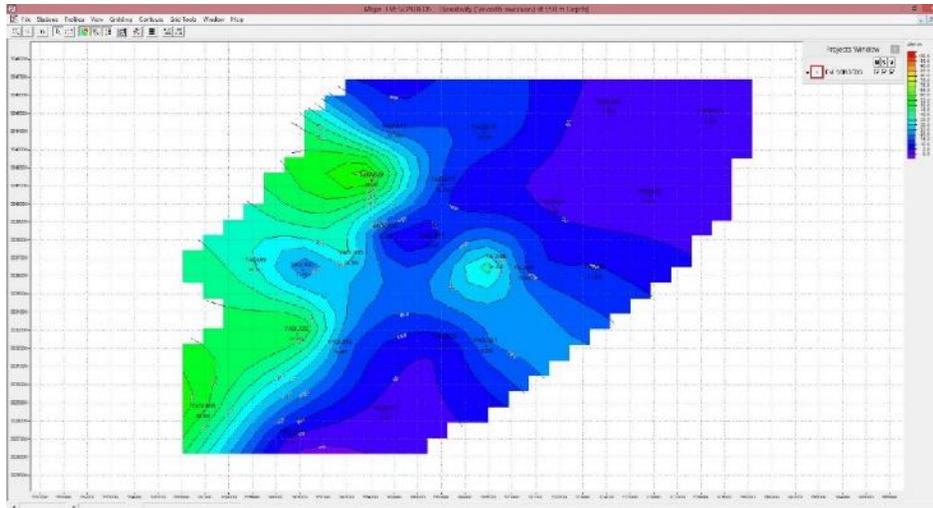
Mapa de resistividad a 400 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink



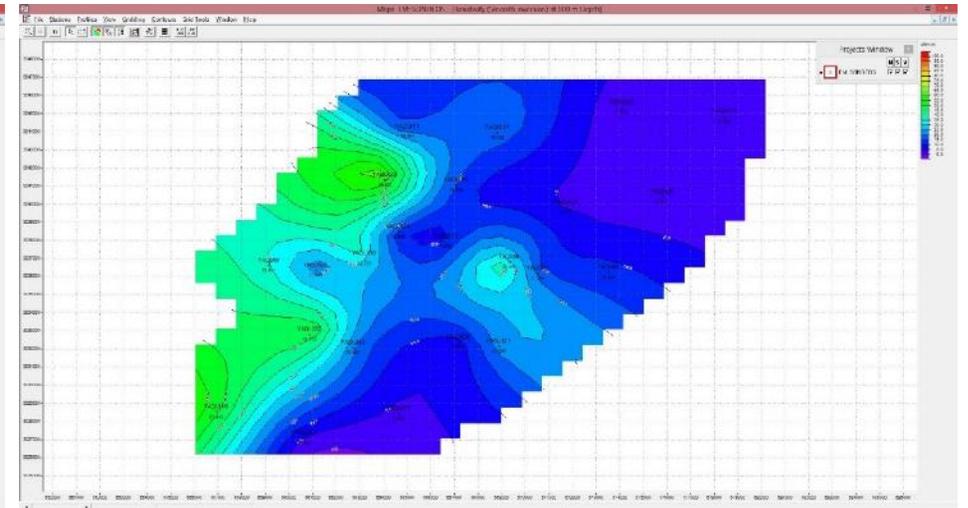
Mapa de resistividad a 450 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink



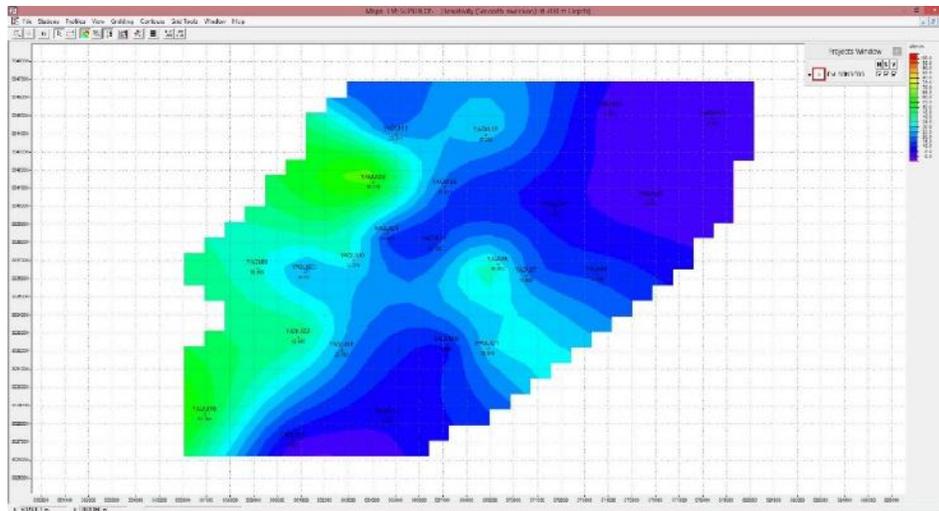
Mapa de resistividad a 500 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink



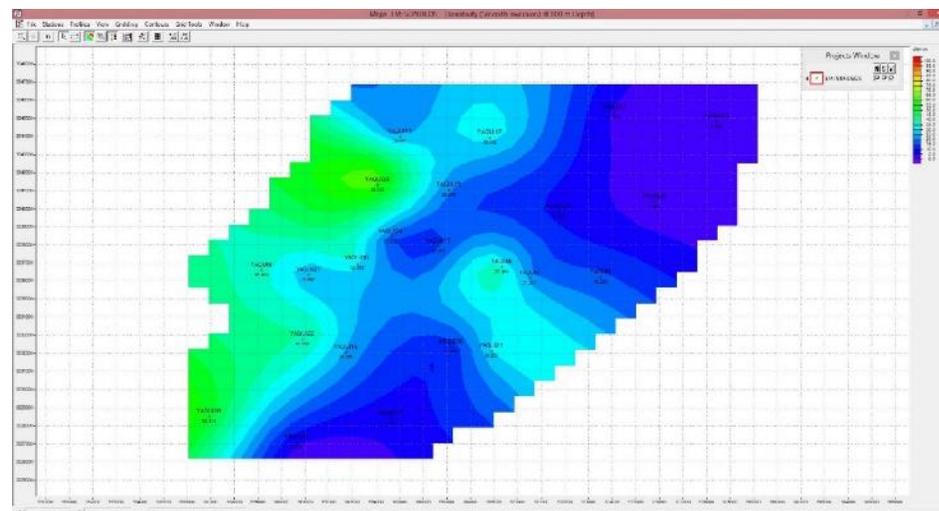
Mapa de resistividad a 550 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink



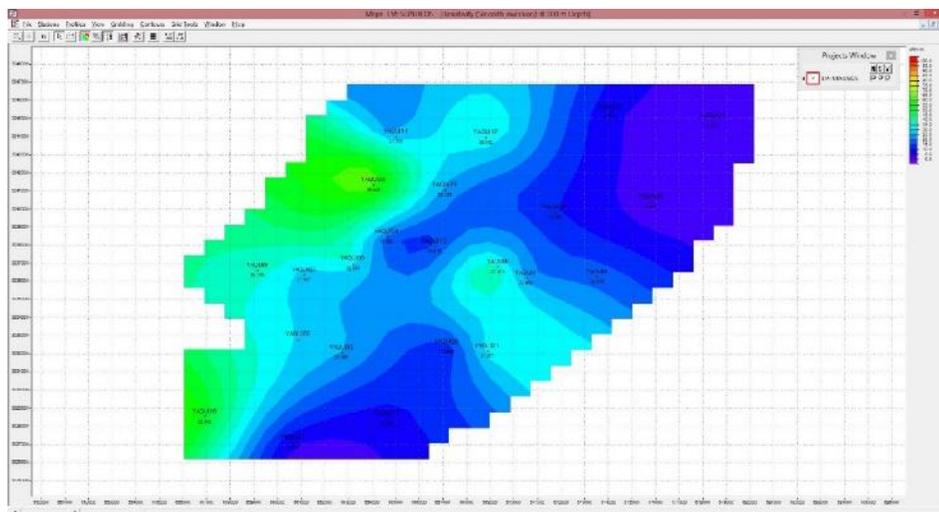
Mapa de resistividad a 600 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink



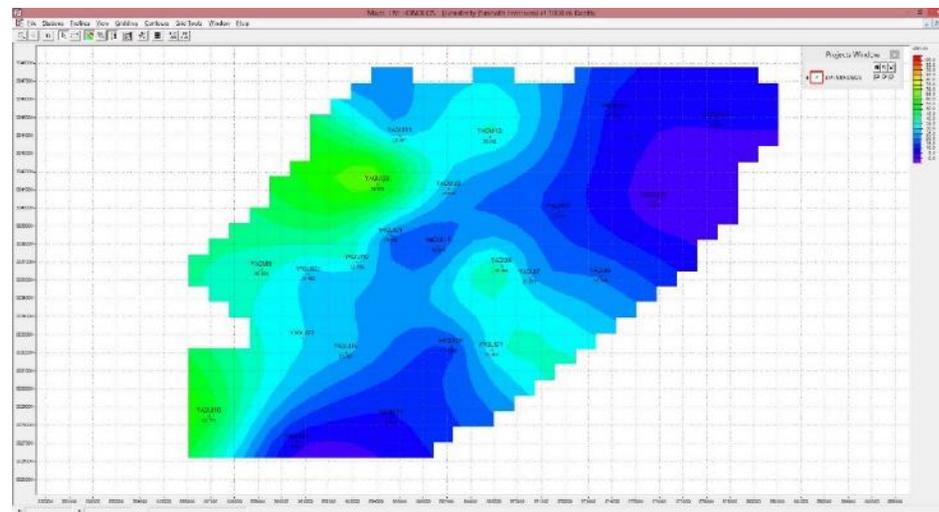
Mapa de resistividad a 700 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLin



Mapa de resistividad a 800 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink

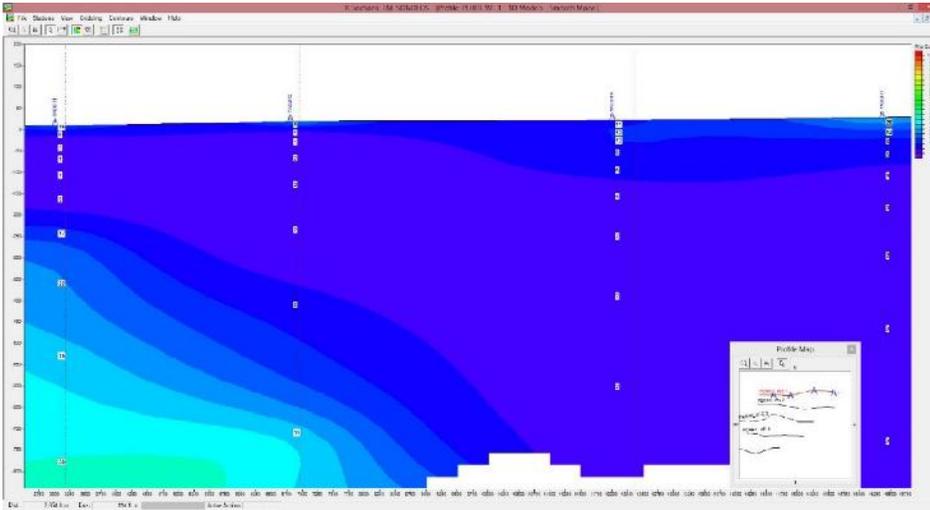


Mapa de resistividad a 900 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink

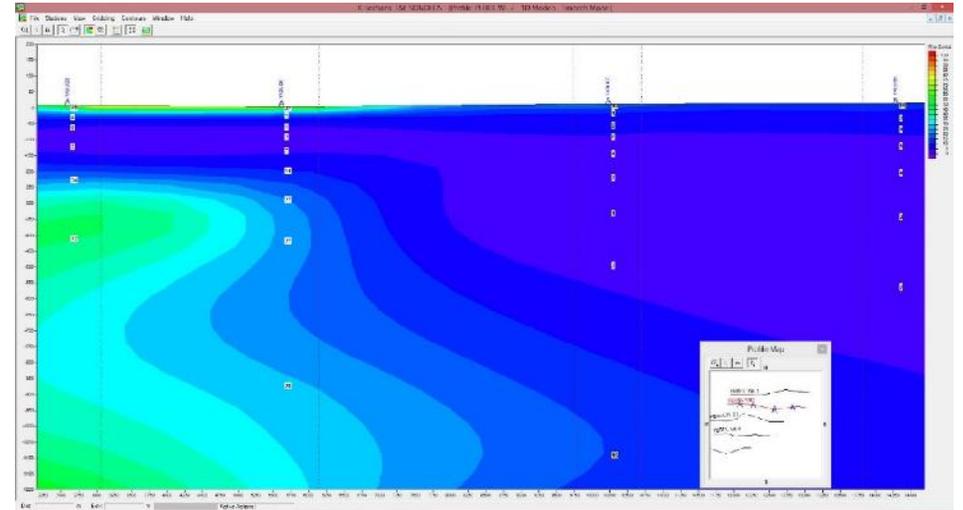


Mapa de resistividad a 1000 metros de profundidad con smooth inversion en WinGLink

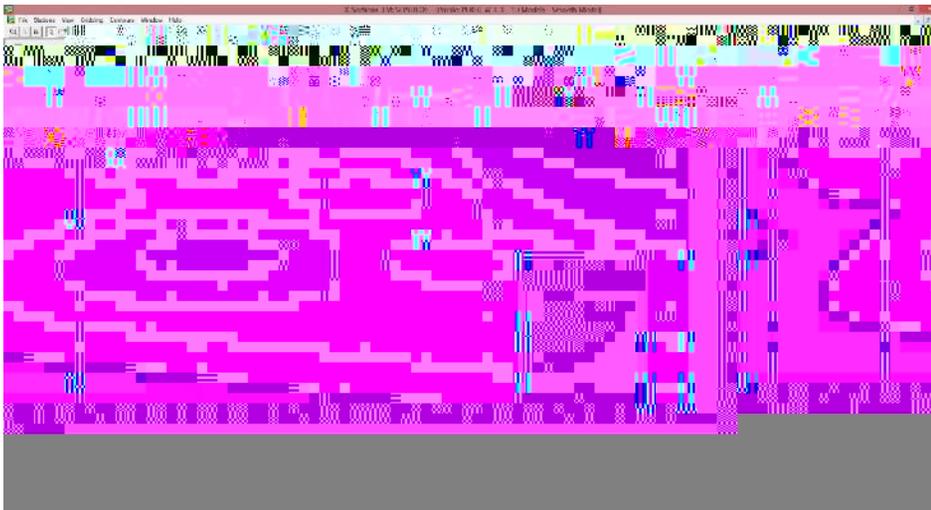
ANEXO IV. SECCIONES DE RESISTIVIDAD EN EL ÁREA DE ESTUDIO



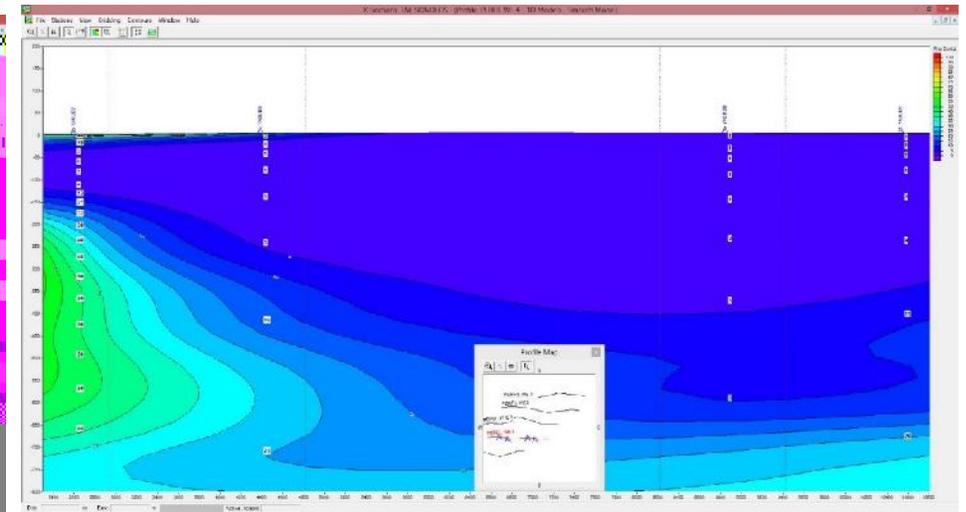
Sección resistiva W-E 1 en el área de estudio



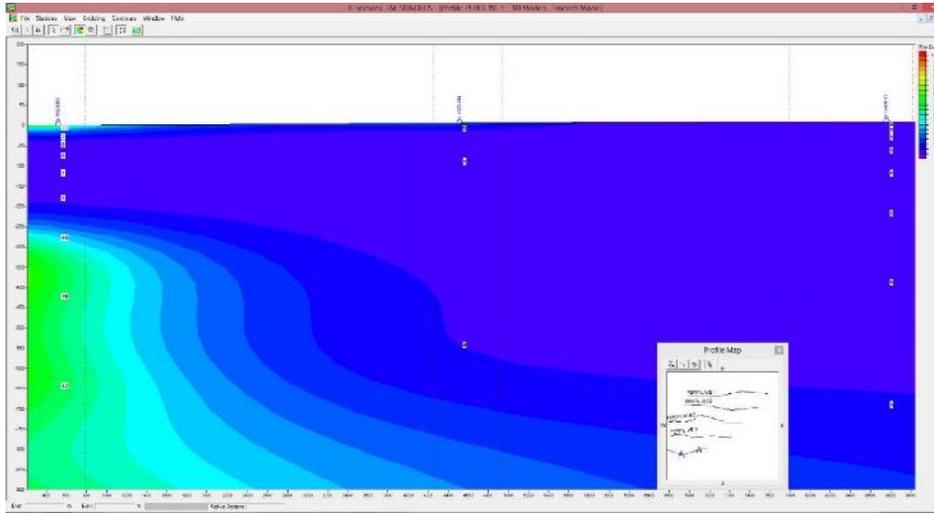
Sección resistiva W-E 2 en el área de estudio



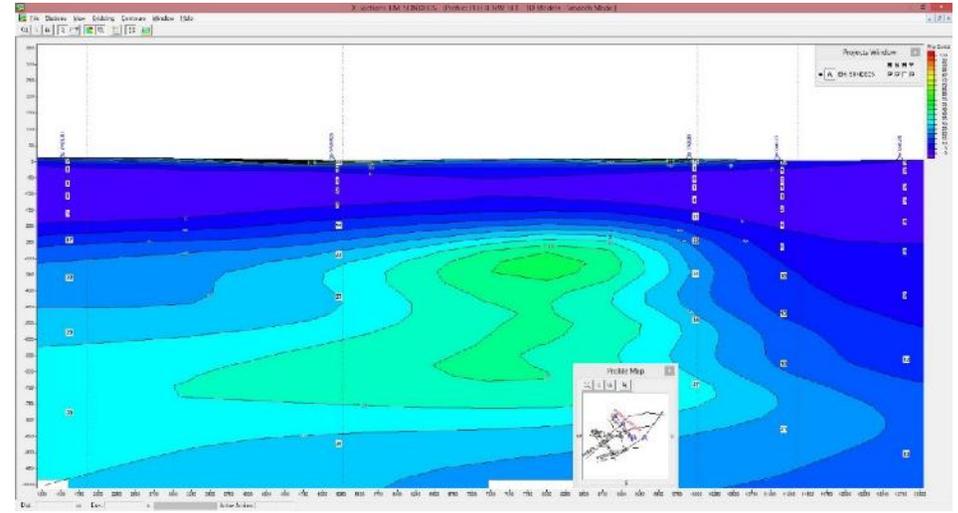
Sección resistiva W-E 3 en el área de estudio



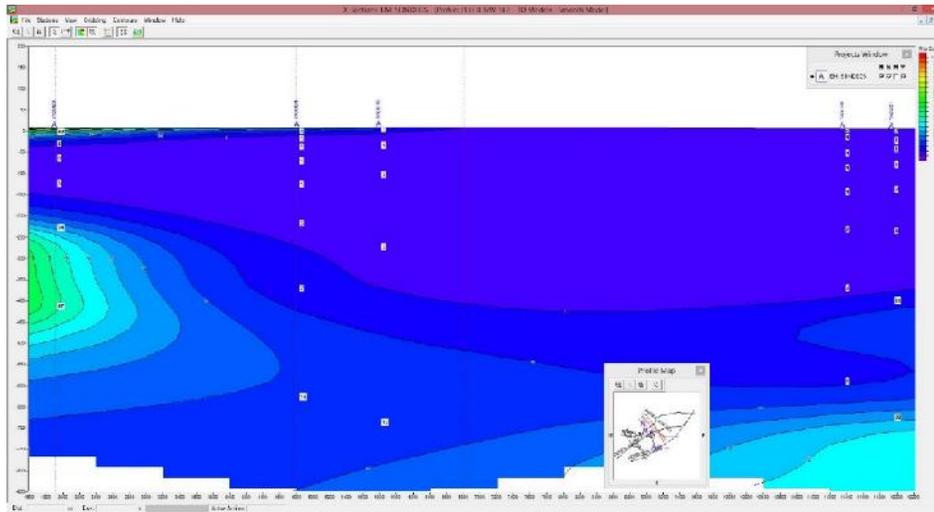
Sección resistiva W-E 4 en el área de estudio



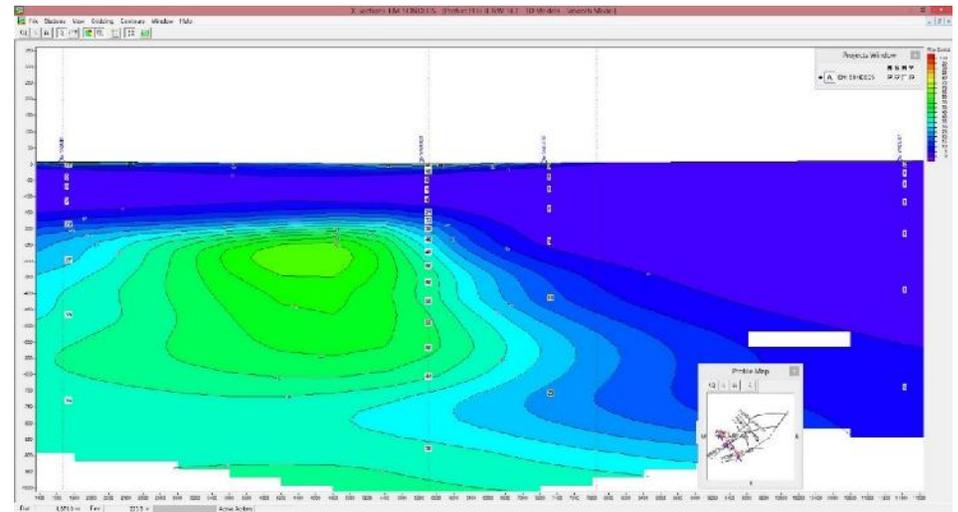
Sección resistiva W-E 5 en el área de estudio



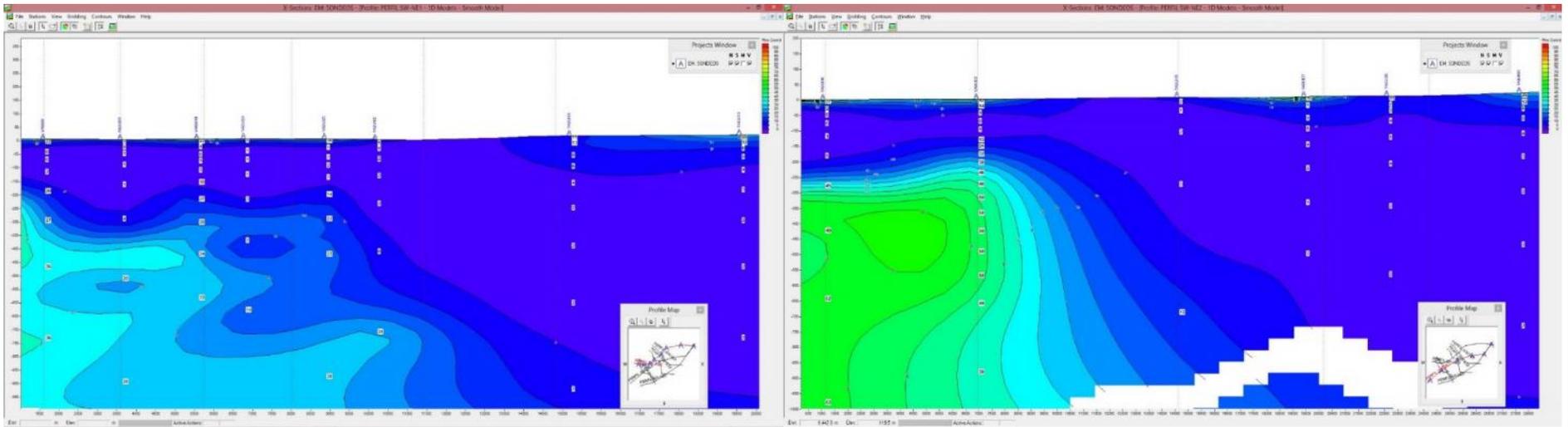
Sección resistiva NW-SE 1 en el área de estudio



Sección resistiva NW-SE 2 en el área de estudio

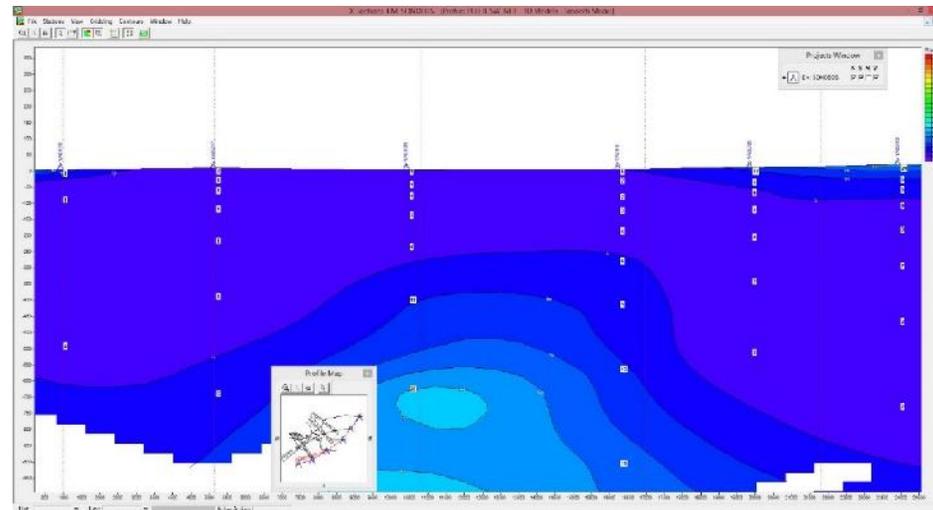


Sección resistiva NW-SE 3 en el área de estudio



Sección resistiva SW-NE 1 en el área de estudio

Sección resistiva SW-NE 2 en el área de estudio



Sección resistiva SW-NE 3 en el área de estudio



ANEXO V. BASES DE DATOS DE GRAVIMETRÍA

Sección	Estación	ID	X	Y	Z	Gobs	A. A. L.	A. B.	A. Res.	Prof.
SECNS	1	17429	559098.100	3073896.500	91.863754	979132.59	-17.199	-19.438	0	0
SECNS	2	17428	559299.100	3071971.200	81.18187	979130.87	-17.624	-19.863	-1.01056	-51.29108
SECNS	3	18168	559623.400	3070021.800	71.796875	979130.12	-17.064	-19.302	-1.04734	-53.15818
SECNS	4	12666	559429.000	3068879.000	61.741592	979130.341	-16.075	-17.904	0	0
SECNS	5	8634	559552.006	3067347.830	101.55072	979109.75	-16.936	-22.798	-5.19027	-263.43357
SECNS	6	17139	558957.000	3065750.600	34.931618	979127.31	-20.094	-21.213	-3.93402	-199.67204
SECNS	7	8677	559574.638	3062731.879	70.50148	979118.63	-17.098	-21.719	-5.03431	-255.51769
SECNS	8	17109	558749.400	3060546.200	-2.830876	979120.32	-23.594	-24.713	-8.47892	-430.34954
SECNS	9	17748	558273.100	3058171.500	-6.023914	979122.41	-19.914	-21.033	-5.26606	-267.28001
SECNS	10	17750	557499.700	3055419.900	-5.31944	979123.75	-16.733	-17.853	-2.63733	-133.8585
SECNS	11	17752	557173.100	3053169.100	-5.356465	979125.32	-13.658	-14.777	0	0
SECNS	12	17751	558897.900	3050795.600	-4.786665	979123.44	-13.944	-15.063	-0.44685	-22.67997
SECNS	13	8812	559642.343	3048885.299	-3.953166	979119.56	-16.206	-16.469	-1.96525	-99.74666
SECNS	14	17749	558924.100	3048195.600	-4.71078	979117.74	-17.905	-19.025	-4.57584	-232.24781
SECNS	15	17747	558950.100	3045644.900	-4.636255	979113.25	-20.69	-21.81	-7.50068	-380.69891
SECNS	16	17746	558823.600	3043995.000	-4.630189	979110.69	-22.149	-23.268	-9.0494	-459.30441
SECNS	17	17822	558949.800	3040570.800	-4.503292	979105.47	-25.082	-26.201	-12.17025	-617.70392
SECNS	18	17857	558972.900	3036918.500	-4.400744	979103.5	-21.529	-23.768	-9.93748	-504.37926
SECNS	19	17858	559022.700	3035118.700	-4.338904	979103.49	-23.425	-24.544	-10.81219	-548.77523
SECNS	20	17865	559099.100	3031792.900	-4.229242	979105.03	-19.669	-20.788	-7.23857	-367.39513
SECNS	21	8996	559732.176	3030423.206	-2.797991	979105.88	-16.976	-19.86	-6.39329	-324.49289
SECNS	22	17189	559147.600	3029119.200	-4.144865	979106.28	-16.638	-17.757	-4.36863	-221.73097
SECNS	23	17181	559648.200	3027844.700	-3.964429	979104.85	-17.218	-18.337	-5.0237	-254.97909
SECNS	24	17197	561075.700	3025817.800	-3.492133	979105.36	-15.355	-16.474	-3.29661	-167.32033
SECNS	25	17210	561074.000	3023393.100	-3.429158	979106.63	-12.472	-13.592	-0.54754	-27.79053
SECNS	26	17470	630247.400	2995966.600	153.944229	979090.76	-6.726	-8.965	0	0

Sección gravimétrica SECNS



Sección	Estación	ID	X	Y	Z	Gobs	A. A. L.	A. B.	A. Res.	Prof.
SECNS1	1	8635	563658.457	3067368.674	150.303787	979111.81	-16.939	-25.554	0	0
SECNS1	2	8678	563682.650	3062752.702	119.254547	979110	-22.381	-24.764	-15.42897	-783.10081
SECNS1	3	11454	563851.000	3062144.000	68.360703	979139.225	-5.576	-7.116	0	0
SECNS1	4	17741	563999.200	3061994.300	69.097954	979118.86	-26.007	-27.126	-20.00677	-1015.44841
SECNS1	5	18059	563960.500	3059990.900	55.038673	979117.38	-26.144	-27.263	-20.11305	-1020.84275
SECNS1	6	18008	564138.200	3058490.200	46.953094	979116.21	-26.308	-27.427	-20.25389	-1027.99076
SECNS1	7	8722	563706.811	3058136.758	88.205307	979118.06	-19.92	-18.118	-10.93634	-555.07631
SECNS1	8	18056	564147.600	3056720.900	35.051838	979118.11	-23.222	-24.342	-17.1376	-869.82309
SECNS1	9	18011	563423.100	3055320.100	16.977671	979120.88	-19.517	-20.636	-13.40743	-680.49707
SECNS1	10	8767	563730.931	3053521.948	57.163521	979119.25	-15.879	-15.764	-8.50746	-431.79806
SECNS1	11	17947	563539.000	3050960.400	-3.477437	979120.92	-16.559	-17.678	-10.38208	-526.94487
SECNS1	12	8813	563755.024	3048906.059	26.114285	979114.5	-16.206	-19.086	-11.75841	-596.80095
SECNS1	13	17937	564873.300	3048044.200	-3.213573	979111.07	-24.454	-25.573	-18.22377	-924.95162
SECNS1	14	17928	564974.300	3046069.200	-3.768631	979106.59	-27.614	-28.733	-21.35345	-1083.79943
SECNS1	15	17742	564450.100	3044044.800	-4.101394	979106.88	-25.973	-27.092	-19.68039	-998.88295
SECNS1	16	17935	563847.500	3040170.700	-3.052987	979105.35	-24.919	-26.038	-18.56629	-942.33626
SECNS1	17	8904	563803.103	3039675.469	-3.08226	979111.88	-14.574	-17.169	-9.68966	-491.80118
SECNS1	18	17932	563749.000	3037994.800	-3.025123	979103.37	-25.447	-26.567	-19.06188	-967.4905
SECNS1	19	17936	564300.400	3035969.900	-2.810231	979102.75	-24.715	-25.834	-18.29671	-928.65398
SECNS1	20	8950	563827.094	3035059.661	-2.843286	979108.31	-15.368	-18.619	-11.06598	-561.65666
SECNS1	21	17940	563322.800	3033893.900	-3.043297	979102.9	-23.184	-24.304	-16.73151	-849.21188
SECNS1	22	17862	563130.000	3031865.200	-3.046932	979103.71	-21.023	-22.143	-14.53927	-737.94417
SECNS1	23	8997	563851.052	3030443.881	-1.588334	979106.13	-16.239	-18.935	-11.30684	-573.88127
SECNS1	24	17169	563872.600	3030069.000	-2.781885	979105.32	-18.215	-19.334	-11.70008	-593.84044
SECNS1	25	17177	564900.100	3028443.500	-2.437653	979104.68	-17.769	-18.888	-11.2246	-569.70731
SECNS1	26	17873	565124.600	3025469.200	-2.294141	979105.19	-15.279	-16.398	-8.68887	-441.00589
SECNS1	27	17875	565124.700	3023367.600	-2.239288	979104.36	-14.711	-15.831	-8.08966	-410.59243
SECNS1	28	17880	565173.700	3021367.900	-2.172727	979105.32	-12.422	-13.541	-5.76899	-292.80651
SECNS1	29	17886	565473.400	3019794.000	-2.043714	979106.14	-10.555	-11.675	-3.87843	-196.85058
SECNS1	30	17890	565497.400	3017843.400	-1.985771	979106.85	-8.549	-9.669	-1.84252	-93.51771
SECNS1	31	17883	566723.500	3015819.100	-1.573232	979103	-11.051	-12.171	-4.30824	-218.66582
SECNS1	32	17881	567272.400	3013994.400	-1.364673	979101.06	-11.778	-12.898	-5.00603	-254.08224
SECNS1	33	9182	568072.582	3012005.214	0.131505	979099.25	-14.479	-15.78	-7.85516	-398.69052
SECNS1	34	17888	567769.900	3009507.800	-1.101912	979100.54	-9.321	-10.441	-2.47759	-125.75086
SECNS1	35	9223	568097.906	3007389.547	0.259066	979098.63	-12.314	-13.724	-5.72773	-290.71246
SECNS1	36	17470	630247.400	2995966.600	153.944229	979090.76	-6.726	-8.965	0	0

Sección gravimétrica SECNS1



Sección	Estación	ID	X	Y	Z	Gobs	A. A. L.	A. B.	A. Res.	Prof.
SECNS2	1	18020	571324.9	3061896.6	155.070053	979118.41	-2.602	-12.341	0	0
SECNS2	2	17415	570224.3	3059896.2	128.463089	979115.02	-25.331	-27.57	-15.29273	-776.18639
SECNS2	3	17365	569923.7	3057845.1	110.973396	979116.91	-23.303	-25.094	-12.8746	-653.45351
SECNS2	4	12671	570048	3056196	101.238213	979119.493	-18.38	-20.416	-8.24277	-418.36363
SECNS2	5	17171	570123.1	3052719.7	78.505768	979120.64	-17.992	-19.111	-7.03483	-357.0545
SECNS2	6	17296	570088.3	3050180.8	60.845058	979112.06	-24.565	-25.796	-13.79071	-699.95078
SECNS2	7	17325	570771.9	3048144.6	55.084759	979108.91	-25.733	-27.189	-15.24367	-773.69601
SECNS2	8	12677	570200	3046892	39.819027	979107.234	-19.784	-23.564	-11.65711	-591.65922
SECNS2	9	17295	569678.3	3046110.5	28.347609	979106.08	-27.825	-29.057	-17.17634	-871.78904
SECNS2	10	17312	570847.6	3044070.9	28.298313	979105.65	-26.58	-27.923	-16.10796	-817.56356
SECNS2	11	17313	571049.2	3042419.7	19.458536	979104.61	-26.516	-27.859	-16.0904	-816.67206
SECNS2	12	17298	571073.1	3040669	7.843965	979106.02	-24.246	-25.477	-13.75727	-698.25375
SECNS2	13	17117	570449	3037994.5	-1.416465	979106.83	-21.962	-23.082	-11.43894	-580.58606
SECNS2	14	17107	570773.3	3036017.8	-1.769119	979103.73	-23.743	-24.862	-13.27486	-673.76847
SECNS2	15	17108	570148.3	3033943.3	-2.746696	979102.39	-23.703	-24.822	-13.29534	-674.80796
SECNS2	16	17112	571557.5	3031948.2	-2.494168	979101.56	-23.198	-24.317	-12.85852	-652.63729
SECNS2	17	8999	572090.843	3030489.38	1.384704	979106	-14.45	-18.646	-7.23088	-367.00504
SECNS2	18	17132	573198.3	3028477.7	-2.015304	979101.67	-20.771	-21.89	-10.53898	-534.90858
SECNS2	19	9046	572117.848	3025874.68	-0.105535	979104.56	-15.112	-17.812	-6.53966	-331.92182
SECNS2	20	17149	573190	3023868.2	-1.300352	979099.81	-19.564	-20.684	-9.47516	-480.9141
SECNS2	21	17141	573218.5	3021837.6	-0.987202	979098.01	-20.014	-21.134	-9.98185	-506.63125
SECNS2	22	17137	573274.7	3019767	-0.500427	979096.41	-20.238	-21.358	-10.26367	-520.93518
SECNS2	23	17154	573050	3017793.3	0.231887	979096.09	-19.248	-20.368	-9.32912	-473.50195
SECNS2	24	9139	572171.758	3016643.17	-0.299687	979100.81	-15.67	-16.649	-5.65052	-286.79352
SECNS2	25	17184	572039.1	3015759.7	-0.012046	979096.92	-17.072	-18.191	-7.21746	-366.32385
SECNS2	26	17871	571518.9	3013938.1	-0.117421	979097.17	-15.615	-16.735	-5.81434	-295.10829
SECNS2	27	17878	570874.4	3011694.4	-0.24824	979097.79	-13.509	-14.629	-3.77351	-191.52524
SECNS2	28	17879	570822.6	3009694.1	-0.211515	979097.31	-12.664	-13.783	-2.98336	-151.42133
SECNS2	29	17884	570657.7	3008206.9	-0.221245	979097.98	-11.009	-12.128	-1.37013	-69.54143
SECNS2	30	17885	571297.1	3007069	-0.004232	979097.25	-10.982	-12.102	-1.38057	-70.07109
SECNS2	31	17223	571808.8	3006607.4	0.157788	979097.68	-10.245	-11.364	-0.66181	-33.59011
SECNS2	32	9265	572252.33	3002797.2	3.791091	979097.63	-10.599	-11.001	-0.40589	-20.6008
SECNS2	33	17470	630247.4	2995966.6	153.944229	979090.76	-6.726	-8.965	0	0

Sección gravimétrica SECNS2



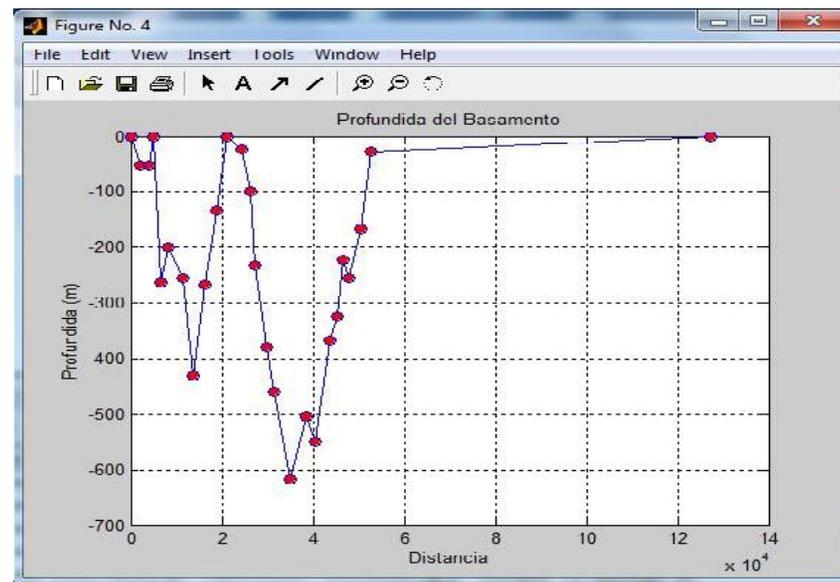
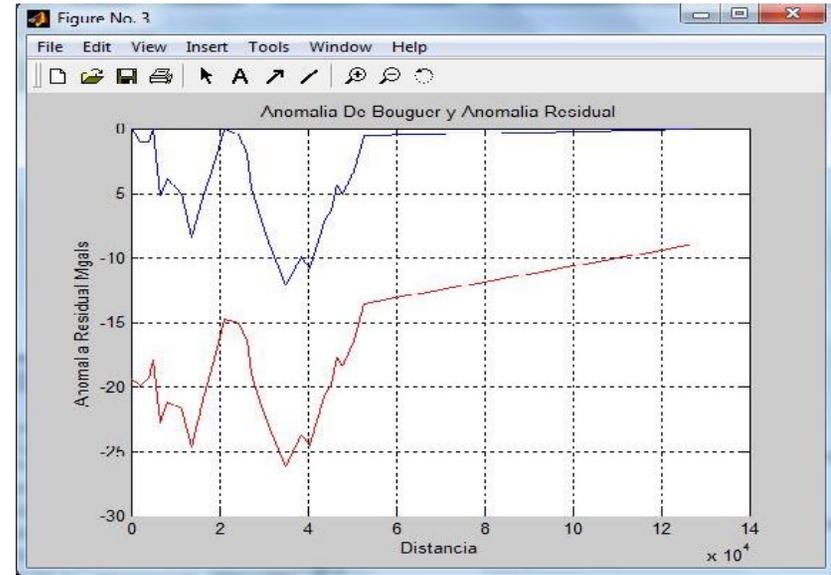
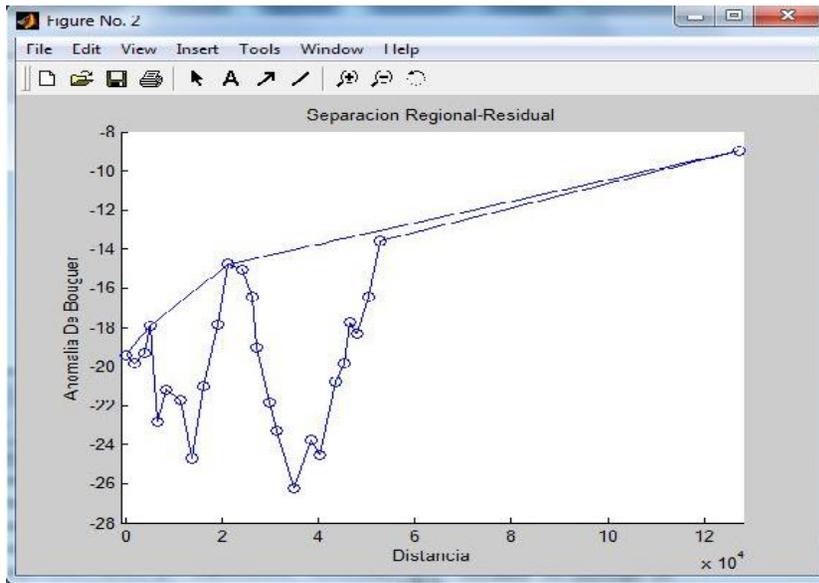
Sección	Estación	ID	X	Y	Z	Gobs	A. A. L.	A. B.	A. Res.	Prof.
SECNS3	1	18066	578123.8	3059421.2	218.607849	979109.66	-3.493	-15.47	0	0
SECNS3	2	17597	577124.2	3057171.5	191.494339	979118.56	-16.852	-20.21	-5.14184	-260.9752
SECNS3	3	11470	576911	3055373	176.74353	979120.15	-15.528	-18.741	-3.96846	-201.42032
SECNS3	4	8770	576066.407	3053592.61	203.411011	979112.19	-15.891	-20.022	-5.57112	-282.76351
SECNS3	5	17431	576973.7	3051920.9	154.006363	979118.32	-16.664	-18.902	-4.76159	-241.6758
SECNS3	6	17403	576073	3049945.8	129.937439	979112.1	-21.875	-24.002	-10.21593	-518.51201
SECNS3	7	8816	576095.164	3048976.65	172.361771	979109.88	-18.06	-21.341	-7.71317	-391.48362
SECNS3	8	17402	576257.4	3047648.3	116.491119	979108.55	-23.888	-26.015	-12.60561	-639.80054
SECNS3	9	17416	577697.6	3044143.3	109.656395	979104.48	-25.301	-27.54	-14.74914	-748.59636
SECNS3	10	17348	577122.4	3040068.6	75.155785	979102.15	-26.456	-28.136	-16.01686	-812.9393
SECNS3	11	17350	577472.7	3038046	65.534042	979103.51	-23.746	-25.425	-13.64092	-692.34818
SECNS3	12	17336	577823	3036045	56.057178	979102.99	-23.238	-24.806	-13.35351	-677.76071
SECNS3	13	17315	577023.3	3033993.7	32.673283	979100.75	-24.732	-26.075	-14.98189	-760.40953
SECNS3	14	17115	577219.6	3032019.4	21.562737	979101.98	-22.803	-23.922	-13.15275	-667.57086
SECNS3	15	17167	577248.2	3029219.4	2.857703	979104.57	-18.348	-19.467	-9.15482	-464.65496
SECNS3	16	17173	577073.1	3027344.4	1.13058	979103.69	-17.981	-19.1	-9.09521	-461.62941
SECNS3	17	9047	576238.331	3025899.47	17.130489	979106.31	-14.257	-15.89	-6.1576	-312.53022
SECNS3	18	17165	577349.6	3023995.2	0.282024	979100.97	-18.472	-19.591	-10.21849	-518.64174
SECNS3	19	17164	576519.3	3021848.3	-1.110536	979099.5	-18.518	-19.637	-10.64022	-540.047
SECNS3	20	9095	576266.846	3021283.67	2.170802	979105.5	-12.938	-14.435	-5.53918	-281.14238
SECNS3	21	17178	577672.4	3019867.7	-0.848208	979099.36	-17.337	-18.457	-9.88685	-501.80925
SECNS3	22	17185	576748	3017769.6	-0.486527	979098.31	-16.998	-18.117	-9.92109	-503.54718
SECNS3	23	9140	576295.321	3016667.9	0.680205	979104.19	-11.275	-13.271	-5.26951	-267.45514
SECNS3	24	17877	578123.4	3013728.8	0.088405	979098.3	-14.32	-15.439	-8.00249	-406.16821
SECNS3	25	9185	580449.863	3012079.35	2.956901	979108.31	-6.319	-6.971	0	0
SECNS3	26	9226	580479.793	3007463.61	1.529255	979105.31	-5.622	-7.418	-0.29092	-14.76582
SECNS3	27	11610	580756	3003124	1.63435	979098.324	-8.789	-9.814	-2.53989	-128.91262
SECNS3	28	17470	630247.4	2995966.6	153.944229	979090.76	-6.726	-8.965	0	0

Sección gravimétrica SECNS3



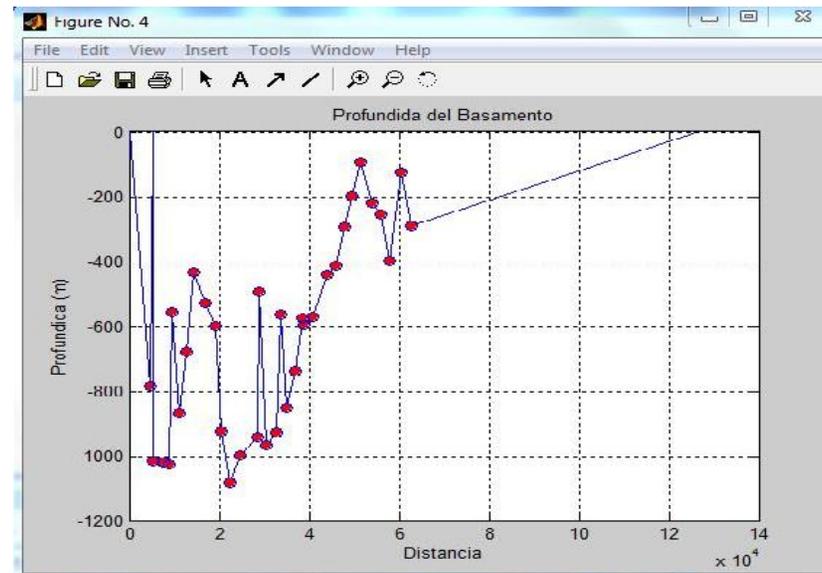
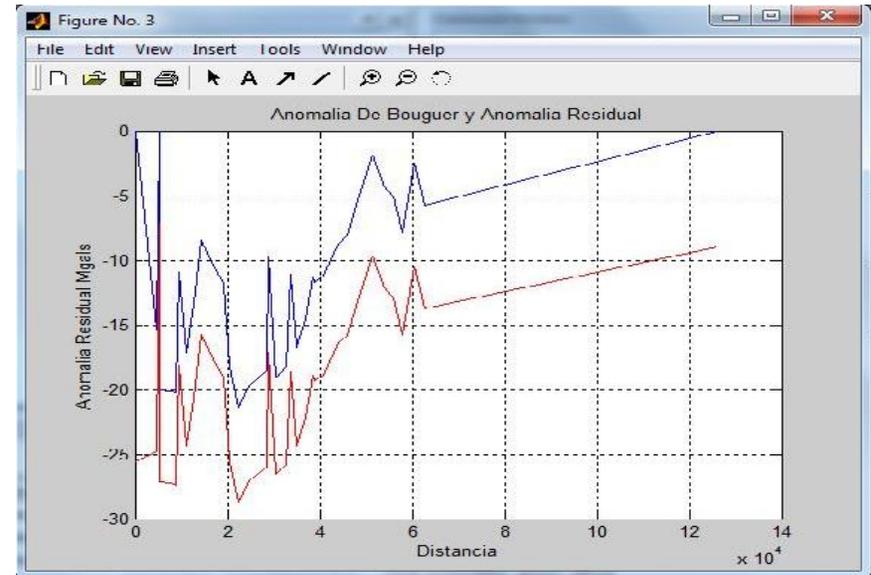
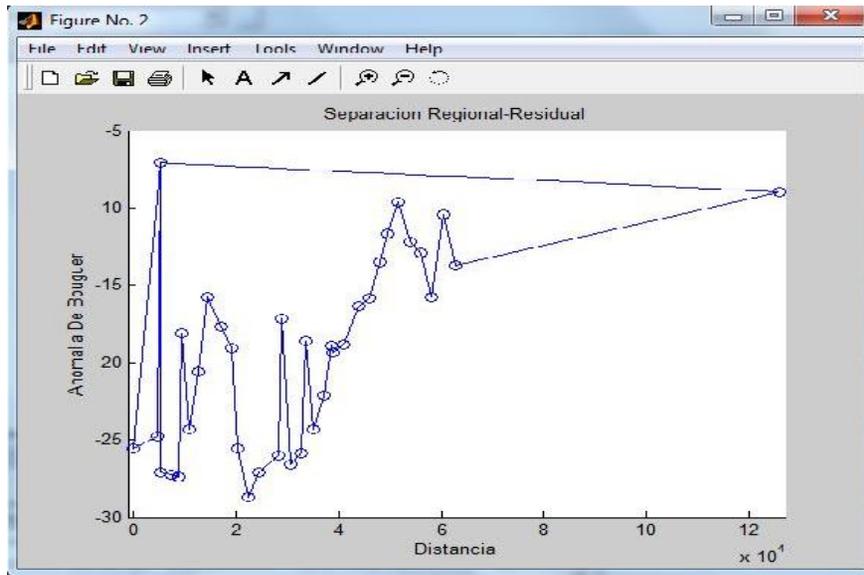
ANEXO VI. GRÁFICAS DE REMOCIÓN REGIONAL-RESIDUAL Y SECCIONES GRAVIMÉTRICAS

Sección NORTE-SUR en el área de estudio



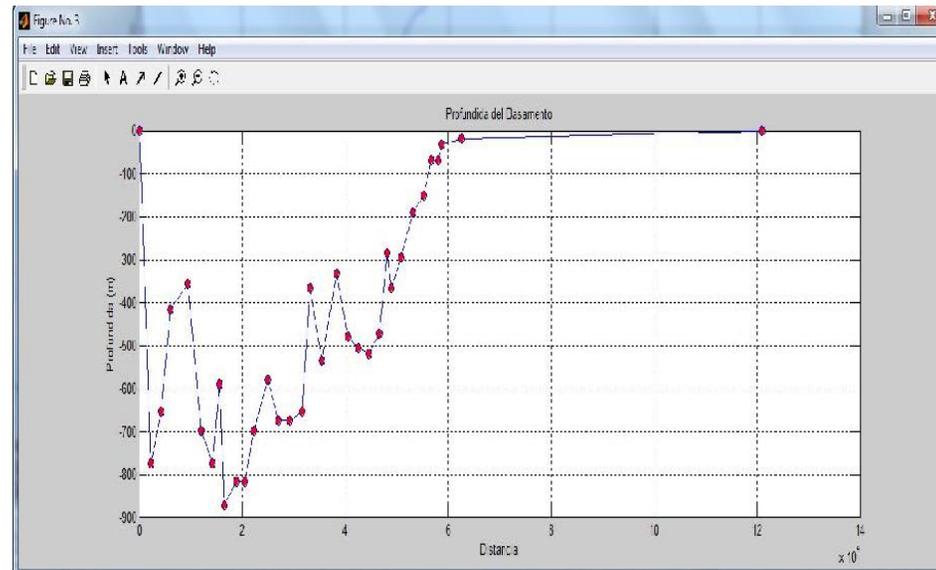
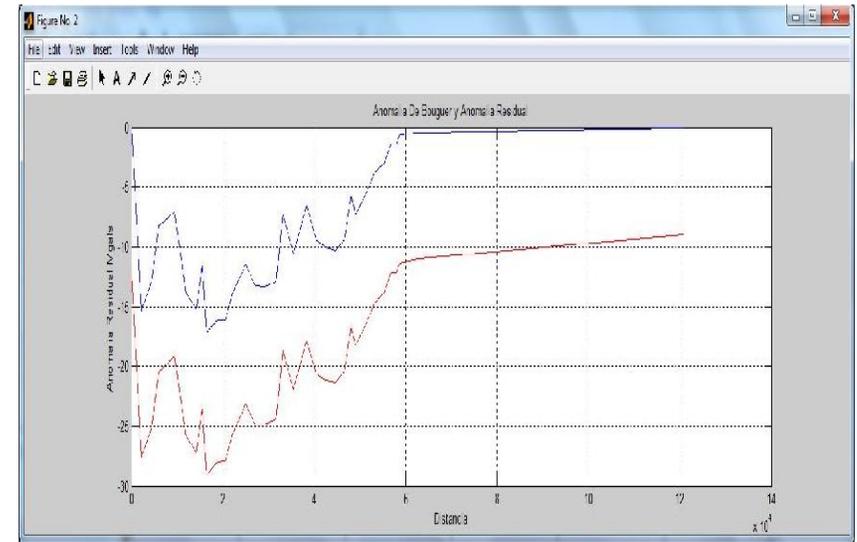
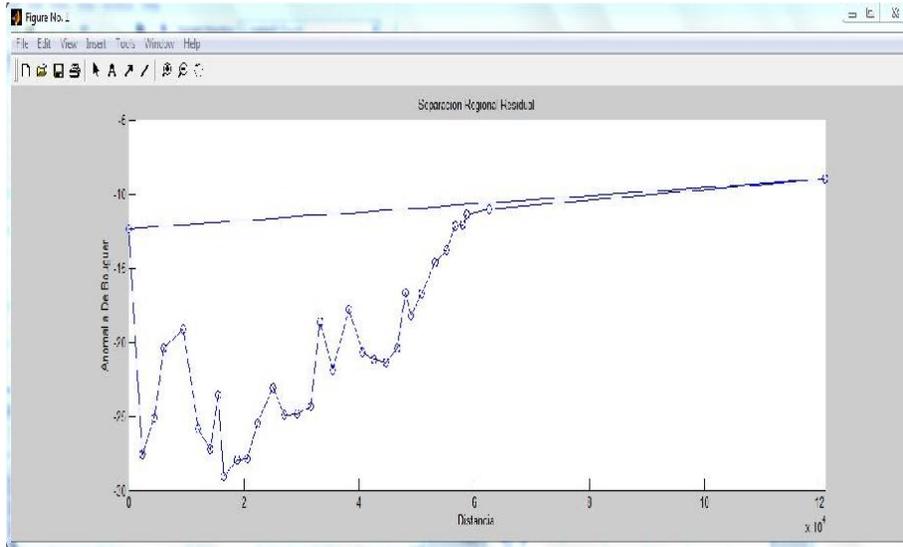


Sección NORTE-SUR 1 en el área de estudio





Sección NORTE-SUR 2 en el área de estudio





Sección NORTE-SUR 3 en el área de estudio

