



UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

**METODOLOGÍA PARA OBTENER
UN MODELO HIDROGEOFÍSICO EN
LA PROSPECCIÓN DE ACUÍFEROS.**

TESIS

**Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias-Geología**

P R E S E N T A:

ADRIAN GRIJALVA MONTOYA



Hermosillo, Sonora, Febrero del 2014

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



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

*“Camina por la tierra dos años.
Sin teléfono, sin piscina, sin mascotas, sin cigarrillos.
Libertad absoluta.
Un extremista.
Un viajero de lo estético cuyo hogar es el camino.
Después de dos años intrincados, llega la aventura final y
más importante.
La batalla culminante para matar al falso ser interno y
concluir victorioso la revolución espiritual.
Sin estar ya mas envenenado por la civilización, el huye y
camina solo por la tierra para perderse en la naturaleza”.*

(Alexander Supertramp 1992)

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS RESUMEN

	Página
I.INTRODUCCIÓN	1
I.1 Definición del tema de estudio.	3
I.2 Métodos de prospección geofísica.	5
I.2.1 Propiedades eléctricas de las rocas.	5
I.2.2 Métodos eléctricos.	7
1.2.2.1 Calicatas eléctricas.	7
1.2.2.2 Sondeos eléctricos verticales.	8
1.2.2.3 Método dipolo-dipolo.	9
1.2.2.4 Método Wenner.	10
1.2.2.5 Método Schlumberger.	11
1.2.2.6 Método gravimétrico.	13
1.2.2.7 Método magnético.	13
1.2.2.8 Método electromagnético.	14
1.2.2.9 Métodos sísmicos.	15
1.2.2.10 Método de refracción sísmica.	15
1.2.2.11 Método de reflexión sísmica.	16
I.3 Objetivo general.	18
I.4 Justificación.	18
I.5 Localización de las áreas de tres casos de estudio.	18
II. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO CASO ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD	20
II.1 Estudios previos.	21
II.2 Área de estudio acuífero Puerto Libertad.	22
II.2.1 Condición administrativa del acuífero Puerto Libertad.	25
II.3 Objetivo caso de estudio acuífero Puerto Libertad.	26
II.3.1 Metas específicas caso de estudio acuífero Puerto Libertad.	26
II.4 Descripción física de la región Puerto Libertad.	27
II.4.1 Hidrografía.	27
II.4.2 Río concepción.	28
II.5 Fisiografía y Geomorfología de la cuenca Puerto Libertad.	30
II.5.1 Fisiografía.	30
II.5.2 Geomorfología.	34
II.5.2.1 Geomorfología de la zona costera acuífero Puerto Libertad.	39
II.6 Suelos y vegetación en la cuenca Puerto Libertad.	41
II.6.1 Características del suelo.	41
II.6.2 Características de la vegetación.	43

II.7 Marco geológico acuífero Puerto Libertad.	45
II.7.1 Geología regional.	45
II.7.2 Estructural y tectónica.	48
II.7.2.1 Estructural.	48
II.7.2.2 Tectónica.	48
II.8 Geología local.	51
III. CARACTERIZACIÓN RESISTIVA	57
III.1 Metodología de campo utilizando el método electromagnético (TDEM).	57
III.1.1 Procesado de la información y modelación.	58
III.1.2 Modelo Suavizado.	59
III.1.3 Modelo undimensional.	59
III.2. Aplicación del método de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TDEM) caso acuífero Puerto Libertad.	60
III.2.1 Identificación de los cambios asociados a presencia de agua subterránea (Geometría y perfiles).	60
III.3 Caracterización de unidades resistiva caso acuífero Puerto Libertad	65
III.3.1 Perfiles de resistividad.	66
III.4 Modelo Geofísico caso acuífero Puerto Libertad.	69
IV. CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA	71
IV.1 Correlación de unidades resistivas con unidades geoelectrica acuífero Puerto Libertad.	71
IV.1.1 Caracterización unidades geoelectrica.	72
IV.1.2 Perfiles geoelectricos.	73
IV.2. Configuraciones de la geometría y cambios asociados a presencia de agua subterránea (Caso Puerto Libertad).	78
IV.2.1 Modelos de penetración del frente de intrusión.	78
IV.2.1.1 Localización y caracterización de cuña de intrusión marina.	78
IV.3 Estructuras geológicas del subsuelo y zonas de fracturamiento.	87
IV.4 Modelo geológico caso acuífero Puerto Libertad.	90
V. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOFÍSICA	93
V.1 Hidrología subterránea	93
V.1.1 Censo de aprovechamientos	93
V.2 Piezometría	97
V.2.1 Nivelación de brocales	97
V.2.2 Profundidad al nivel estático	99
V.2.3 Elevación del nivel estático y dirección del flujo de agua subterránea	99
V.2.4 Evolución del nivel estático	100

V.3 Interacción de eventos hidrológicos superficiales con el agua subterránea	102
V.4 Influencia del agua subterránea sobre el medio hidrogeológico del litoral	102
V.5 Magnetometría (Caso de estudio proyecto San Francisco)	103
V.5.1 Procesamiento e interpretación cualitativa de datos	104
V.5.1.1 Interpretación cualitativa caso proyecto San Francisco	104
V.5.1.2 Derivada tilt de la RAP	105
V.5.1.3 Reducción al polo (RAP)	106
V.5.1.4 Señal analítica de la RAP	108
V.5.1.5 Anomalía magnética (TMI)	109
V.5.2 Interpretación cuantitativa	110
V.5.2.1 Análisis espectral para la estimación de profundidades	110
V.5.2.2 Método de deconvolución de Euler	112
V.5.3 Modelo del sistema de fracturamiento local	113
V.5.3.1 Análisis estructural	113
V.6 Gravimetría (Caso de estudio acuífero costero San José de Guaymas)	116
V.6.1 Ejecución e interpretación de gravimetría	116
V.6.1.1 Perfiles gravimétricos	116
V.6.1.2 Procesamiento gravimétrico	118
V.6.2 Modelación de perfiles	119
V.7 Modelo hidrogeofísico caso acuífero Puerto Libertad	124
V.7.1 Discusión de resultados caso acuífero Puerto Libertad	128
VI. CONCLUSIONES	131
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

Lista de Figuras

		Página
Figura 1	Metodología de un modelo hidrogeofísico.	2
Figura 2	Arreglo Calicatas Eléctricas.	8
Figura 3	Arreglo sondeo eléctrico vertical.	9
Figura 4	Arreglo dipolo-dipolo.	10
Figura 5	Arreglo wenner.	11
Figura 6	Arreglo Schlumberger.	12
Figura 7	Localización de áreas de tres casos de estudio.	19
Figura 8	Regiones hidrológicas de Sonora mostrando la localización del acuífero Puerto Libertad.	23
Figura 9	Localización de las estaciones climatológicas y polígonos de Thiessen. Tomado de IDEAS (2006).	24
Figura 10	Fisiografía del área de estudio en la subcuenca Puerto Libertad.	33
Figura 11	Mapa de unidades morfogénicas de la sub-cuenca Puerto Libertad.	36
Figura 12	Vista al noreste de la sierra Aguirre (al fondo) que ilustra su piedemonte de pendiente estable y el lomerío estable compuesto por rocas plutónicas (a la derecha de la imagen).	37
Figura 13	Vista hacia el noreste, desde sierra Cirio ilustrando las amplias planicies que representan la unidad morfogénica de Gran Bajada con Lomerío.	38
Figura 14	Vista al suroeste de la Sierra Cirio, e ilustración del drenaje paralelo que caracteriza al lomerío de pendiente estable que rodea a la Sierra.	38
Figura 15	Mapa de unidades morfogénicas dentro del acuífero Puerto Libertad.	39
Figura 16	Tipos de suelo en el acuífero Puerto Libertad.	42
Figura 17	Tipo de vegetación en la sub-cuenca Puerto Libertad.	44
Figura 18	Mapa geológico regional en la subcuenca Puerto Libertad	46
Figura 19	Columna estratigráfica regional acuífero Puerto Libertad	47
Figura 20	Mapa geológico del área del acuífero Puerto Libertad	52
Figura 21	Arreglo de Loop coincidente.	57
Figura 22	Localización de sondeos electromagnéticos.	61
Figura 23	Localización de perfiles de resistividad.	63
Figura 24	Perfil de resistividad SWNE-04.	67
Figura 25	Perfil de resistividad SWNE-05.	68
Figura 26	Modelo geofísico con secciones de resistividad acuífero Puerto Libertad	70
Figura 27	Unidades geoeléctrica interpretadas dentro del área estudiada.	71
Figura 28	Perfil geoeléctrico WE-05.	74
Figura 29	Perfil geoeléctrico SW NE-01.	75
Figura 30	Perfil geoeléctrico SW NE-01.	76
Figura 31	Perfil geoeléctrico SW NE-05.	78
Figura 32	Concentración de la intrusión salina acuífero Puerto Libertad.	81
Figura 33	Configuración del basamento y la intrusión salina, vista hacia el NW. Acuífero Puerto Libertad.	82
Figura 34	Configuración del basamento y la intrusión salina, vista hacia el NE. Acuífero Puerto Libertad.	83
Figura 35	Configuración del basamento y la intrusión salina, vista hacia el SW. Acuífero Puerto Libertad.	84
Figura 36	Configuración del basamento y la intrusión salina, vista hacia el N-NW. Acuífero Puerto Libertad.	85

Figura 37	Configuración del basamento y la intrusión salina, vista aérea a 45°. Acuífero Puerto Libertad.	86
Figura 38	Fosas Principales acuífero Puerto Libertad.	87
Figura 39	Estructuras inferidas con geofísica.	88
Figura 40	Definición de las Zonas de fracturamiento acuífero Puerto Libertad	89
Figura 41	Modelo geológico del acuífero Puerto Libertad.	92
Figura 42	Localización de aprovechamientos subterráneos en el acuífero Puerto Libertad.	94
Figura 43	Tipos de Aprovechamientos en el acuífero Puerto Libertad.	94
Figura 44	Usos del agua en el acuífero Puerto Libertad (REPDA).	95
Figura 45	Diámetro de descarga en el acuífero Puerto Libertad.	95
Figura 46	Tipo de bomba en el equipo de extracción de los Aprovechamientos.	96
Figura 47	Tipo de motor en el equipo de extracción de los aprovechamientos.	96
Figura 48	Equipo utilizado para nivelación de brocales.	98
Figura 49	Profundidad al nivel estático en el acuífero Puerto Libertad.	99
Figura 50	Configuración de la Profundidad al Nivel Estático, acuífero Puerto Libertad 2009.	100
Figura 51	Configuración de la Elevación al Nivel Estático y dirección de flujo subterráneo, acuífero Puerto Libertad 2009.	101
Figura 52	Configuración de la evolución al nivel estático, acuífero Puerto Libertad.	101
Figura 53	Mapa de anomalía magnética con la derivada de tilt (DT).	106
Figura 54	Mapa de anomalía Reducción de Polo (RAP o RTP)	108
Figura 55	Mapa de señal analítica (SA-RAP).	109
Figura 56	Mapa de anomalía magnética (TMI).	110
Figura 57	Espectro de potencias y estimación de profundidades.	111
Figura 58	Espectro de potencias y estimación de profundidades.	112
Figura 59	Modelo del sistema de fracturamiento local proyecto San Francisco.	115
Figura 60	Esquema que ilustra el comportamiento de la gravedad debido a la presencia del basamento en el subsuelo.	117
Figura 61	Principio del funcionamiento de un gravímetro (Griem 2007).	117
Figura 62	Plano de anomalía de Bouguer en el acuífero San José de Guaymas.	118
Figura 63	Plano de anomalía residual del acuífero San José de Guaymas	118
Figura 64	Representación esquemática en 3D del plano de Anomalía Residual Unidades en mGals.	119
Figura 65	Plano de Anomalía Residual donde se muestra la distribución de los 3 perfiles modelados dentro del área.	120
Figura 66	Modelo del perfil 1-1' acuífero San José de Guaymas.	121
Figura 67	Modelo del perfil 2-2' acuífero San José de Guaymas.	122
Figura 68	Modelo del perfil 3-3' acuífero San José de Guaymas.	123
Figura 69	Sección hidrogeofísica SWNE-02 acuífero Puerto Libertad.	124
Figura 70	Sección hidrogeofísica WE-06 acuífero Puerto Libertad.	125
Figura 71	Modelo hidrogeofísico acuífero Puerto Libertad.	127
Figura 72	Acuíferos primarios en: 1) sedimentos clásticos (arena y arena/grava), 2) Roca permeables (caliza o carbonatada), y 3) acuíferos secundarios en fracturas.	128

Lista de Tablas

		Pagina
Tabla 1	Muestra la resistividad de algunos minerales y rocas.	6
Tabla 2	Resistividades de las aguas según el medio en que se encuentre.	7
Tabla 3	Resumen de los métodos de prospección geofísica.	17
Tabla 4	Estaciones climatológicas.	22
Tabla 5	Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero	25
Tabla 6	Localización de los Tem's levantados en el Acuífero Puerto Libertad.	62
Tabla 7	Unidades resistivas interpretadas dentro del acuífero Puerto Libertad	64
Tabla 8	Censo de aprovechamientos.	93
Tabla 9	Especificaciones de los equipos usados para nivelación de brocales.	98
Tabla 10	Índice estructural y formas de los cuerpos geológicos inferidos.	113
Tabla 11	Densidades utilizadas en la modelación de los perfiles del acuífero San José de Guaymas.	138

AGRADECIMIENTOS

AL FINALIZAR UN TRABAJO TAN ARDUO Y LLENO DE DIFICULTADES COMO EL DESARROLLO DE UNA TESIS DE MAESTRÍA ES INEVITABLE QUE TE ASALTE UN MUY HUMANO EGOCENTRISMO QUE TE LLEVA A CONCENTRAR LA MAYOR PARTE DEL MÉRITO EN EL APORTE QUE HAS HECHO. SIN EMBARGO, EL ANÁLISIS OBJETIVO TE MUESTRA INMEDIATAMENTE QUE LA MAGNITUD DE ESE APORTE HUBIESE SIDO IMPOSIBLE SIN LA PARTICIPACIÓN DE PERSONAS E INSTITUCIONES QUE HAN FACILITADO LAS COSAS PARA QUE ESTE TRABAJO LLEGUE A UN FELIZ TÉRMINO. POR ELLO, ES PARA MÍ UN VERDADERO PLACER UTILIZAR ESTE ESPACIO PARA SER JUSTO Y CONSECUENTE CON ELLAS, EXPRESÁNDOLES MIS AGRADECIMIENTOS.

GRACIAS A DIOS POR GUIARME CON TUS PASOS Y LLEVARME A CAMINOS DESCONOCIDOS Y ADVERSOS PARA APRENDER A SALIR DE ELLOS VICTORIOSO.

AGRADEZCO AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA (CONACYT) POR DOS AÑOS DE BECA PARA LLEVAR A CABO LA MAESTRÍA EN CIENCIAS-GEOLOGÍA, ASÍ COMO NUESTRA ALMA MATER LA UNIVERSIDAD DE SONORA (UNISON) Y EN ESPECIAL AL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA POR PERMITIRME LLEVAR A CABO MI FORMACIÓN PROFESIONAL.

AL DR. MIGUEL RANGEL MEDINA, A QUIEN APRECIO DE TODO CORAZÓN YA QUE NO SOLO FUE UN PROFESOR SINO UNA GRAN PERSONA QUE ME HIZO VER LOS ERRORES Y DESTACAR MIS VIRTUDES, NO SOLO EN ESTA ETAPA DE MI VIDA, SINO EN TODO MI RECORRIDO PROFESIONAL, POR ESO NO TERMINARE DE DARLE LAS SUFICIENTES, "GRACIAS".

AL DR. ROGELIO MONREAL SAAVEDRA, POR SER UN GRAN PROFESOR Y GRAN AMIGO, EL CUAL ME ENSEÑO A VER LA GEOLOGÍA NO DE UN SOLO PLANO SINO DE LAS DISTINTAS FORMAS. POR SU APOYO EN LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS, SUS COMENTARIOS, SUS CORRECCIONES Y SU TIEMPO. AL *M.C. JOSÉ ISMAEL MINJAREZ SOSA* POR LA CONFIANZA QUE SIEMPRE ME INSPIRO, POR SUS CONSEJOS Y COMENTARIOS, POR EL APOYO QUE ME BRINDO. *GRACIAS POR TOMAR PARTE DE SU TIEMPO EN LA REVISIÓN DE ESTA TESIS Y POR SUS COMENTARIOS QUE AYUDARON A MEJORARLA.*

AL DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA POR SU DISPONIBILIDAD A LA HORA DE COMPARTIR, REVISAR Y AÑADIR INFORMACIÓN TANTO COMO A LA HORA DE CONSULTAR ALGUNAS DE LAS DUDAS SURGIDAS DURANTE LA INVESTIGACIÓN Y ADEMÁS DE LA GRAN VALIOSA ENSEÑANZA QUE ME INCULCÓ Y POR SUS CONSTANTES ÁNIMOS DE SUPERACIÓN A LO LARGO DE MI CARRERA PROFESIONAL.

M.C. RAFAEL RODRÍGUEZ TORRES (CHIVITO)† POR TODOS LOS BUENOS Y MALOS MOMENTOS QUE TUVIMOS, POR SUS BUENOS CONSEJOS, POR SU APOYO, POR SU AYUDA, PORQUE SIEMPRE SERÁN PARTE DE LO QUE APRENDÍ DURANTE MI FORMACIÓN EN ESTA CARRERA, MUCHAS GRACIAS.

A MI MAMÁ, ADEMÁS DE DARMÉ LA VIDA SIEMPRE ME DISTE MOTIVOS PARA VIVIR, TÚ, MUJER DE LUCHAS ETERNAS, DE PALABRAS PARA TODA OCASIÓN, GRACIAS POR HACER DE MI EL HOMBRE QUE SOY HOY EN DÍA, POR ENSEÑARME A AMAR A MIS SEMEJANTES Y DEMOSTRARME QUE NO EXISTE LUCHA QUE NO SE PUEDA GANAR EXCEPTO AQUELLA EN LA QUE SE PIERDE LA VOLUNTAD.

PAPÁ (†) GRACIAS POR BRINDARME TU APOYO INCONDICIONAL EN LAS BUENAS, EN LAS MALAS Y EN LAS PEORES, GRACIAS POR TANTOS CONSEJOS Y DESVELO, POR SER MOTIVO DE LUCHA Y BRINDARME EL EJEMPLO DE LO QUE ES SER UN BUEN HOMBRE.

A MIS HERMANOS, COMPAÑEROS DE TODO MOMENTO, CONFIDENTES DE MIS TRAVESURAS, AMIGOS INCONDICIONALES, PERSONAS DE CORAZÓN NOBLE Y FUERTE, GRACIAS POR AYUDARME A ORIENTARME CUANDO ME CREÍ PERDIDO Y POR BRINDARME UNA MANO CUANDO ESTUVE A PUNTO DE CAER, ¡LOS QUIERO MUCHO!. A TODOS, ESPERO NO DEFRAUDARLOS Y CONTAR SIEMPRE CON SU VALIOSO APOYO, SINCERO E INCONDICIONAL.

A MIS COMPADRES IRAM LÓPEZ Y JUAN CARLOS GONZÁLEZ POR SER EN VERDAD GRANDES PERSONAS DE CORAZÓN Y EJEMPLOS DE SUPERACIÓN A TODA ADVERSIDAD. PORQUE LA FORTALEZA DEL HOMBRE SE PRUEBA EN LA DESGRACIA, Y LA FIDELIDAD DE UN BUEN AMIGO SE PRUEBA EN LA TEMPESTAD. BASTA UN POCO DE ESPÍRITU AVENTURERO PARA ESTAR SIEMPRE SATISFECHOS, PUES EN ESTA VIDA, GRACIAS A DIOS, NADA SUCEDE COMO DESEÁBAMOS, COMO SUPONÍAMOS, NI COMO TENÍAMOS PREVISTO.

A MI COMADRE CARMEN CECILIA BERNAL TERÁN POR SU ESFUERZO EN EL CUAL, DIRECTA O INDIRECTAMENTE, ME ESTUVO AYUDANDO LEYENDO, OPINANDO, CORRIENDO, TENIÉNDOME PACIENCIA, DANDO ÁNIMO, ACOMPAÑANDO EN LOS MOMENTOS DE CRISIS Y EN LOS MOMENTOS DE FELICIDAD.

A MIS COMPAÑEROS AN HO, CARLOS P, ELSA, EMMANUEL, ERICK, IRLANDA Y MARCIA, QUIENES SON PARTE IMPORTANTE EN MI FORMACIÓN COMO PROFESIONISTA, CON QUIENES LLEGUE A FORJAR LAZOS DE AMISTAD QUE PERDURARAN EN EL TIEMPO.

Y POR ÚLTIMO CON TODO CARIÑO Y AMOR A LA PERSONA QUE HA ESTADO CONMIGO Y ME HA DADO SU APOYO, COMPRENSIÓN Y AMISTAD, QUIEN ME HA ALENTADO Y EMPUJADO PARA SEGUIR ADELANTE EN LOS MOMENTOS MÁS DIFÍCILES Y ANTE TODO ME HA DADO SU AMOR Y CARIÑO TODOS ESTOS AÑOS Y DURANTE LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO A MI ESPOSA GEORGINA YAMBE DURAN CALLES Y MIS HIJOS ANÍBAL RAFAEL, ITZEL NATALIA Y GLORIA MARINEE GRIJALVA DURAN, QUE ME DAN UN GRAN DOLOR DE CABEZA Y ME HACEN SENTIR MUCHA ALEGRÍA A MI VIDA MUCHAS GRACIAS POR SER UN GRAN APOYO EN MI VIDA.

SON MUCHAS LAS PERSONAS QUE HAN FORMADO PARTE DE MI VIDA PROFESIONAL A LAS QUE ME ENCANTARÍA AGRADECERLES SU AMISTAD, CONSEJOS, APOYO, ÁNIMO Y COMPAÑÍA EN LOS MOMENTOS MÁS DIFÍCILES DE MI VIDA. ALGUNAS ESTÁN AQUÍ CONMIGO Y OTRAS EN MIS RECUERDOS Y EN MI CORAZÓN, SIN IMPORTAR EN DONDE ESTÉN QUIERO DARLES LAS GRACIAS POR FORMAR PARTE DE MÍ, POR TODO LO QUE ME HAN BRINDADO Y POR TODAS SUS BENDICIONES. GRACIAS A TODOS DE CORAZÓN.

RESUMEN

Se propone una metodología elaborada por el autor utilizando el método resistivo con su aplicación en diversos escenarios geológicos. El método permite caracterizar y obtener un modelo hidrogeofísico, que es posible aplicarlo en diversas formaciones acuíferas. Por lo que este trabajo presenta la hidrogeofísica generada en experiencias hidrogeológicas de campo y gabinete para casos de acuíferos costeros y en zonas serranas, con interés minero. Las primeras zonas generalmente se encuentran en acuíferos constituidos litológicamente por materiales granulares; unidades fluvio-aluviales de sedimentos de relleno y los segundos en rocas consolidadas de todo tipo. La metodología obtenida para caracterizar formaciones geológicas que respondan a esta definición, soporta los fundamentos teóricos empleados en los estudios hidrogeológicos convencionales, aunque requiere de la combinación de los resultados obtenidos en diversas especialidades de Ciencias de la Tierra. Es por tanto, la aplicación de técnicas indirectas que bien aplicadas resuelven las incertidumbres geológicas e hidrogeológicas surgidas de la complejidad del medio físico.

Las metodologías aplicadas se describen paso a paso para llevar a cabo la caracterización hidrogeofísica. La metodología posee dos principales etapas; la primera corresponde a la adquisición de un marco geológico, geográfico e hidrogeológico de la zona. La segunda requiere del reconocimiento hidrogeológico de campo, para conocer las posiciones de los niveles estático y dinámico del agua. Una vez definido este marco conceptual, es posible definir la actividad del estudio para la obtención de las propiedades físicas de las rocas—resistividad— lo que permite caracterizar la geometría y definir la estructura del subsuelo. Con la suma integral de lo anterior, se realiza el procesado e integración de la información con lo cual se define un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico, que muestra las condiciones del subsuelo y permite definir si la zona es o no productora de agua subterránea, así como definir las direcciones generales de flujo y posible número de acuíferos presentes.

Para mostrar el desempeño metodológico de esta investigación, se utilizaron casos de estudio, en los que se empleó el método electromagnético, en la modalidad de sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM, ó TDEM por sus siglas en inglés). Esta técnica geofísica proporciona contrastes de resistividad o conductividad a profundidad, que permiten asociarlos a los diferentes eventos geológicos y materiales que se presentan en el subsuelo. Se concluye que el método define con mayor certidumbre las condiciones del subsuelo, al caracterizar mejor los estratos a mayor profundidad, con respecto al método geoelectrico de sondeos eléctricos verticales (SEV). Por tanto, el uso del TEM apoya a la definición de las condiciones hidrogeológicas con mayor detalle y sentido teórico-práctico.

I INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, las necesidades de consumo han llevado a una gran demanda no solo en cuanto a disponibilidad de grandes cantidades de recursos, sino también en cuanto a gran calidad de estos recursos hídricos. Esto ha llevado a importante y destacado desarrollo de la perforación de nuevas y mejores técnicas y caracterizaciones del aprovechamiento de captaciones de agua subterránea, así como la expansión de redes de sondeos y piezómetros para la vigilancia y control de acuíferos, siendo por tanto una actividad en claro auge.

Habitualmente se asocia el papel de la geofísica aplicada a la hidrogeología en la resolución de aspectos relativos a la geometría de las formaciones rocosas del subsuelo. Determinar el espesor y posición en profundidad de niveles rocosos con influencia en el comportamiento hidrogeológico de una determinada zona es un objetivo típico de los métodos geofísicos. Se trata de objetivos de carácter cuantitativo que parcialmente se complementan a veces con aspectos cualitativos indicativos de posibles variaciones en la composición litológica de determinadas formaciones.

Para la resolución de estos objetivos de tipo general se pueden aplicar un amplio abanico de técnicas: gravimetría, métodos de resistividad por (SEV), electromagnéticos (TEM), etc. Desde el punto de vista teórico, y práctico en ciertos casos; es preciso a veces aplicar más de un método si se pretende reducir las indeterminaciones que conlleva la interpretación de los datos. De modo general es frecuente que puedan existir varias posibilidades capaces de justificar los datos obtenidos por la aplicación de un determinado método geofísico.

La caracterización resistiva para captación de agua o como elemento de las redes de control de los acuíferos, está sujeta a un conjunto de singularidades y especificaciones debidas precisamente a la imperiosa necesidad de garantizar la protección de los acuíferos. Para ello la necesidad de caracterizar el control y funcionamiento de los acuíferos, es necesario tener claro una metodología de la caracterización hidrogeofísica, así prevenir una posible deficiencia de cualquier tipo en la interpretación o caracterización de un modelo hidrogeofísico (Figura 1).

Una vez integrada toda la información obtenida de las sucesivas etapas de análisis y reconocimiento planteadas durante un estudio, se estará ya en disposición de pasar a evaluar la necesidad e idoneidad de plantear una campaña de investigación mediante la caracterización hidrogeofísica, utilizando métodos de magnetometría y gravimetría, de manera que se pueda ampliar la información disponible y su precisión.

I.1 DEFINICIÓN DEL TEMA DE ESTUDIO.

El término hidrogeofísica es una contracción de la aplicación de la geofísica de prospección con fines hidrogeológicos. Contempla por tanto, la estimación de algunos parámetros y el monitoreo de varios procesos importantes en los estudios hidrogeológicos, con el fin de determinar y cuantificar el recurso agua, comprender el sistema acuífero y brindar herramientas para la evaluación, y en algunos casos, la remediación de zonas contaminadas. Diferentes problemas hidrogeológicos pueden tener solución con la prospección geofísica (Arias, 2002), entre ellos: la determinación de la geometría del acuífero, su caracterización en función de la litología, conocimiento de varios parámetros hidráulicos y la protección de acuíferos superficiales.

La temática hidrogeofísica es objeto cada vez de mayor interés, tanto en artículos, síntesis y sesiones especiales de diferentes conferencias y asociaciones internacionales, entre ellas: International Association of Hydrological Sciences (IAHS), American Geophysical Union (AGU), European Geosciences Union (EGU), European Association of Geoscientists and Engineers (AEGE) y en los simposios de: Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP) y de la Society of Exploration Geophysicists (SEG).

Dada la efectividad y eficiencia de los métodos geofísicos en las investigaciones hidrogeológicas, a nivel mundial se observa un incremento del volumen de trabajos geofísicos en este campo. La literatura especializada reporta resultados donde los métodos geofísicos han permitido pronosticar el comportamiento de las propiedades hidrodinámicas y en este sentido los de pozo han contribuido de manera importante (Jones & Bufford, 1951; Keys & MacCary, 1971; Brown, 1988).

Mazac, Kelly & Landa (1985). También señalan que el modelo hidrogeofísico general debe tener en cuenta que:

- La conductividad hidráulica se correlaciona con el tamaño de los granos y la porosidad efectiva o total para sedimentos libres de arcilla, y se correlaciona con el contenido de arcilla y la porosidad efectiva en sedimentos arcillosos.
- Relaciones inversas entre los parámetros eléctricos e hidráulicos pueden ser esperados cuando la porosidad controla las variaciones de la conductividad hidráulica y otros factores como el tamaño de los granos y el contenido de arcilla son relativamente constantes.
- Relaciones directas entre los parámetros eléctricos e hidráulicos aparecen cuando existen correlaciones inversas entre el contenido de arcilla y la conductividad hidráulica. La mayoría de los trabajos que se reportan han sido desarrollados en acuíferos donde existe un predominio de la porosidad intergranular; sin embargo, también se reportan trabajos donde ha

sido posible estudiar el comportamiento de las propiedades hidrodinámicas a partir de los métodos geofísicos en colectores fracturados y cavernosos.

Gómez Rivero (1979) presenta una metodología para estimar la permeabilidad de las rocas usando solamente registros geofísicos de pozo y una metodología para relacionar el factor de formación (obtenido de un registro eléctrico), la porosidad obtenida de un registro de porosidad y la permeabilidad absoluta (obtenida de datos de laboratorio); también, presenta ecuaciones empíricas obtenidas en carbonatos y arenas. El método desarrollado por este autor puede ser aplicado a rocas con porosidad intergranular y a rocas con porosidad mixta.

La metodología desarrollada por Gómez Rivero es aplicada con éxito para el estudio de la permeabilidad de colectores vulcano-sedimentarios (tobas), donde existe un predominio de la porosidad de fractura (García.1996).

Katsube & Humet (1987) reportan que la relación entre el factor de formación obtenido de un registro de corriente enfocada y el obtenido a partir de un registro de densidad, puede ser usada para estimar la conductividad hidráulica de rocas cristalinas fracturadas. Estos autores reportan una ecuación de regresión entre la transividad obtenida por pruebas hidrogeológicas "in situ" y el cociente de los dos factores de formación, para intrusiones graníticas de Canadá.

Se reportan también correlaciones empíricas entre la velocidad del flujo del agua subterránea y parámetros geofísicos de pozo en calas hidrogeológicas del acuífero cárstico Cuenca Sur de La Habana (Valcarce. 1995). En este trabajo se establece que el comportamiento de la porosidad y la cantidad de arcilla condicionan el comportamiento de los parámetros hidrodinámicos del acuífero. También reportan correlaciones inversas entre el factor de formación (obtenido del registro eléctrico) y la velocidad del agua subterránea (obtenida del método de dilución de sal) y correlaciones inversas entre la cantidad de arcilla (estimada del registro gamma natural) y la velocidad del flujo; pero para solo tres calas. En el presente trabajo. Este análisis se amplía y profundiza para 9 pozos del acuífero, se incorporan otros parámetros geofísicos de pozo y los resultados de pruebas de bombeo.

Hinnell, A. C., T. P. A. Ferré, J. A. Vrugt, J. A. Huisman, S. Moysey, J. Rings, and M. B. Kowalsky (2010), Improved extraction of hydrologic information from geophysical data through coupled hydrogeophysical inversion, *Water Resour. Res.*, 46, W00D40, doi:10.1029/2008WR007060. Se comparan las capacidades de inversión de acoplado y desacoplado mediante un ejemplo de síntesis de la superficie, basado en estudios de conductividad eléctrica se utiliza para controlar la infiltración unidimensional y redistribución. A través de este ejemplo ilustrativo, se muestra que el enfoque acoplado puede proporcionar una reducción significativa de la incertidumbre de las propiedades hidrológicas y predicciones asociadas si el modelo subyacente es una representación fiel de los procesos hidrológicos. Sin embargo, si el modelo hidrológico exhibe errores estructurales, la inversión de acoplado

puede no mejorar la interpretación hidrológica. A pesar de esta limitación, nuestros resultados apoyan el uso de la inversión de acoplamiento hidrogeofísico tanto por los beneficios directos de la reducción de errores durante la inversión y debido a los beneficios secundarios que se acumulan debido a la amplia comunicación y el intercambio de los datos necesarios para producir un modelo acoplado, lo que probablemente conducir a un uso más reflexivo de los datos geofísicos en los estudios hidrológicos.

Herckenrath, D., E. Auken, L. Christiansen, A. A. Behroozmand, and P. Bauer-Gottwein (2012), Coupled hydrogeophysical inversion using time-lapse magnetic resonance sounding and time-lapse gravity data for hydraulic aquifer testing: Will it work in practice?, *Water Resour. Res.*, 48, W01539, doi: 10.1029/2011WR010411. Los cambios temporales en el contenido del agua pueden estar directamente relacionados con las señales de lapso-tiempo recuperado mediante resonancia magnética de sondeo (TL-MRS) y gravimetría (TL-RG). Estudios previos sugieren que las medidas potenciales de TL-RG pueden proporcionar estimaciones precisas de las características de un acuífero en una prueba de bombeo cuando se utiliza un enfoque de inversión acoplada con hidrogeofísica. Sin embargo, estos estudios consideran condiciones altamente idealizadas. Llegamos a la conclusión de que esta aplicación particular de inversión acoplada hidrogeofísica tiene un potencial limitado para TL-RG, mientras que TL-MRS para ser un método más prometedor.

I.2 METODOS DE PROSPECCION GEOFISICA

1.2.1 Propiedades eléctricas de las rocas

Las propiedades eléctricas de las rocas más importantes para la investigación de agua subterránea son tres.

- a) Actividad electroquímica
- b) Constante dieléctrica
- c) Resistividad

Actividad electroquímica. Es la propiedad de las rocas de polarizarse al pasar por ellas la corriente eléctrica. Depende de la composición química de la roca y de la composición y concentración de los electrolitos disueltos en el agua subterránea, que esta en contacto con las rocas. La actividad electroquímica determina la magnitud y el signo del voltaje desarrollado cuando la roca esta en equilibrio con el electrolito.

Constante dieléctrica. El nombre proviene de los materiales dieléctricos, que son materiales aislantes o muy poco conductores por debajo de una cierta tensión eléctrica llamada tensión de rotura. El efecto de la constante dieléctrica se manifiesta en la capacidad total de un condensador eléctrico o capacitor.

Resistividad. La resistividad eléctrica de cualquier material se define como la resistencia, en menor o mayor grado al paso de la corriente eléctrica, por unidad de área y de longitud con una intensidad conocida. Se designa por la letra griega rho minúscula (ρ), en unidades de ohmios por metro ($\Omega \cdot m$). Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de la corriente eléctrica, por lo que da una idea de lo buen o mal conductor que es dicho material. Un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor mientras que uno bajo indicara que es un buen conductor.

Una roca homogénea, independiente de su litología Tabla 1, responde eléctricamente como un material aislante (resistividades del orden de 10^7 [$\Omega \cdot m$]), excepto en el caso de metales (resistividades del orden de 10^{-7} [$\Omega \cdot m$]).

Esta habilidad de las rocas de poder conducir corriente está directamente ligada a factores intrínsecos del material Tabla 2, (porosidad, permeabilidad), y factores externos (sistemas hídricos de recarga, zonas de entrapamiento). Los factores, que determinan la resistividad eléctrica de una roca, son los siguientes:

- Conductividad de los granos minerales
- Porosidad
- Composición química del agua, que llena los espacios porosos de la roca, como su salinidad por ejemplo.
- % saturación (S)
- Temperatura
- Presión

Tabla 1 Resistividad de algunos minerales y rocas.

MINERALES Y ROCAS	RESISTIVIDAD ($\Omega \cdot m$)
Ígneas	2 a 4.8
Metamórficas	2 a 4.8
Areniscas	2.5 a 4
Calizas	2.5 a 4
Gravas	2.3 a 4
Arenas	2 a 3
Margas	0 a 1.7
Limos	1 a 2
Arcillas	0 a 1

Tabla 2 Resistividad del agua según el medio en que se encuentre.

TIPO DE AGUA	RESISTIVIDAD (Ω -m)
Agua de lagos y arroyos de alta montaña	103 a 3 x 103
Agua dulce superficial	10 a 103
Agua salobre superficial	2 a 10
Agua subterránea	1 a 20
Agua de lago de montaña	0,1 a 1
Agua marina	0,03 a 10

1.2.2 Métodos eléctricos

Los métodos eléctricos son una de las aplicaciones más importantes dentro de la prospección geofísica, Garcia Isidro, Lopez Borromeo, Muñoz Ernesto, 2011; por lo que se explicara cada uno de los arreglos que componen los métodos eléctricos. Para lograr desarrollar esta metodología se utilizan cuatro electrodos, 2 de corriente (A y B), 2 de potencial (M y N) y la unidad resistiva (Trasmisor de corriente, receptor) al centro del arreglo.

Los métodos eléctricos de corriente continua se dividen en:

- Calicatas eléctricas
- Sondeos Eléctricos Verticales
 - Arreglo Dipolo – Dipolo
 - Arreglo Wenner
 - Arreglo Schlumberger

1.2.2.1 Calicatas eléctricas

Las calicatas eléctricas son una aplicación más de los métodos eléctricos, para la realización de este arreglo se necesitan 2 electrodos de corriente (A y B), 2 de potencial (M y N) y la unidad resistívmetra al centro de la medición, que se encarga de enviar corriente y obtención de datos de potencial. (Figura 2).

La finalidad de las calicatas eléctricas es el estudio de las variaciones laterales en la resistividad del subsuelo. Este método consiste en una investigación horizontal a profundidad aproximadamente constante.

Experimentalmente las calicatas eléctricas consisten en trasladar a la misma vez los electrodos de corriente y potencial, manteniendo la separación entre ellos de manera constante, obteniéndose así un perfil de resistividades aparentes a lo largo del área seleccionada.

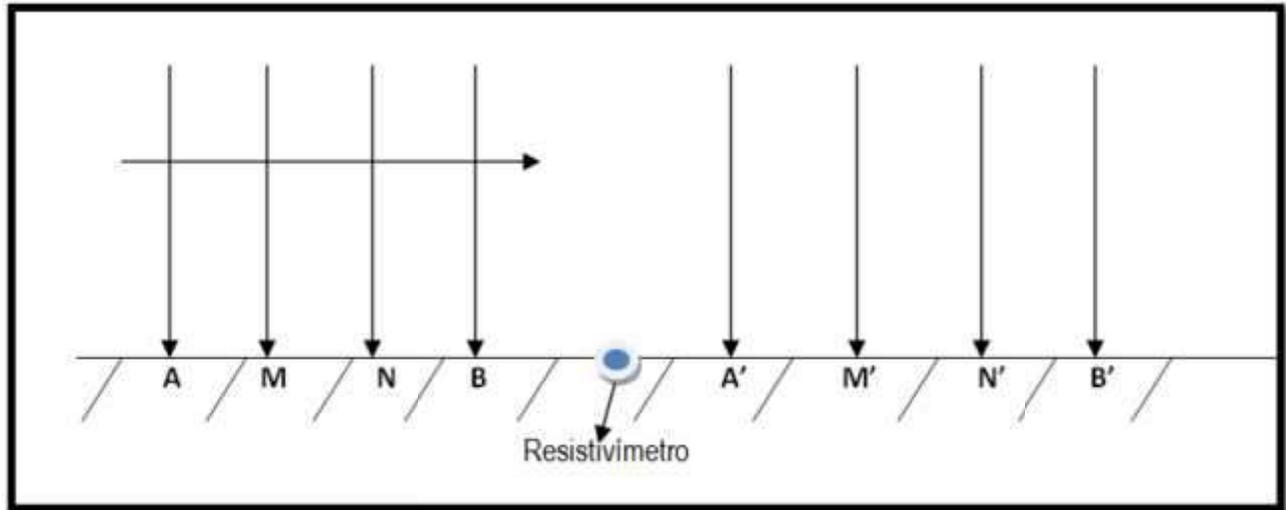


Figura 2 Arreglo Calicatas Eléctricas.

1.2.2.2 Sondeos eléctricos verticales

Dentro de los métodos de prospección geofísica en general, los sondeos eléctricos verticales son una herramienta de gran importancia en la investigación o exploración de acuíferos subterráneos, que es nuestro caso; sin embargo también se extiende al estudio de posibles plumas de contaminación en un área determinada, exploración para la búsqueda de objetos arqueológicos, exploración de yacimientos geotérmicos, etc.

Los SEV nos permiten suministrar una información cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo y se puede determinar aproximadamente la distribución vertical de su resistividad, por lo que la finalidad de esta metodología es la determinación de las capas del subsuelo y las resistividades o conductividades eléctricas de la misma, esto mediante mediciones realizadas en el lugar de estudio.

En términos generales los SEV son una serie de determinaciones de resistividad aparente y que son efectuadas mediante un mismo dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción de corriente. (Figura 3) y propiamente en el levantamiento se puede observar un arreglo en el cual se incluyen 4 pares de electrodos, dos son utilizados para energizar o inyectar corriente al subsuelo y los otros dos para medir la diferencia de potencial, al centro se ubica la unidad resistiva que nos sirve como el centro de control para la inyección de la corriente y recepción de los datos del levantamiento geofísico. El producto final o lo que se busca obtener de un levantamiento utilizando el método SEV es el valor de resistividad aparente del sitio de exploración en función de la profundidad. La razón por la cual se denomina resistividad aparente es porque al realizar o aplicar un levantamiento utilizando SEV, la resistividad del subsuelo no es homogénea debido a que en este se puede encontrar, no solo un tipo de material, sino varios, y esto dependerá de la geología y profundidad.

Matemáticamente podemos definir a la resistividad aparente como $\rho = (V/I) K$

Donde:

V = Diferencia de potencial obtenida de campo

I = Corriente aplicada al subsuelo

K = Coeficiente geométrico del dispositivo

La constante K depende del arreglo a utilizar, por lo que esta variable esta asociada a la distancia entre los electrodos a utilizar en el levantamiento.

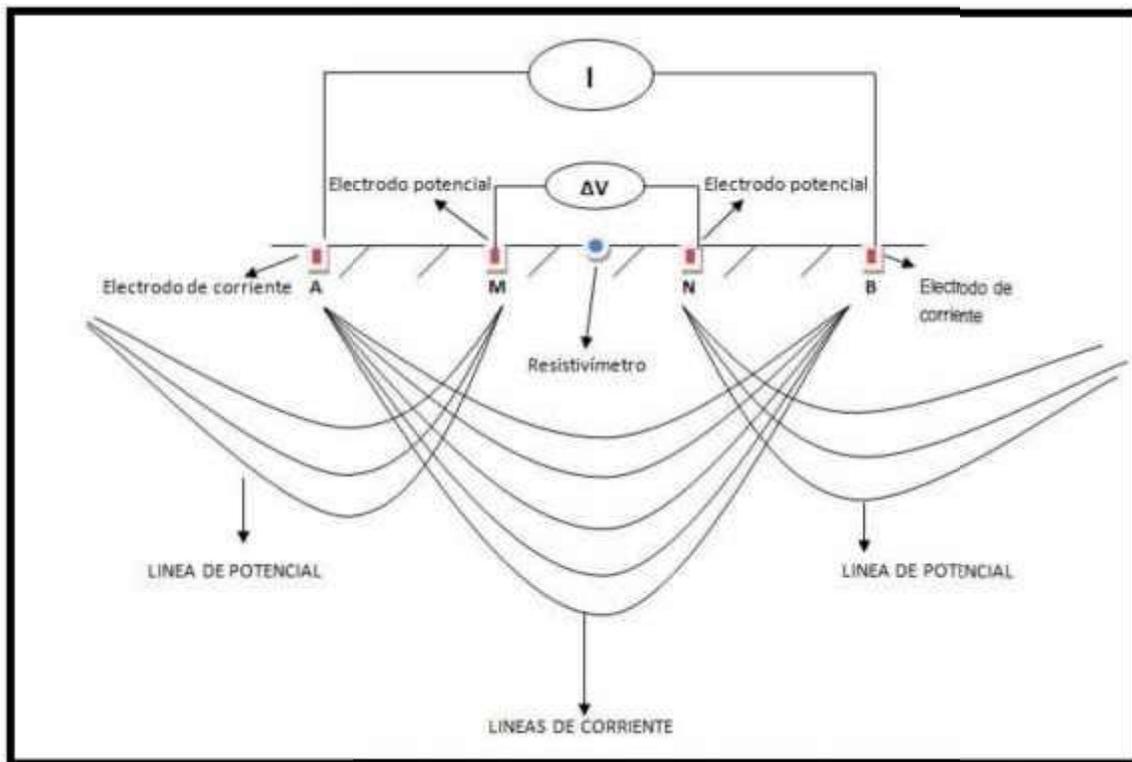


Figura 3 Arreglo sondeo eléctrico vertical.

1.2.2.3 Método dipolo-dipolo

El sondeo dipolo – dipolo es una variante más que ofrecen los métodos de resistividad geoelectrica, el cual consiste en emplear los mismos componentes mencionados anteriormente, como por ejemplo dos electrodos de corriente, dos electrodos de potencial y la unidad resistiva (Figura 4).

Este tipo de arreglo consiste en ubicar los electrodos de corriente (A y B) separados de los electrodos de potencial (M y N), por lo tanto la distancia entre A y B se mantiene constante al igual que entre M y N; la distancia que va aumentando la llamaremos "a" y es la que va separando de una manera gradual los electrodos de corriente de los electrodos de potencial.

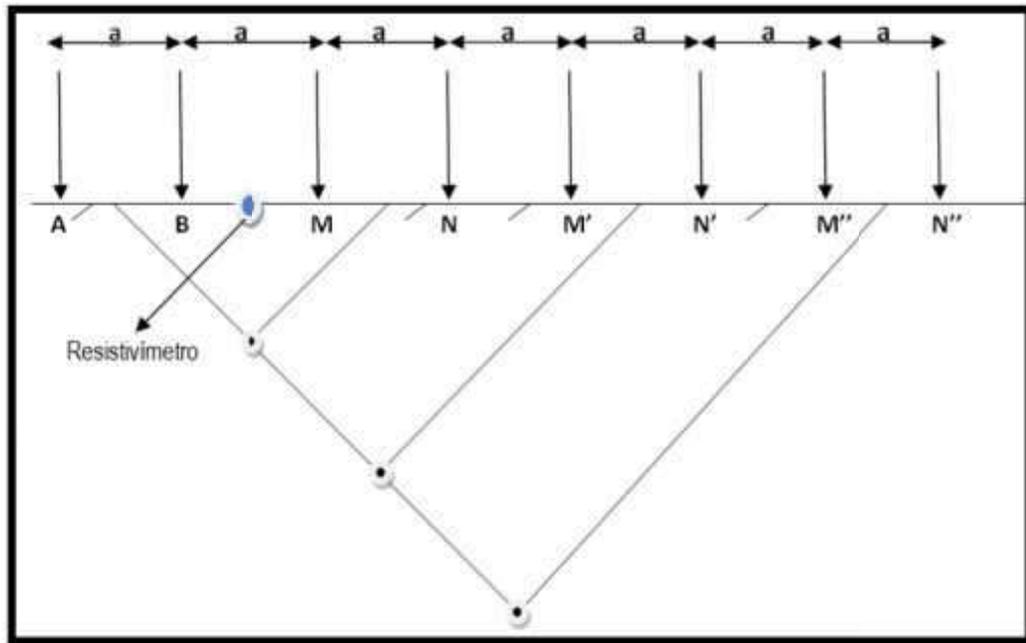


Figura 4 Arreglo dipolo-dipolo.

1.2.2.4 Método Wenner

El arreglo Wenner consiste en la misma aplicación y principios de los SEV, pero la variante en esta metodología es el tipo de separación que existe entre sus electrodos AB, BM y MN ya que esta distancia varía por un factor al que denominaremos "a", manteniéndola constante durante toda la medición (Figura 5)

La constante geométrica al utilizar el arreglo Wenner se calcula de la siguiente forma:

$$K = 2 \pi a$$

a = Separación entre los electrodos AB, BM y MN

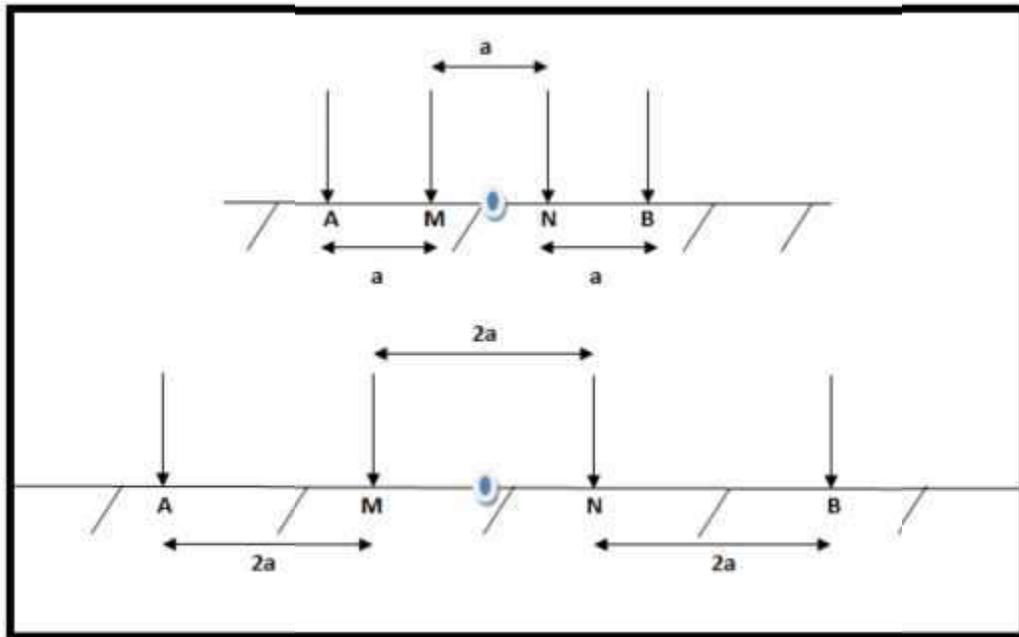


Figura 5 Arreglo wenner.

En la Figura 5 podemos observar como la distancia “a” se va manteniendo constante entre los electrodos AM, MN y NB por cada medición.

Como en todo arreglo utilizando los SEV, siempre se tendrán que hacer uso de cuatro electrodos, dos de potencial y dos de corriente, dos pares de cables, agua con sal y la unidad resistiva para la inyección de la corriente, así mismo la recepción de los datos de resistividad aparente del sitio de exploración.

Una desventaja que posee el método Wenner es que a la hora de realizar el levantamiento, todos los electrodos tienen que modificarse por cada medida, por lo que se necesitará un mayor tiempo para desarrollar este método.

1.2.2.5 Método Schlumberger

El método geofísico empleado para la obtención de la resistividad de los materiales del subsuelo es el eléctrico, en su modalidad de sondeo eléctrico vertical (SEV), con arreglo Schlumberger, para lo cual se utilizan 4 electrodos de acero inoxidable, 2 electrodos de corriente A y B, que son los que transmiten la corriente eléctrica al terreno y el otro par son los electrodos denominados de potencial M y N, los cuales detectan la diferencia de potencial que surge al transmitirse la corriente eléctrica, y conectados al aparato, se procesan los datos presentando los valores de resistividad aparente, los cuales a su vez multiplicados por una constante de proporcionalidad de acuerdo al arreglo y espaciamento utilizado, se grafican en papel doble logarítmico obteniendo una curva de resistividad en función de la profundidad de exploración.

Una vez obtenida esta grafica, se procesaron en nuestro caso los datos en la computadora utilizando el programa denominado "DCINV", en el cual hace una serie de iteraciones para estimar el modelo de capas iniciales, el cual se ajusta a la curva establecida para llegar a un modelo de capas final, por el método de inversión.

Al obtener este modelo de capas para cada SEV, se realiza una correlación entre estos para construir las secciones geoelectricas, mismas que nos darán un panorama general de la estratigrafía del subsuelo.

Este arreglo no es aplicable en terrenos con excesiva pendiente, ni en terrenos cercanos a torres o plantas de energía eléctrica, ya que los datos obtenidos pueden llegar a tener un gran margen de error sobre el área de estudio.

La mayor ventaja que presenta este método es que al inyectar la corriente al subsuelo, se tiene mayor información de las variaciones verticales de las capas subterráneas en cuanto a las resistividades aparentes que se nos puedan presentar.

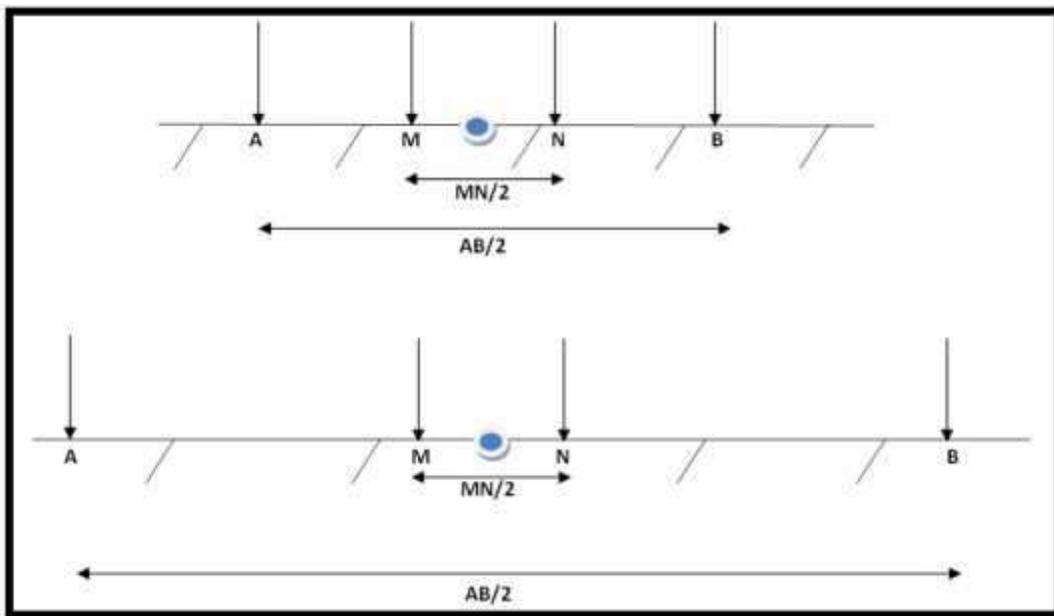


Figura 6 Arreglo Schlumberger.

En la figura 6 podemos observar como se incrementa la distancia "AB/2" entre A y B (electrodos de corriente), ya que al tener mayor distancia para inyectar corriente nos podemos introducir más en las capas del subsuelo proporcionándonos así mayor información acerca de las características litológicas de la zona. Por otro lado se hace una comprobación de los datos que se van obteniendo, esto mediante un empalme que se realiza a cierta distancia de la medición. Este empalme consiste en aumentar la distancia entre MN/2, este dato obtenido tiene que ser relativamente parecido al de la medición anterior en la que no se aplicó el empalme.

1.2.2.6 Método gravimétrico

El método gravimétrico de prospección se basa en la medida en superficie de las pequeñas variaciones o anomalías de la componente vertical del campo de la gravedad terrestre. Con estas se puede llegar a interpretar la situación de las masas en el subsuelo, ya que son causadas por una distribución irregular en profundidad de masas de diferentes densidades, por lo que conociendo aquellas se puede llegar a una interpretación mas o menos probable de la situación de las masas en el subsuelo, dependiendo del conocimiento geológico y de la distribución de densidades en profundidad.

Básicamente, el método por gravedad mide las variaciones laterales de la atracción gravitatoria del suelo que están asociadas a cambios de densidad próximos del subsuelo.

En los métodos de gravimetría se han utilizado tres tipos de instrumentos: la balanza de torsión, el péndulo y el gravímetro. El primero de estos, ideado en un principio con fines geodésicos hacia comienzos del siglo pasado, el péndulo tuvo un uso limitado para la exploración petrolífera, luego el gravímetro que desplazó a ambos, viene siendo utilizado casi desde entonces.

El gravímetro es un instrumento que mide directamente pequeñas variaciones en la componente vertical de la gravedad. Este instrumento puede determinar diferencias de 0.1 miligales y aun menores.

1.2.2.7 Método magnético

El método magnético es el método geofísico de prospección más antiguo aplicable en la prospección petrolífera, en las exploraciones mineras y de artefactos arqueológicos.

En la prospección petrolífera el método magnético proporciona informaciones acerca de la profundidad de las rocas pertenecientes al basamento. A partir de estos conocimientos se puede localizar y definir la extensión de las cuencas sedimentarias ubicadas encima del basamento, que posiblemente contienen reservas de petróleo.

En las exploraciones mineras se aplica el método magnético en la búsqueda directa de minerales magnéticos y en la búsqueda de minerales no magnéticos asociados con los minerales, que ejercen un efecto magnético mensurable en la superficie terrestre.

Además el método magnético se puede emplear en la búsqueda de agua subterránea. Por medio de estudios aeromagnéticos se puede también localizar zonas de fallas, de cizallamiento y de fracturas, que pueden albergar una gran variedad de minerales y ayudar a encontrar la dirección de la mineralización.

El conocimiento de sistemas de fracturas y de acuíferos en rocas solidificadas cubiertas por una capa de depósitos aluviales puede facilitar la búsqueda y explotación de agua subterránea. Hoy día en la prospección petrolífera se emplean magnetómetros instalados en aviones y en barcos. En los estudios de reconocimiento de depósitos minerales se emplean magnetómetros aeroportados.

1.2.2.8 Método electromagnético

Los métodos electromagnéticos conocidos con la designación TEM, utilizados en geofísica de exploración tienen como objetivo principal medir las variaciones de conductividad eléctrica aparente de la Tierra en función de la profundidad. Este método se fundamenta en el hecho de que un campo electromagnético producido por una antena o bobina por la que pasa una corriente alterna, se propaga a través del subsuelo, induciendo otras corrientes que se hallen en su recorrido, cuando esto ocurre una fuerza electromotriz o un voltaje se genera dentro del conductor, según la Ley de Faraday. Las corrientes inducidas ocurren en las capas superficiales y las magnitudes y distribución están en función de la frecuencia del transmisor, energía, geometría y de las propiedades eléctricas del subsuelo o conductor. Por otra parte, los TEM constituyen el grupo de mayor diversidad tanto en una metodologías como en instrumentos para llevar a cabo la toma de datos, resultando ser herramienta eficaz a la hora de abordar una gran variedad de problemas tales como: estudio de aguas subterráneas, cartografía de la intrusión marina, detección de vertidos de contaminantes, localización de cavidades o fallas geológicas, exploración minera, investigación de recursos geotérmicos, etc. Siempre que estos presenten cambios anómalos en conductividad eléctrica.

La versatilidad y gran resolución en la toma de datos, aspecto que permite el reconocer extensas áreas de terreno en un corto espacio de tiempo, son las dos principales virtudes de los métodos electromagnéticos en general. Además la no necesidad de contacto eléctrico con la superficie del terreno (no precisan electrodos), permiten incluso el realizar estudios tanto en barco como en avión.

Los métodos electromagnéticos proporcionan una gran variedad de técnicas para la investigación de agua subterránea en el subsuelo, pero son los de campo próximo y artificial los de mayor importancia, dado que en estos es el operador el que controla el dispositivo transmisor que genera el campo electromagnético primario, por lo tanto el hecho de poder definir las características de la onda primaria, nos permitirá controlar un parámetro tan importante como es la profundidad de investigación.

1.3.2.9 Métodos sísmicos

Los métodos sísmicos representan una herramienta indispensable en la prospección geofísica. Esto debido a que mediante estos se obtiene una mayor cantidad de información en relación a estructuras presentes en el subsuelo, que en comparación con cualquier otro método de prospección geofísica. Entre los métodos sísmicos de la geofísica aplicada se distinguen dos principalmente, los de refracción y los de reflexión sísmica. La base de estos métodos es la medición del tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre el sitio donde se generan las ondas sísmicas y la llegada de estas a diferentes puntos de observación. Cada uno de estos métodos se emplea dependiendo del objetivo, y la profundidad que se desee alcanzar en subsuelo.

Produciendo artificialmente unas ondas sísmicas y detectando los tiempos de llegada de las ondas producidas, una vez reflejadas o refractadas en las distintas formaciones geológicas, se puede obtener una imagen muy aproximada de las discontinuidades sísmicas. Estas discontinuidades coinciden generalmente con las discontinuidades estratigráficas.

1.3.2.10 Método de refracción sísmica

A través de este método se estudia la respuesta del terreno cuando se propaga a través de él una onda de compresión (onda P) producida por medios mecánicos en la superficie. El método de refracción sísmica, es un método de reconocimiento general especialmente en trabajos de ingeniería civil, exploración petrolera, y estudios hidrogeológicos. Permite la localización de los acuíferos (profundidad del estrato), la posición y tamaño del acuífero. Este método es particularmente usado en el reconocimiento de áreas donde prácticamente no se cuenta con información geológica de la zona. El parámetro que se analiza es la velocidad de propagación de la onda a través de los materiales del subsuelo en función de la compacidad de los mismos.

La sísmica de refracción resulta ser uno de los métodos de mayor utilidad en la prospección geofísica y la geotecnia, debido a que permite obtener información sobre las estructuras geológicas presentes en el subsuelo. Adicionalmente, la sísmica de refracción permite obtener información somera del subsuelo para generar modelos de velocidades y determinar el espesor y la profundidad de la roca. Este método estudia básicamente la propagación de las ondas en el subsuelo a partir de impulsos sísmicos, generados mediante el uso de una fuente, y geófonos colocados en el terreno, con el fin de adquirir registros sísmicos a través de los cuales se generan curvas de distancia versus tiempo. Con estas curvas se logran generar modelos de capas con sus velocidades respectivas. En conjunto con los datos geológicos de campo, este modelo sísmico permite generar en profundidad un modelo tectónico y estratigráfico en áreas con poca información de superficie. Aunque dicho método

posee poca resolución en escala vertical, es una importante herramienta cuando se requiere conocer las propiedades del subsuelo a poca profundidad ya que posee una gran resolución horizontal.

En un levantamiento de sísmica de refracción, una fuente genera una perturbación sísmica la cual se propaga dentro del subsuelo; esta perturbación viaja pasando por puntos donde cambian las propiedades elásticas del medio. En esas interfaces, ocurre un proceso de partición de la energía, por lo cual una porción de la energía continúa su propagación hacia el interior de la tierra, mientras que la otra porción regresa a la superficie, donde es registrada por dispositivos detectores (geófonos).

Estas perturbaciones sísmicas, originan los diferentes tipos de ondas que conocemos entre las cuales destacamos las ondas Love, ondas Rayleigh, ondas S y ondas P. Estas últimas son también conocidas como ondas longitudinales las cuales resultan de interés fundamental en la prospección con sísmica de refracción.

El equipo de medición de refracción sísmica se compone básicamente por una fuente generadora de ondas sísmicas, sensores que detectan las ondas (geófonos) y el equipo de adquisición y almacenamiento (sismógrafo).

1.3.2.11 Método de reflexión sísmica

El método de reflexión sísmica se basa en las reflexiones del frente de ondas sísmicas sobre las distintas interfaces del subsuelo. Estas interfaces (reflectores) responden, al igual que en la refracción, a contrastes de impedancia que posteriormente se relacionaran con las distintas capas geológicas. Las reflexiones son detectadas por los receptores (geófonos) que se ubican en superficie y que están alineados con la fuente emisora.

Este método es el más empleado en prospección petrolífera ya que permite obtener información de capas muy profundas. Permite definir los límites de un acuífero hasta una profundidad de 100 metros, su saturación (contenido de agua) y su porosidad. Permite también la localización de los saltos de falla.

La sísmica de refracción y la sísmica de reflexión se diferencian particularmente por un elemento de geometría, es decir la refracción usa principalmente en grandes distancias entre la fuente y el receptor de tal manera que la onda sísmica viaja principalmente de manera horizontal, a lo largo del subsuelo, en vez de manera vertical.

Principalmente lo que se desea es generar ondas sísmicas a través de una fuente controlada, es decir que pueda controlarse la localización y el tiempo. Entre las que podemos mencionar:

Fuentes de impacto: Generalmente mandarrías o martillos; la energía transmitida al suelo por este método no es muy grande, por lo cual se deben aplicar varias veces los impactos al suelo con el fin de mejorar la señal de llegada y suprimir el ruido. Existen varias fuentes de impactos mecánicos, por ejemplo dejando caer un gran peso de una altura de 2 a 3 metros.

Cargas explosivas: Representa un tipo de fuente que genera mayor energía; son usadas por lo general en prospección petrolera. La explosión puede ocurrir en un tiempo corto, de micro a milisegundos, dependiendo de la naturaleza y cantidad del explosivo como del material que rodea el sitio de explosión.

Disparos: Se utilizan balas o cartuchos; la energía generada es mayor que la producida por la fuente de impacto y por lo general menor al producido por las cargas explosivas.

Tabla 3 Resumen de los métodos de prospección geofísica.

MÉTODOS	PRINCIPIOS	PARAMETROS OBTENIDOS
Geoelectrico	Conductividad o resistividad eléctrica	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral, propiedades de las formaciones (arena-arcilla), salinidad del agua, plumas de contaminación
Sísmica de refracción	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Depósitos secos-saturados, espesores de diferentes estratos y detección de zonas de fracturamiento
Sísmica de reflexión	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Zonas de fallas, cartografías de estructuras de recubrimiento
Gravimetría	Densidad	Relleno-basamento
Magnetometría	Susceptibilidad magnética	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral
Electromagnetismo	Conductividad o resistividad eléctrica y magnetismo	Localización de las áreas más conductivas, detección de fracturas que no afloran en superficie

I.3 OBJETIVO

Establecer una metodología hidrogeofísica que permita bajo diversas condiciones geológicas, facilitar el entendimiento hidrogeológico utilizando varios tipos de caracterizaciones. Este se podrá aplicar en diversos casos de estudio haciendo las modificaciones necesarias para obtener mejores resultados para calibrar, tanto de un punto de vista regional como local o puntual.

I.4 JUSTIFICACIÓN

La revisión del estado de arte sobre el tema de esta tesis, no logró encontrar en la bibliografía existente una definición clara que permita tener un entendimiento científico de la aplicación de los métodos geofísicos para alcanzar su aplicación hacia la meta principal, la obtención de un “modelo hidrogeofísico”. Por tanto, tampoco se encuentra disponible una metodología que describa paso a paso las diversas etapas por las que se debe transitar para alcanzar el mismo objetivo.

En la actualidad no existe ninguna pauta normalizada sobre los aspectos que se deban considerar a la hora de elaborar una modelo hidrogeofísico, por lo que se propone la estandarización del método desarrollado en el presente documento.

I.5 LOCALIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE TRES CASOS DE ESTUDIO

La aplicación de la metodología de esta tesis, obligó al uso de diferentes ambientes geológicos para probar y comprobar su eficiencia. Por lo tanto, las siguientes áreas de estudio (Figura 7), fueron analizadas:

1. Acuífero administrativo Puerto Libertad, Sonora, México.
2. Acuífero administrativo San José de Guaymas, Sonora, México.
3. Sitio de mina distrito minero San Francisco, mpio. de Santa Ana, Sonora, México.

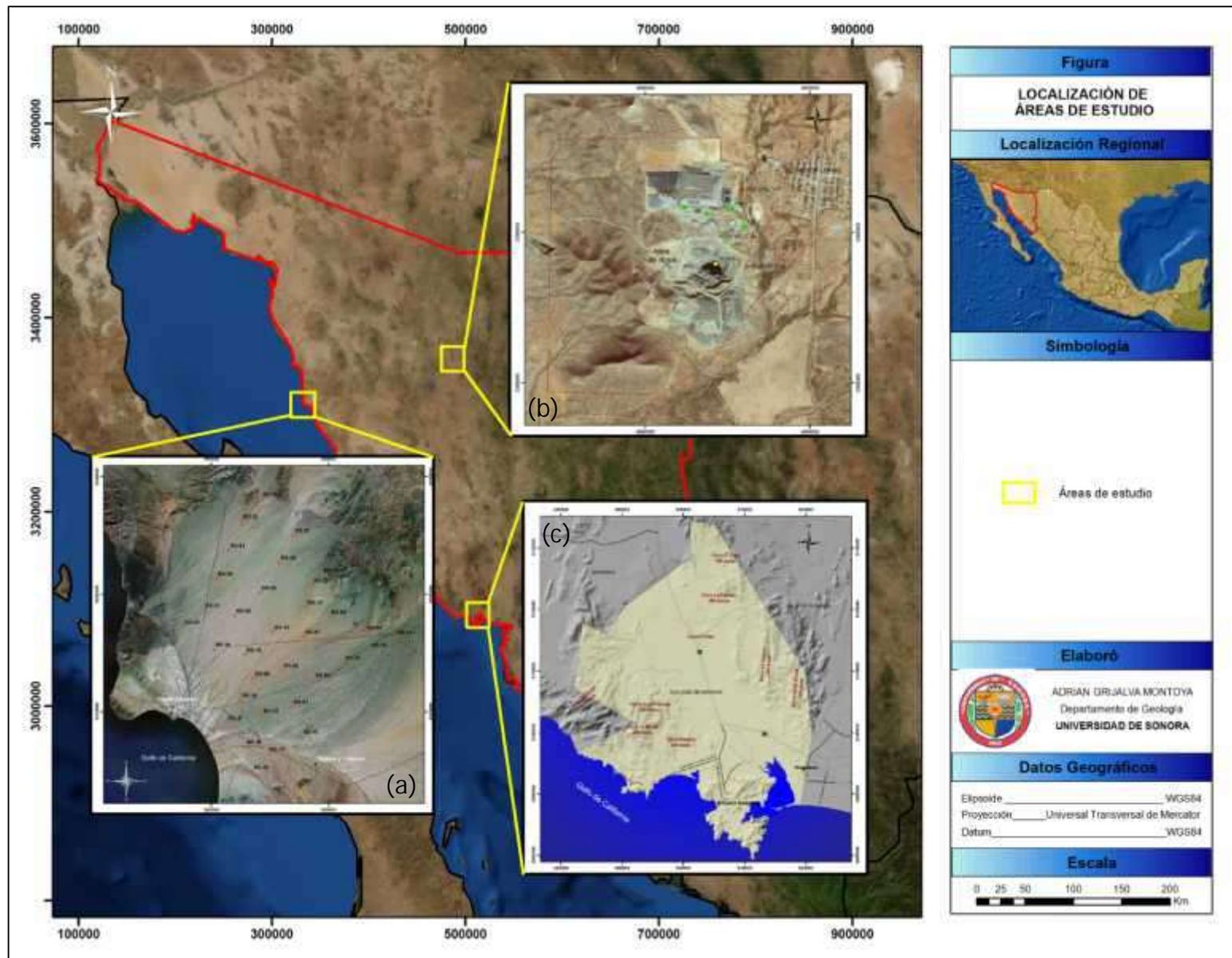


Figura 7. Localización de áreas de estudio, a) Acuífero Puerto Libertad, b) Caso proyecto San Francisco, c) Acuífero San José de Guaymas.

II CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO CASO ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD

II.1 ESTUDIOS PREVIOS

Los estudios de mayor utilidad y más recientes realizados en el acuífero Puerto Libertad, de los cuales se obtuvo un nivel de referencia para este trabajo de tesis se describen a continuación:

- *“Atlas de aguas subterráneas y red de monitoreo del estado de Sonora”. Universidad de Sonora, estudio realizado para la Comisión Nacional del Agua, 2005.*

El atlas incluye principalmente la piezometría (profundidad y elevación del nivel estático y direcciones de flujo) de los 64 acuíferos que constituyen la región noroeste, que incluye al estado de Sonora y una parte del Estado de Chihuahua. Se incluyeron las bases de datos que generaron las curvas de isovalores, así como una descripción de los acuíferos.

- *“Estudio de Caracterización Físicoquímica y Piezometría de los Acuíferos Costeros de la Región Noroeste”. Universidad de Sonora, estudio realizado para la Comisión Nacional del Agua, 2006.*

Los objetivos del estudio fueron: establecer una red de pozos para la toma de muestras de agua, y el análisis físicoquímico de las mismas; y hacer una medición de la profundidad y elevación del nivel estático en los pozos muestreados, para determinar una posible intrusión marina en los acuíferos costeros.

Dentro de las conclusiones las principales son:

- En el acuífero San Luis Río Colorado, predominan las concentraciones de potasio y cloruros por arriba del límite máximo permisible.
- Los aprovechamientos que se encuentran en la ciudad de Puerto Peñasco, en el acuífero del mismo nombre, presentan mala calidad de agua, pues las concentraciones de calcio, magnesio, sodio, cloruros y sulfatos, están por arriba del límite máximo permisible.
- Los acuíferos Caborca, Costa de Hermosillo, Sahuaral y valle de Guaymas, presentan intrusión salina, siendo más fuerte en el segundo.
- Los acuíferos San José de Guaymas y Fuerte Mayo, presentan indicios de intrusión salina.
- El acuífero Valle del Yaqui presenta predominancia de valores altos de Magnesio y Cloruro.
- El acuífero Cocoraque presenta valores por encima del límite de Cloruro y Sodio, en la mayoría de los aprovechamientos muestreados.

- *Estudio técnico para determinar la factibilidad de extracción de aguas subterráneas para su desalación en los acuíferos de Caborca, Puerto Libertad, Arivaipa y Fuerte Mayo, Sonora. Universidad de Sonora, estudio realizado para la Comisión Nacional del Agua, 2007.*

Las conclusiones más importantes del estudio, relacionadas con el acuífero Puerto Libertad, son:

- En el frente de la bahía, en el acuífero Puerto Libertad existe una penetración marina de cortas dimensiones, entre el centro y sur de Puerto Libertad y se definen dos zonas de interfase de agua salina; una pluma de agua salobre que penetra entre Puerto Libertad y el oeste rumbo a la Sierra Bacha con espesores de hasta 100 m, y otra de mayor longitud que penetra continente adentro y se extiende desde Puerto Libertad en dirección noreste, con espesores variables desde unos pocos metros a un promedio de 60 m de agua salobre-salada.
- De acuerdo al análisis de precipitación se establece que el volumen anual que llueve en el acuífero Puerto Libertad es de 405.13 hm^3 , con una evapotranspiración calculada en 367.86 hm^3 , lo que deja una precipitación efectiva de 37.28 hm^3 , considerándose que de ésta, se genera un escurrimiento al mar de 30.76 hm^3 . La infiltración vertical de lluvia se estima en 6.52 hm^3 , es decir el 1.6 % de la precipitación total, dato que se considera adecuado por las características del acuífero.
- La disponibilidad de agua subterránea para el acuífero Puerto Libertad es de 1.12 hm^3 .

II.2 ÁREA DE ESTUDIO CASO ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD

El acuífero Puerto Libertad se encuentra dentro de la cuenca Río San Ignacio, y sub-cuenca Puerto Libertad, en la Región Hidrológica 8 (Sonora norte). Esta región, inicia al sureste de San Luis Río Colorado llegando cerca de Cananea y de Punta Chueca (frente a la Isla Tiburón), con un área de $54,857 \text{ km}^2$, representa el 30.1% de la superficie de Sonora (INEGI, 1993), (Figura 8).

La cuenca del Río San Ignacio se sitúa al oeste del estado de Sonora y al sur de la región hidrológica 8. Tiene un área de $8\,127 \text{ km}^2$, ocupando el 4.59% de la superficie estatal. Se calcula una precipitación media anual de 142 mm, con un coeficiente de escurrimiento de 3.6%. En el acuífero Puerto Libertad, el tipo de clima es muy seco con lluvias en verano (BWhw(x')), y semi-cálido con invierno fresco y presencia de lluvia invernal; la que ocurre en los primeros meses del año y supera los 10.2 mm. La temperatura media anual es de $18 \text{ }^\circ\text{C}$, según la clasificación de Köppen, modificada por E. García (*Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*, Instituto de Geografía, UNAM, 1983). La expresión morfológica en la cuenca define una pendiente general que varía de moderada a baja. Colinda

con la cuenca del Río Concepción - Arroyo Cocóspera al norte y noreste, y con la cuenca Río Bacoachi.

Las estaciones climatológicas son escasas en la planicie semidesértica donde se incluye el área de estudio, ya que a nivel de cuenca se tiene información de solo 4 estaciones administradas por la Comisión Nacional del Agua. La Tabla 4 presenta su localización geográfica, mostrando también la media mensual de temperatura, precipitación total, y evaporación para cada una de éstas. Únicamente la estación Puerto Libertad se encuentra dentro del área estudiada (Figura 9). De estas estaciones el registro de la temperatura y la precipitación se presentan en períodos variables debido a la falta de datos en algunos casos, aunque en el presente estudio se logró el análisis de 46 años (de 1960 a 2006).

Tabla 4 Estaciones climatológicas.

ESTACIÓN	X	Y	TEMP (°C)	PREC (mm)	EVAP (mm)
FÉLIX GÓMEZ	453823	3300931	20.1	340.0	2 160.2
PITIQUITO	393695	3396438	21.7	253.8	2 647.6
PUERTO LIBERTAD	337509	3309227	21.3	107.6	2 264.2
PUERTO PEÑASCO	257290	3465657	22.2	84.6	SD
		MÁXIMA	22.2	340.0	2 647.6
		MÍNIMA	20.1	84.6	2 160.2
		PROMEDIO	21.33	196.5	2357.33

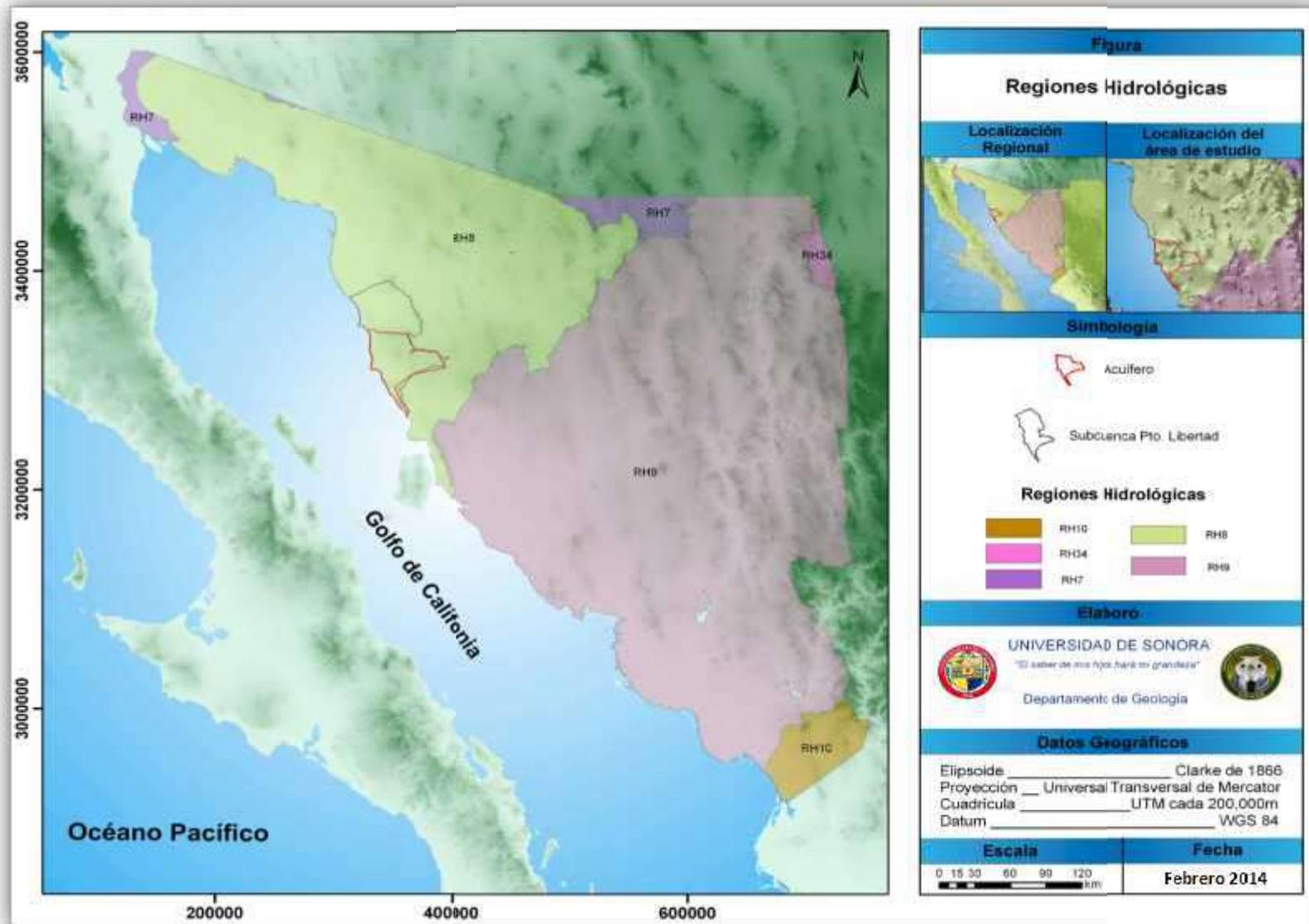


Figura 8 Regiones hidrológicas de Sonora mostrando la localización del acuífero Puerto Libertad.



Figura 9 Localización de las estaciones climáticas y polígonos de Thiessen. Tomado de IDEAS (2006).

La cuenca se encuentra conformada por múltiples corrientes de carácter intermitente, entre las que destaca el Río San Ignacio de donde toma su nombre. El patrón de drenaje en el acuífero Puerto Libertad es de tipo dendrítico, y las corrientes son de tipo intermitentes. En las partes altas del acuífero se manifiestan manantiales de bajo gasto, cuyo flujo se infiltra totalmente al llegar a las zonas aluviales. Las corrientes destacadas son los arroyos El Julio, El Carbón y El Dátil. El primero se sitúa en la parte norte del acuífero, tiene una longitud de 15 km y fluye de noreste a suroeste, para desembocar en el Golfo de California. El arroyo el Carbón se sitúa en la parte centro - noreste del acuífero, lleva un flujo general norte - sur, y se infiltra totalmente al llegar a la zona aluvial. El arroyo El Dátil es el de mayor longitud (60 km). Su dirección de flujo inicial es hacia el suroeste los primeros 16 km, para luego cambiar a casi norte - sur, los siguientes 15 km, y finalmente define su dirección de flujo de este a oeste, desembocando en el Golfo de California, a 3.6 km al sureste del poblado de Puerto Libertad. El aprovechamiento de los escurrimientos se lleva a cabo mediante la construcción de pequeños bordos de almacenamiento, los que se utilizan para actividades pecuarias.

II.2.1 Condición administrativa del acuífero Puerto Libertad.

El acuífero Puerto Libertad es un acuífero costero ubicado en una zona desértica, por lo tanto el agua subterránea se convierte en la única fuente sustentable del recurso para satisfacer la demanda de la población. Sin embargo, la extracción no controlada puede provocar problemas prácticamente irreversibles como la intrusión salina. Es necesario conocer la geometría del acuífero, su calidad, el volumen de extracción adecuado y las mejores zonas de extracción.

El acuífero Puerto Libertad, con la clave 2617 del Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la Comisión Nacional del Agua, se ubica en el extremo oeste del estado de Sonora. Su forma tiende a ser triangular, de manera que es limitado por el Golfo de California (Mar de Cortés) en el lado oeste, por el acuífero Caborca (clave 2005) al norte y por el acuífero Arivaipa (clave 2618) al sureste. El acuífero Puerto Libertad cuenta con un área de 2,025.75 km².

Geográficamente, el acuífero Puerto Libertad se ubica entre los paralelos 29° 33' y 30° 14' de latitud norte y entre los meridianos 112° 05' y 112° 47' de longitud oeste, comprendiendo en un 99% al municipio de Pitiquito, y en un 1% el municipio de Caborca. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero.

Acuífero 2617 Puerto Libertad							
Vértice	Longitud Oeste			Latitud Norte			Observaciones
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos	
1	112	28	55.9	29	38	51.0	
2	112	25	17.6	29	34	44.5	
3	112	25	57.1	29	33	20.4	Del 3 al 4 por la línea de bajamar a lo largo de la costa.
4	112	47	0.2	30	14	0.9	
5	112	43	0.5	30	14	7.3	
6	112	41	27.8	30	12	62.1	
7	112	26	24.5	30	12	15.8	
8	112	21	58.2	30	4	25.7	
9	112	10	17.8	30	3	40.5	
10	112	5	58.1	29	56	5.4	
11	112	23	27.8	29	52	7.3	
12	112	32	7.6	29	45	4.6	
1	112	28	55.9	29	38	51.0	

El acuífero Puerto Libertad se encuentra a las disposiciones del decreto de veda del meridiano 110° (1 de 3), publicada en el Diario Oficial de la Federación con fecha del 19 de septiembre de 1978, la cual enuncia lo siguiente: *“DECRETO por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona”*.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2007), el municipio de Pitiquito se localiza en la zona de disponibilidad 4. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

II.3 OBJETIVOS CASO ESTUDIO ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD

- ❖ Recopilación, consulta, análisis y depuración de la información geológica, hidrológica, topográfica y toda aquella de interés hidrogeológico que exista sobre el Acuífero Puerto Libertad en el Organismo de Cuenca Noroeste, tanto en la CONAGUA (oficina del Organismo de Cuenca) como en INEGI, UNISON, etc.
- ❖ Descripción del entorno fisiográfico y análisis geológico, geomorfológico e hidrológico del acuífero Puerto Libertad.
- ❖ Interpretación de la geología del subsuelo con información geofísica y geológica existentes, para cada una de las zonas donde se ubica el acuífero Puerto Libertad.
- ❖ Censo de aprovechamientos, hidrometría, piezometría y nivelación de brocales.
- ❖ Modelo conceptual hidrogeofísico del acuífero Puerto Libertad.

II.3.1 Metas específicas caso de estudio acuífero Puerto Libertad

La integración de este tipo de información se denomina prospección hidrogeofísica y tuvo las siguientes metas específicas:

Realizar una metodología hidrogeofísica a partir de un levantamiento **geofísico** con aplicación hidrogeológica para:

- Obtener la distribución de valores de resistividad del subsuelo
- Establecer unidades Resistivas
- Asociar las unidades Resistivas obtenidas con cuerpos rocosos, condiciones y estructuras del subsuelo.
- Obtener correlaciones litológicas
- Obtener unidades geoelectricas.
- Inferir la geometría de los cuerpos granulares y las distintas unidades de roca.
- Establecer la geometría del contacto Basamento Geohidrológico – Material granular.
- Inferir la posición del nivel freático.

II.4 DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA REGIÓN PUERTO LIBERTAD

En este capítulo se presentan las descripciones temáticas regionales, ya sea a nivel de la sub-cuenca Puerto libertad, o bien, de la región hidrológica 8 donde se encuentra el acuífero estudiado. Se describe la vegetación, hidrografía, fisiografía, geomorfología, geología, tectónica y estratigrafía, ya que esta información es el marco de referencia para llevar a cabo la caracterización del acuífero.

II.4.1 Hidrografía

La región hidrológica 8 comprende la porción noroeste del estado de Sonora y las Islas Tiburón y San Esteban. Tiene los siguientes límites: al norte las cuencas de varias corrientes que se encuentran en territorio de los Estados Unidos de Norte América y drenan hacia el Río Colorado; al suroeste el golfo de California; al sureste la cuenca del Río Sonora y otras menores de la región hidrológica 9 y por el noroeste parte de la cuenca del Río Colorado que constituye la región hidrológica 7. Políticamente forman parte de ella los municipios San Luis Río Colorado, Puerto Peñasco, Caborca, la mayor parte de Pitiquito y el territorio correspondiente a las Islas mencionadas.

La región comprende una superficie de 56,177 km² dentro de los cuales, 1,241 corresponden a las Islas Tiburón y San Esteban. Las únicas corrientes de importancia dentro de la región son los ríos Concepción y Sonoita.

Se pueden distinguir tres zonas de diferente orografía: la primera comprendida aproximadamente entre una altitud de 1,000 m y el parteaguas de la Sierra Madre Occidental, cuyas crestas alcanzan altitudes hasta de 2,530 m; es la zona con pendientes más pronunciadas, cauces bien definidos, precipitación más abundante y zonas dispersas de bosque. La zona intermedia comprendida entre altitudes de 200 a 1,000 m aproximadamente,

tiene topografía ondulada, poca vegetación y cauces medianamente definidos. En ella se encuentra la presa de almacenamiento Cuauhtémoc y numerosos aprovechamientos por derivación para riego en las márgenes los ríos. Esta zona cuenta con abundantes recursos de agua subterránea que también se aprovechan para riego de importantes extensiones agrícolas. Existen dentro de ella varias formaciones montañosas aisladas con características similares a las de la zona alta.

La zona baja, donde se encuentra el acuífero Puerto Libertad, corresponde a la planicie costera con altitudes inferiores a los 200 m; se caracteriza por tener pendientes suaves con grandes aéreas cubiertas por dunas y en ella se encuentra el desierto de Altar, con escasa vegetación y reducido desarrollo agropecuario, dadas las extremas condiciones de aridez.

II.4.2 Río Concepción

Es la corriente más importante de la región hidrológica 8 ya que drena una superficie de 25,757 km². Sus límites son: por el oriente la cuenca del Río Sonora, de la región hidrológica 9; al sur la cuenca del río San Ignacio; al norte la cuenca del río Sonoita y las de los ríos San Pedro, Santa Cruz y Puertecito que escurren hacia territorio de los Estados Unidos de Norteamérica; al noroeste las cuencas de las corrientes poco definidas que descargan directamente en el Golfo de California.

La topografía de la cuenca se caracteriza por grandes extensiones de terrenos planos en las zonas media y baja, tiene altitud media de 700 m aproximadamente y una máxima de 2,530 m al norte de Cananea. La formación montañosa más importante de la cuenca se extiende desde Magdalena, hasta los orígenes del colector general abarcando además las cuencas de los ríos Babasac, Los Alisos, Coyotillo, Busani y Altar, afluentes de Concepción. Tiene altitudes de 1,500 m y máxima de 2,530 m en la Sierra Mariquita. Esta Sierra se continúa hasta el Parque Nacional Coronado en territorio de los Estados Unidos de Norteamérica.

El río Concepción nace con el nombre de río Casa de Piedra en el cerro Vereda, a una altitud de 2,000 m, 9 km al sureste de Santa Cruz, en el parteaguas con el río Santa Cruz, que escurre hacia el territorio de los Estados Unidos de Norteamérica. Su cauce sigue un rumbo suroeste, recibe por su margen derecha al arroyo San Antonio a una altitud de 1,100 m y cambia su nombre al de arroyo Cocóspera; por la margen izquierda confluye el río Babasac a una altitud de 930 m. En el arroyo Cocóspera la CONAGUA realizó observaciones del nivel del río en la Estación Comaquito, pero actualmente está suspendida. Esta estación se encontraba a 12.5 km de aguas arriba de la confluencia con el río Babasac.

El arroyo Cocóspera recibe las aportaciones de su primer afluente importante, el arroyo los Alisos, inmediatamente aguas abajo de Imuris. Por su margen derecha a una altitud de 840 m toma el nombre de río Los Alisos hasta las inmediaciones de Magdalena, donde el colector general fluye por zonas de topografía más suave y se inician los aprovechamientos de sus escurrimientos. Este escurrimiento cuenta con registro hidrométrico desde abril de 1969, cuando entró en operación la estación hidrométrica Imuris de la CONAGUA, situada sobre el colector general, ligeramente aguas abajo de la confluencia del arroyo Los Alisos.

A partir de Magdalena, el colector general toma el nombre de esta población y continua con curso suroeste; pasa por la población de Santa Ana, donde cruza la carretera Hermosillo-Nogales y aguas abajo, a la altura del ejido La Tinaja, recibe por su margen derecha al arroyo El Coyotillo, a una altitud de 550 m.

Desde la confluencia anterior hasta Caborca, el río Magdalena sigue un curso poniente norponiente, penetra a zonas de topografía suave donde su cauce se hace divagante y sus escurrimientos se aprovechan parcialmente por derivación. En este tramo los principales aportes provienen de la margen derecha como el arroyo Busani y los ríos Altar y Seco. A partir de la confluencia del río Altar, el Magdalena cambia su nombre por el de Asunción y a él confluye el río Seco a una altitud de 300 m, ligeramente aguas arriba de la estación hidrométrica Pitiquito 2.

Aguas abajo de la confluencia del río Seco existieron varios canales de los cuales se derivan los escurrimientos del río Asunción para riego de sus márgenes. Los principales canales eran: Casa Blanca, Del Alto, Del Pueblo y Quisuni, donde se efectuaban observaciones hidrométricas, habiéndose determinado que los volúmenes medios anuales derivados eran del orden de 0.8, 1.4, 3.1 y 1.4 millones de metros cúbicos respectivamente.

Aguas abajo de Caborca, Sonora, el río Asunción sigue con rumbo oriente hasta llegar a la sierra El Álamo bordeándola por el norte para después tomar un curso surponiente y finalmente descargar sus aguas en el golfo de California. En este tramo el arroyo Tesota confluye al río Asunción por la margen izquierda al oriente de la Sierra El Alamo, a una altitud de 180 m. Aguas abajo recibe el arroyo Coyote por margen derecha, al norte de la misma sierra, a una altitud de 130 m.

De acuerdo con la división de cuencas y sub-cuencas del Organismo de Cuenca Noroeste de la Comisión Nacional del Agua, el acuífero Puerto Libertad se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 8-Sonora Norte, cuenca Río San Ignacio y en la sub-cuenca Puerto Libertad.

II.5 FISIOGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA PUERTO LIBERTAD

II.5.1 Fisiografía

Es claro que una descripción del relieve proporcionada por la fisiografía, nos ayudará a obtener una mejor información acerca del comportamiento hidrológico, ya que la interacción superficial agua-roca varía según el material, su ubicación espacial dentro del continente y según el área de interacción que posea con la atmósfera, produciendo una modelación del relieve acorde a estos parámetros.

Según la Carta Fisiográfica escala 1:1'000,000 emitida por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, el territorio del estado de Sonora es dividido en cuatro provincias o regiones fisiográficas: Desierto o Llanura Sonorense, hacia el noroeste y oeste, Sierra Madre Occidental, en la parte oriental, Sierras y Llanuras del Norte, en la porción boreal, y Llanura Costera del Pacífico, en el sur.

El acuífero Puerto Libertad se ubica en un área perteneciente solamente una de las cuatro provincias fisiográficas que constituyen al estado de Sonora: la provincia Desierto o Llanura Sonorense. Esta provincia se extiende de sur a norte, abarcando gran parte de las regiones costeras del Estado adoptando forma de cuña hacia el sur. Sus colindancias son: en el extremo noroeste con la península de Baja California, hacia el oriente con la Sierra Madre Occidental y en su extremo sur con la Llanura Costera del Pacífico; asimismo, está dividida en dos subprovincias y una discontinuidad: Sierras y Llanuras Sonorenses, Desierto de Altar y Sierra del Pinacate (respectivamente), esta última ubicada al Norte-Noroeste de la Provincia (Figura 10).

Dentro de la sub-cuenca Puerto Libertad, la cual cuenta con un área de 4,074.12 km², únicamente se presenta la sub-provincia Sierras y Llanuras Sonorenses, la cual se constituye principalmente por sierras de poca elevación principalmente orientadas Noroeste-Sureste separadas por amplias llanuras. Las sierras que representan a esta sub-provincia varían según su ubicación geográfica: son más elevadas (700 a 1,400 m.s.n.m.) y más estrechas (rara vez más de 6 km de ancho) en el oriente; más bajas de 700 m.s.n.m. y más amplias (entre 13 a 24 km) en el occidente. Los principales accidentes topográficos son Sierra El Álamo, al norte de la sub-cuenca, sierra El Viejo, al noreste, sierra Aguirre y sierra Picú en la parte centro-este, y las sierras Cirio y Tordillo al sur. La Isla Tiburón también forma parte de este sistema de sierras alargadas y de bajas elevaciones.

La mayoría de estas sierras son afloramientos de rocas ígneas intrusivas de composición granítica, sin embargo, también son importantes los afloramientos de rocas

metamórficas y rocas carbonatadas (calizas-dolomías), así como rocas volcánicas y conglomerados. Las pendientes topográficas de las principales sierras son bastante pronunciadas, siendo en su mayoría pendientes superiores a 45°, especialmente en las rocas intrusivas, lávicas y metamórficas; en tanto que las menores a 20° son raras. Como principal consecuencia de esta característica, las cimas de las Sierras son dentadas y afiladas (sierras tipo Navaja).

Las llanuras representan la principal forma fisiográfica de la sub-provincia Sierras y Llanuras Sonorenses (con cerca del 80% del área), y se constituyen principalmente de amplios abanicos aluviales que descienden con pendientes suaves desde las sierras colindantes y hacia los márgenes costeros. Los arroyos que drenan esta región efectúan una fuerte erosión debido a rápida escorrentía superficial, produciendo espolones laterales de grava que se proyectan en las llanuras. Esta característica produce rasgos hidrográficos muy bien marcados.

Debido a las variaciones litológicas de los diferentes rasgos topográficos, éstos poseen distintas formas generales y además interactúan de forma distinta con la llanura colindante, ocasionando distintos patrones que generan formas fisiográficas características; tal como puede ser visto en la Figura 10. En la subcuenca Puerto Libertad se encuentran las siguientes formas fisiográficas:

-Gran Bajada con Lomerío: representa la forma fisiográfica principal presentándose en la mayor parte de la subcuenca; posee pendientes bajas (menores a 20°) sin embargo, al pie de las sierras presenta pendientes moderadamente pronunciadas (entre 20° y 30°); cubre un área de 2,857.73 km², cubriendo el 70.15% del área de la subcuenca.

-Sierra Escarpada Compleja: es la segunda de mayor extensión dentro del área de estudio, cubriendo 664.54 km² (16.31% del área de la subcuenca); esta forma fisiográfica está representada por los principales accidentes topográficos (sierras) por lo que su ocurrencia se limita a los afloramientos de roca más representativos de tal forma que las sierras El Álamo, El Viejo, Aguirre, Picú, Cirio y El Tordillo, forman parte de este sistema;

-Abanico Aluvial: esta forma fisiográfica ocurre solamente al norte de la subcuenca y está representada por una planicie aluvial de gran cobertura al noroeste del estado; cubre un área de 496.64 km² (12.19% del área de la subcuenca) y aunque posee características similares a las que posee la forma fisiográfica Gran Bajada con Lomerío, la distintiva de esta forma fisiográfica es que está representado por sedimentos activos que desarrollan pendientes menos pronunciadas (menores a 15°);

-Sierra Escarpada del Noroeste: es la forma fisiográfica de menor extensión, está representada por sierras bajas localizadas en o muy cercanas a los márgenes costeros, y cuando forman el límite de costa pueden llegar a desarrollar acantilados de corta longitud; ocurre solamente en la porción central de la subcuenca con 54.92 km², que es apenas el 1.32% del área total de la subcuenca Puerto Libertad.

Las características fisiográficas mencionadas son similares en gran parte de las regiones costeras del noroeste del estado de Sonora, sin embargo, la litología de los principales accidentes topográficos si varía notoriamente, así que, dentro de la misma subcuenca se pueden observar este tipo de variaciones, de tal forma que podemos notar que las sierras de menor elevación y menos escarpadas corresponden con cuerpos plutónicos, las rocas de origen volcánico desarrollan afloramientos poco elevados y con pendientes poco abruptas, mientras que las sierras más escarpadas están formadas por rocas sedimentarias o volcánicas antiguas.

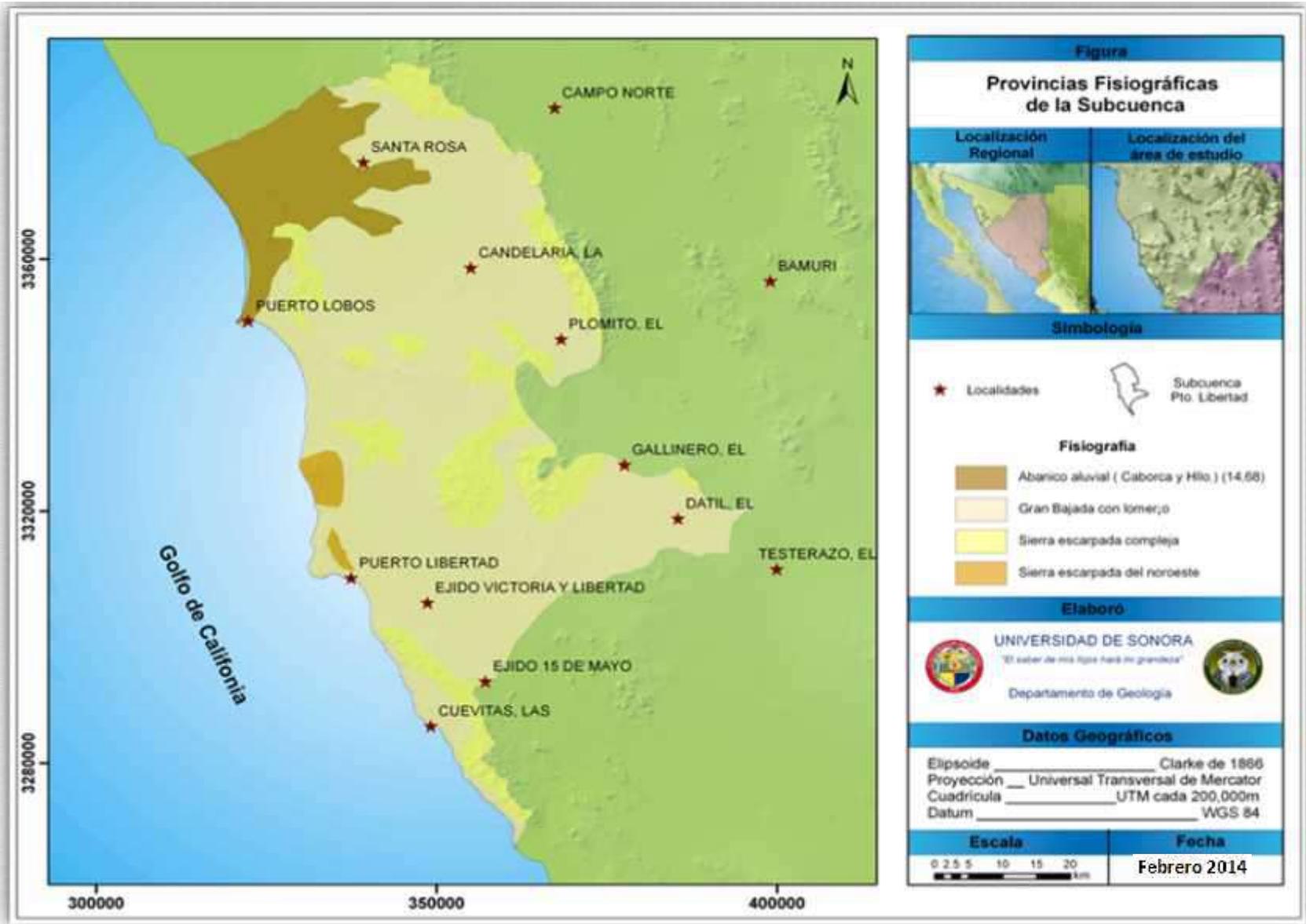


Figura 10 Fisiografía del área de estudio en la subcuenca Puerto Libertad.

II.5.2 Geomorfología

La geomorfología aplicada se utiliza para la solución de diversos problemas relacionados con la evolución del relieve y las formas que deja en el paisaje que son de interés práctico para el hombre; ejemplos de ello son la localización de yacimientos minerales e hidrocarburos, combate a la erosión diferencial de suelo y planificación de su uso, delimitación de peligros y riesgos naturales y causados de forma antropogénica, además de interactuar con la ingeniería para el desarrollo de grandes obras de construcción.

El propósito de una descripción geomorfológica consiste en proveer información sobre las formas de terreno, las cuales son un reflejo directo de la acción de distintos procesos destructivos y constructivos interconectados, es decir, que los resultados geomórficos son la consecuencia directa de la interacción de procesos endógenos (estructurales) y exógenos (ambientales).

Los procesos endógenos dependen de las fuerzas internas que afectan a la Tierra, mismas que se encargan dentro de los continentes de levantar o hundir regiones, de fracturar las rocas y de hacer ascender hasta la superficie grandes volúmenes de magma; solamente las manifestaciones externas de esta energía interna acumulada, pueden ser descritas por la geomorfología.

Por otro lado, los procesos exógenos dependen tanto de los procesos atmosféricos o del clima, tales como precipitación y escorrentía, como de las características físicas de los materiales con los que interactúan, los cuales poseen propiedades físicas naturales (naturaleza química, tamaño de grano, estratificación, etc.) y propiedades físicas adquiridas (alteración, fallamiento y fracturamiento, etc.) que hacen posible su degradación y posterior acumulación de materiales, modificando el relieve a distintas escalas.

Con base en los lineamientos descritos por Verstappen y Van Zuidam (1981), se realizó un análisis morfogenético de las cartas escala 1:250,000 Caborca (H12-04) y Ángel de la Guarda (H12-07), de INEGI, utilizando como referencia geológica las mismas cartas geológico-mineras proporcionadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM). Para el análisis se delimitaron “sistemas de terreno”, lo cual incluye las características principales de geoforma expresadas en el afloramiento de cada elemento: altura relativa, pendiente, litología y origen. Considerado todo lo anterior, para estudiar el origen de las formas del relieve es necesario establecer el o los tipos de agentes que dan origen a la geoforma, de tal forma que también resulta necesario mencionar que las entidades se agrupan en ocho grandes clases: estructural, volcánico, denudativo, fluvial, lacustre/marino, glacial/periglacial, eólico y kárstico.

Dentro de la subcuenca Puerto Libertad se presentan formas de origen estructural, volcánico, denudativo, fluvial, eólico y lacustre/marino.

Los tipos de relieve fueron definidos por su forma y la diferencia altitudinal con respecto a la base de la entidad o unidad geomorfológica para este estudio, a saber:

- **Ladera montañosa:** la condición principal de este tipo de relieve, es que posean una altura relativa o gradiente de elevación mayor a 200 m; según Hubp (1989) este relieve es ocasionado por procesos endógenos (plegamiento, magmatismo, volcanismo, etc.) y también puede ser originada por la disección de una estructura de formación endógena modelada. Se subclasifica en ladera montañosa baja y alta. La primera presenta un intervalo de 200-500 m y la segunda es superior a la anterior.

- **Lomerío:** el criterio de clasificación aplicado para la determinación de ocurrencia de este tipo de relieve, es que la diferencia altitudinal o gradiente de elevación sea menor a 200 m. Este grupo se origina por la nivelación de montañas (modelado endógeno) o por la disección de una planicie inclinada (exógeno erosivo), sin embargo, puede tratarse de relieve endógeno de baja altura, producto de tectónica reciente (Córdova, 1988).

- **Piedemonte:** constituye márgenes montañosas o zonas transicionales que se distinguen por cambio de pendiente abrupto o moderado y una altura considerablemente menor; el gradiente altitudinal varía entre 0 y 200 m, dependiendo del comportamiento del terreno. La misma naturaleza de este tipo de relieve obvia que su composición es material detrítico proveniente de la erosión directa de las sierras circundantes y es común que presente drenaje fluvial.

- **Planicie:** es una superficie de pendiente suave y de poca diferencia altitudinal. Corresponde principalmente a depósitos aluviales, eólicos y costeros originados por la modificación exógena-acumulativa del relieve. Se consideró para su identificación el uso de suelo (agrícola y urbano), el cambio de pendiente y el patrón de drenaje.

La estabilidad de la pendiente se clasificó en tres categorías, denominándose como estable para una pendiente entre los 0-10°, metaestable entre 10-25° e inestable entre 25-35° y mayor. A partir de lo anterior, se presentan los resultados del análisis y cartografía de las unidades geomorfológicas presentes en la subcuenca Puerto Libertad se muestran en dos niveles de estudio: sub-cuenca y acuífero.

En la Figura 11 se muestran los resultados del análisis con la presencia de 11 unidades morfogenéticas distribuidas en tres regiones geomorfológicas, separadas entre sí por amplias planicies de origen aluvial-fluvial de pendientes bajas con dirección al oeste, hacia la línea de costa;

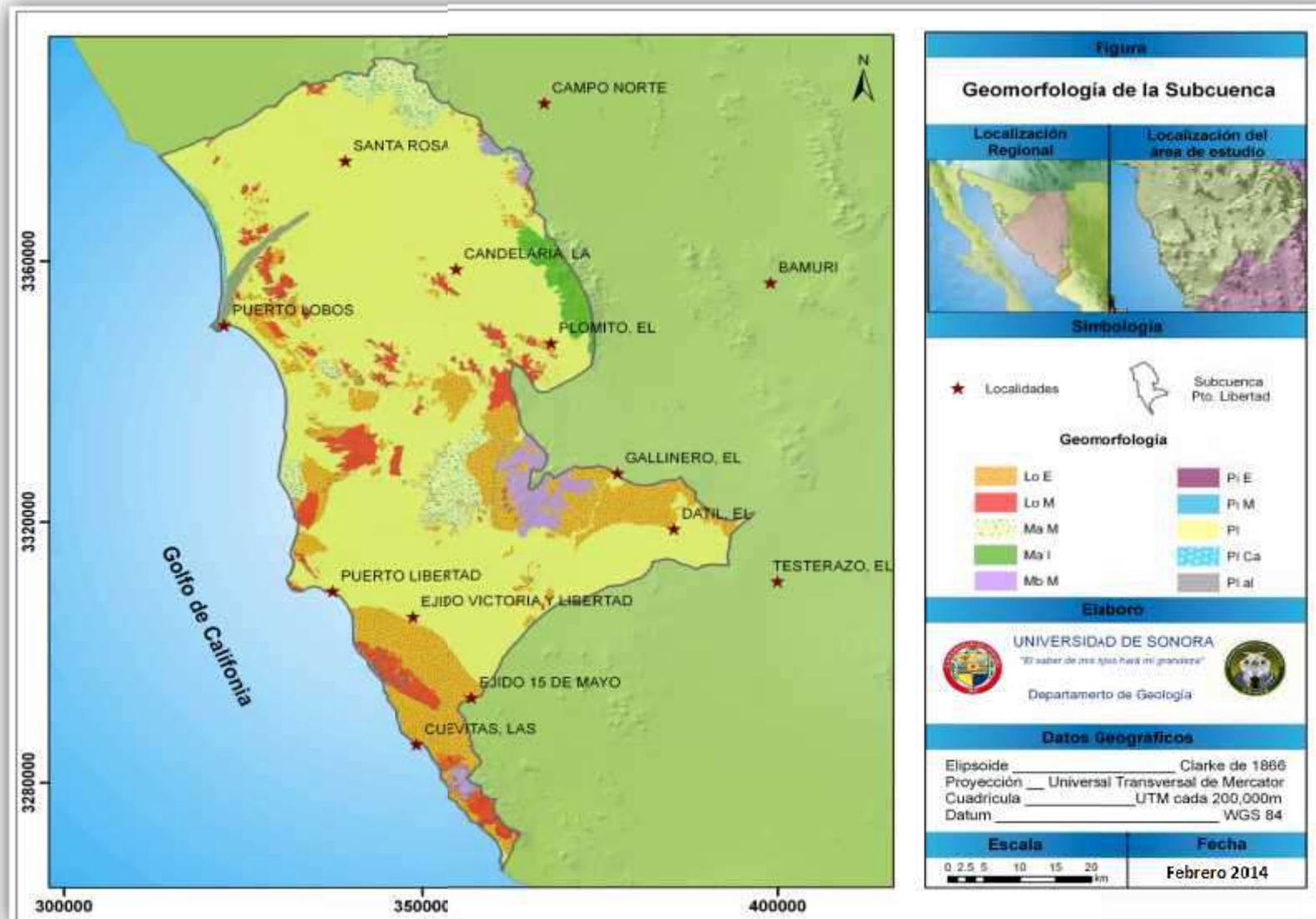


Figura 11 Mapa de unidades morfogénicas dentro de la sub-cuenca Puerto Libertad.

Las tres regiones que corresponden a la geomorfología de la subcuenca Puerto Libertad son:

Zona Norte. Hacia el noreste se caracteriza dominancia de montaña alta y montaña baja con piedemonte metaestable que ocurren sobre planicies aluviales-fluviales de pendiente baja, mientras que hacia el noroeste, es notoria una dominancia del lomerío metaestable sobre el lomerío estable ubicados sobre planicies eólicas; ambas partes (noreste y noroeste) están separadas por una amplia planicie aluvial-fluvial que hacia los márgenes costeros es dominada por procesos eólicos que le convierten en planicie eólica (Figura 12).

Zona Centro. Esta zona cruza la parte central de la sub-cuenca de forma transversal y se caracteriza por una gran diversidad de unidades morfológicas; las zonas de montaña alta y montaña baja no son dominantes, sin embargo, es notorio que su presencia es importante en el modelado del terreno ya que tanto lomerío estable como lomerío inestable derivan de éstas. Un aspecto de interés es que lomerío estable y lomerío inestable presentan una fuerte segmentación, característica asociable a una fuerte denudación de materiales granulares fácilmente erosionables; la presencia de lineamientos noroeste-sureste es muy notoria, de tal forma que la presencia de denudación por presencia de estructuras es muy probable; sierra Aguirre, sierra Picú y sierra Julio, son los elementos más representativos (Figuras 12 a 14);



Figura 12 Vista al noreste de la Sierra Aguirre (al fondo) que ilustra su piedemonte de pendiente estable y el lomerío estable compuesto por rocas plutónicas (a la derecha de la imagen).



Figura 13 Vista hacia el noreste, desde Sierra Cirio ilustrando las amplias planicies que representan la unidad morfogénica de Gran Bajada con Lomerío, acuífero Puerto Libertad.



Figura 14 Vista al suroeste de la Sierra Cirio, e ilustración del drenaje paralelo que caracteriza al lomerío de pendiente estable que rodea a la sierra, acuífero Puerto Libertad.

Zona Sur. Se caracteriza por su poca variedad de geoformas, su continuidad y por su poca área de influencia dentro de la sub-cuenca; ocurren tanto montaña alta como lomerío metaestable con piedemonte estable, dominados por regiones de lomerío estable que rodea los relieves topográficos más elevados; se limita a las regiones costeras y su lineamiento noroeste-sureste es asociable a denudación estructuralmente controlada; sierra Cirio es el principal rasgo topográfico.

Por otro lado, en el acuífero, el resultado del análisis geomorfológico muestra la presencia de 14 unidades morfogénicas que a diferencia de las unidades anteriormente descritas, incluyen el tipo de material modelado, esto es, la asociación litológica general de la cual se componen. La Figura 15 muestra el resultado de estas unidades descritas con mayor detalle además del origen denudativo de la unidad. La importancia del reconocimiento de las unidades morfogénicas utilizando además el tipo de material, radica en el proceso

morfogenético, así, la unidad morfogenética puede ser separada como material denudado o material resultado de la denudación.

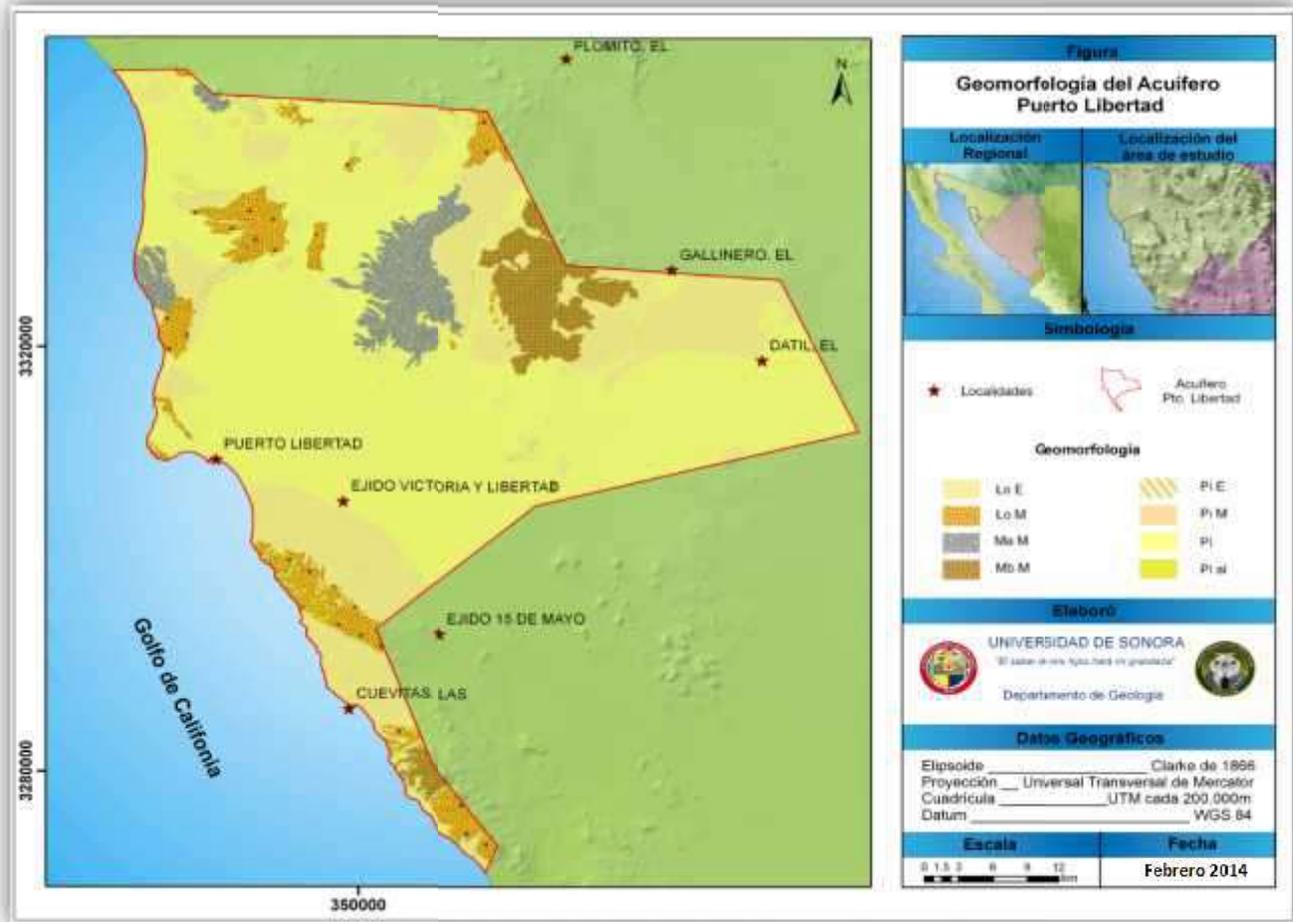


Figura 15 Mapa de unidades morfogenéticas dentro del acuífero Puerto Libertad.

II.5.2.1 Geomorfología de la zona costera acuífero Puerto Libertad.

La definición de la zona costera varía de país a país; ya que se trata de un área sin límites fijos. Se encuentra localizada entre el mar abierto y la superficie terrestre. La zona costera presenta características de constante transformación; es influenciada por las corrientes, las mareas, el oleaje, la abrasión y las fluctuaciones del nivel del mar. A su vez, los procesos terrestres que influyen a la zona costera son el escurrimiento de los ríos y arroyos que drena hacia el mar, el acarreo de sedimentos y materiales terrígenos. En resumen, la zona costera, área de intensas interacciones físicas, ecológicas y sociales, es una parte de tierra que es afectada por su proximidad al mar a la vez que es una parte del océano que es afectada por su proximidad a la tierra.

Para fines descriptivos, se concibe entre dos ejes: uno paralelo a la orilla denominado “eje litoral”, y otro perpendicular a la orilla denominado “eje tierra-altamar”. Una definición apropiada de la zona costera es “el espacio en el cuál el ambiente marino, o lacustre, influye un ambiente terrestre y viceversa” (Carter, 1988). No obstante, es preciso en cada Entidad geográfica, definir con mayor claridad la distancia del eje perpendicular, denominado “eje tierra-altamar” ya que esta distancia depende de las fluctuaciones del nivel del mar y la pendiente del terreno. Las fluctuaciones del nivel del mar son influenciadas por la marea. La marea más baja (bajamar máxima) y la marea más alta (pleamar) constituyen la “amplitud intermareal”.

La amplitud intermareal varía dependiendo principalmente de la zona geográfica. Para el caso del área costera dentro del acuífero Puerto Libertad, el cual se ubica en el alto golfo de California, la amplitud intermareal es prácticamente de 7m.

(<http://oceanografia.cicese.mx/predmar/calmen.php>)

Otras variables que deben considerarse para determinar la influencia del mar en la interface de la zona costera son: la pendiente (que varía de casi nula en terrenos planos y deltas de ríos, hasta costas montañosas con pendientes pronunciadas). El área de influencia de la amplitud intermareal variará de este modo del rango de kilómetros en costas de pendiente suave hasta centímetros en costas montañosas.

Dentro de las zonas costeras con pendiente suave, la acción del viento es muy activa, sobre todo en las regiones áridas, siendo responsable de la erosión, transporte y sedimentación de las partículas de la superficie del terreno, de tal forma que, dentro de la zona costera del acuífero, las formaciones más típicas de la sedimentación eólica son las dunas, interviniendo directamente los siguientes factores en su formación:

- 1.- Aportaciones de arenas por efecto de las corrientes marinas y que se acumulan en determinadas zonas de la playa.
- 2.- Vientos frecuentes que soplan en una determinada dirección.
- 3.- Superficie llana de la playa que carece de barreras para el viento, mismo que desplaza la arena.

En cuanto a flora y fauna las dunas forman un biotopo que se caracteriza por la ausencia de agua y las muchas horas de sol, siendo muy pobres tanto en vida animal como vegetal. Entre los animales que podemos encontrar los más representativos son, sobre todo, los insectos y arácnidos y reptiles. Sin embargo lo interesante son las plantas que allí viven y que para poder hacerlo han desarrollado adaptaciones para solventar las condiciones poco favorables, caracterizadas por la falta de agua, temperaturas extremas y escasos nutrientes.

Las plantas que viven en la zona de dunas tienen raíces muy extendidas para aprovechar al máximo la humedad y la captación de nutrientes, contribuyendo a fijar las arenas de la playa, hojas pequeñas o transformadas en espinas presentando un revestimiento coriáceo y superficies de color blanquecino para reflejar la radiación del sol, además de estar preparadas para retener el agua, tallos flexibles que ofrecen menor resistencia al viento y capacidad de sus bulbos y semillas para permanecer enterrados sin crecer en espera de mejores condiciones.

II.6 SUELOS Y VEGETACIÓN EN LA CUENCA PUERTO LIBERTAD

II.6.1 Características del suelo

La imagen de clasificación de Puerto Libertad, los suelos que se muestra en la Figura 16 corresponde para el área del acuífero, y se basa en las propiedades físicas y químicas de los horizontes edafológicos del área. En total se tienen doce términos, que combinados entre sí conforman las unidades que se describen a continuación:

Fluvisoléutrico (Je): suelo aluvial poco desarrollado, formado por materiales acarreados por el agua, por lo tanto se encuentra cercano al lecho de ríos y arroyos. Presenta sedimentos disgregados y sin terrones. La clase textural es gruesa y su fase física es gravosa. Posee capas alternadas de arena, arcilla y grava. El subtipo éutrico tiene un grado de saturación de 50% o más dentro de los 20 y 50 cm superficiales; carece de propiedades sálicas y de un horizonte sulfúrico.

Fluvisolcalcárico (Jc): formado por material aluvial reciente. Presenta un descenso irregular del contenido de materia orgánica en profundidad y cambios de textura, depositado en el lecho de río, arroyos y zonas de escorrentía superficial proveniente de las bajadas de los altos topográficos. Generalmente, se encuentran caracterizados por la presencia de sucesivas capas sedimentarias de granulometría muy variable, en función de la energía que lleva el agua al momento de la deposición. El continuo rejuvenecimiento de estos suelos por los aportes periódicos hace que tenga un grado de evolución muy escaso, presentan un contenido de calcio muy variable, que oscila entre el 20% y 50% debido al aporte de material carbonatado de la región. Son suelos de alta fertilidad y susceptibles de incrementar su productividad con prácticas agrícolas relativamente sencillas. Cuando presenta subtipo éutrico significa que carece de sales.

Litosol (I): las características determinantes de este suelo es que es delgado, menor de 10 cm de profundidad, muy pedregoso con bajo contenido de material orgánico y débilmente desarrollado. Se encuentra en sierras y lomeríos distribuidos a manera de manchones. Su textura es gruesa, fase física arenosa en zonas cercanas a la costa y textura media en la parte occidental. Una segunda fase es cuando presenta el subtipo regosolcalcárico y vertisol crómico: el primero implica que contiene fragmentos gravosos de material calcáreo, producto

de la erosión de las partes topográficamente altas y el segundo hace alusión al efecto de mezcla, provocado por la presencia de arcillas expandibles. Un segundo subtipo, conocido como regosoléutrico indica que es poco consolidado con susceptibilidad a la erosión de moderada a alta y de fase física pedregosa.

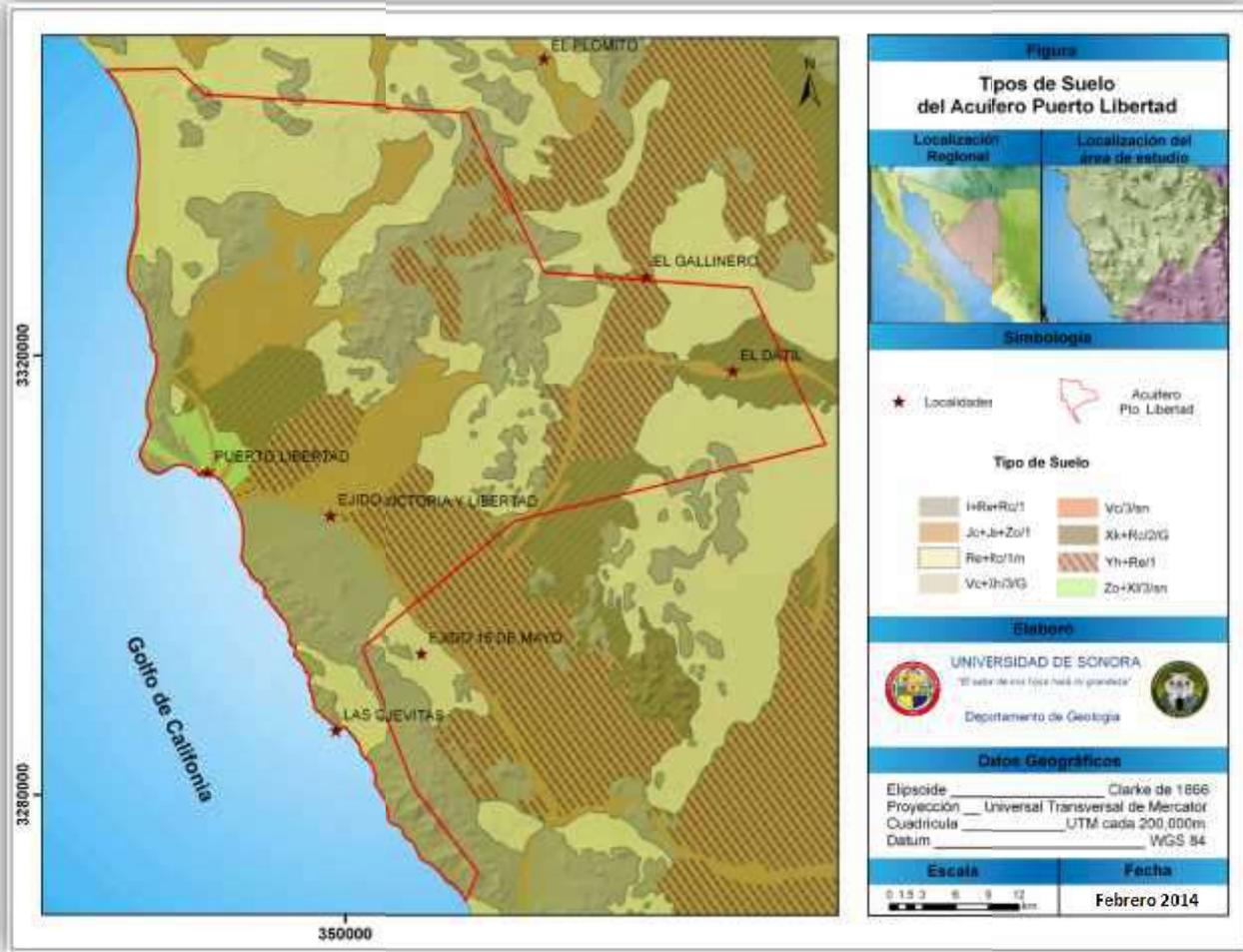


Figura 16 Tipos de suelo en el acuífero Puerto Libertad. Fuente: Elaborado a partir de la carta Edafológica, escala 1:250,000 (INEGI)

Regosoléutrico (Re): se desarrolla sobre materiales no consolidados, alterados y de textura fina. Son suelos jóvenes y su evolución en el perfil es mínima debido a un proceso lento de formación por una prolongada sequedad. Suelen ser delgados, pedregosos, de textura gruesa, y procedentes de relieves altos por lo que reciben el adjetivo de litosol. Si contiene subtipo calcárico indica fragmentos de material calcáreo presentes, similar al material parental, es pobre en contenido orgánico con texturas de arena a migajón arenoso y la saturación de bases es alta. En ocasiones comparten horizontes de fluvisoléutrico, observándose como material disgregado y sin terrones, de clase textural media a gruesa, incluso alternancia de gravas, arenas, limos y arcillas. En otras situaciones como yermosolháplico se distingue más árido con capas de yeso y sales.

Solonchakórtico (Zo): es un suelo literalmente salino. Se presenta en zonas donde se acumula el salitre como en las partes más bajas de los valles, llanuras y zonas próximas a la costa, presenta un alto contenido en sales y puede contener capas de material calcáreo. El subtipo xerosollúvico posee un alto contenido en arcillas expandibles y su fertilidad es importante, se le distingue por colores pardos.

Xerosol cálcico (Xk): suelo seco con alto contenido en arcillas expandibles, agua, fertilidad importante y concentraciones de carbonatos secundarios entre 50 y 100 cm desde la superficie. Son de color pardo claro. Su clase textural es gruesa en forma de terrones disgregados y en ocasiones con carga de material calcáreo cuando se trata del subtipo calcárico.

Yermosolháptico (Yh): suelo característico de zonas desérticas con capas de cal, yeso y sal, clase textural gruesa, pedregosa y seca, su color es pardo oscuro o rojizo, puede contener horizontes de arcilla. Si presenta subtipo éutrico indica que se desarrolló sobre material no consolidado, es un suelo joven y su formación fue lenta debido a la sequedad del terreno.

II.6.2 Características de la vegetación

La vegetación en la sub-cuenca Puerto Libertad fue caracterizada por INEGI (1993) en siete categorías generales: matorral, mezquital, pastizal, vegetación halófito, vegetación de desiertos, vegetación de dunas y agrícola temporal (Figura 17), las cuales se describen de manera general

Matorral. Constituye 88% del área de la sub-cuenca. El tipo de matorral predominante es el Sarcocaulis, conformado por arbustos de tallos carnosos o jugosos, algunos con corteza papirácea. Las especies que caracterizan este tipo de vegetación son torotes o copales (*Bursera* spp.) y sangregados (*Jatropha* spp.), aunque a veces son rebasadas en número por: palo fierro (*Olneyatesota*), palo verde (*Cercidium floridum*), ocotillo (*Fouquieria splendens*), gobernadora (*Larrea tridentata*) y mezquite (*Prosopis glandulosa* var. *torreyana*).

Mezquital. Ocupa el 1.3% del área total de la sub-cuenca. Se encuentra distribuida localmente en pequeñas zonas al sur y sureste de la misma.

Pastizal. Su nombre local es zacate y solamente cubre el 0.04% del área de la sub-cuenca, distribuyéndose principalmente en una región aislada al norte de ésta.

Vegetación de Desierto. Constituye el 9% del área total de la sub-cuenca. Este tipo de vegetación se encuentra distribuida en la mayor parte del área estudiada, así como en pequeñas zonas aisladas en el sur y cerca del poblado de Puerto Libertad.

Vegetación de Dunas. Cubre el 0.04% del área total. Se localiza en pequeñas zonas al norte y sur de la sub-cuenca. La vegetación que cubre a las dunas son arbustos, hierbas y cactáceas.

Vegetación Halófila. Representa el 1.3% de la extensión total. Se encuentra distribuida en pequeñas zonas a lo largo de la costa y en la parte norte de la sub-cuenca.

Agrícola Temporal. Constituye el 0.01% del área total de la sub-cuenca, se localiza en una pequeña zona en la parte sur.



Figura 17 Tipo de vegetación en la sub-cuenca Puerto Libertad.

II.7 MARCO GEOLÓGICO ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD

II.7.1 Geología Regional

La identificación de los afloramientos rocosos y su variación litológica es importante en la caracterización física superficial del acuífero, ya que la descripción cronológica de los eventos tectónicos regionales y los productos estructurales que afectan a estas unidades litológicas, proporcionan información útil en la definición del modelo hidrogeológico.

La columna estratigráfica de los afloramientos litológicos que ocurren dentro del área de la sub-cuenca Puerto Libertad (Figura 18), está constituida por secuencias líticas cuyas edades varían desde el Triásico hasta el Reciente (Figura 19).

La unidad más antigua está constituida principalmente por caliza y limolita que afloran al norte de la sierra El Álamo (hacia el norte fuera de esta área de estudio), y por las unidades TRs(?) MAr-MLu, Ji Ar-Lm y Ji Cz-Ar, correlacionables con la Formación Antimonio (González L.C., 1980). Estas unidades afloran en la porción central del acuífero, en el área del rancho El Caracol y en la sierra El Julio, pero sus principales afloramientos se dan en la localidad tipo de la sierra del Antimonio (hacia el noreste fuera del área de estudio). Estas rocas representan depósitos marinos de arenisca, caliza, limolita, lutita y conglomerado de 4 km de espesor (González L.C., 1980), con abundante contenido fosilífero.

Cubriendo discordantemente a las rocas de la Formación Antimonio, afloran la secuencia volcanosedimentaria Ks A, la cual está constituida por riolita, andesita, y escasos horizontes en la base de la secuencia de arenisca, arenisca conglomerática y conglomerado. Sus principales afloramientos se localizan en la sierra de Aguirre.

Afectando a las unidades precretácicas afloran rocas intrusivas representadas por las unidades KsTpa Gr-Gd y KsTpa Gd-D, las cuales están constituidas por granodiorita, granito, cuarzomonzonita, gabro, diorita, y pórfidos andesítico y riodacítico. Éstas rocas afloran extensamente formando parte de las sierras de Aguirre, Julio y en la región costera. Éstas unidades han sido fechadas con edades que varían de 64.3 ± 2 Ma (Damon et al, 1983) hasta 80.9 ± 1.8 Ma (De Jong, 1988).

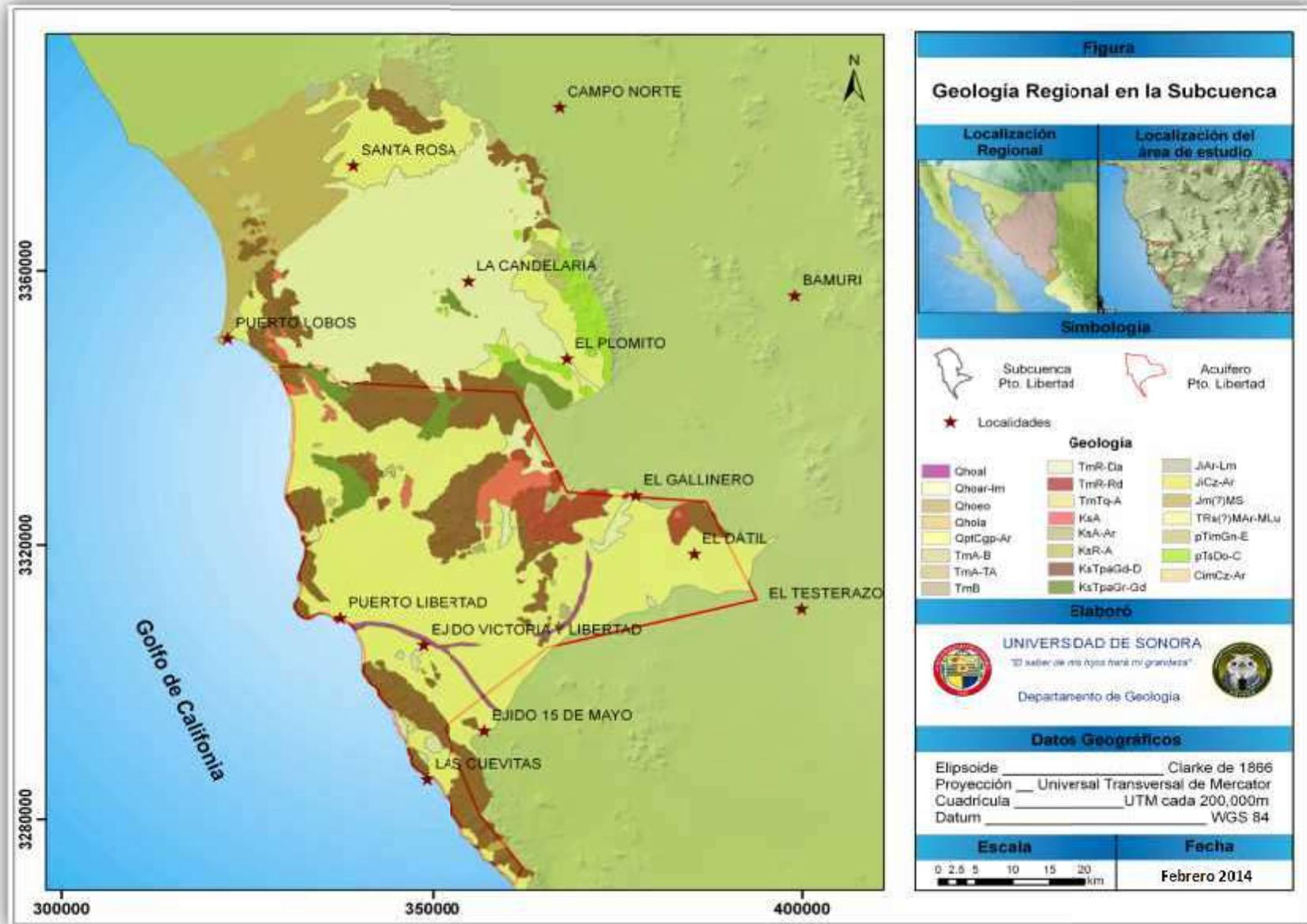


Figura 18 Mapa Geológico Regional en la subcuenca acuífero Puerto Libertad.

COLUMNA GEOLOGICA ACUIFERO PUERTO LIBERTAD

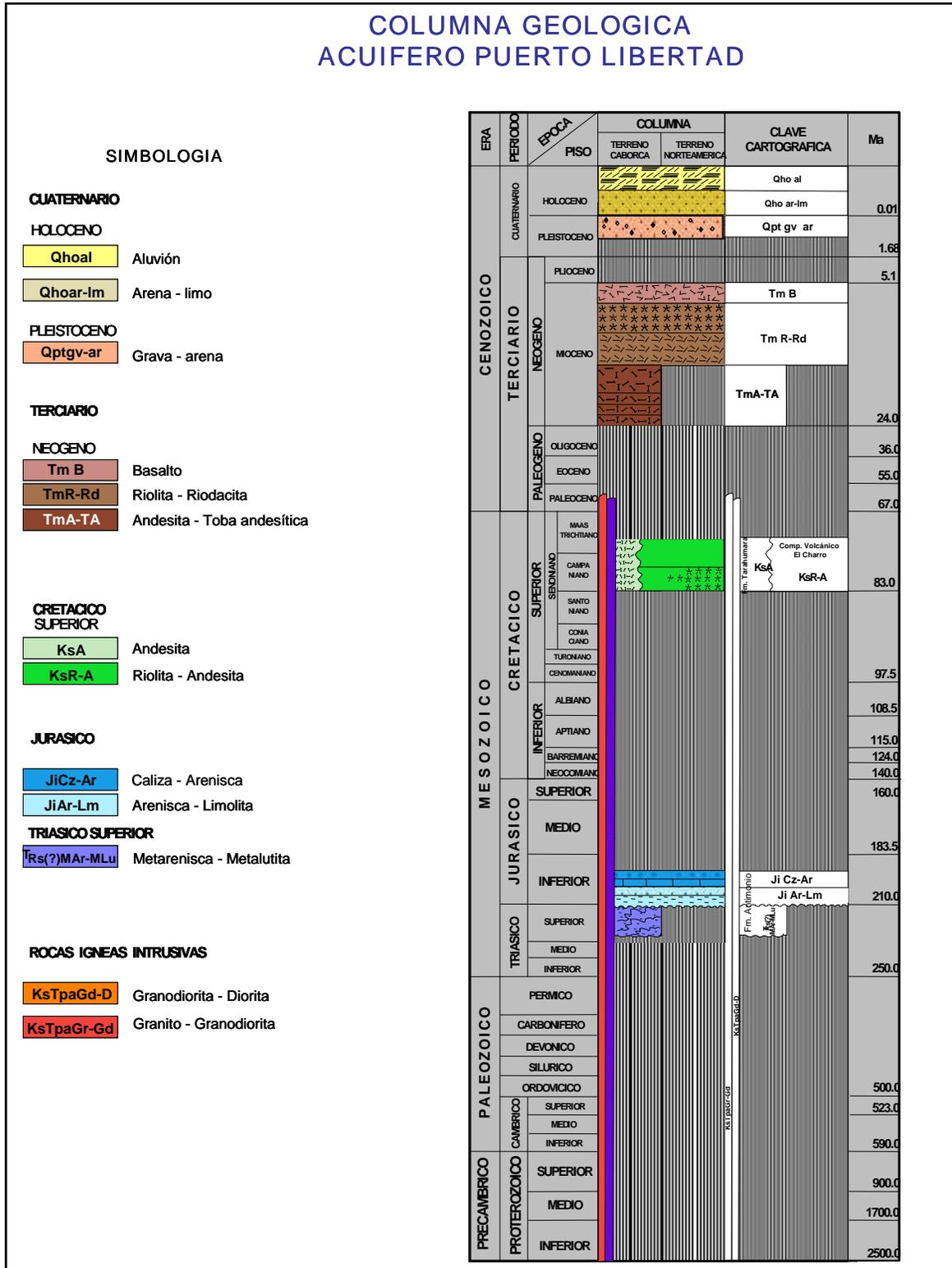


Figura 19 Columna estratigráfica regional acuífero Puerto Libertad.

En el Mioceno continúa el volcanismo intermedio representado por las unidades Tm A-TA, fechadas en 14.0 Ma (Gastil, 1977), y que afloran en pequeños mogotes aislados hacia la región costera. Posteriormente se tienen coladas, derrames y flujos riolítico y riolítico de las unidades Tm R-Rd, Tm R-Da y Tm Tq-A fechadas por Gastil (1977), en 12.7 Ma. Los afloramientos se encuentran principalmente en la porción central sur, en la Sierra Picú, y en la porción centro–este del acuífero.

Del Mioceno Tardío se tienen basaltos andesíticos y basaltos de la unidad TmB, aflorando en cerros aislados en la porción sureste del acuífero. Del Cuaternario se tienen depósitos semiconsolidados y no consolidados de pie de monte, relleno de planicies y aluviales, representados por las unidades Qptgv-ar, Qhoar-lm y Qho al.

II.7.2 Estructural y tectónica

II.7.2.1 Estructural

Los distintos eventos tectónicos que han sido documentados generan sistemas estructurales que se traslapan y mezclan entre sí. Como resultado de esta mezcla, las fallas y fracturas desarrollan patrones complejos que al final determinan las características de afloramiento de las unidades a nivel regional y local. Así, el análisis de los rasgos fisiográficos y geomorfológicos principales permite observar en términos generales sierras alargadas y orientadas NNW-SSE separados por amplias planicies aluviales.

Los dos principales rasgos estructurales que están registrados en los afloramientos, corresponden con la extensión cortical del Basin and Range del Mioceno y la transpresión que ocurre en la Provincia Extensional del Golfo de California. Estas relaciones cortantes mediante estructuras limítrofes primarias pueden ser observadas en la distribución cartográfica de los intrusivos de composición granítica-granodiorítica del Cretácico Superior-Eoceno, que son anteriores a la tectónica extensiva y que presentan sistemas de fracturamiento y foliación paralelos a las tendencias estructurales regionales.

En general, las tendencias estructurales forman patrones NNW-SSE muy bien definidas y que están en su mayor parte determinadas por los sistemas extensivos del evento tectónico que generó la provincia morfotectónica del Basin and Range, la cual domina en gran parte la geología del noroeste del estado.

II.7.2.2 Tectónica

Los avances logrados en el conocimiento geológico del noroeste de México han permitido el desarrollo de diversas teorías acerca de la evolución tectónica regional a pesar, incluso, de la escasa disponibilidad de afloramientos, de la presencia de fuertes complejidades geológico-estructurales y del amplio rango de edades de la columna cronoestratigráfica.

De esta forma, las características geológicas y estructurales presentes en el noroeste de Sonora, particularmente en la región costera, determinan una evolución tectónica que está dada por un conjunto de eventos magmático-estructurales que han operado continuamente desde el Jurásico Tardío hasta el reciente (Staude & Barton, 2001), y que dejan clara una serie de eventos sobrepuestos cuya resultante principal es una fuerte dispersión de afloramientos orientados NW-SE que dan lugar a la morfología típica de la provincia fisiográfica de Sierras y Llanuras Sonorenses.

El orden de ocurrencia de estos eventos, no permite definir con claridad la tectónica anterior al Cretácico, sin embargo, varios autores han logrado poner en evidencia la ocurrencia de dos grandes bloques de basamento Proterozoico yuxtapuestos durante el Jurásico, mediante un sistema de estructuras corticales de movimientos transpresivos sinestrales de grandes desplazamientos conocido como la Megacizalla Mojave-Sonora (Anderson & Silver, 2005, y referencias incluidas), cuya influencia estructural muestra una traza continua desde Sonora central hasta el oeste de Arizona. Probablemente estos desplazamientos corticales dan origen a la configuración actual dispersa del basamento Proterozoico, lo que se registra en diversas partes del estado mediante el afloramiento de cuerpos ígneo-metamórficos (zócalo estructural) y secuencias sedimentarias marinas detrítico-carbonatadas (cobertura estructural), también del Proterozoico (Rodríguez-Castañeda, 1984; Longoria et al., 1978), ejemplo de éstas últimas son las Capas Gamuza que afloran en sierra El Viejo.

Por otro lado, ha sido bien documentado también que durante el Mesozoico inició un largo período de subducción de la Placa Farallón (ahora extinta) bajo la Placa Norteamérica (Nakanishi & Winterer, 1998). Asociado a esta subducción, la Orogenia Laramide es un evento compresivo que se llevó a cabo a finales del Cretácico e inicios del Terciario en un ambiente de retro-arco, y dio como resultado estructuras en compresión orientadas NW-SE con una vergencia predominantemente hacia el NE, extendiéndose a lo largo del margen Pacífico de Norteamérica y sobreponiéndose a los eventos tectónicos anteriores. Este evento tectónico afecta a todas las secuencias Cretácicas y pre-Cretácicas, de tal forma que el registro litológico queda seriamente afectado con plegamiento, segmentación estructural, metamorfismo y deformación frágil y dúctil, sobre todo en el noreste de México a lo largo de la Sierra Madre Oriental (Eguiluz de Antuñano et al., 2000). Si bien es cierto que en el noreste de Sonora han sido identificadas estructuras asociadas a esta orogenia, en la mayor parte del estado y de la región que incluye el área del acuífero Puerto Libertad no se tienen claramente definidas.

Los productos principales del proceso de subducción en la margen pacífica de Norteamérica durante el Mesozoico e inicios del Cenozoico en la región, están relacionados a un fuerte magmatismo que definió el desarrollo de un arco continental, por lo que se tienen una serie de intrusiones y su cobertura volcánica y volcanosedimentaria que determinan una edad del Cretácico Tardío al Paleoceno. Este evento está muy poco registrado dentro del área del Acuífero Arroyo Sahuaró, ya que solo ocurren afloramientos ocales de secuencias volcanosedimentarias, además de que los cuerpos plutónicos de composición granítica de esta edad son también escasos, sin embargo, es posible encontrar algunas de estas masas ígneas intrusivas cortando las unidades del Proterozoico.

Durante el Mioceno inicia un relajamiento cortical asociado a la pérdida de energía acumulada durante la subducción (Peccerillo, 2005) que dio origen a la provincia extensional del *Basin and Range*, aproximadamente entre los 25 y los 12 Ma (McDowell & Roldán-Quintana, 1991; Bartolini et al., 1992; Gans, 1997). Este evento es un episodio tectónico regional muy importante que ocurre en gran parte del oeste de Estados Unidos y noroeste de México, ya que representa una etapa de adelgazamiento cortical que extiende la litósfera generando un sistema estructural que desarrolla patrones geométricos dispuestos en bloques de altos y bajos estructurales (*horst-graben*). Los bajos estructurales (*graben*) en la porción centro y oriente de Sonora, representan cuencas alargadas NW-SE que son rellenadas por molasas continentales producto de la erosión de los altos estructurales (*horst*); esta unidad sedimentaria sintectónica está representada por conglomerados polimícticos (localmente oligomícticos), generalmente consolidados y cementados por zeolitas que son el producto de la degradación directa de los epiclastos vítreos del volcanismo riolítico de la Sierra Madre Occidental (Cochemé et al., 1988). Este proceso de sedimentación se da contemporáneamente a un volcanismo basáltico cuyo emplazamiento se propicia gracias a la presencia de las fallas profundas. Las zonas de máxima extensión cortical de este episodio tectónico, han sido reportadas hacia el W-NW del Estado, tal como puede ser visto en la distribución de afloramientos de la región, donde es posible observar una alineación de éstos con dirección NNW-SSE según el sistema estructural de este evento.

Hacia el final de esta fase temprana de distensión terciaria, en el Plioceno, ocurrió otro cambio en el régimen tectónico regional, e inició una ruptura continental asociada a la apertura del Golfo de California (~12 Ma), el cual actualmente se encuentra activo y ha sido un claro ejemplo de rifting continental mundialmente documentado desde el surgimiento de la teoría de la tectónica de placas (Aguillón-Robles, 2002; Wilson et al., 2005; Vidal-Solano, 2005; Pallares, 2007). Este proceso de rompimiento genera un área de afectación estructural que es conocida como Provincia Extensional del Golfo (Martín-Barajas, 2000), y que trae consigo un volcanismo intermedio a ácido, además de que posee una situación estructural cuya influencia afecta las regiones costeras tanto de Sonora como de la Península de Baja California.

Por otro lado, el desarrollo de amplias cuencas a causa de la extensión terciaria (Basin and Range) y de la extensión asociada a la Provincia Extensional del Golfo, ocasionaron durante el Cuaternario, la sedimentación de grandes cantidades de sedimentos detríticos que forman actualmente las amplias llanuras costeras y planicies aluviales de las costas del Estado.

II.8 GEOLOGÍA LOCAL.

El análisis de unidades litoestratigráficas presentes en el área de la subcuenca muestra la presencia de 12 Unidades (Figura 20), las cuales se describen a continuación en orden cronoestratigráfico.

* TRsMAR-MLu

Esta secuencia metasedimentaria se encuentra como techos colgantes encima de los cuerpos plutónicos de composición granodiorítica que conforman al basamento regional. Sus afloramientos están integrados por una intercalación no rítmica de arenisca y lutita con delgados horizontes de lutita carbonosa. En cuanto al protolito se identifica claramente la presencia de rocas sedimentarias integradas por arenisca y lutita bituminosa que presentan un bajo grado de metamorfismo. Sus estratos presentan un rumbo general E-W, buzando de 20° a 25° al sur.

González-León, 1980, identificó un abundante contenido fosilífero principalmente de amonitas. La base de esta secuencia, gracias a la variación faunística de su contenido fósil, se interpreta de origen marino con rápidos cambios de nivel del mar, mientras que la parte superior es considerada de ambiente marino profundo; el espesor total de esta secuencia es de 3,400 m.

* JiAr-Cz-Lm y Jm(¿)MS

Las unidades JiAr-Cz-Lm está constituida por arenisca de grano grueso que varían hacia arriba a arenisca calcárea con amonitas. La cima está compuesta por lutita y limolita intercaladas con caliza fosilífera de origen marino somero. El espesor total de esta secuencia es de 60 m, y posiblemente ambas correspondan a la secuencia litoestratigráfica de la Formación Antimonio. En la Sierra Cirio se encuentra en contacto tectónico por falla normal con el Batolito Laramide y con rocas volcánicas ácidas del Mioceno; en la sierra Picú es afectada por el Batolito Laramide y al sur de la sierra Aguirre está cubierta por grava y arena del Pleistoceno.

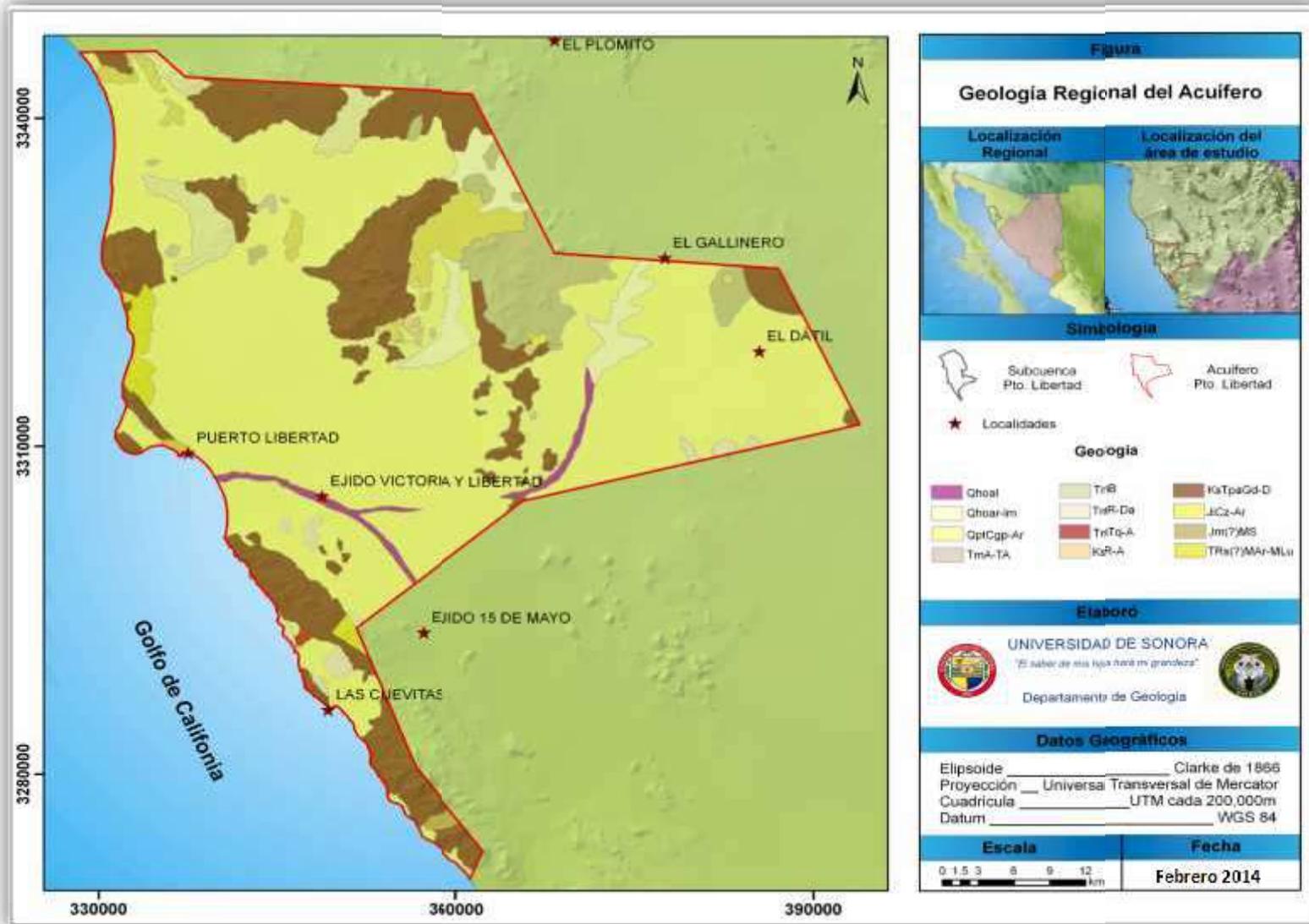


Figura 20 Mapa Geológico del área del acuífero Puerto Libertad.

La unidad Jm(ζ)MS corresponde al metamorfismo de la unidad JiAr-Cz-Lm, y la edad de metamorfismo es estimada como del Jurásico Medio. Aunque en algunas zonas el grado de metamorfismo no permite la identificación del protolito, la interestratificación si demuestra la correlación litológica.

* **KsA-R**

La unidad KsA-R restringe sus afloramientos al flanco oriental de la sierra Julio en el límite suroriental del acuífero Puerto Libertad y hacia el oriente, en la sierra de Aguirre. La litología principal consiste de rocas volcánicas de composición riolítica y andesítica fuertemente alteradas con silicificación (riolita) y propilitización (andesita). Hacia la base tiene niveles sedimentarios constituidos por arenisca rojiza, intercaladas con arenisca conglomerática y conglomerado de poco espesor. Hacia la parte superior predominan las brechas y coladas andesíticas de color púrpura a gris púrpura.

En algunas zonas la litología varía con la predominancia de derrames y aglomerados andesíticos que ocasionalmente varían a traquiandesita y dacita con un espesor máximo de 100 m. Su relación estratigráfica en el flanco oriental de la Sierra de Aguirre se encuentra afectada y en contacto por falla normal con el intrusivo laramídico. Están cubiertas discordantemente por gravas y arenas del Pleistoceno. En la región costera los afloramientos se encuentran afectadas por intrusivos cretácicos de composición granodiorítica y diorítica. Su ambiente de depósito es netamente continental: la presencia de conglomerados en la base de esta unidad volcanosedimentaria sugiere periodos de levantamiento y subsidencia mientras que el predominio de las secuencias lávicas hacia la cima indica que el magmatismo superaba la sedimentación.

* **KsTpa Gr-Gd-D (*Batolito Laramide*)**

Lindgren (1915), fue el primero en reconocer la variación composicional hacia el oriente de los plutones del Cretácico al Paleoceno dentro del oeste de los Estados Unidos. Damon (1983) definió al Batolito Laramide de Sonora como del Cretácico tardío al Eoceno tardío, entre 90 y 40 Ma. El batolito incluye todas las intrusiones granítica-granodiorítica y granitos de 2 micas (peraluminosos). Estas rocas representan la continuación hacia el sur del cinturón batolítico del oeste de Estados Unidos.

La forma y distribución de estos afloramientos, está controlada por la erosión y por los eventos tectónicos posteriores a su emplazamiento, principalmente la tectónica de extensión del Terciario Medio y Tardío. El nivel de erosión es más profundo hacia la costa y disminuye hacia el oriente, donde estos cuerpos se encuentran cubiertos por las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental; esta típica característica morfotectónica se puede asociar al grado o intensidad de extensión cortical ocasionada por el Basin and Range, durante el Mioceno.

En el acuífero, sus principales afloramientos se localizan en la porción centro-suroriental a lo largo de toda la línea de costa ocupando la mayor parte de las sierras de Julio, Aguirre, Cirios y la porción occidental y sur de la Sierra Picú. Sus afloramientos constituyen por lo general sierras alargadas de orientación casi norte-sur.

La unidad KsTpa Gr-Gd, se encuentra al norte del Cerro La Libertad (parte norte del acuífero) y en una serie de cerros orientados E-W. Este intrusivo granítico afecta a la unidad KsTpa Gd-D, y se encuentra cubierta discordantemente por gravas, arenas y limos del Cuaternario. En el afloramiento más costero, este trend estructural afecta a rocas volcánicas cretácicas de composición andesítica. Parte de este contacto es tectónico por falla normal, y al sur de estos afloramientos, al oriente de la sierra de Julio, está en contacto indefinido (Tectónico?) con la unidad KsTpa Gd-D (los contactos son muy rectos y abruptos).

La unidad KsTpa Gd-D aflora en la parte centro, en la sierra El Julio donde se encuentra en contacto tectónico con la unidad TRs(?) Mar-MLu. En el flanco oriental de la Sierra de Aguirre, se encuentra en contacto tectónico y afectando a rocas volcánicas cretácicas andesíticas y riolíticas; en el flanco occidental y norte está cubierta por gravas, arenas y limos cuaternarios; en la Sierra Picú, en el flanco occidental, está en contacto tectónico por falla normal con riolitas y riolacitas del Mioceno y con gravas y arenas del Pleistoceno; en el flanco oriental intrusiona a rocas sedimentarias correlacionables con la Formación Antimonio.

*** Tm A-TA**

En este trabajo denominamos unidades volcánicas intermedias, a una secuencia volcánica intermedia continental depositada desde el Eoceno hasta el Mioceno.

La unidad Tm A-TA aflora cerca de la línea de costa al norte y noreste de la sierra de Julio, y en el flanco oriental de la sierra Aguirre. La mayor parte de los afloramientos de esta unidad se presentan en cerros y lomerío aislado de escasa elevación y contornos circulares. Posiblemente a profundidad sean cuerpos subvolcánicos o pórfidos.

Básicamente están constituidos por derrames y piroclásticos de composición andesítica y posiblemente traquiandesítica (Unidad TmTq-A). La gran mayoría de los derrames presentan textura porfídica y fanerítica, aunque también las hay afaníticas. El espesor no se midió, pero fácilmente sobrepasan los 50 m.

Esta unidad en los afloramientos costeros descansa discordantemente sobre el Batolito Laramide y están cubiertos por gravas y arenas del Pleistoceno. Gastil et al (1979), realizó un fechamiento en una plagioclasa por el método K-Ar en un afloramiento de andesitas al oeste

de la sierra de Aguirre, definiendo una edad de 14.03 ± 3 Ma (Unidad Tm A-TA). El ambiente de depósito es volcánico, piroclástico continental.

* Tm R-Da

Se denomina unidad volcánica ácida a una secuencia lávica constituida primordialmente por riolitas y riodacitas del episodio volcánico que construyó el edificio de la sierra Madre Occidental. Su principal afloramiento se localiza en la porción noreste del acuífero conformando la mayor parte de la sierra Picú, y pequeños afloramientos al occidente de la sierra de Aguirre.

Primordialmente está constituida por depósitos volcánicos lávicos ácidos representados por riolita y riodacita que pueden variar a dacita y latita, aunque también se presentan en forma de brecha, aglomerado riolítico y toba lítica y de cristales de diferente composición, presentan textura porfídica y afanítica. Conforman cerros y sierras de escasa altura aunque en la sierra Picú fácilmente sobrepasan los 300 m.

En la sierra Picú sobreyacen discordantemente a la andesita del Cretácico superior y sedimentarias del Jurásico inferior correlacionables con la Formación Antimonio y en contacto por falla y discordante sobre el intrusivo Cretácico de composición granodiorita-diorita. Están cubiertas discordantemente por grava, arena y limo del Cuaternario.

Gastil et al (1977), en el flanco oriental de la sierra Picú realizó un fechamiento (K-Ar) en un feldespato de una dacita, determinando una edad de 12.7 ± 0.4 Ma. Esto permite correlacionar con rocas de edad y litología similar que afloran en la región costera de Sonora y Baja de California. Su ambiente de depósito es volcánico con facies subvolcánicas locales, originadas en un ambiente de arco magmático continental relacionada con las últimas etapas de la subducción terciaria.

* Tm B

Denominamos unidad volcánica básica a una secuencia volcánica constituida por derrames en bloques y lavas de composición basáltica-andesítico-basáltica con textura afanítica vesicular, rellena de calcita y sílice, ocasionalmente presentan texturas porfídica fanerítica, color gris oscuro, café oscuro. La edad probable es Mioceno. Esta unidad aflora en la línea de costa del acuífero, constituyendo afloramientos de escasa altura y orientados NW-SE.

La unidad sobreyace discordantemente a las rocas volcánicas ácidas-intermedias del Mioceno y es cubierta en discordancia por gravas y arenas del Pleistoceno. Su ambiente de depósito corresponde a un volcanismo continental muy ligado a los procesos distensivos del Basin and Range y la separación del golfo de California.

*** Qptgv-Ar**

Esta unidad se encuentra constituida por sedimentos de naturaleza litológica variable, que granulométricamente consisten en grava, arena, limo y arcilla, que en algunas ocasiones presentan estratificación débilmente marcada, aunque la mayor parte de las veces se presenta masiva. Estos depósitos se encuentran cubriendo discordantemente a las unidades preexistentes en los piedemonte y rellenando depresiones y cuencas actuales, y son considerados de edad Pleistoceno superior.

Esta unidad tiene gran importancia ya que además de constituir la base de los rasgos topográficos principales, es una fuente potencial de material sedimentario en las épocas de avenidas fuertes, además de que delimitan zonas en las que el basamento (independientemente de su litología) está muy próximo.

*** Qhoar-lm y Qho al**

Unidad constituida por depósitos aluviales no consolidados de arena y limo que se han acumulado a lo largo de los valles principales. El tipo de componentes y la granulometría de la unidad varía ampliamente en toda el área: incluye a los depósitos aluviales de grano fino de la parte central de los valles, así como los depósitos de grano grueso de las fajas de pie de monte. La planicie aluvial de la porción occidental está caracterizada por la presencia de constituyentes de grano muy fino, por el desarrollo de patrones de drenaje desintegrados, y por la presencia de una cubierta eólica que se ha desarrollado en el borde occidental.

III CARACTERIZACIÓN RESISTIVA

III.1 METODOLOGÍA DE CAMPO UTILIZANDO EL METODO ELECTROMAGNETICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (TDEM).

Con el método electromagnético aplicado (TEM), se pretende mostrar una caracterización resistiva del subsuelo. Debido a la gran resolución vertical que se obtiene con esta técnica, es posible obtener una imagen lo más real posible de las condiciones del subsuelo. En las secciones del subsuelo es posible observar las heterogeneidades (zonas anómalas) debidas a estructuras geológicas, cambios de facies y fracturamiento de la roca, donde además la presencia del agua influye en el valor medido, provocando cambios importantes en la resistividad (que es el parámetro experimental de campo que se mide). Lo que puede ser identificado también con este método.

La técnica del TEM (sondeo transitorio electromagnético), consistió en utilizar una espira o bobina que está construida por un cable en forma de cuadro con dimensiones de 150x150 m (área de la bobina 22,500 m²), con el arreglo denominado "loop coincidente" (Figura 21), es decir donde únicamente se utiliza una bobina, la cual actúa en ciertos instantes de tiempo como transmisora de la señal y en otros es receptora, con una resistencia de 2.6 Ohms en el circuito, para lo cual se utilizó un cable de fabricación canadiense de 110 hilos; con estas características del arreglo se logró una intensidad de corriente que variaba entre 8 y 9 amperes.

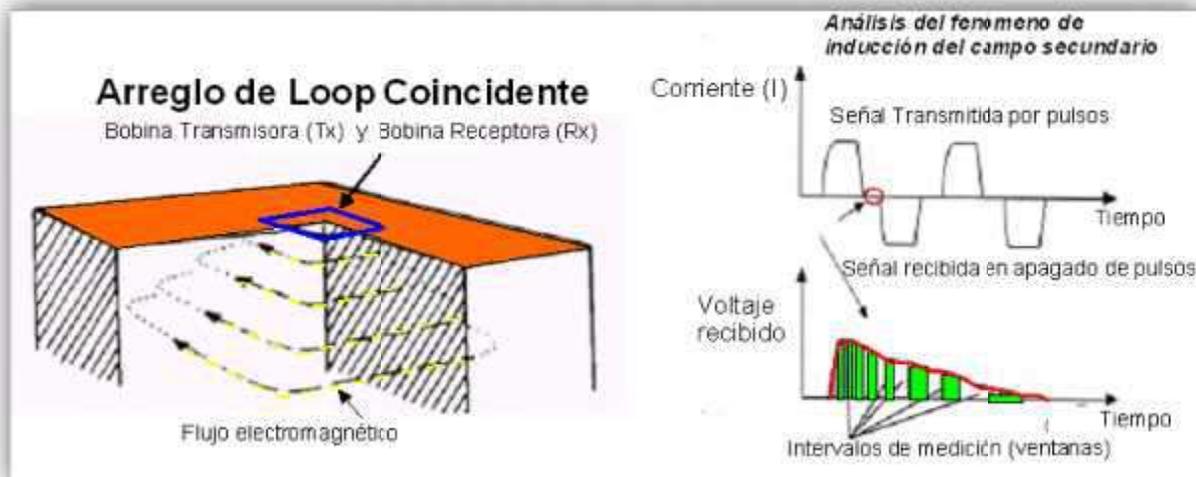


Figura 21 Arreglo de Loop coincidente.

Con este arreglo se realizaron una serie de pruebas que consistieron en variar parámetros tales como:

- Pruebas de la resistencia del circuito de transmisión y recepción
- Análisis de la intensidad de corriente circulante
- Análisis de ruido y respuesta del equipo con diferentes ganancias
- Análisis de la penetración de la señal en el subsuelo (profundidad de investigación)
- Análisis de la repetibilidad de la respuesta medida por el equipo
- Apilamiento de la señal con promedios de 256, 512, 1024 y 2048 muestras

Las pruebas y análisis anteriores se hicieron en dos sitios, de tal manera que fueran representativos de las condiciones generales esperadas. Estas pruebas produjeron como resultado que el arreglo denominado "loop coincidente" cumple con las especificaciones establecidas, usando un tendido de 150 x 150 m.

El tiempo de medición se fijó con una duración entre 44 y 47 ventanas, con la serie de tiempo denominada High Resolution del equipo "Sirotem". Las mediciones se realizaron con ganancias de 0.1, 1, 10, y 100, aumentando el número de lecturas en sitios donde el ruido geológico era alto, esto con el fin de aumentar la calidad en la estadística de los datos.

III.1.1 Procesado de la información y modelación (MODELOS).

El procesado de los registros se efectuó en las siguientes etapas, para cada sondeo y fueron:

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

Todas las etapas del proceso anterior se realizaron en gabinete, y los datos de campo fueron analizados el mismo día que fueron adquiridos, para conocer la calidad de la información.

Para la ubicación de los sitios de medición, se utilizó un equipo de geoposicionamiento, empleando para ello un GPS marca GARMIN, el cual nos proporciona, para cada sitio de medición, sus coordenadas geográficas (X, Y), mientras que la elevación fue tomada de los

mapas topográficos publicados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

En el proceso de los datos se siguieron los estándares internacionales que se aplican para este fin, utilizando software y equipos de patente, de los cuales tenemos versiones originales, para ello podemos citar el siguiente equipo y software:

- Equipo Sirotem MK3 con número de serie 3259
- Programa TEMIXS para el proceso primario de los datos
- Programa WINGLINK para utilizarlo como base de datos y formar secciones y mapas de resistividad.

El proceso de los datos, para cada sondeo, consiste en obtener un modelo unidimensional, partiendo de la curva de resistividad aparente, la cual es procesada en una primera etapa mediante el modelado por capas planas, siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de las curvas y los tiempos en los que ocurren las inflexiones. Una segunda etapa en el proceso de la curva de resistividad aparente es aplicar una regresión tipo Occam, con lo cual se logra obtener un modelo multicapas (19 capas) para integrar secciones y simular un comportamiento bidimensional de la sección. A continuación se describe cada proceso.

III.1.2 Modelo suavizado

El procesamiento de los datos consistió en obtener los modelos suavizados mediante una regresión tipo Occam, en la que se propone una resistividad inicial y una final, basada en los datos de campo.

El algoritmo requiere de un número de capas inicial, un valor de ajuste al que se quiere llegar y un número máximo de iteraciones, estos tres últimos parámetros no intervienen en la obtención del modelo suavizado, por lo que este sólo depende de los valores de resistividad de campo, y en el uso de la regresión Ridge, para encontrar un modelo que cumpla con el error marcado en el ajuste o con el mínimo error posible.

III.1.3 Modelo unidimensional

Los datos fueron también procesados por el modelado por capas o unidimensional. Se hizo siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de la curva de campo, las pendientes de la curva y los tiempos a los que ocurren las inflexiones. Se aprovechó la facilidad del paquete TEMIXS que permite la interacción con la computadora en un proceso conocido como interpretación interactiva.

Este proceso posibilita que el intérprete modifique los parámetros del modelo y presenta el cálculo de las curvas teóricas de las modificaciones realizadas, esta característica hace que el ajuste del modelo sea rápido. Una vez que se ha obtenido un ajuste aceptable, el modelo generado se somete a una regresión automática con las técnicas de Ridge y de Marquardt con algoritmos de aproximación de tipo Anderson para obtener, por inversión, el mejor ajuste bajo el criterio del error cuadrático medio mínimo.

Los modelos obtenidos, son sometidos a un nuevo proceso para obtener una serie de modelos equivalentes que cumplan con el mismo error de ajuste. Los modelos equivalentes posibilitan establecer el intervalo de variación de los espesores y resistividades en cada capa del modelo original con fines de correlación electro estratigráfica.

Al final de esta sección, se muestra el procesado en forma de gráficas interpretadas para cada sitio de medición (Apéndice 1).

III.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (TDEM) CASO ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD.

III.2.1 Identificación de los cambios asociados a presencia de agua subterránea (Geometría y perfiles).

A partir de las condiciones fisiográficas del área estudiada en el acuífero Puerto Libertad, así como de los objetivos buscados en este estudio hidrogeológico, se consideró necesario utilizar el método geofísico de exploración denominado sondeo transitorio electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM por sus siglas en inglés), el cual tiene la mayor eficiencia resolutive y gran sensibilidad a la presencia de agua o de materiales saturados. En este contexto, como parte de este estudio exploratorio se llevaron a cabo 33 sondeos electromagnéticos (Figura 22 y Tabla 6), estos sondeos permitieron obtener una profundidad de exploración teórica entre los 500 y 700 m. La localización de estos sondeos fue determinada de acuerdo a la distribución de los afloramientos de las unidades geológicas y las tendencias estructurales, con la finalidad de integrar la mayor cantidad de elementos geológicos e incrementar la certidumbre en la interpretación de las unidades geoeléctricas del subsuelo. El modelado de una serie de perfiles geofísicos con los resultados de estos sondeos fue determinante para obtener un mejor detalle de las características geométricas y físicas de las unidades hidrogeológicas en cada sitio, lo que permitió seleccionar el mejor lugar para la propuesta de perforación.

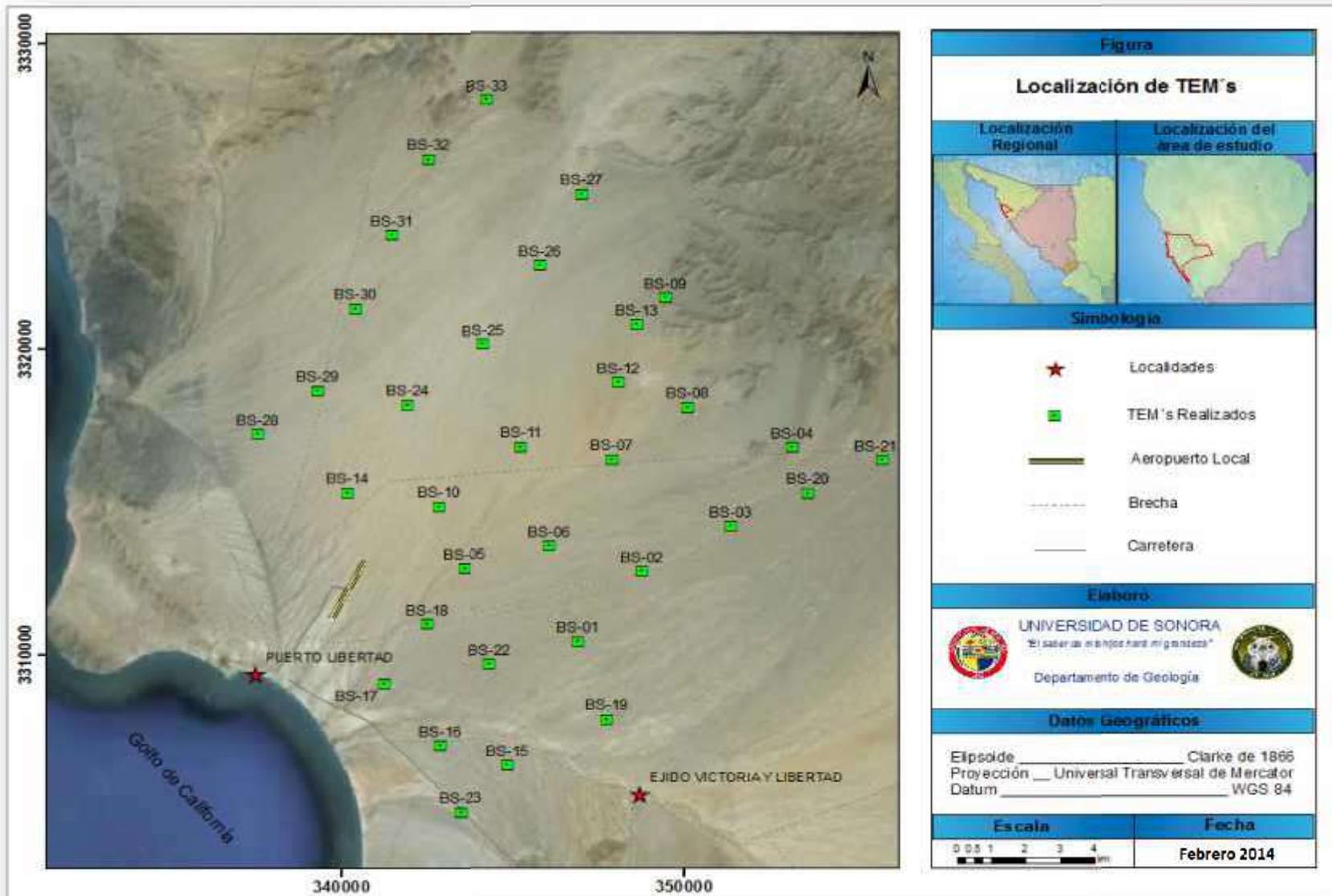


Figura 22 Localización de Sondeos Electromagnéticos.

Particularmente para este estudio, la técnica del TEM (sondeo transitorio electromagnético), consistió en utilizar una espira o bobina que está construida por un cable en forma de cuadro con dimensiones de 150 x 150 m (área de la bobina 22,500 m²), con el arreglo denominado "Loop coincidente" (Figura 18), es decir, donde únicamente se utiliza una bobina que actúa en ciertos instantes de tiempo como transmisora de la señal y en otros es receptora, con una resistencia de 2.6 Ohms en el circuito, para lo cual se utilizó un cable de fabricación canadiense de 110 hilos. Con estas características del arreglo se logró una intensidad de corriente que variaba entre 8 y 9 amperes, permitiendo una profundidad de investigación teórica de 500 y 700 m en promedio (Figura 23).

A partir de los datos obtenidos en campo, se interpretaron los resultados en términos hidrogeológicos, considerando la geología del área, la información de cortes litológicos de pozos y la piezometría, a partir de los pasos siguientes:

- Obtención de los valores de resistividad del subsuelo en levantamiento de campo.
- Establecimiento de las unidades resistivas.
- Asociación de las unidades resistivas obtenidas con cuerpos rocosos y condiciones del subsuelo.
- Definición de la geometría de los cuerpos granulares y el contacto con el basamento rocoso, geometría de los cabios asociados a presencia de agua subterránea y el delimitación del nivel freático.

Tabla 6 Localización de los Tem's levantados en el acuífero Puerto Libertad.

Nombre	Este	Norte	Elevación	Nombre	Este	Norte	Elevación
BS-01	346903.626	3310409.71	89.52771	BS-18	342500.854	3310997.63	43.62512
BS-02	348764.772	3312710.63	137.1127	BS-19	347732.647	3307874.12	83.75989
BS-03	351334.941	3314175.49	186.8605	BS-20	353582.136	3315262.85	238.0504
BS-04	353141.592	3316753.56	245.5005	BS-21	355737.213	3316348.31	279.3867
BS-05	343604.715	3312812.94	68.13867	BS-22	344329.558	3309666.34	56.60291
BS-06	346071.964	3313527.31	101.7845	BS-23	343499.954	3304837.38	65.25476
BS-07	347902.036	3316362.33	139.0353	BS-24	341962.41	3318185.61	127.2593
BS-08	350101.161	3318073.16	206.8077	BS-25	344159.854	3320130.85	177.0072
BS-09	349465.967	3321651.98	333.4606	BS-26	345812.265	3322704.3	244.299
BS-10	342876.301	3314834.18	81.35669	BS-27	347029.443	3325029.79	303.4196
BS-11	345238.879	3316767.05	120.7704	BS-28	337602.368	3317206.85	69.82092
BS-12	348081.499	3318886.59	187.1008	BS-29	339344.045	3318634.09	101.0635
BS-13	348607.197	3320781.49	257.9976	BS-30	340414.67	3321321.71	152.734
BS-14	340208.648	3315305.67	74.8678	BS-31	341477.298	3323729.23	200.0786
BS-15	344869.553	3306377.73	58.52551	BS-32	342566.921	3326212.18	248.8651
BS-16	342897.875	3307017.07	30.40723	BS-33	344260.233	3328125.22	294.2871
BS-17	341281.486	3309036.72	23.67798				

Coordenadas UTM WGS84 Zona 12N

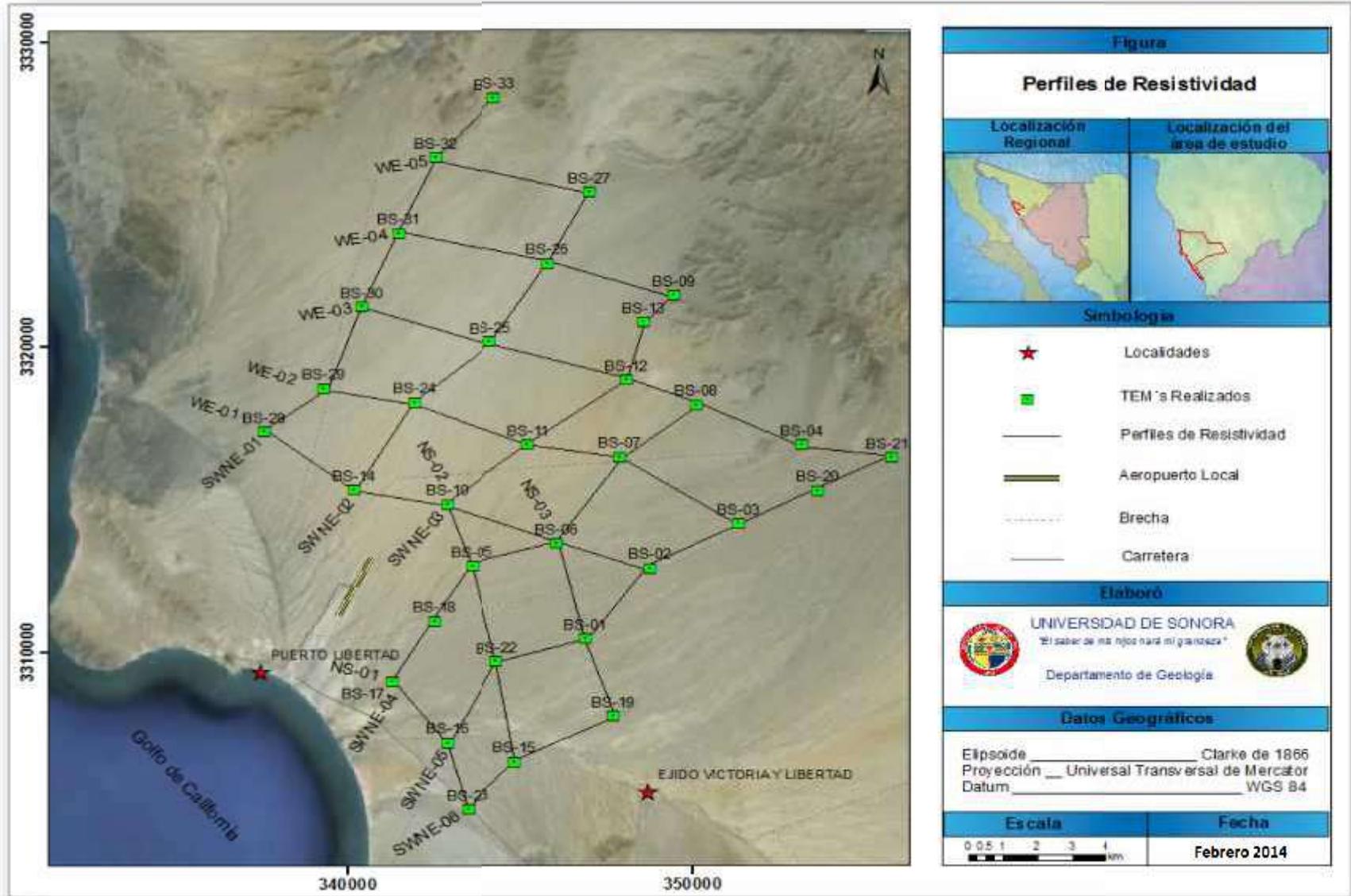


Figura 23 Localización de perfiles de resistividad acuífero Puerto Libertad.

Una vez obtenida y verificada la información de campo, se inició el trabajo de gabinete consistente en la corrección de los datos geofísicos y elaboración de modelos (los modelos unicapa y multicapa son mostrados en el Apéndice. Para la localización de los sitios de medición se utilizó un equipo GPS marca GARMIN, el cual proporciona las coordenadas geográficas (X, Y) y una elevación con un margen de error aceptable para cada sitio de medición.

Conociendo dicha distribución y las características geológicas superficiales, es posible caracterizar el sistema hidrogeológico. Las resistividades obtenidas en el subsuelo dentro del área, permiten identificar un total de 3 unidades resistivas, algunas de las cuales presentan rangos de variación internos, por lo que a su vez se delimitaron varias divisiones dentro de éstas (Tabla 7). Es importante establecer que las interpretaciones desarrolladas en el presente trabajo se sustentan en el conocimiento previo de las condiciones hidrogeológicas locales y de la región, sin embargo, la correlación litológica de los rangos de resistividad de cada unidad resistiva, puede eventualmente estar sujeta a verificación mediante exploración directa. Lo que el desarrollo e interpretación de los TEM ofrece como resultado cuantitativo únicamente son valores de resistividad del subsuelo, y no es posible obtener valores de otros parámetros tales como porosidad de la roca, o contenido mineralógico; aun así, se pueden realizar inferencias y modelos de ciertas condiciones geológicas y calidad de agua.

TABLA DE RESISTIVIDAD		
UNIDAD	INTERVALO RESISTIVO	INTEPRETACIÓN GENÉRICA
U1	VARIABLE	Relleno superficial, suelo y materiales no saturados
U2	(a) 	menor a 6 Constituida predominantemente por arcillas y limos con valor de resistividad, por lo general inferiores a los 3 ohm*m .
	(b) 	6 a 16 Material intercalado por arenas , gravas , arcilla y limos
	(c) 	16 a 56 Constituida predominantemente por gravas arenosas
U3	(a) 	56 a 100 Roca fracturada o material granular compacto. Es posible que este saturado.
	(b) 	> 100 Roca Sana
Nota: Se presenta una asociación litológica general que considera la relación típica entre la resistividad, tipo de fracturamiento en la roca y los materiales granulares. Puede presentarse excepciones.		

Tabla 7 Unidades resistivas interpretadas dentro del acuífero Puerto Libertad.

III.3 CARACTERIZACIÓN DE UNIDADES RESISTIVA CASO ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD.

La **unidad U1** es la más superficial en la mayoría de los perfiles, presentándose con un espesor muy reducido y con rangos de resistividad muy variables que van desde los 2 Ohm/m hasta mayores de 200 Ohm/m. Representa unidades de suelo y sedimentos de granulometría muy variada, generalmente no consolidados ni saturados.

La **unidad U2** identifica a la unidad sedimentaria neógena que se tiene como relleno sedimentario de cuencas extensionales, y que representa el acuífero granular. Dentro de esta unidad se tiene a la **sub-unidad U2a** que está asociada a secuencias dominadas por limos y arcillas que presentan resistividades muy bajas, generalmente menor a los 6 Ohm/m (tonos de color azul), pueden estar saturados con agua salada. La **sub-unidad U2b** se interpreta como una intercalación de sedimentos detríticos caracterizados por arenas, gravas, arcillas y limos, los cuales se tienen con un rango de resistividad entre 6 y 16 Ohm/m; la cual pueden estar saturados con agua salobre. La **sub-unidad U2c** son predominantemente paquetes de sedimentos gravosos cuyas resistividades varían entre 56 y 100 Ohm/m. con tonalidades de color verde, permeables saturados de agua dulce.

La **unidad U3** se asocia al Batolito Laramide del Cretácico tardío al Eoceno tardío, incluye todas las intrusiones granítica-granodiorítica, que aflora ampliamente en el área del acuífero. En el subsuelo, la **sub-unidad U3a** representa a esta secuencia rocosa con un grado de fracturamiento relativamente alto con intervalos de resistividad entre 56 y 100 Ohm/m. Las distintas formas de presentarse de este basamento, en cuanto a presentar mayor o menor fracturamiento, son las que condicionan distintos valores de resistividad de esta litología, llegando a descender por debajo de los 100 ohm/m cuando se trata de un basamento muy fracturado y presenta circulación de fluidos, lo que se interpreta aquí en colores naranja (Tabla 7).

La **sub-unidad U3b**, que presenta valores de resistividad muy altos en tonos de color rojo que localmente sobrepasan los 100 Ohm/m, son materiales que corresponden al basamento, la roca más compacta que aflora en la zona estudiada.

Los rangos de valores de resistividad utilizados para definir las diferentes unidades resistivas, no necesariamente son fijos, ya que al momento de la interpretación geoelectrónica, y de acuerdo a su distribución en los perfiles, éstos pueden llegar a tener pequeñas variaciones. Asimismo, los contactos entre diferentes materiales se identifican en la zona de inflexión, entre los valores más altos y más bajos, o a la profundidad donde los valores en el sondeo se repiten; estos cambios o particularidades de resistividad marcan cambios en las condiciones de granulometría o litologías en el subsuelo. Por su parte, el método electromagnético aplicado (TEM), identifica las estructuras en los puntos de interrupción de las anomalías

resistivas, al ser éstas las que definen la presencia de los materiales compactos y sanos. La interrupción en la alta resistividad puede ser producto de la presencia de una discontinuidad por la cual ha podido circular agua y ha disuelto parte del material, dejando incluso depósitos arcillosos en las juntas lo que hace disminuir la resistividad y definir así la presencia de la estructura.

III.3.1 Perfiles de resistividad

A partir de los resultados obtenidos con el levantamiento de los TEM dentro del acuífero Puerto Libertad (Figura 23), se elaboraron 14 secciones de resistividad mostrando unidades geoelectricas correlacionales con unidades litológicas, así mismo muestran la geometría inferida de los depósitos granulares y su contacto con el basamento rocoso. Dentro de este apartado se describen las dos secciones más representativas dentro del acuífero (Figuras 24 y 25), y el resto de las secciones se presentan en el apéndice II.

Conociendo dicha distribución y las características geológicas superficiales, es posible caracterizar el sistema hidrogeológico.

Perfil de resistividad SWNE-04

Este perfil fue construido a partir del análisis de 6 TEM (BS-17, BS-18, BS-05, BS-06, BS-07 y BS-08) con una orientación general SW-NE y una longitud de 1,400 m (Figura 24). La interpretación de éste establece como característica general que en el subsuelo se presenta un bloque levantado de resistividades altas en el TEM BS-08 cubierto por materiales granulares.

La unidad U1 representa de manera continua lateralmente en la porción central más superficial de este perfil, con un espesor máximo de 30 m y con resistividades desde 24 Ohm/m hasta 60 Ohm/m. La unidad U2a se caracteriza por material areno limoso el cual se puede presentar con valores inferiores a los 3 Ohm/m identificado como intrusión marina, los TEM BS-05 Y BS-06 y en la sección se presenta como una franja sub horizontal con valores resistivos menores a los 4 Ohm/m, con un espesor promedio de 80 m que llega a alcanzar un máximo de casi 100 m en el TEM BS-05. La unidad U2b se interpreta tanto en la cima como en la base de la franja de baja resistividad de la unidad U2a, presentando los valores mínimos en el TEM BS-17 constituido por sedimentos de arena, grava y arcilla. La unidad U2c es definida en casi todos los Tem por sedimentos gravosos, a excepción del TEM BS-08 que se encuentra en la Sierra Aguirre constituido principalmente por roca granítica, donde la unidad U2c llega a alcanzar un espesor de 650 m en el TEM BS-05 con resistividades de 20 a 40 Ohm/m y en los TEM BS-17, BS-18, BS-06 y BS-07 su espesor se reduce hasta 160 m con resistividades semejantes.

La porción rocosa de este perfil presenta una gran variedad de características resistivas. El límite oriental del perfil (TEM BS-17 y BS-08) está dominado por resistividades muy altas que llegan a alcanzar los 1000 Ohm/m, representando al Batolito Laramide. El basamento en el resto del perfil está representado por las mismas rocas graníticas, cuyos valores de resistividad sobre los 100 Ohm/m, la caracterizan como una secuencia relativamente sana con poco fracturamiento; mientras que los valores resistivos entre los 56 y 100 Ohm/m en la fracción rocosa establecen la presencia de un fracturamiento de moderado a intenso y/o una granulometría más fina en las rocas.

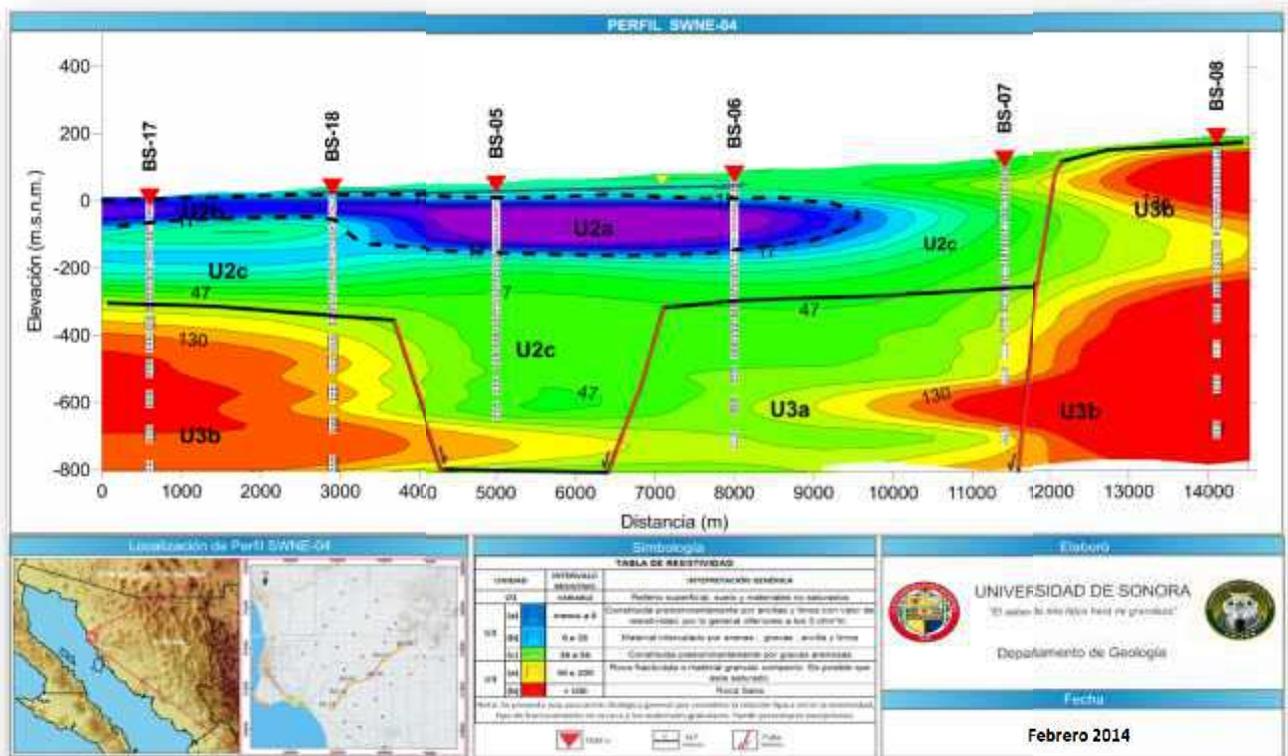


Figura 24 Perfil de resistividad SWNE-04 acuífero Puerto Libertad.

Perfil de resistividad SWNE-05

Este perfil fue construido a partir del análisis de 7 TEM (BS-16, BS-22, BS-01, BS-02, BS-03, BS-20 Y BS-21), tiene una orientación general SW-NE y una longitud de casi 17 km (Figura 25). La interpretación general de este perfil establece la presencia de un basamento predominantemente ígneo, cubierto por los sedimentos del Neógeno.

La interpretación del perfil ubica la presencia en el subsuelo de dos fosas tectónicas que fueron rellenadas por los sedimentos de la unidad U2 sedimentaria neógena, y que son limitadas por bloques levantados del basamento ígneo, de la sub-unidad U3. En el límite oriental del perfil, esta unidad tiene la característica de presentarse de manera más somera. Aunque en ambas fosas predomina la presencia de la sub-unidad U2c, en la primera de éstas (TEM BS-01 y BS-02) tiene casi 600 m de espesor y resistividades entre 20 y 40 Ohm/m, mientras que en la segunda (BS-16), los valores de resistividad de esta sub-unidad están entre 15 y 35 Ohm/m. La sub-unidad U2b también se interpreta formando parte de este relleno, identificándose como capas lenticulares de valores resistivos alrededor de los 16 Ohm/m.

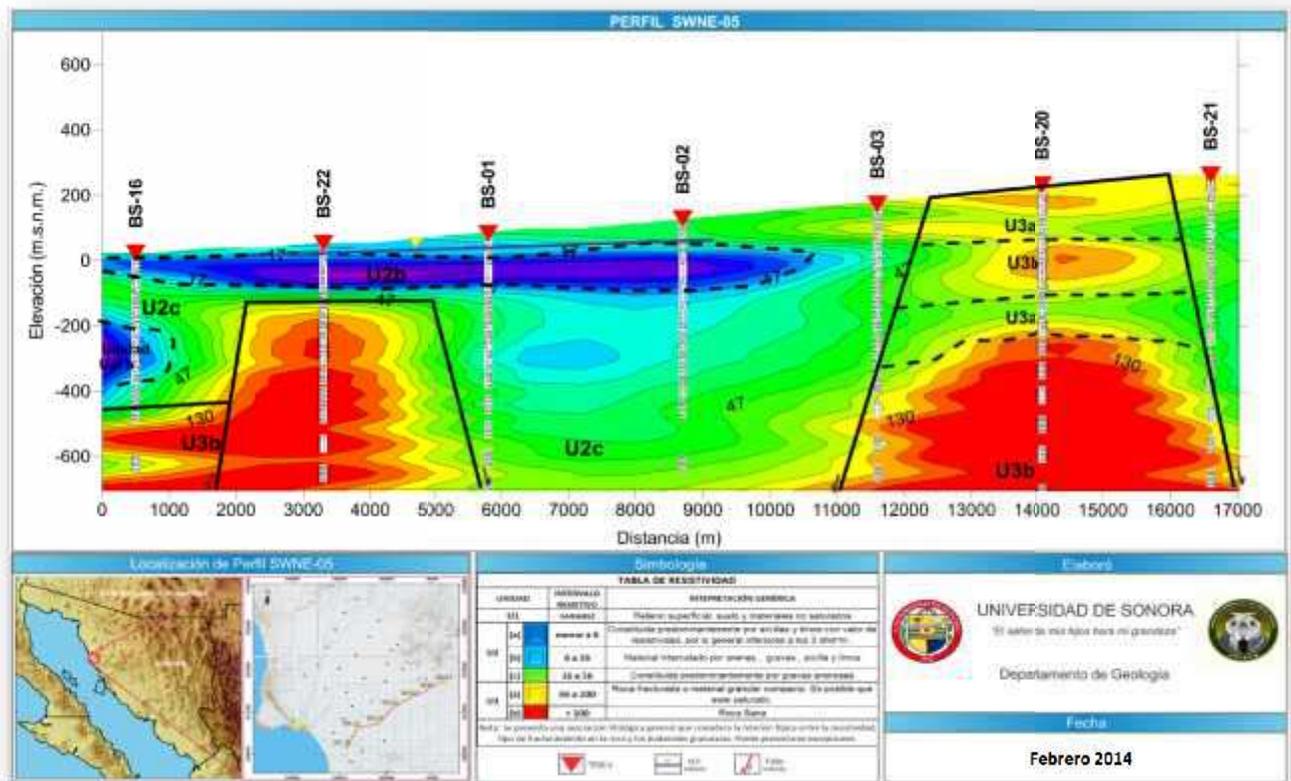


Figura 25. Perfil de resistividad SWNE-05 acuífero Puerto Libertad.

III.4 MODELO GEOFÍSICO CASO ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD.

Los perfiles de resistividad fueron integrados en un modelo tridimensional, con el objetivo de mostrar con mayor claridad gráfica, la expresión y observación de los resultados (Figura 26). El modelo geofísico se compone de 3 grandes capas (5 unidades resistivas y sus divisiones), lo que ofrece la posibilidad de inferir las condiciones geológicas a partir del conocimiento de los valores de resistividad en el subsuelo.

Desde esta perspectiva general la aplicación de técnicas geofísicas para estudio de la intrusión marina se define como un ámbito perfectamente delimitado por rasgos específicos.

Es importante establecer que las resistividades mayores en el subsuelo se concentran hacia la porción oeste en las inmediaciones del poblado El Sagarito, donde se localiza la sierra Los Cirios y al este en las inmediaciones del poblado El Dátil, donde se localiza la Sierra Aguirre, principalmente las unidades U2b y U2c, sobreyacidas por una capa lateralmente continua de resistividades muy bajas que identifican a la unidad U2a. Por su parte, la unidad U2a, manifiesta una extensión lateral y vertical muy dominante a lo largo del subsuelo de la porción centro-sur de la zona costera. Estas mismas unidades resistivas tienden a aparecer con mayor incidencia en la parte central del área, las cuales identifican a la sub-unidad U3b del basamento ígneo.

Dentro de la Figura 26, y específicamente las que representan a la sedimentación fina dentro del relleno sedimentario de las fosas interpretadas, hacen notar la distribución de la zona de resistividades bajas (colores azules). Los valores de resistividad, por debajo de la interfase, están en el rango de 1.4 a 1.8 ohm-m, típico de intrusión marina en acuíferos costeros (SENGPIEL, 1986).

Cualquiera que sea la resolución o el modelo definitivo que dé explicación a la manifestación de agua salada en el acuífero, puede ser resuelto. Existen dos entradas o zonas de línea de costa retrógrada, la primera entrada ubicada al NW entre la sierra Julio y el Cerro Santa María, y la segunda entrada ubicada al SW de la localidad Puerto Libertad, que generan cambios asociados a presencia de agua subterránea.

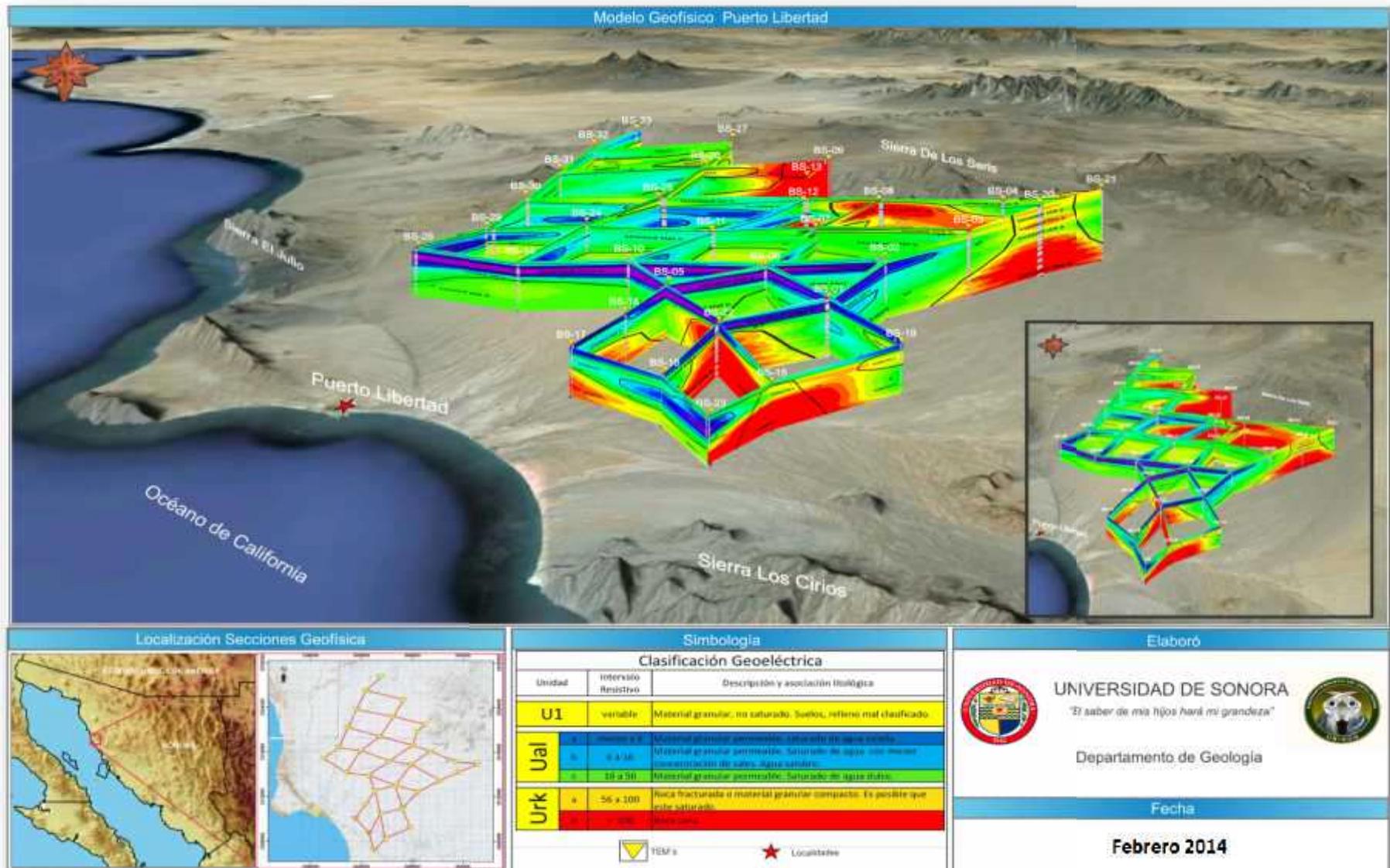


Figura 26 Modelo geofísico con secciones resistividad acuífero Puerto Libertad.

IV CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA

IV.1 CORRELACIÓN DE UNIDADES RESISTIVAS CON UNIDADES GEOELÉCTRICAS EN EL ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD

A partir de este apartado, se integran los diversos análisis realizados que permiten llegar a la obtención del modelo geoelectrico y posteriormente al hidrogeofísico. Utilizando las unidades litoestratigráficas identificadas en la geología superficial y con base en la interpretación geológica realizada a partir de los sondeos electromagnéticos (TEM's).

En el acuífero Puerto Libertad, se determinaron tres unidades geoelectricas (figura 27). Para la referencia litológica y de ocurrencia detallada de las unidades litoestratigráficas, consultar capítulo (Geología Local).

TABLA GEOELÉCTRICA		
SUB-UNIDAD	UNIDAD	CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS
 (a)	UNIDAD I SEDIMENTARIA CONTINENTAL	Representa la zona de intrusión salina con granulometría variable
 (b)		Está constituida por material saturado (agua dulce y/o salobre) del tamaño de la arena, limo y arcilla, en donde ésta ultima puede actuar como una capa confinante
 (c)		Se caracteriza por sedimentos mas gruesos dominando las gravillas arenosas
 (d)		Esta sub-unidad esta representada por gravas, arena y boleó con gran importancia, ya que es una fuente potencial de material sedimentario en las épocas de avenidas fuertes.
 (e)		Se encuentra localmente en zonas cercanas a afloramientos de basamento, como lentes anómalamente compactados de gravas
 (a)	UNIDAD II VOLCÁNICA ACIDA	Secuencia lávica constituida primordialmente por riolitas y riodacitas que pueden variar a dacita y latita.
 (a)	UNIDAD III BATOLITO LARAMIDE	Secuencia rocosa con un grado de fracturamiento relativamente alto se trata de un basamento my fracturado y presenta circulación de fluidos.
 (b)		Material que corresponde al basamento, la roca compacta que aflora en la zona estudiada.

Figura 27 Unidades Geoelectrica interpretadas dentro del área estudiada.

IV.1.1 Caracterización de unidades geoelectricas

Unidad I: Qptgv-ar,Qho al, Qpt lm-ar (*Sedimentario detrítico continental*)

La **unidad I** está constituida por sedimentos que se encuentran cubriendo discordantemente a las unidades preexistentes como el relleno sedimentario de cuencas actuales, considerado éste como de edad Pleistoceno tardío. Sus características resistivas permiten su división en 5 **sub-unidades**, las cuales a su vez identifican granulometrías y/o condiciones de salinidad diferentes. La **sub-unidad UI-a** representa la zona de intrusión salina con granulometría variable; la **sub-unidad UI-b** está constituida por material saturado (agua dulce y/o salobre) del tamaño de la arena, limo y arcilla, en donde ésta última puede actuar como una capa confinante; **sub-unidad UI-c** se caracteriza por sedimentos más gruesos dominando las gravillas y arenas; la **sub-unidad UI-d** son gravas, arenas y boleos que tienen gran importancia ya que además de constituir la base de los rasgos topográficos principales, es una fuente potencial de material sedimentario en las épocas de avenidas fuertes, además de que delimitan zonas en las que el basamento (independientemente de su litología) está muy próximo. La **sub-unidad UI-e** se encuentra localmente en zonas cercanas a afloramientos de basamento, como lentes anómalamente compactados de gravas dentro de la sub-unidad UI-d.

Unidad II: Tm R-Da (*Unidad Volcánica Ácida*)

Se denomina unidad volcánica ácida a una secuencia lávica constituida primordialmente por riolitas y riodacitas del episodio volcánico que construyó el edificio de la sierra Madre Occidental. Su principal afloramiento se localiza en la porción noreste del acuífero conformando la mayor parte de la sierra Picú, y pequeños afloramientos al occidente de la Sierra de Aguirre. Primordialmente está constituida por depósitos volcánicos lávicos ácidos representados por riolita y riodacita que pueden variar a dacita y latita, aunque también se presentan en forma de brecha, aglomerado riolítico y toba lítica y de cristales de diferente composición, presentan textura porfídica y afanítica. Conforman cerros y sierras de escasa altura aunque en la sierra Picú fácilmente sobrepasan los 300 m.

Unidad III: KsTpa Gr-Gd-D (*Batolito Laramide*)

La unidad IV En el subsuelo, se divide en la **sub-unidad UIII-a** que representa a esta secuencia rocosa con un grado de fracturamiento relativamente alto, se trata de un basamento muy fracturado y presenta circulación de fluidos. La **sub-unidad UIII-b**, son materiales que corresponden al basamento, la roca más compacta que aflora en la zona estudiada.

La forma y distribución de estos afloramientos, está controlada por la erosión y por los eventos tectónicos posteriores a su emplazamiento, principalmente la tectónica de extensión del Terciario medio y tardío. El nivel de erosión es más profundo hacia la costa y disminuye hacia el oriente, donde estos cuerpos se encuentran cubiertos por las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental; esta típica característica morfotectónica se puede asociar al grado o intensidad de extensión cortical ocasionada por el Basin and Range, durante el Mioceno.

En el acuífero, sus principales afloramientos se localizan en la porción centro-suroccidental a lo largo de toda la línea de costa ocupando la mayor parte de las sierras de Julio, Aguirre, Cirios y la porción occidental y sur de la sierra Picú. Sus afloramientos constituyen por lo general sierras alargadas de orientación casi norte-sur.

La unidad KsTpa Gr-Gd, se encuentra al norte del cerro La Libertad (parte norte del acuífero) y en una serie de cerros orientados E-W. Este intrusivo granítico afecta a la unidad KsTpa Gd-D, y se encuentra cubierta discordantemente por gravas, arenas y limos del Cuaternario. En el afloramiento más costero, este trend estructural afecta a rocas volcánicas cretácicas de composición andesítica. Parte de este contacto es tectónico por falla normal, y al sur de estos afloramientos, al oriente de la sierra de Julio, está en contacto indefinido (Tectónico?) con la unidad KsTpa Gd-D (los contactos son muy rectos y abruptos).

V.1.2 Perfiles geoelectricos

Con base en la información obtenida a partir de los sondeos electromagnéticos (TEM'S), en la información geológica disponible recabada, se interpretaron las secciones geofísicas para convertirlas en secciones geoelectricas. A continuación se describe las secciones más representativas del área.

Cabe señalar que la unidad de suelo (aluvión) siempre cuenta con espesores poco potentes y por lo general no se percibe en las secciones, de manera que se ilustra solo en aquellos perfiles en los que cuentan con espesores considerables.

Perfil geoelectrico WE-05

Con rumbo general WE éste perfil se conforma por los TEM'sBS-28, BS-14, BS-10, BS-06 Y BS-02 (Figura 28), y se ubica en la parte norte de Puerto Libertad. La interpretación de los datos geofísicos TEM permitió diferenciar 2 unidades geoelectricas principales: la unidad 1 (a) y (d) que se detectó claramente, mientras que la unidad 3 (a) se detectó con un grado de fracturamiento. El límite entre las unidades superior e intermedia se considera como contraste entre el acuífero de agua dulce y la intrusión de

agua de mar. El límite se sitúa en el interior de una secuencia litológicamente homogénea y por tanto, corresponde a un contraste de salinidad.

La unidad 1(a) ocurre a lo largo de todo el perfil y se presenta con espesores muy constantes entre 140 y 150 m, en el TEM BS-10 su espesor aumenta hasta 190 m. La zona saturada con agua salina disminuye su espesor en el TEM BS-02, tiene espesores de 120 m. se observa una variación en el TEM BS-28 ya que se encuentra una capa con un espesor de 90 m de la unidad 1 (b) identificada como material granular saturado con agua salobre. La unidad 1 (d) tiene espesores que van de 295 m (BS-14) a 430 (BS-10 y BS-14) y hasta 530 m (BS-02 y BS-28). La unidad 3 (a) corresponde al basamento que en esta cuenca consiste de rocas graníticas fracturadas y se encuentra a diferentes profundidades, desde 295 m (BS-14) hasta 530 (BS-28 y BS-02).

La existencia de una franja de mezcla entre el agua dulce, arriba, y el agua salada, abajo, podría ser erróneamente interpretada como un cambio en la litología. Este fenómeno debería tenerse en cuenta cuando el contraste brusco en la resistividad, que se puede interpretar, sin duda como la interfase, vaya acompañado de un contraste relativamente moderado, localizado varias decenas de metros por encima del primero.

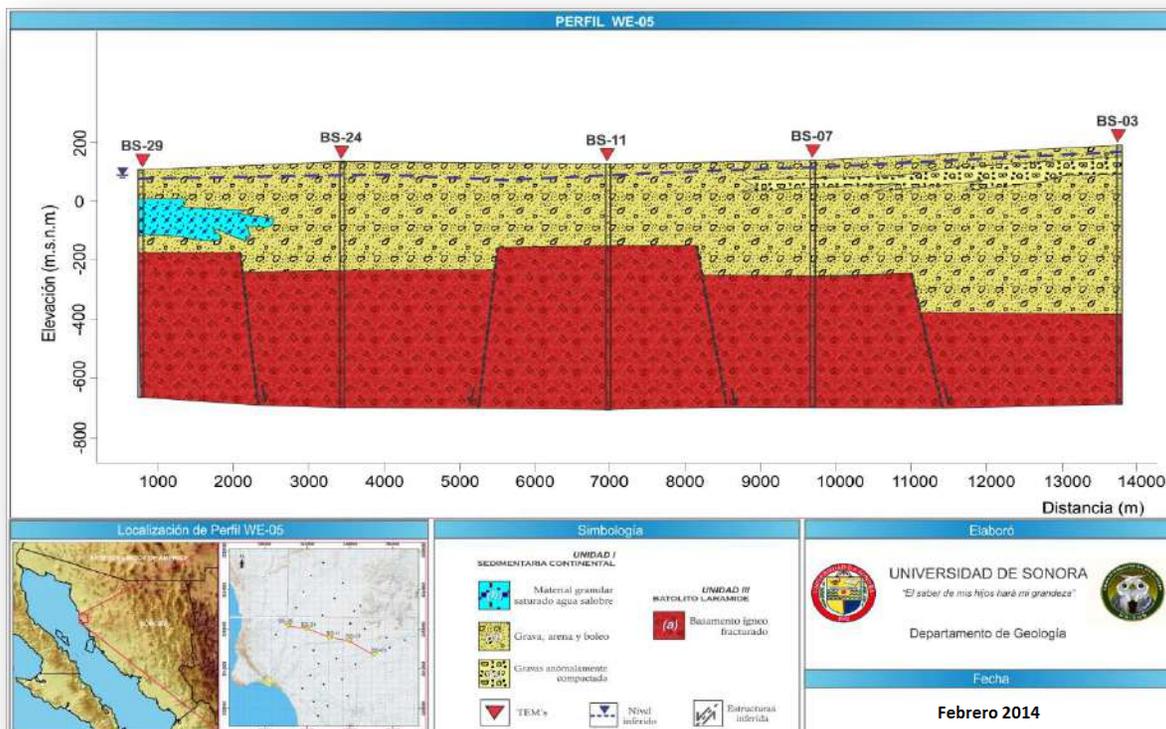


Figura 28 Perfil Geoeléctrico WE-05 acuífero Puerto Libertad.

Perfil geoelectrico SWNE-01

El perfil está conformado por los TEM's: BS-28, BS-29, BS-30, BS-31, BS-32 y BS-33 (Figura 29) con rumbo general SWNE, ubicada en la parte poniente de Puerto Libertad. Se determinaron dos de las tres unidades geoelectricas: sedimentario detrítico continental (1) y Batolito Laramide (3). La unidad 1 (a) comprende la zona de intrusión salina con espesor de 140 m a una profundidad de 70 m, ubicada en el TEM BS-28. La unidad 1 (b) en los TEM BS-28 y BS-29 consiste de un material granular saturado de agua salobre con un espesor de 90 y 120 m respectivamente. La unidad 1 (c) en los TEM BS-30, BS-31 que ocurre a partir de los 171 m y hasta la parte más inferior del perfil (aproximadamente a 228 m), de igual manera se presenta someramente en los TEM BS-32 y BS-33 con un espesor de 133 y 146 m. La unidad 1 (d) es representada por grava, arena y boleó, esta unidad alberga la zona saturada de agua salobre y agua salina, en el TEM's BS-28 con un espesor de relleno de hasta 500 m y en el TEM BS-31 se encuentra un espesor de 680 m. La unidad 3 (a) roca ígnea fracturada muestra la presencia de un bloque que representa un alto estructural, pero que no modifica la forma de la zona de intrusión salina. En el perfil se definieron fallas normales con rumbo NW-SE y visible entre los TEM's BS-29 y BS-30.

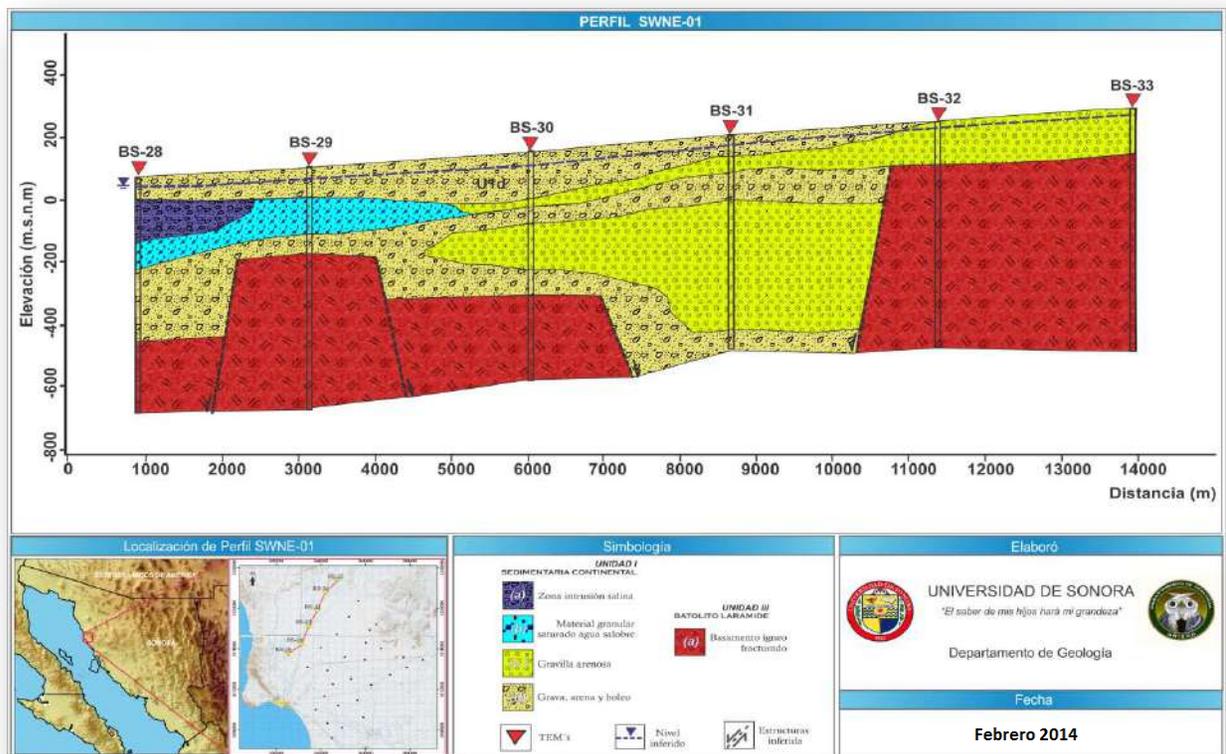


Figura 29 Perfil Geoelectrico SW NE-01 acuífero Puerto Libertad.

Perfil geoelectrico SWNE-03

El perfil está conformado por los TEM´s BS-10, BS-11, BS-12, BS-13 Y BS-09 (Figura 30), tiene un rumbo general SWNE y se ubica al norte de Puerto Libertad. En ella se identificaron dos de las tres unidades geoelectricas: sedimentario detrítico continental (1) y Batolito Laramide (3). La unidad 1 (a) (zona de intrusión salina), solo se encuentra en el TEM BS-10 con un espesor de 190 m a una profundidad de 85 m. La unidad 1 (d) representada por grava, arena y boleó se observa homogéneamente en casi todo el perfil con un espesor de 428, 270 y 214 m en los TEM BS-10, BS-11 y BS-12, respectivamente, la cual se encuentra saturada y que evidentemente muestra un control litológico. La unidad 3 se identificó a profundidad a lo largo de todo el perfil, solamente en los TEM BS-13 y BS-09 se observa aflorando en superficie y pone en evidencia su permeabilidad baja y propiedades hidráulicas de poco potencial. Se observa entre los TEM's BS-12 y BS-13 una estructura de rumbo NWSE, poniendo en contacto la secuencia detrítica continental con el intrusivo.

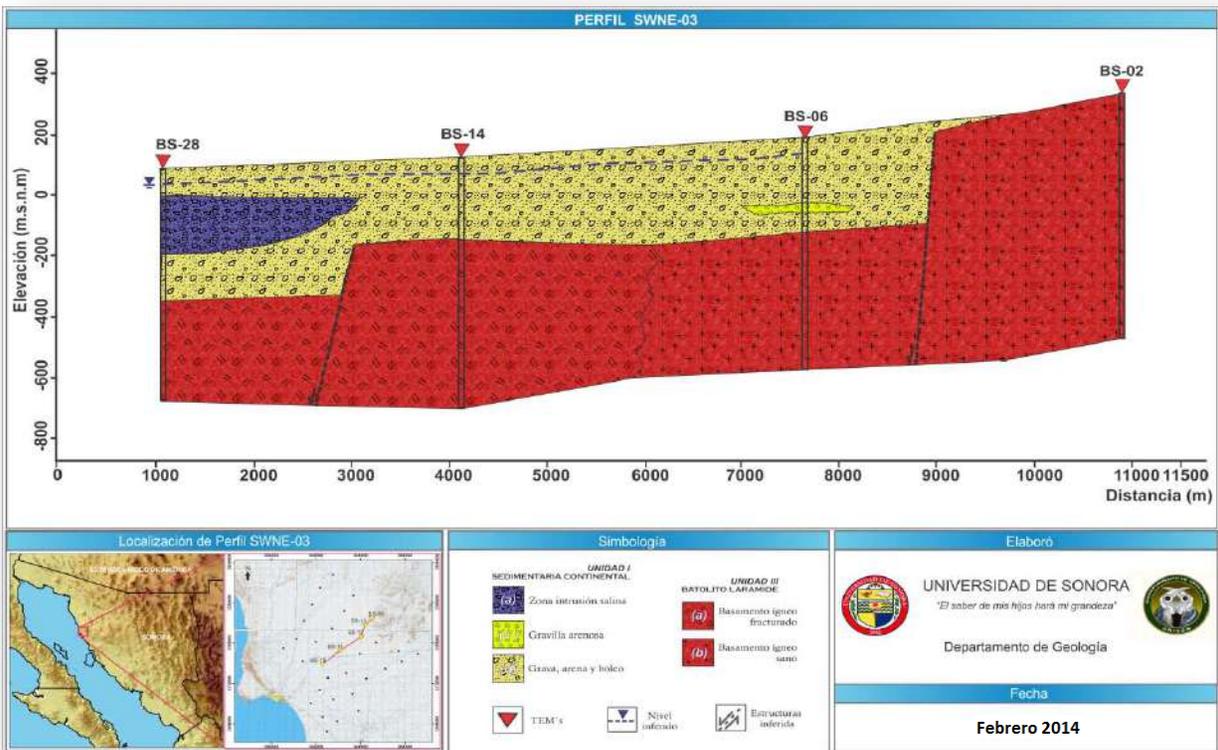


Figura 30 Perfil Geoelectrico SW NE-01 acuífero Puerto Libertad.

Perfil geoelectrico SWNE-05

Este perfil lo conforman los TEM's BS-16, BS-22, BS-01, BS-02, BS-03, BS-20, BS-04 Y BS-21 (Figura 31) y tiene un rumbo general SWNE que se ubica al este de Puerto Libertad y sigue el cauce del río El Dátil. Fueron identificadas dos de las tres unidades: sedimentario detrítico continental (unidad 1) y Batolito Laramide (unidad 3). La unidad I (d) está presente en casi todos los TEM's menos en el TEM BS-20 donde se encuentra aflorando la unidad 3 (a), mientras que la unidad I (d) forma la cobertura sedimentaria del sustrato rocoso, que permite la infiltración hacia las unidades inferiores, la cual posee la unidad 1 (a), zonas de saturación a lo largo de todo el perfil mediante un control litológico donde se pueden observar variaciones en el espesor de la zona saturada de agua salobre y de agua salina, las cuales están en niveles permeables puestos a distintos niveles debido a un fallamiento de rumbo NW-SE entre los TEM's BS-22 y BS-02 delimitando un bajo estructural en el TEM BS-01 (fosa tectónico-estructural) que aumenta el espesor de la zona saturada.

Este fallamiento demuestra la presencia de control litológico para la intrusión salina, la cual fue identificada en los TEM's BS-16 y BS-22, con profundidades entre los 200 y 47 m con un espesor de 200 y 95 m. La unidad 3 (b), en el TEM BS-22 se muestra como una barrera hidrogeológica que impide el paso de la intrusión al continente.

Se puede observar claramente la presencia de un amplio frente de intrusión salina clásico de materiales granulares saturados con agua salada. El frente de intrusión presenta una distribución irregular en forma de lenguas hasta una distancia de la línea de costa del orden de los 12 kilómetros. La interpretación de este perfil muestra claramente el desarrollo de un canal preferencial de intrusión salina hacia el continente a lo largo del río El Dátil.

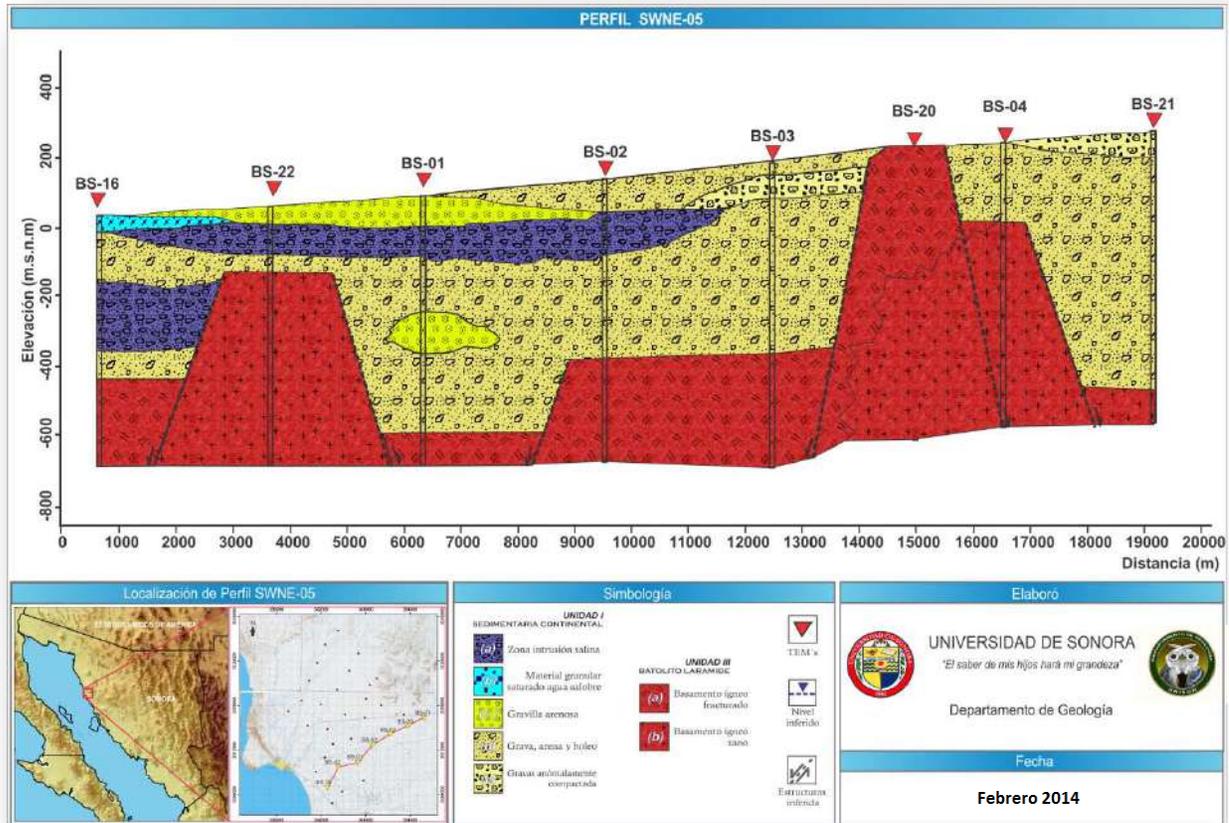


Figura 31 Perfil Geoelectrico SW NE-05 acuífero Puerto Libertad.

IV.2 CONFIGURACIONES DE LA GEOMETRÍA Y CAMBIOS ASOCIADOS A PRESENCIA DE AGUA SUBTERRÁNEA (CASO PUERTO LIBERTAD).

IV.2.1 Modelos de penetración del frente de intrusión

IV.2.1.1 Localización y caracterización de cuña de intrusión marina

En los últimos años se han venido realizando trabajos de investigación de la intrusión marina en distintos puntos de la geografía costera mexicana, con múltiples fines y empleando muy variados métodos prospectivos, desde los estrictamente geofísicos hasta el estudio mediante sondeos de manera exclusiva. En ocasiones también se han combinado estudios mediante perforaciones y prospección geofísica de superficie.

En unos casos se ha perseguido la definición de la cuña de intrusión marina en cuanto a la determinación del alcance de la misma tierra adentro. En otras ocasiones, ya identificada ésta, se ha buscado controlar de forma periódica su evolución y la posición de la interface, entendiéndose por este concepto, como la franja costera donde se forma una

zona de mezcla de agua marina que ha penetrado y alcanzado el agua subterránea dulce continental para formar agua subterránea salobre. En la mayoría de los casos han existido perforaciones en las cuales se ha observado la evolución de la calidad del agua dulce hacia su degradación incrementando la presencia de sales, y en tales pozos se ha podido realizar mediciones para obtener parámetros físico químicos con los cuales correlacionar la información geofísica.

El propósito principal de la prospección se centra en determinar la geometría de la interface, con la obtención de los espesores donde la lámina de intrusión marina ha tenido mayor desarrollo. Para alcanzar este objetivo se realizó una investigación mediante perfiles, tanto en dirección paralela como perpendicular a la línea de costa. La razón de este tipo de investigación es que con los perfiles, al ser una sección en dos dimensiones del terreno, se podría determinar la potencia de este acuífero contaminado por la intrusión por agua marina y correlacionar con la hidráulica del sistema sobre su posible salda del acuífero hacia el mar.

El comportamiento litológico del subsuelo dentro del área de estudio se obtuvo con la ejecución de prospección geofísica empleando sondeos electromagnéticos. Para determinar la geometría, hidrogeofísica e hidrodinámica de los materiales de relleno, se configuraron dos tipos de planos del frente de intrusión marina con la resistividad del medio saturado.

- 1.- Con la primera configuración se tomó la cima de la intrusión.
- 2.- Con la segunda configuración se tomó la base de la intrusión.

En la Figura 32 se muestran con triángulos, los TEM's en los que fue detectada la intrusión de agua salada, llegando hasta una distancia de 10 km de la línea de costa. La profundidad a la que fue detectada varía entre 46 y 85 m, inclusive se detectó en la zona donde fue perforado el pozo CIBNOR-1, sin embargo la profundidad de esta captación es solo de 100 ft (30.48 m), por lo que de haber sido más profunda, habría encontrado agua salada.

Analizando los modelos de intrusión marina generados, se observa que la dirección de la intrusión es perpendicular a la línea de costa, y se manifiesta en la unidad granular.

Se interpretó la profundidad al basamento hidrogeológico del área, el cual se asume está formado por rocas predominantemente ígneo-metamórficas, y cuya geometría resultante establece la presencia de tres fosas dentro del área de estudio. La roca granítica de la unidad KsTpa Gr-Gd es una barrera hidrogeológica cuando se

encuentra poco fracturada, de manera que la intrusión se ve obligada a rodear a la unidad.

Fosa 1.- Es la más importante de ellas por su extensión, se ubica en la parte centro – suroeste y se extiende aproximadamente por 15 km de longitud (Figura 33). Es paralela a la línea de costa con una orientación NNW-SSS y a unos 7 km distancia perpendicular a la misma. Ésta fosa empieza a partir de 2.5 km de la playa, y cuenta con tres depresiones de importancia: en la parte noroeste alcanza 500 m de profundidad, en la parte central hasta 800 m y en la porción sureste 700 m.

Las Figuras 33 a la 35, muestran el comportamiento en tres dimensiones de la intrusión salina, con respecto al basamento impermeable. En ellas se incluye la configuración del basamento. En la Figura 33 se muestra una vista hacia el noroeste de la configuración del basamento y de la intrusión, la cual se encuentra a 46 m de profundidad, y cuenta con un espesor máximo de 200 m.

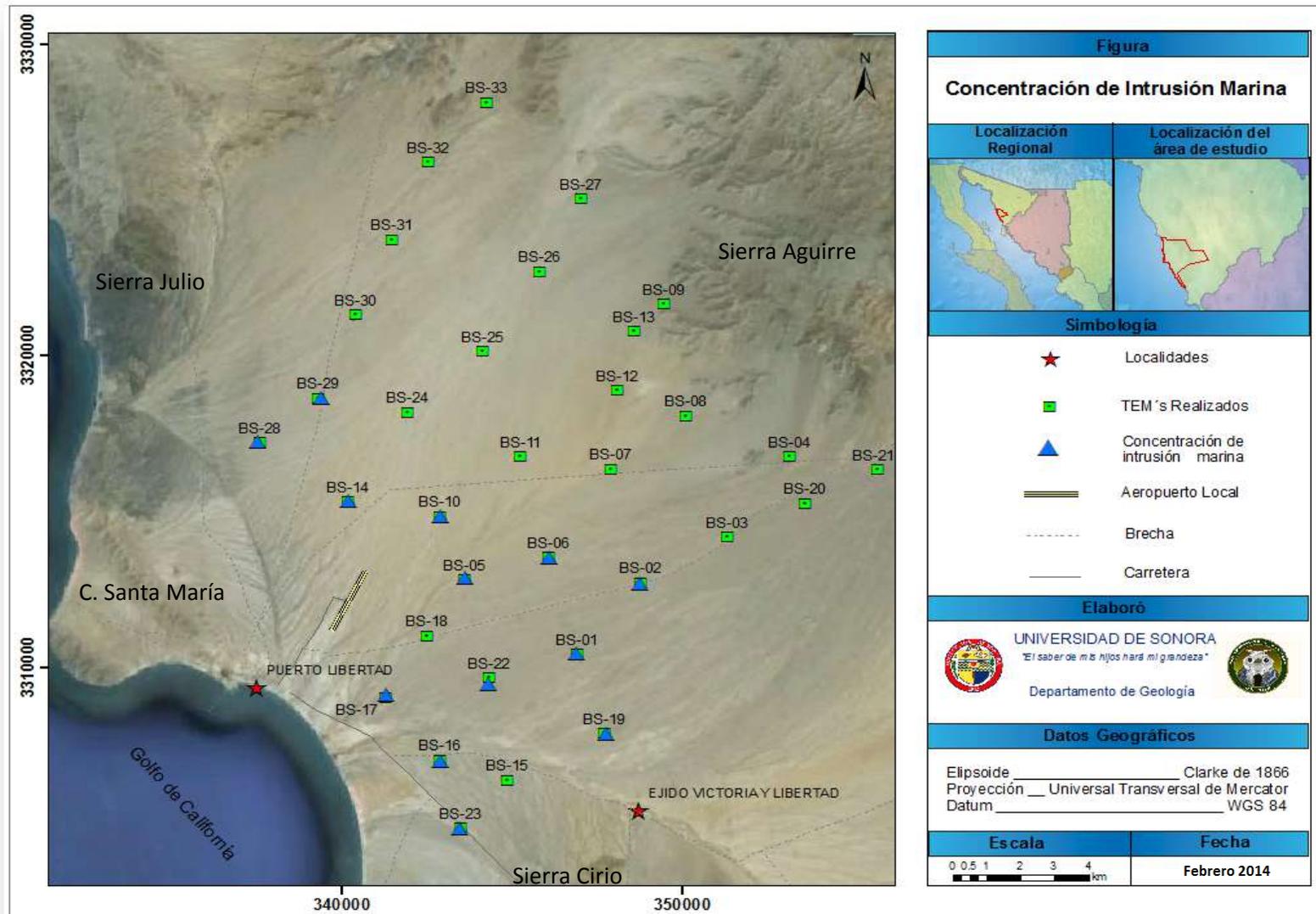


Figura 32 Concentración de la intrusión salina acuífero Puerto Libertad.

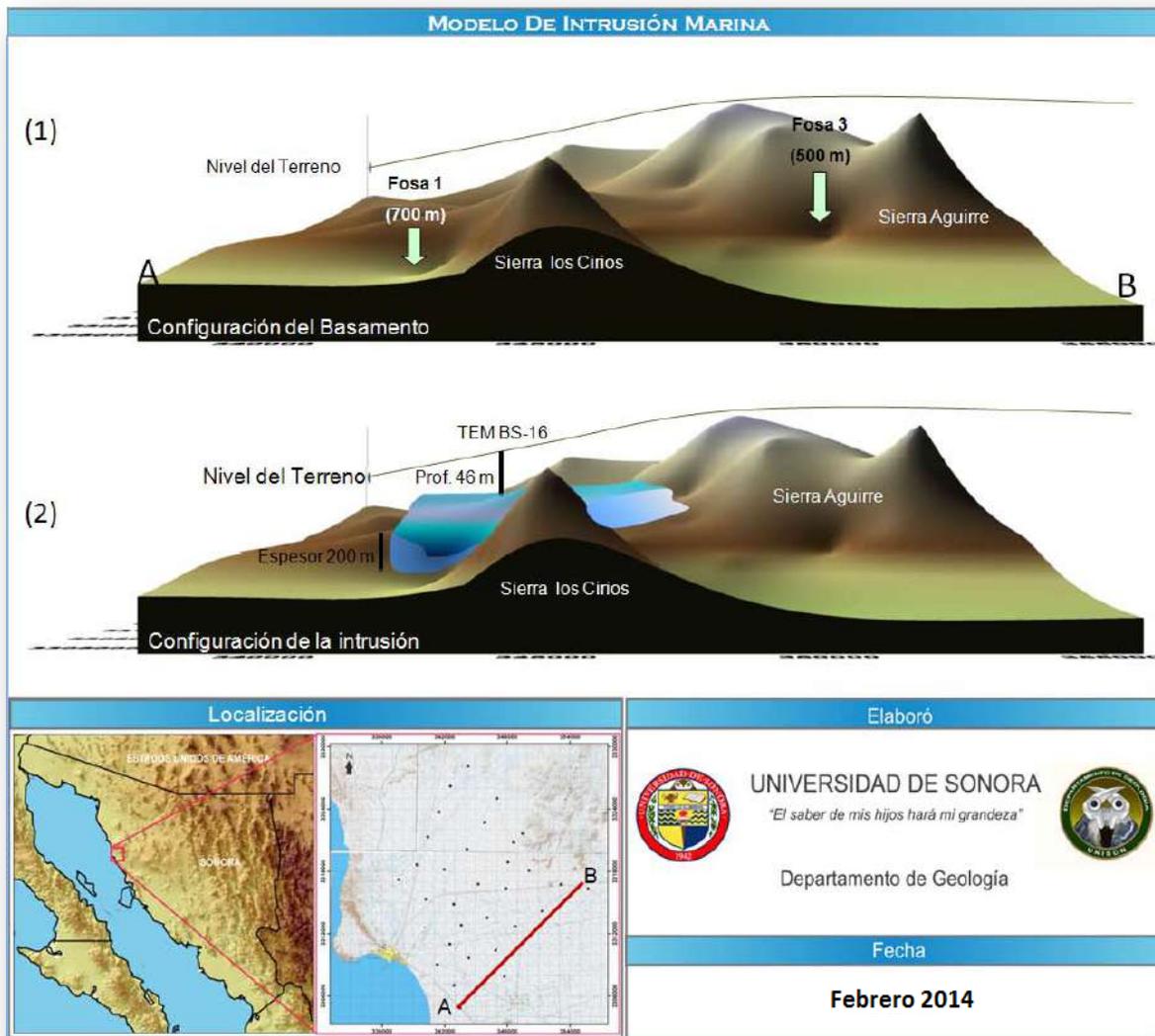


Figura 33 Configuración del basamento (1) y la intrusión salina (2), vista hacia el NW acuífero Puerto Libertad.

Fosa 2.- Se localiza en la porción noroeste del área de estudio, al sur del cerro Libertad y al oeste de la sierra de Aguirre. Su extensión es de aproximadamente 30 km² y alcanza una profundidad máxima de 700 m (Figura 33).

La Figura 34, tiene vista hacia el noreste, donde se observa a la pluma de intrusión ingresando por el costado noroeste del Cerro Santa María (perpendicular a la imagen), el cual está formado por roca granítica sana. La profundidad a la franja de agua salada es de 70 m en esta porción del área, con un espesor de 140 m.

Se observa la pluma de intrusión salina entrando por el lado de la costa (lado derecho de la imagen). La vista es hacia el sureste, y la profundidad a la franja de agua salada es de 85 m, y alcanza un espesor de 140 m.



Figura 34 Configuración del basamento (1) y la intrusión salina (2), vista hacia el NE acuífero Puerto Libertad.

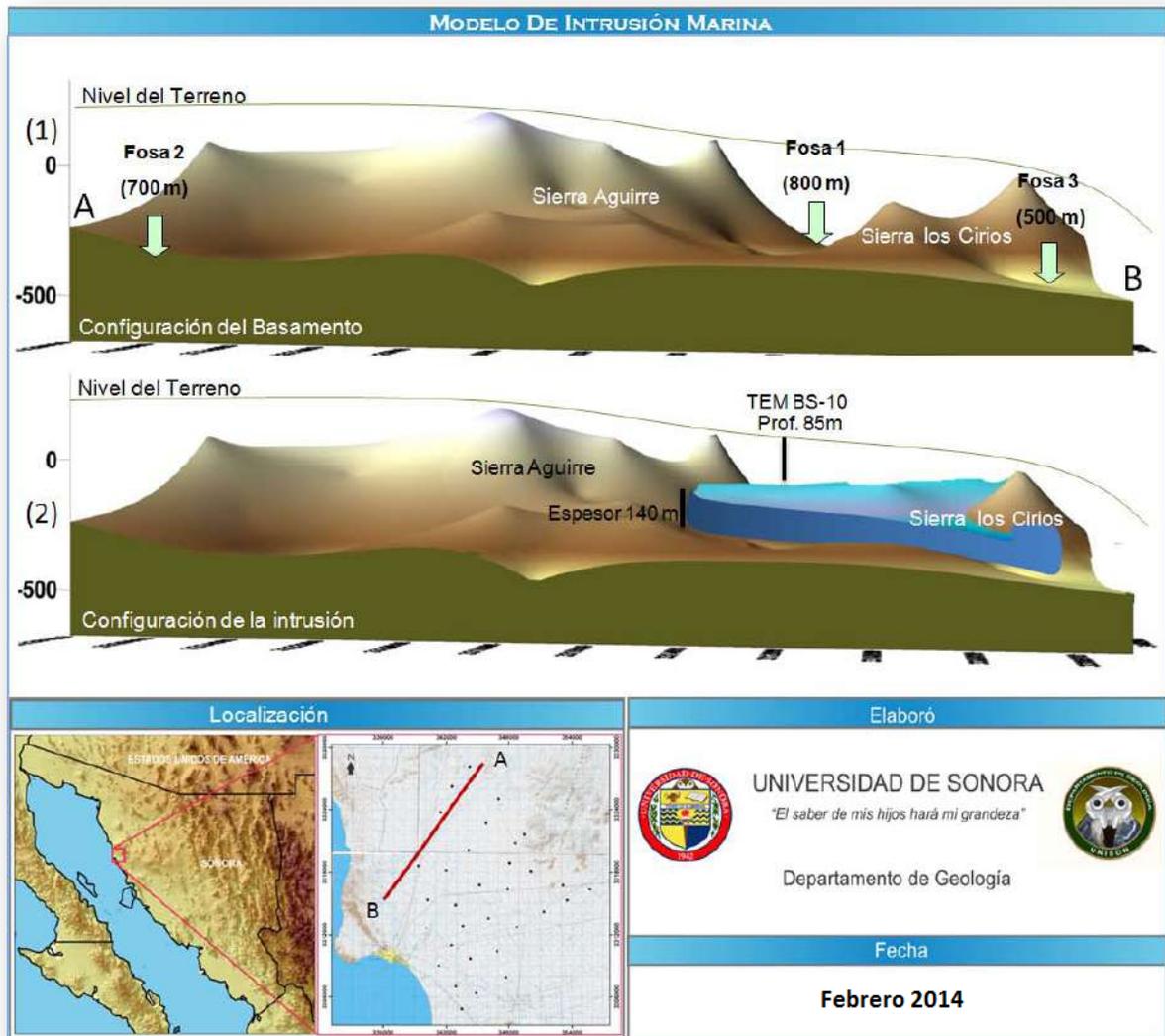


Figura 35 Configuración del basamento(1) y la intrusión salina(2), vista hacia el SW acuífero Puerto Libertad.

Fosa 3.- Se encuentra al sur de la sierra de Aguirre, en la porción este del área. Su extensión es pequeña, pues abarca aproximadamente 16 km². Para esta fosa se interpretan 500 m de profundidad (Figura 35)

Lo que se observa en la Figura 36, es una vista hacia el nor-noroeste del comportamiento de la intrusión salina con respecto al basamento rocoso. En ella se muestra la penetración del agua de mar por el flanco noroeste de la sierra Los Cirios. La profundidad a la que se encuentra el agua salada en esta sección, es de 57 m, presentando un espesor saturado de la pluma de intrusión de 160 m.

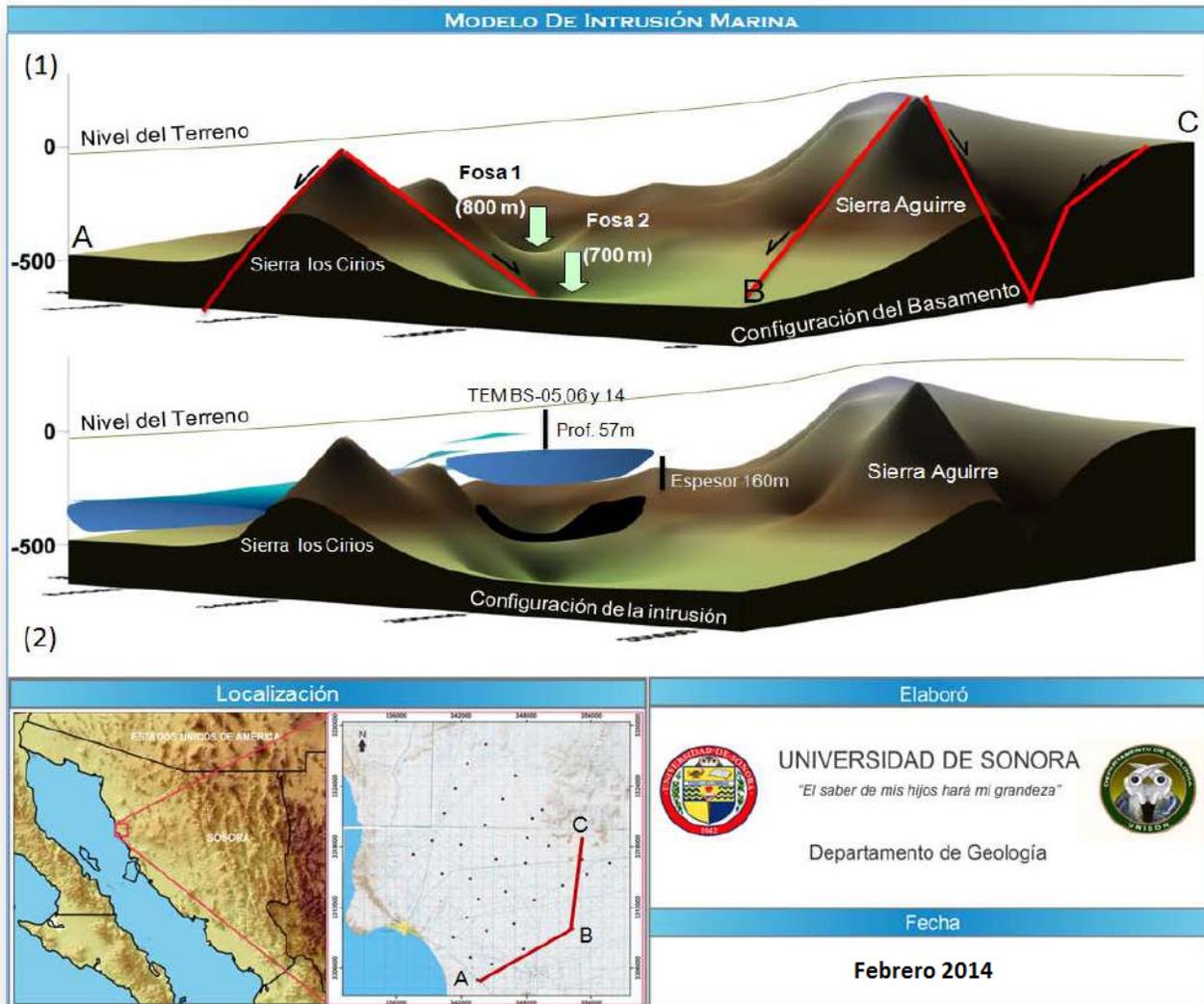


Figura 36 Configuración del basamento (1) y la intrusión salina(2), vista hacia el N-NW acuífero Puerto Libertad.

La Figura 36 proporciona una vista hacia el noroeste de la configuración del basamento. En esta imagen se muestra la interpretación de algunas fallas normales, con el fin de mostrar el sistema estructural que predomina en el sitio y generalizado al estado de Sonora, como producto del evento tectónico distensivo del Terciario, que originó la serie de cuencas y sierras paralelas (*Basin and Range*). En esta vista se observan dos de las depresiones que forman a la fosa principal (Fosa 1).

A diferencia de las anteriores configuraciones de la intrusión salina, la Figura 37 presenta una vista aérea, aproximadamente a 45°, de manera que se obtiene una visión más regional y completa. En ella se muestran dos zonas con presencia de agua

salada, que corresponden a dos de las tres fosas principales que se encuentran en el área. En la figura se indica un parteaguas subterráneo, formado por las diferentes elevaciones entre dos centros de máxima depresión al interior de la Fosa 1, así como las dos entradas principales de agua de mar: una de ellas ubicada en el flanco noroeste de la Sierra Los Cirios (alrededor del poblado de Puerto Libertad), y la otra también en el flanco noroeste pero del cerro Santa María.

En la Figura 37 se muestra una vista aérea hacia el noreste, donde aparece la ubicación de las fosas 1 y 2.

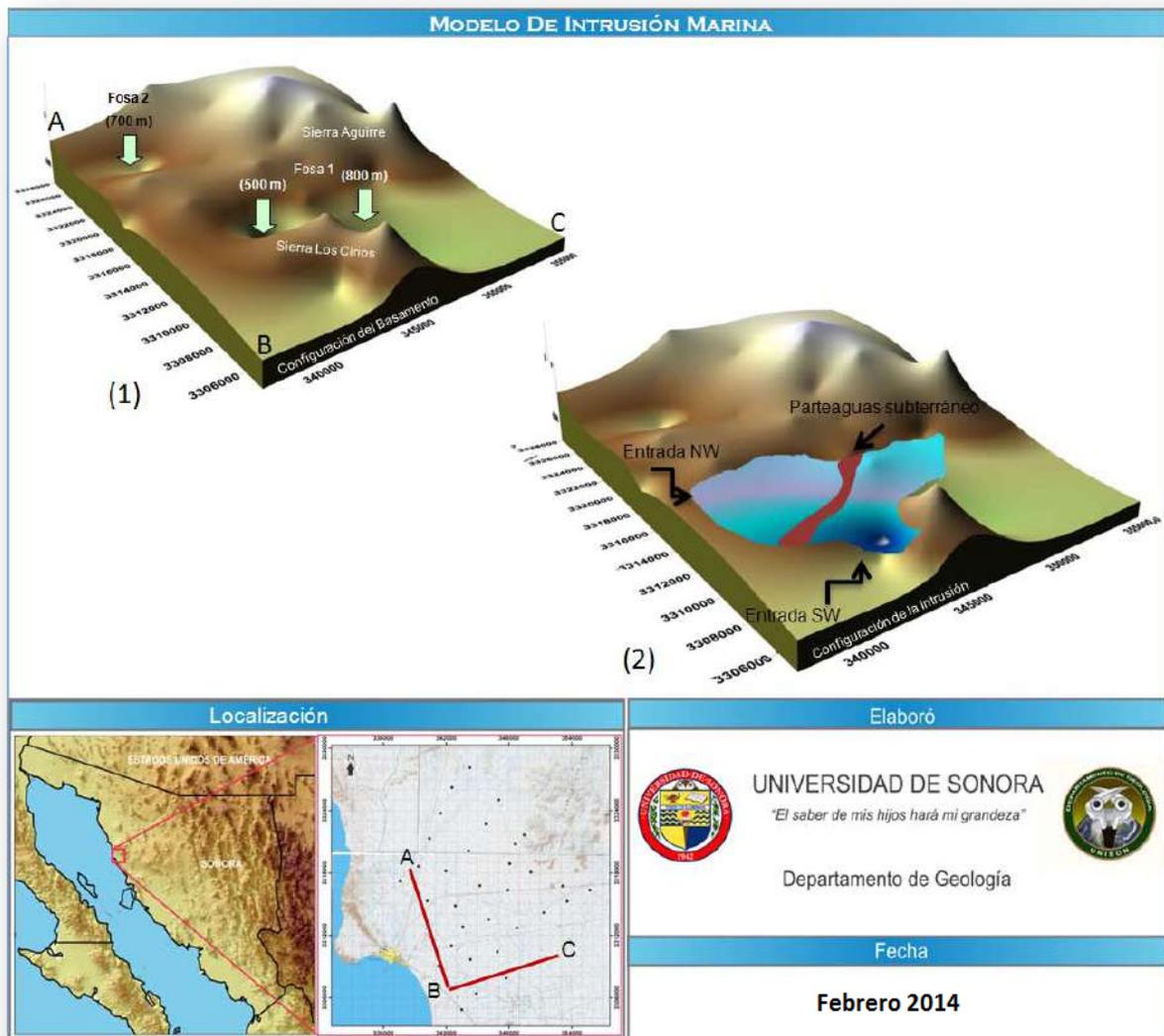


Figura 37 Configuración del basamento (1) y la intrusión salina (2), vista aérea a 45°. acuífero Puerto Libertad.

La Figura 38 muestra la distribución espacial de las tres fosas, incluyendo las profundidades en algunos puntos y la dirección de la pendiente (dirección de la profundidad al basamento).

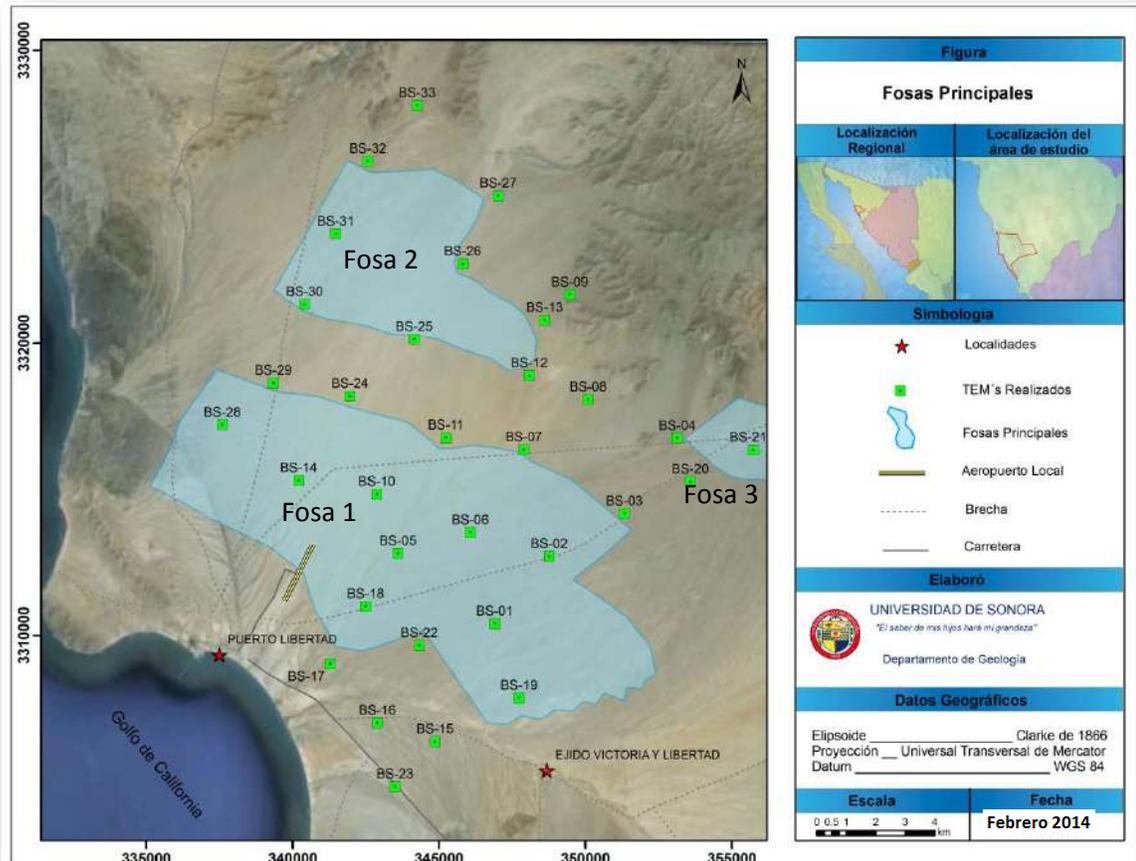


Figura 38 Fosas principales acuífero Puerto Libertad.

IV.3 ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS DEL SUBSUELO Y ZONAS DE FRACTURAMIENTO

El sistema estructural de fosas y pilares es característico porque define fisiográficamente sierras y valles paralelos, que en superficie constituyen grandes planicies y en el subsuelo son zonas que semejan grandes canales rellenos de sedimentos detríticos no consolidados, por donde es posible que exista de forma natural el ingreso de un frente de intrusión marina. Por otro lado, los pilares son altos gravimétricos de rocas graníticas o metamórficas que forman lomeríos de baja altura y en el subsuelo actúan como barreras a la penetración de agua marina, como es el caso del cerro El Peñasco (sierra los Cirios) en esta localidad.

En la Figura 39 se muestran las principales estructuras encontradas con el análisis geofísico, de donde se desprenden dos familias principales: (a) La más antigua con dirección noroeste–sureste, y (b) la segunda que corta a la primera, en dirección noreste–suroeste. También se incluyen las estructuras presentadas en las carta geológicas escala 1:250 000 (H12-4 y H12-7) realizadas por el Servicio Geológico Mexicano.

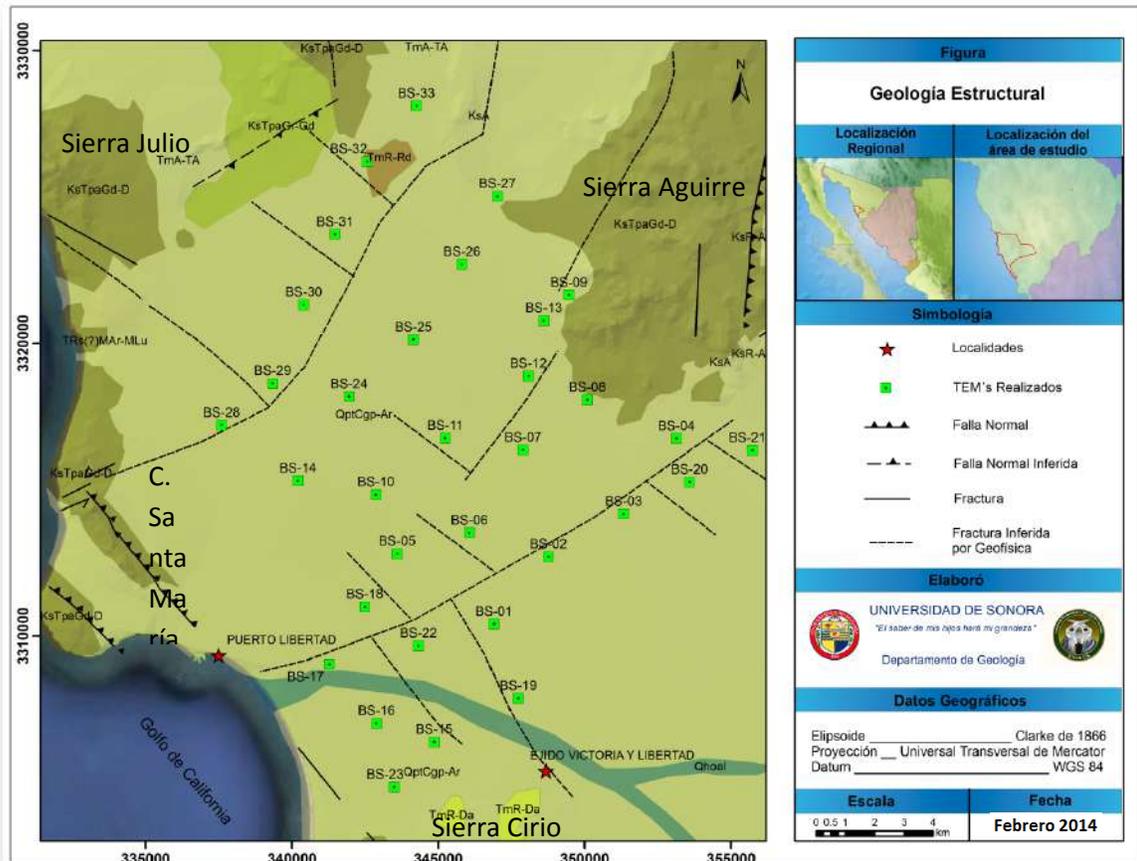


Figura 39 Estructuras inferidas con geofísica en este estudio (planicie) y en negro estructuras por el SGM. Acuífero Puerto Libertad.

Con este estudio se definieron tres tipos de basamento, clasificados de acuerdo a su grado de fracturamiento: 1) basamento con alto grado de fracturamiento, 2) basamento con fracturamiento moderado, y 3) basamento sano. El primero se considera de mayor importancia desde el punto de vista hidrogeológico, por ser el de mayor permeabilidad, ya que en muestra del pozo CIBNOR1, se observa el granito prácticamente triturado y convertido en una arena de textura gruesa.

La zona de alto fracturamiento se presenta de forma alargada con dirección noroeste – sureste, con una longitud de 15 km y una anchura de 3 km, y se ubica en la parte central del área de estudio (Figura 40). La zona con fracturamiento moderado se encuentra unida a la zona anterior por el margen noreste, y presenta dimensiones similares. También se encontró roca de este tipo al límite sur del área, a 2 km de la línea de costa. La zona con el basamento sano, se presenta en contacto por el lado noreste, con las dos zonas con fracturamiento moderado, al pie de la sierra de Aguirre, del cerro Libertad y de la sierra Cirios, los cuales están ubicados en la parte norte y sur del área, respectivamente. La roca zona sana es de suma importancia hidrogeológica pues actúa como barrera impermeable que impide el intercambio de agua salada del mar y agua dulce del continente.

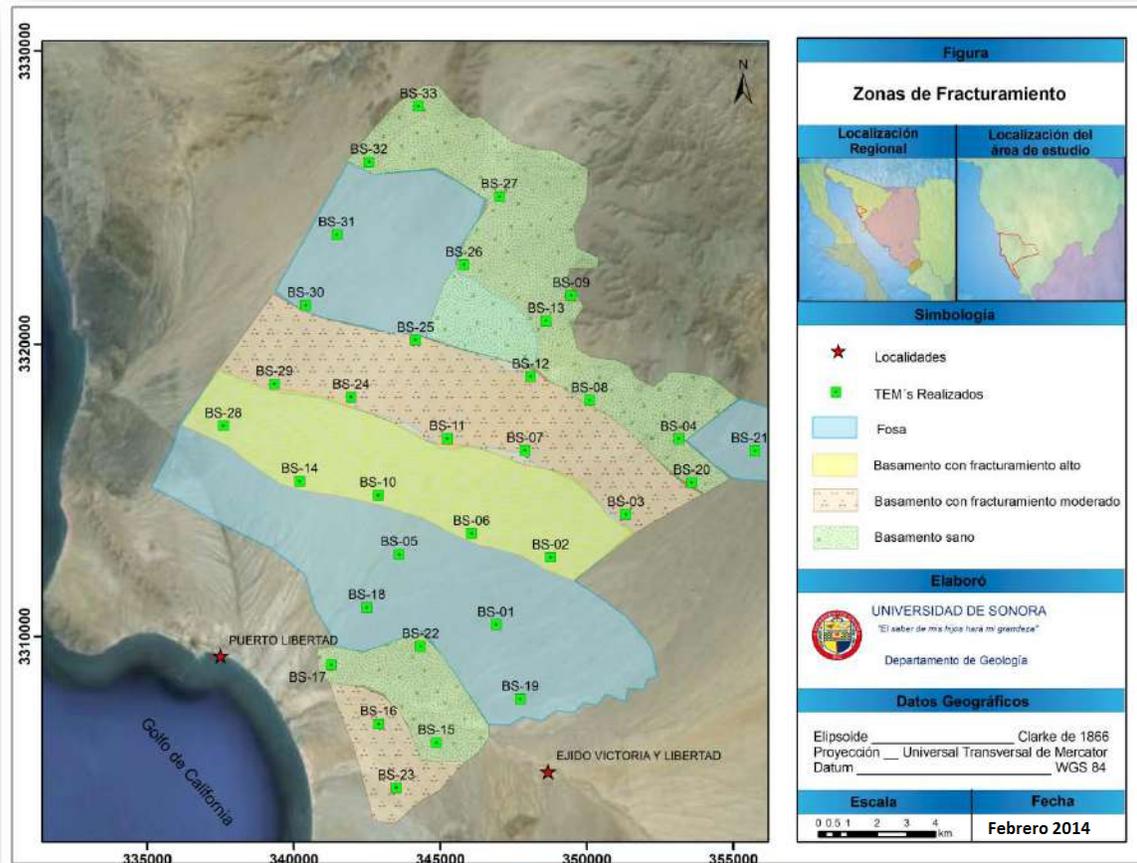


Figura 40 Definición de las zonas de fracturamiento acuífero Puerto Libertad.

IV.4 MODELO GEOLÓGICO CASO ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD

El modelo geológico del acuífero Puerto Libertad está controlado principalmente por la tectónica de la región, lo cual se evidencia por el lineamiento en sus estructuras.

En el área del acuífero, se tienen una serie de elementos estructurales importantes como son fallas, lineamientos y foliación. El fallamiento presenta un patrón de estructuras regionales bien marcado, con una orientación preferencial NW-SE, que la mayor parte de las veces corresponde a fallas normales de ángulo alto con buzamientos al NE y al SW. Estas estructuras producen sierras paralelas a la orientación de las fallas, dando como resultado un sistema de bloques levantados y hundidos tipo horst y graben que se relacionan a la tectónica extensional cenozoica. La falla Libertad, que limita los bloques levantados o pilares tectónicos de las sierras Cirio y Tordilla en Sonora, y Sierra Menor y Kunkaak en la Isla Tiburón, es producto de dicha tectónica distensiva.

Existe un segundo sistema de fallas y lineamientos de orientación NE-SW que ocurre principalmente hacia la porción oriental. Éstas estructuras cortan a las de orientación NW-SE, por lo tanto son más jóvenes y posiblemente forman parte del sistema de fallas transformes responsables de la apertura del Golfo de California. Éstas estructuras tienen sus mayores expresiones en la costa de Sonora, sobre todo en las sierra Cirios.

En la Sierra Cirios se encuentra en contacto tectónico por falla normal entre el Batolito Laramide y las rocas volcánicas ácidas del Mioceno; y al sur de la Sierra Aguirre está cubierta por grava y arena del Pleistoceno. Cooper y Arellano (1946) identificaron rocas del Triásico Superior-Jurásico con base en fósiles identificados por Perrin Smith (González, 1980). Después, Doger (in González L.C., 1980) consideró que la edad podía llegar hasta el Jurásico medio. Posteriormente, González, (1980) las consideró Triásico Superior-Jurásico Inferior, sin embargo recientemente el mismo autor y otros más han definido una edad Pérmico superior-Jurásico inferior para esta formación considerando la edad de fósiles colectados en la localidad tipo de la sierra El Álamo.

Las rocas intrusivas representadas por las unidades **KsTpa Gr-Gd** y **KsTpa Gd-D**, las cuales están constituidas por granodiorita, granito, cuarzomonzonita, gabro, diorita, y pórfidos andesítico y riódacítico, afloran extensamente formando parte de las sierras de Aguirre, Julio y en la región costera. Éstas unidades han sido fechadas con edades que varían de 64.3 ± 2 Ma (Damon et al, 1983) hasta 80.9 ± 1.8 Ma (De Jong, 1988).

En el Mioceno continúa el volcanismo intermedio representado por las unidades **Tm A-TA**, fechadas en 14.0 Ma. (Gastil, 1977), las cual esse tienen en pequeños afloramientos aislados hacia la región costera. Posteriormente se tienen coladas, derrames y flujos riolíticos y riodacíticos de la unidad **Tm R-Da**, fechadas por Gastil (1977) en 12.7 Ma. Los afloramientos se encuentran en la porción central sur, en la sierra Picú.

Del Cuaternario se tienen depósitos semi-consolidados y no consolidados de pie de monte, relleno de planicies y rellenos aluviales, representados por las unidades **Qptgv-ar**, **Qhoar-lm** y **Qho al**.

La unidad **Qptgv-ar** se encuentra constituida por sedimentos de naturaleza litológica variable, que granulométricamente consisten en grava, arena, limo y arcilla, que localmente presentan estratificación débilmente marcada, aunque la mayor parte de las veces se presenta en forma masiva. Estos depósitos se encuentran cubriendo discordantemente a las unidades preexistentes rellenando depresiones y cuencas actuales, y son considerados de edad Pleistoceno Tardío. Los espesores aproximados son de 300 a 700m, los cuales se incrementan hacia el centro del área de estudio.

En el modelo geológico de la Figura 41, se muestra el comportamiento estructural clásico de las cuencas producto de la distensión terciaria, con estructuras de orientación NW-SE, que corresponden a fallas normales de ángulo alto con buzamientos al NE y SW, que afectan a las unidades graníticas del Cretácico Superior y volcánicas del Mioceno. También se presentan rocas metamórficas del Triásico como cuerpos colgantes en la parte izquierda superior del modelo. Rellenando las fosas se encuentra el conglomerado polimíctico del Pleistoceno, y sobre el cauce de los arroyos se encuentra sedimentos aluviales del Holoceno.

La interpretación geofísica de las secciones de resistividad permite identificar la presencia del movimiento de un bloque hacia el continente, de tal forma que se interpreta que dicho movimiento se genera a partir fallas de desplazamiento lateral con dirección NE-SW. Ya que no se tienen evidencias de mayor certidumbre, dichas fallas son marcadas en el modelo con interrogantes (?). Sin embargo, estas estructuras pudieran estar asociadas a la actividad transtensional que se desarrolló durante la apertura del golfo de California.

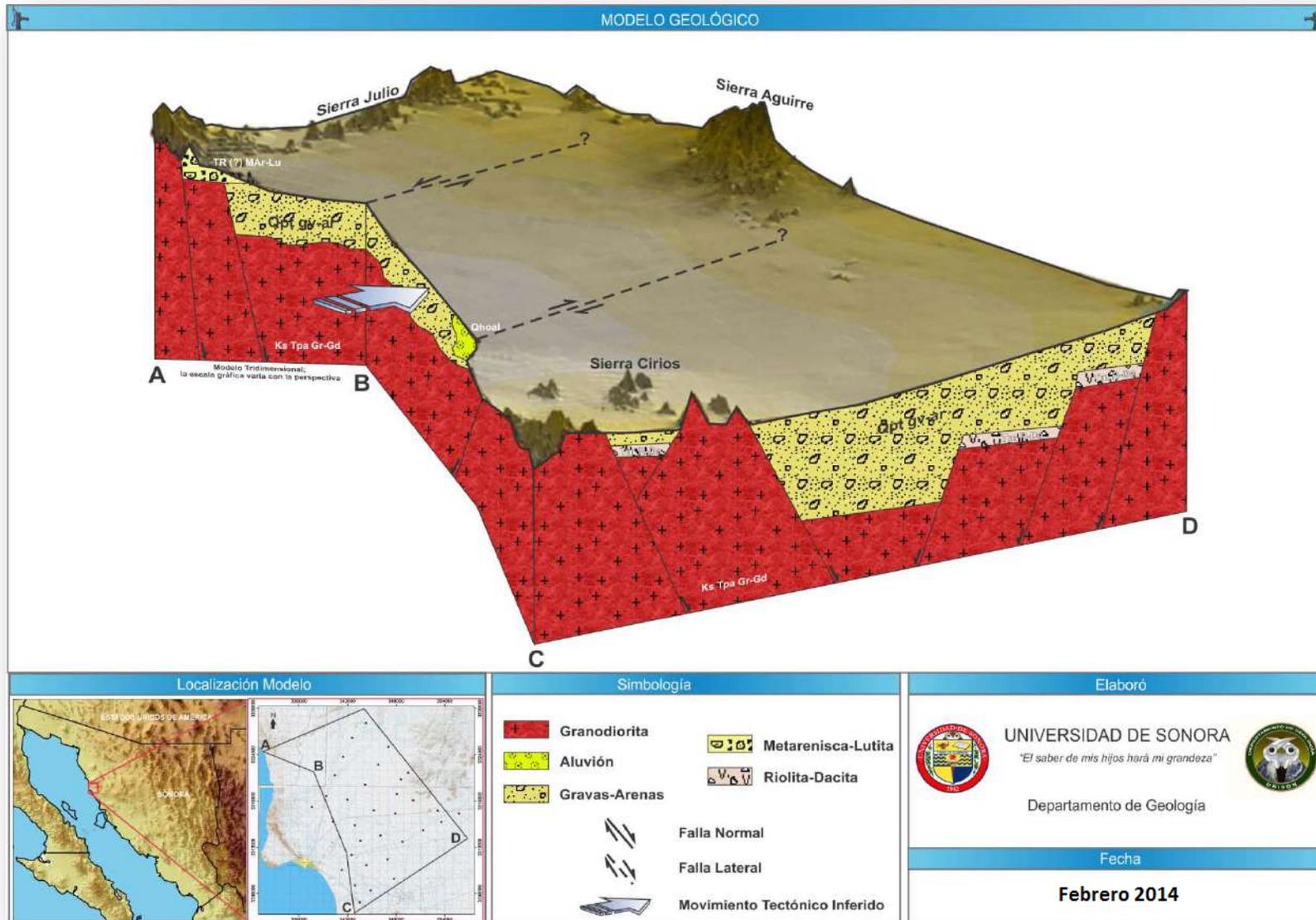


Figura 41 Modelo geológico del acuífero Puerto Libertad.

V. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOFÍSICA

V.1 HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

V.1.1 Censo de aprovechamientos

Fueron censados en campo un total de 26 aprovechamientos de aguas subterráneas, y después de efectuar un análisis de los datos que proporciona el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) y de la información de aprovechamientos muestreados por INEGI, se incluyeron 7 aprovechamientos más. (Figura 42, Tabla 8). De acuerdo a las características constructivas, en el acuífero predominan los pozos (62%) sobre las norias (38%) Figura 43.

Tabla 8 Censo de Aprovechamientos.

CLAVE	X	Y	Z	TIPO
PBL-01	356271.00	3299254.00	169.500	Pozo
PBL-02	353455.00	3303925.00	135.00	Pozo
PBL-03	348601.00	3305590.00	87.00	Pozo
PBL-04	346242.00	3314940.00	112.00	Pozo
PBL-05	343999.86	3308106.57	45.139	Pozo
PBL-06	339625.00	3307834.00	4.00	Noria
PBL-07	363323.54	3334382.33	492	Pozo
PBL-08	360083.71	3327170.74	428.966	Pozo
PBL-09	359540.90	3323253.51	394.044	Pozo
PBL-10	344996.29	3308055.48	56.064	Pozo
PBL-11	346654.30	3306763.01	71.527	Pozo
PBL-12	338487.48	3309033.59	3.66	Noria
PBL-13	366308.69	3321080.37	490	Noria
PBL-14	365213.31	3305694.16	325.53	Noria
PBL-15	377723.15	3310293.80	493.35	Noria
PBL-16	364023.72	3319278.06	451.26	Noria
PBL-17	367182.47	3325879.09	596.36	Noria



Figura 42 Localización de aprovechamientos subterráneos en el acuífero Puerto Libertad.



Figura 43 Tipos de aprovechamientos en el acuífero Puerto Libertad.

De los 26 aprovechamientos considerados, el 46% pertenece a captaciones que se encuentran inactivas (algunas temporalmente y otras abandonadas), siendo éste el de mayor relevancia, seguido del uso pecuario-doméstico (23%) y el uso pecuario (19%). El uso industrial-público urbano abarca el 8% de los aprovechamientos y el 4% restante corresponde al uso público urbano. La Figura muestra una gráfica con la proporción de cada uso.

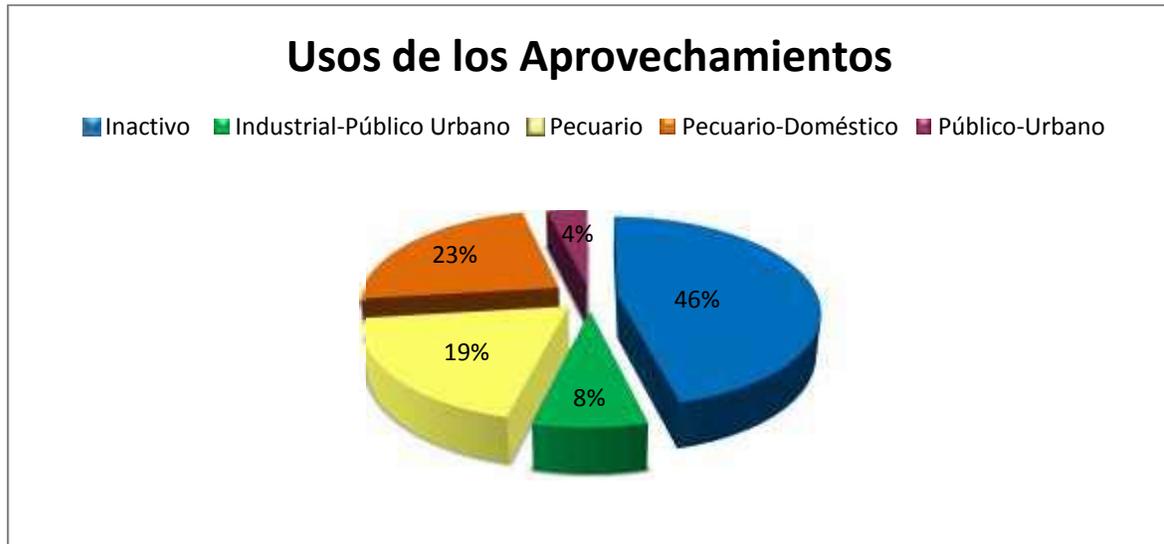


Figura 44 Usos del agua en el acuífero Puerto Libertad (REPDA).

La mayoría de los diámetros de descarga de los equipos de bombeo en los aprovechamientos del acuífero Puerto Libertad son de 1" a 2", ocupando el 27% del total. No se encontraron aprovechamientos con diámetro entre 2 ½", 3" o 4". Las captaciones con descarga entre 6" y 8" son 5, ocupando el 19% del total, y por último se tienen dos aprovechamientos con descarga de 10", que ocupan un 8%. Existen 12 aprovechamientos sin descarga, que constituyen el 46% restante (Figura 45).

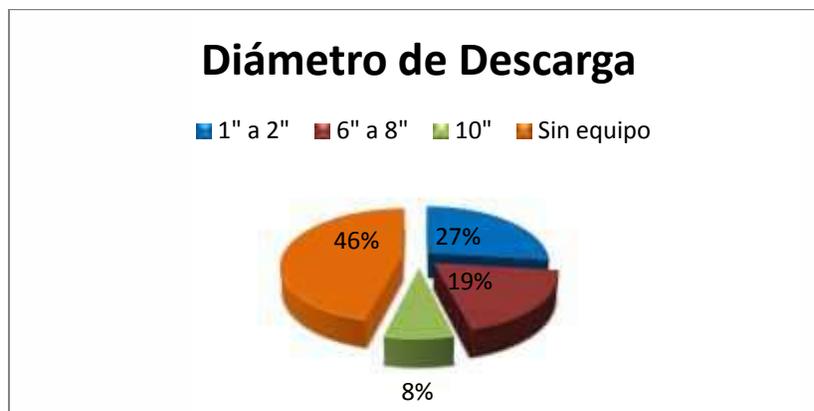


Figura 45 Diámetro de descarga en el acuífero Puerto Libertad.

En lo referente al tipo de bomba con que cuentan los aprovechamientos, el 27% tiene bomba vertical, el 8% operan mediante bomba sumergible, el 34% no cuenta con equipo de bombeo, un 27% tiene bomba manual y el 4% restante tiene bomba centrífuga (Figura 46).



Figura 46 Tipo de bomba en el equipo de extracción de los Aprovechamientos.

El tipo de motor más utilizado en los aprovechamientos del acuífero es el eléctrico (23%); seguido del motor de combustible (8%) y el motor accionado por el viento (8%); el manual con el 27%. La mayoría de los aprovechamientos se encuentran sin motor, comprenden el 34% restante (Figura 47).

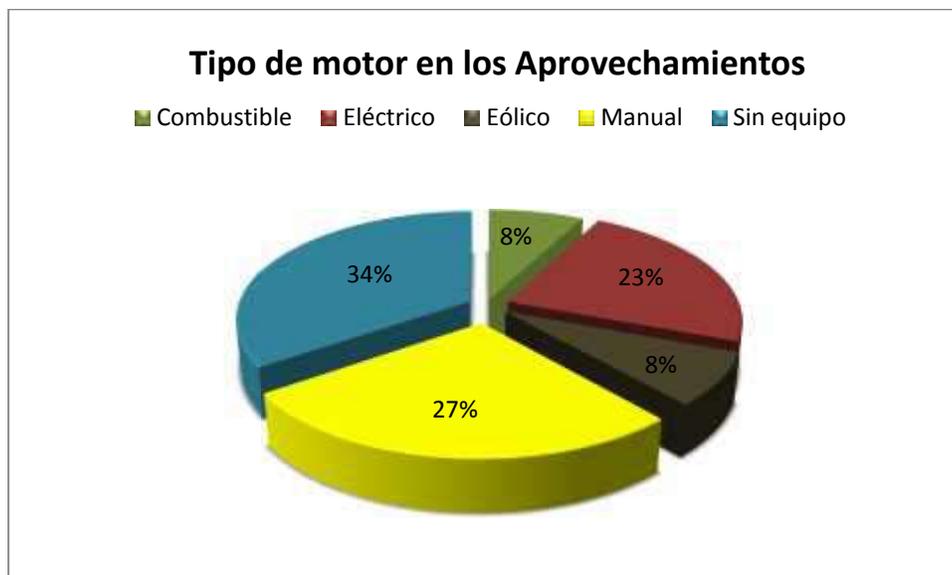


Figura 47 Tipo de motor en el equipo de extracción de los aprovechamientos.

V.2 PIEZOMETRÍA

V.2.1 Nivelación de brocales

Se llevó a cabo la nivelación de 10 brocales de pozos en el acuífero Puerto Libertad con el fin de tener un mayor control de las elevaciones del nivel estático, y así definir con certidumbre la dirección del flujo subterráneo. El procedimiento para la toma de datos en campo consistió en:

- 1) Establecer una estación base, ubicando un equipo de GPS en un sitio fijo.
- 2) La estación base debe recopilar las señales enviadas por los satélites a un intervalo de tiempo de 5 segundos durante el día.
- 3) Otro equipo es desplazado de un pozo a otro para obtener sus coordenadas, a este equipo se le conoce como móvil. Al llegar a un pozo la antena se fija a su brocal y se espera por un par de minutos para empezar a tener una exactitud del orden de los decímetros, es decir fijar la señal de los satélites.
- 4) En este tiempo se identifica el pozo, pues su denominación es empleada para identificar el registro correspondiente con las lecturas que se efectúen en el brocal del mismo.
- 5) Una vez que han pasado unos minutos se inicia la toma de lecturas, de 15 a 30 minutos de duración en promedio, pues el tiempo de dicha lectura estará en función del número de satélites recibidos y la calidad de la señal. Durante estos 15 a 30 minutos el equipo recibe la señal de los satélites también a un intervalo de 5 segundos.
- 6) Al terminar con la lectura, se desplaza a la siguiente estación y se repiten los pasos 3, 4, y 5.
- 7) El proceso se repite hasta terminar todas las estaciones del día. En ese momento se suspende la recopilación de datos en la estación base de GPS.

Con la información recopilada en el día se efectúa el post-proceso, para el cual se emplean los programas desarrollados por TRIMBLE. Este post-proceso consiste en:

- 1) Transferir la información desde los equipos receptores hacia una computadora personal.
- 2) Una vez en la computadora, los archivos recuperados deben ser convertidos al formato que emplean los programas de post-proceso, pues se encuentran en un formato comprimido que no permite su manipulación.

3) Una vez convertidos se inicia el procesado de los datos, que implica la obtención de la solución que permite determinar la posición de la estación y de la base simultáneamente. De esta forma se obtienen las coordenadas con corrección diferencial.

Aún sin el post-procesado diferencial, los equipos son capaces de proporcionar exactitudes, en los primeros minutos, del orden de los decímetros. Después de mantener el equipo por más de 20 minutos estático, la exactitud alcanza el orden de los milímetros, si la geometría de los satélites y la calidad de la señal recibida son buenas.

El equipo está formado por dos tabletas colectoras "Recon" 3 y dos antenas A3 de la marca TRIMBLE (Figura 48). El detalle de las características del equipo se muestra en la Tabla 9.



Figura 48 Equipo utilizado para nivelación de brocales.

Tabla 9 Especificaciones de los equipos usados para nivelación de brocales (TRIMBLE).

Parámetro	Especificación
Modalidad de medición GPS aceptada	Fase Estática
Precisión de la Medición (RMS)	Horizontal: $\pm (5 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm})^2$ Vertical: $(\pm 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})^2$
Precisión de Navegación (RMS)	WAAS/EGNOS precisión típica <3 m 3DRMS
Distancia a medir (longitud del vector)	Hasta 20 kilómetros, posiblemente durante períodos de baja actividad ionosférica
Tiempo de observación	20 a 30 minutos normalmente, dependiendo de la longitud del vector
Canales de satélites GPS	10
Canales de satélites WAAS/ EGNOS	12 (1 WAAS / 1 EGNOS)
Angulo de corte de satélites GPS 1	10 grados
Intervalo de grabación	5 segundos
Capacidad de almacenamiento de datos en la memoria	Más de 900 horas de registro típico de datos L1 continuo a intervalos de 15 s con 6 satélites con memoria de 64 MB

El Software de post-proceso TRIMBLE GEOMATICS OFFICE proporciona las herramientas requeridas para transferir y procesar datos GPS desde cualquier receptor GPS para producir posiciones relativas de todos los puntos medidos.

V.2.2 Profundidad al nivel estático

De los 26 aprovechamientos que se consideran para el acuífero Puerto Libertad, sólo a 9 pozos se les pudo medir el nivel estático. En el 56% de los aprovechamientos medidos, la profundidad al nivel estático es menor a 50 m. La profundidad varía de 50 a 100 m en el 33% de los mismos, y por último el 11% restante corresponde a una profundidad mayor a 100 m (Figura 49).

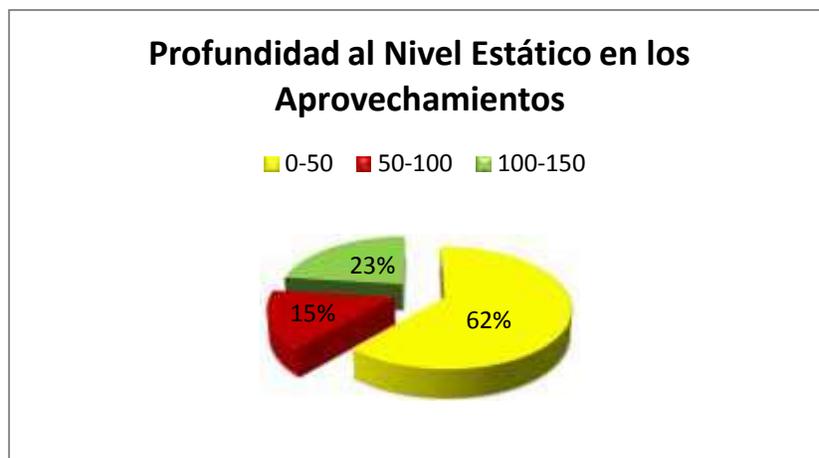


Figura 49 Profundidad al nivel estático en el acuífero Puerto Libertad.

La profundidad al nivel estático varía desde 3.08 m hasta 136.08 m. La primera se encontró en Puerto Libertad, y la máxima se localiza en el Predio Quince de Mayo, en la porción sureste del acuífero, a la altura de la sierra El Cirio. En la Figura 50, se observa que la profundidad al nivel estático aumenta hacia el continente, sin embargo, este comportamiento se mantiene solo en la parte aluvial, pues en las sierras, la profundidad al nivel estático disminuye notablemente. El promedio de las mediciones realizadas es de 46.35 m, y la mediana es de 34.58 m, considerándose éste último valor como el más representativo.

V.2.3 Elevación del nivel estático y dirección del flujo de agua subterránea

La elevación del nivel estático en los aprovechamientos medidos se encuentra entre 1.29 a 476.00 metros sobre el nivel del mar, presentándose la menor elevación en los alrededores de la localidad de Puerto Libertad, y la mayor en la parte norte del acuífero, por la zona del Predio El Carbón. La dirección de flujo subterráneo general para el acuífero Puerto Libertad, es este-oeste, convergen hacia las inmediaciones del poblado de Puerto Libertad y

de norte a sur en la parte alta del acuífero. Las curvas de isovalores de elevación del nivel estático son más densas en las partes altas, debido a una baja permeabilidad en la unidad hidrogeológica, y en el valle (zona aluvial) las curvas se encuentran a mayor distancia entre sí, reflejando un gradiente hidráulico suave. No existen distorsiones significativas en las curvas, lo cual muestra un acuífero granular en equilibrio (Figura 50 Configuración de la Profundidad al Nivel Estático, acuífero Puerto Libertad 2009).

V.2.4 Evolución del nivel estático.

La configuración de la evolución del nivel estático fue realizada con base en mediciones realizadas en 7 aprovechamientos ubicados en la parte central del acuífero, pues son los únicos que cuentan con al menos dos mediciones en años distintos para estimar su evolución anual. De las curvas de igual valor de evolución del nivel estático (figura 52), se observa que hacia la parte central del acuífero los niveles se han mantenido en equilibrio, ya que su variación oscila entre 0.05 a 0.20 m. En la parte sureste es donde se presentan los abatimientos, variando entre -0.22 y -1.26 m. En la parte noreste, predomina la estabilidad.

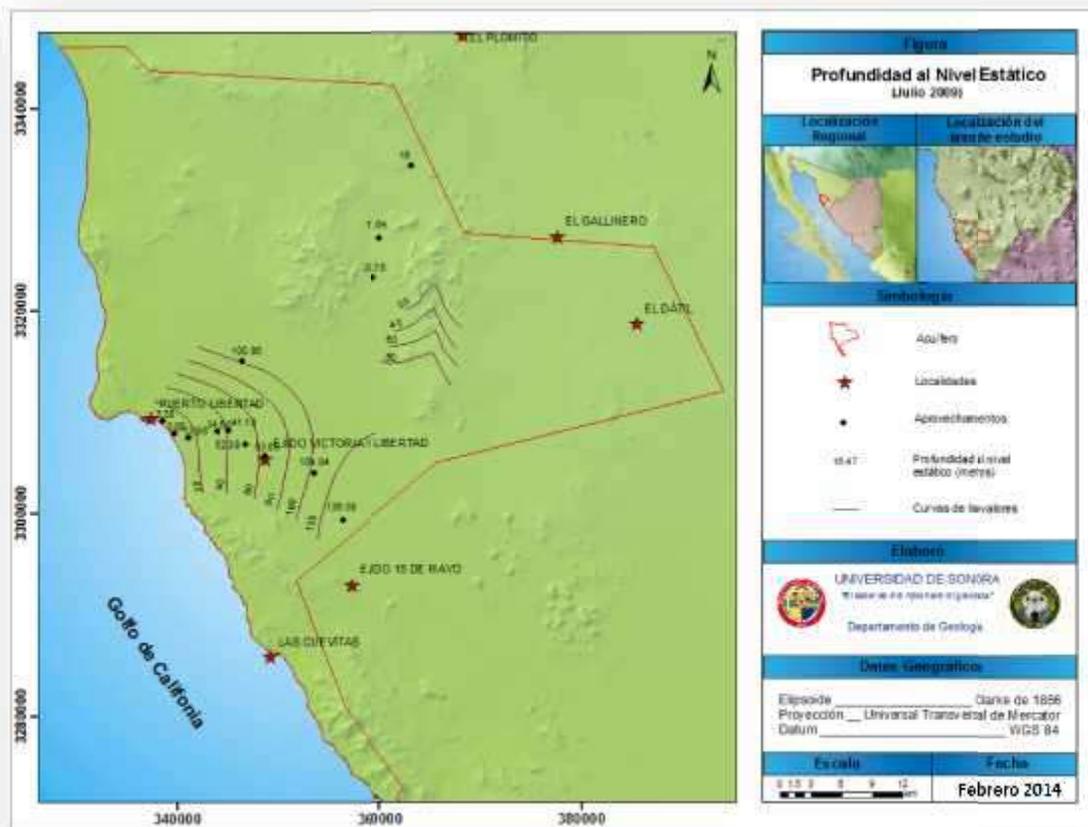


Figura 50 Configuración de la Profundidad al Nivel Estático, acuífero Puerto Libertad 2009.

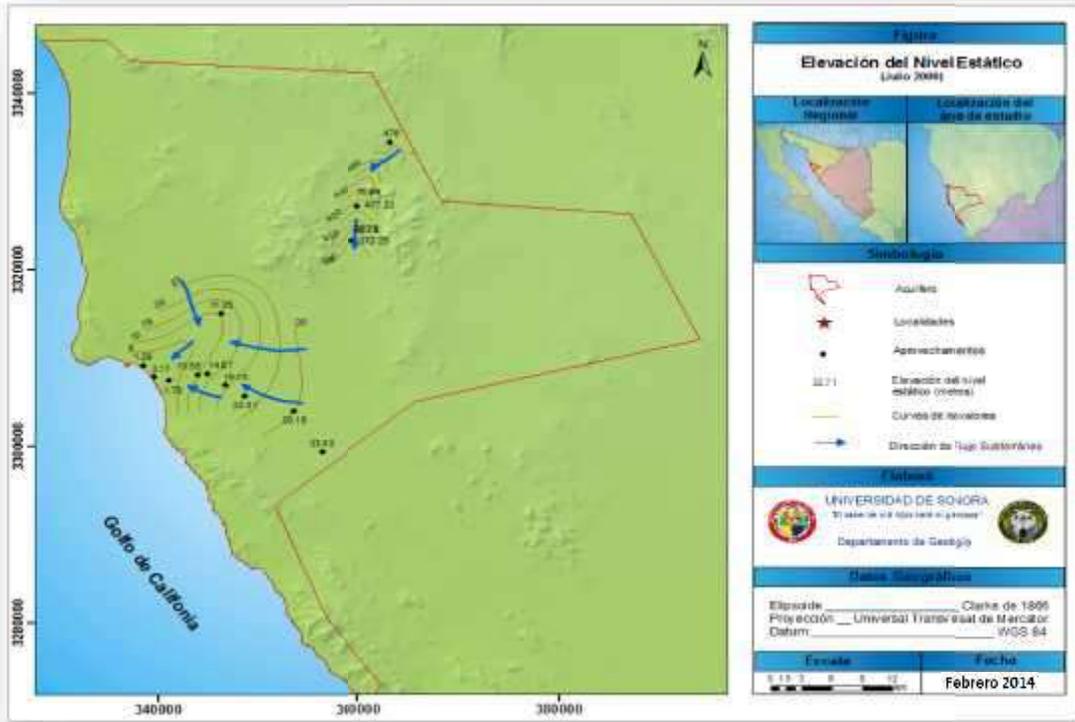


Figura 51 Configuración de la elevación al nivel estático y dirección de flujo subterráneo, acuífero Puerto Libertad.

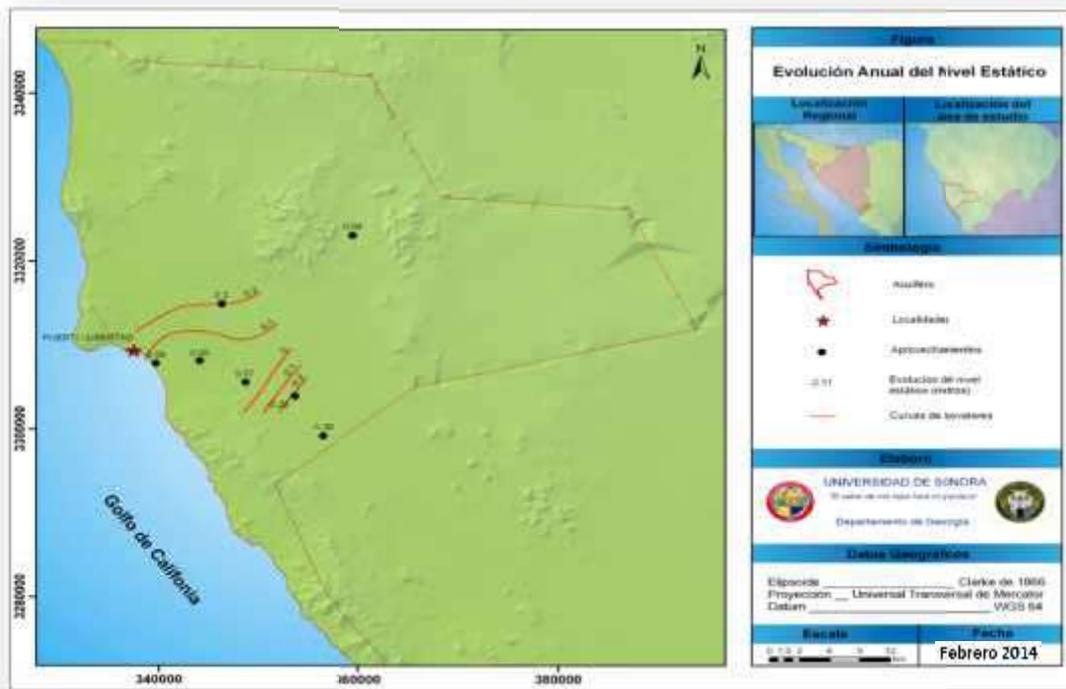


Figura 52 Configuración de la evolución al nivel estático, acuífero Puerto Libertad.

V.3 INTERACCIÓN DE EVENTOS HIDROLÓGICOS SUPERFICIALES CON EL AGUA SUBTERRÁNEA CASO ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD

La zona que representa el paso del agua superficial hacia la zona saturada del acuífero Puerto Libertad, se llama zona vadosa o zona no saturada. Esta zona contiene principalmente un sistema de tres fases: sólido, líquido y gas. La primera contiene granos minerales y materia orgánica, la fase líquida es agua que contiene solutos disueltos y la fase gaseosa incluye vapor de agua y otros gases. El plano a partir del cual solo coexisten las fases sólida y líquida, se denomina nivel freático.

La porosidad y permeabilidad en la zona vadosa dependen de la textura y estructura del suelo. La conductividad hidráulica, además de ser función del medio poroso, también depende del contenido de agua en el suelo, de manera que es variable. En este sentido, en caso de requerirse infiltrar agua al acuífero deben realizarse pruebas de infiltración para determinar la conductividad hidráulica en la zona vadosa, pues las pruebas de bombeo tradicionales proporcionan valores de la zona saturada.

En la cuenca del arroyo El Dátil y sus afluentes fue calculado un volumen de infiltración potencial de 3.2 millones de m³ anuales. Se le ha denominado “infiltración potencial” porque es el volumen máximo a infiltrarse, sin embargo una parte de este volumen se quedará atrapado por las partículas de la zona vadosa. En algunas zonas de la cuenca la profundidad al nivel estático es de más de 100 m, por lo que el tiempo de tránsito de las aguas superficiales hasta la zona saturada puede ser de años, dependiendo de la naturaleza del medio.

En su paso por la zona vadosa, el agua superficial puede transportar contaminantes desde la superficie hasta la zona saturada. El tiempo de transporte y la concentración del contaminante dependerán de las características químicas del agua y del contaminante. En este sentido, es importante realizar un plan de manejo de residuos tóxicos y domésticos conforme a los lineamientos de la SEMARNAT, de modo que evite la lixiviación y afectación al agua dulce del acuífero.

V.4 INFLUENCIA DEL AGUA SUBTERRÁNEA SOBRE EL MEDIO HIDROGEOLÓGICO DEL LITORAL.

En la zona vadosa la dirección preferencial del flujo de agua es en dirección vertical, debido a la acción de la fuerza de gravedad. Cuando se ha alcanzado el nivel freático el flujo se mueve en tres dimensiones, con una dirección preferencial que dependerá de las condiciones hidrodinámicas de la zona. Mediante el análisis de la distribución de las cargas hidráulicas (elevaciones del nivel estático), en el acuífero Puerto Libertad se observa que el flujo subterráneo lleva una dirección preferencial hacia la línea de costa.

Por otro lado, en el litoral el agua de mar presenta también una carga hidráulica que depende de la presión que ejerce la columna de agua. Para que el agua salada entre al continente es necesario que la presión sea suficiente para vencer la resistencia capilar del medio poroso y la carga hidráulica del agua dulce del continente. Esto sucede principalmente cuando disminuye la carga hidráulica del agua dulce ya sea por causas naturales (descenso en el volumen de recarga al acuífero por baja precipitación) o antropogénicas (bombeo excesivo). En el acuífero Puerto Libertad la extracción de agua dulce por bombeo se considera baja, de manera que se asume que la intrusión marina presente es producto de la baja precipitación en la región.

La zona de mezcla del agua dulce con el agua de mar, se conoce como “zona de interfase”. El agua salada por densidad tiende a ubicarse bajo el agua dulce, sin embargo esto no siempre es posible debido a las diferencias litológicas en los estratos, pues en algunas capas es más sencillo vencer la presión capilar que en otras. Este hecho provoca el comportamiento errático de la cuña de intrusión observada en el acuífero Puerto Libertad. De este modo, de acuerdo a los datos de conductividad eléctrica tomados en aprovechamientos perforados en la zona costera del acuífero, es evidente que se presenta una descarga de agua dulce hacia el mar en al menos hasta 30 m de profundidad, y una intrusión salina debajo de esta.

V.5 MAGNETOMETRÍA EN EL CASO PROYECTO SAN FRANCISCO

Como primera fase de estudio, se realizó la interpretación de la geología del subsuelo en el área del proyecto San Francisco, utilizando la información aeromagnética publicada por el Servicio Geológico Mexicano, con la finalidad de seleccionar zonas para la prospección geofísica.

Los datos originales aeromagnéticos fueron recolectados por el Servicio Geológico Mexicano en el año 2000, donde la distancia entre líneas de vuelo fue de 1,000m y la altura nominal fue de 300m sobre el nivel del suelo. Asimismo, el Servicio Geológico Mexicano aplicó los siguientes procesos a los datos aeromagnéticos para ofrecer el mapa de campo magnético total como producto final.

- a) corrección por movimiento del avión (compensación magnética);**
- b) corrección por variación diurna;**
- c) corrección *Lag*;**
- d) corrección *Heading*;**
- e) sustracción del Campo Geomagnético Internacional de Referencia;**
- f) nivelación mediante líneas de control;**

V.5.1 Procesamiento e interpretación cualitativa de datos

El procesamiento primario consistió en la compilación de los datos del SGM, donde la primera aplicación a obtener es el mapa de campo magnético total (CMT). Con base en éste se realizan procesos de corrección y filtrado para mejorar la lectura, donde los productos resultantes de estos procesos son:

- g) Reducción al polo (RAP o RTP);**
- h) Señal analítica de la reducción al polo (SA-RAP);**
- i) Derivada tilt de la reducción al polo (DT-RAP);**
- j) Anomalía magnética (TMI);**

Para la interpretación estructural solo se utilizaron los mapas de reducción al polo y derivada tilt. El resto de los procedimientos realizados sobre los datos de campo total, se mencionan en este apartado, detallando también las consideraciones teóricas de los métodos.

V.5.1.1 Interpretación cualitativa caso proyecto San Francisco

La interpretación cualitativa de los productos magnetométricos consiste en una descripción de los rasgos más notorios hallados en cada uno de los mapas que se obtuvieron durante el procesamiento. Para lograr esta descripción, se asocian las anomalías resultantes a rasgos que usualmente representarían alguna condición geológica previamente conocida o estimada para el área. La interpretación cualitativa consiste por lo tanto en la observación de los detalles de los mapas, por lo que dependen de los conocimientos que el intérprete tenga acerca del modelado magnetométrico así como de las condiciones geológicas particulares de cada lugar.

La interpretación de datos magnetométricos es muy compleja debido a que la señal observada contiene el efecto magnético de todos los cuerpos que conforman el subsuelo. Por otra parte, el efecto magnético de un cuerpo se manifiesta de forma bipolar (polo norte y sur) y la superposición de los campos de varios cuerpos genera un campo más complejo. Sin embargo, con las herramientas apropiadas es posible discriminar las señales de diversos cuerpos que conforman el subsuelo y aprovechar la gran cantidad de información contenida en la señal magnetométrica.

Por estos motivos de ocurrencia de los cuerpos magnéticos, para efectuar el estudio magnetométrico se presentan varios mapas donde cada uno de ellos presenta aspectos distintos de los cuerpos que conforman el subsuelo, mostrando distintas características en la distribución de propiedades magnéticas. En análisis de cada uno de los resultados de los procesos que se presentan ofrece un conjunto muy grande de información que puede servir para interpretar una gran cantidad de objetivos geológicos.

Nuevamente, en el mapa de anomalía magnética (reducida al polo o no) se observa la superposición del efecto magnético que generan todos los cuerpos del subsuelo que se encuentran por debajo del punto de observación. Por esta razón, no hay un parámetro directo que establezca la profundidad de investigación en el método magnetométrico (a diferencia de los métodos resistivos). En el método magnetométrico pueden interpretarse cuerpos muy cercanos a la superficie como tuberías, o estructuras muy profundas como la discontinuidad de mohorovicic (moho). La posibilidad de interpretar uno u otro depende de la resolución y la extensión del levantamiento. El presente estudio muestra anomalías que podrían interpretarse a profundidades desde 200-300m hasta alrededor de 2,000m (obtenidas con el cálculo de la Deconvolución Euler).

Para realizar la interpretación estructural en este proyecto solo se utilizaron los mapas de reducción al polo y derivada tilt. El resto de los procedimientos realizados sobre los datos de campo total, se mencionan en este apartado, detallando también las consideraciones teóricas de los métodos.

V.5.1.2 Derivada tilt de la RAP

La derivada tilt (DT) representa una anomalía normalizada directamente sobre los cuerpos magnéticos sin importar la profundidad de estos. Dadas sus notables ventajas sobre las derivadas convencionales, esta técnica es de suma utilidad para interpretar estructuras del basamento y particularmente es útil para el reconocimiento de estructuras someras. La expresión matemática que define a la derivada tilt es la siguiente:

$$TDR = \tan^{-1} \left[\frac{VDR}{THDR} \right]$$

Donde VDR y THDR son la primera derivada vertical y la derivada horizontal total, respectivamente, del campo magnético total. En este caso se aplicó la derivada tilt directamente al campo magnético con reducción al polo (Figura 53).

Una forma de leerlo es asociar los mínimos (azules) a estructuras tipo falla, fractura, etc., mientras que los máximos se asocian con diques u otros elementos con contenido magnético. A partir de este mapa DT, se hace muy evidente que los lineamientos regionales más claramente representados tienen un rumbo preferencial NW-SE y NE-SW, que manifiesta una relación semi-ortogonal entre ambas. Esta relación regional entre estructuras es también muy persistente dentro del área del proyecto. Si bien es cierto que las estructuras N-S interpretadas en el mapa DT no están muy relacionadas a los bajos magnéticos, éstas fueron identificadas claramente como resultado del trabajo local de resistividad, por lo que aquí se asociaron a lineamientos de altos magnéticos (rojos), o bien a interrupciones de éstos. Esto último probablemente nos indica que las estructuras con esta dirección son más jóvenes y someras que las mencionadas anteriormente.

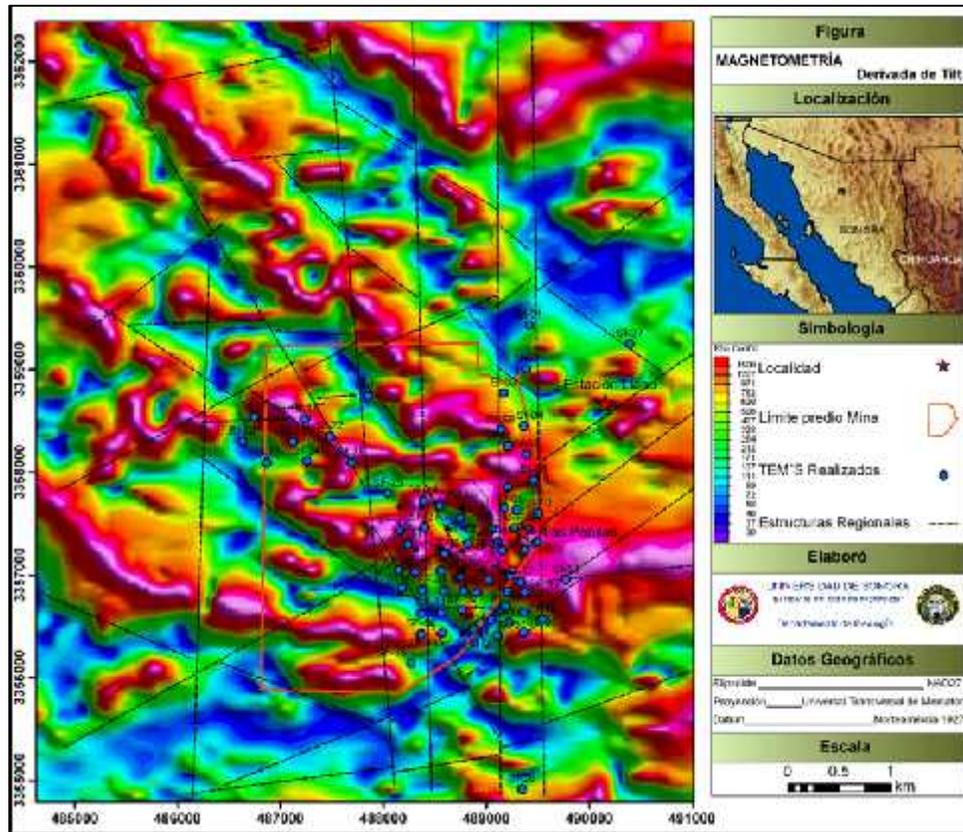


Figura 53. - Mapa de anomalía magnética del proyecto San Francisco con la Derivada de Tilt (DT) aplicada a la reducción al polo (RAP), donde se muestran los lineamientos NW-SE y NNW-SSE, el sistema semi-ortogonal asociado de rumbo NE-SW, y el de rumbo E-W poco representado.

A manera local dentro del proyecto, el Servicio Geológico Mexicano (2000) establece que la mineralización se tiene asociada principalmente a una familia de estructuras tipo veta-falla que presenta una orientación dominante NW-SE, y sobre todo donde se tienen las intersecciones con estructuras de orientación NE-SW.

Los lineamientos presentados en la Figura 53 son solo una guía de las posibilidades de interpretación cualitativa que puede realizarse a partir de estos mapas. Es posible que los lineamientos aquí coincidan con alineamientos observados en superficie, sin embargo, hay que considerar la profundidad a la que ocurren los cuerpos que causan estos lineamientos. Otra posibilidad es que los lineamientos coincidan en rumbo pero no en posición exacta, esta discrepancia puede deberse al echado de las estructuras y a la profundidad de la fuente magnética.

V.5.1.3 Reducción al polo (RAP)

Primeramente se eliminó el efecto de la inclinación y declinación sobre los datos, simulando que la zona es afectada por un campo magnético vertical, es decir, con una inclinación igual a 90° y una declinación igual a 0° . El mapa de reducción al polo que se obtuvo, es solo una aproximación del que se obtendría si en verdad se tuviera un campo

magnético vertical. En latitudes entre los 15 y 30 grados, estos resultados pueden ser usados junto con el mapa original de CMT para consideraciones aceptables, a diferencia de aquellas zonas con latitudes mayores a 45 grados, donde la representación es más razonable (Ted, 2006). Sin embargo otros autores consideran que es mejor no utilizar este proceso para latitudes menores a 20° afirmando que dentro del rango de 30-40 grados ya se vuelve inestable la reducción y se amplifica el ruido de alta frecuencia.

La operación requiere el conocimiento de los valores de la inclinación y declinación del campo magnético de la tierra de la zona donde se llevó a cabo el registro. Adicionalmente se requiere el valor de la altura de vuelo a la cual se hizo el levantamiento, en este caso de 300 metros sobre el terreno. Pueden conocerse los valores de inclinación y declinación a partir de la latitud y longitud, y los valores de inclinación y declinación usados en el presente estudio para realizar la reducción al polo fueron los siguientes:

- 1) inclinación = 52°56'
- 2) declinación = 00°25'

El mapa de reducción al polo (Figura 54) presenta las anomalías magnéticas vistas sobre la fuente que las origina, en otras palabras, este mapa puede leerse directamente asociando los valores máximos a cuerpos rocosos con mayor contenido de material magnético entendiendo por material magnético aquellos cuerpos rocosos formados por minerales ferromagnesianos, contenido de hierro o bien que contengan magnetita como mineral traza. Las rocas ígneas, volcánicas o plutónicas presentan mayor cantidad de material magnético y son las responsables de originar las anomalías de mayor intensidad, sin embargo, otros cuerpos y estructuras geológicas también poseen firmas magnéticas que pueden ser altas, tales como fallas, contactos, rocas sedimentarias e incluso los estratos individuales que conforman las formaciones sedimentarias.

El mapa de anomalía magnética reducido al polo es el producto principal que genera la exploración magnetométrica, ya que en este está contenida toda la información de los efectos magnéticos de las rocas que conforman el subsuelo, a excepción de que ya no poseen la forma dipolar característica de los mapas de anomalía magnética. De manera general puede observarse una tendencia regional de orientación NW-SE de los altos magnéticos; mientras que para el caso del área local del proyecto, se tiene una zona de valores altos (rojo), circundada por otra de valores mayores (rojo intenso)

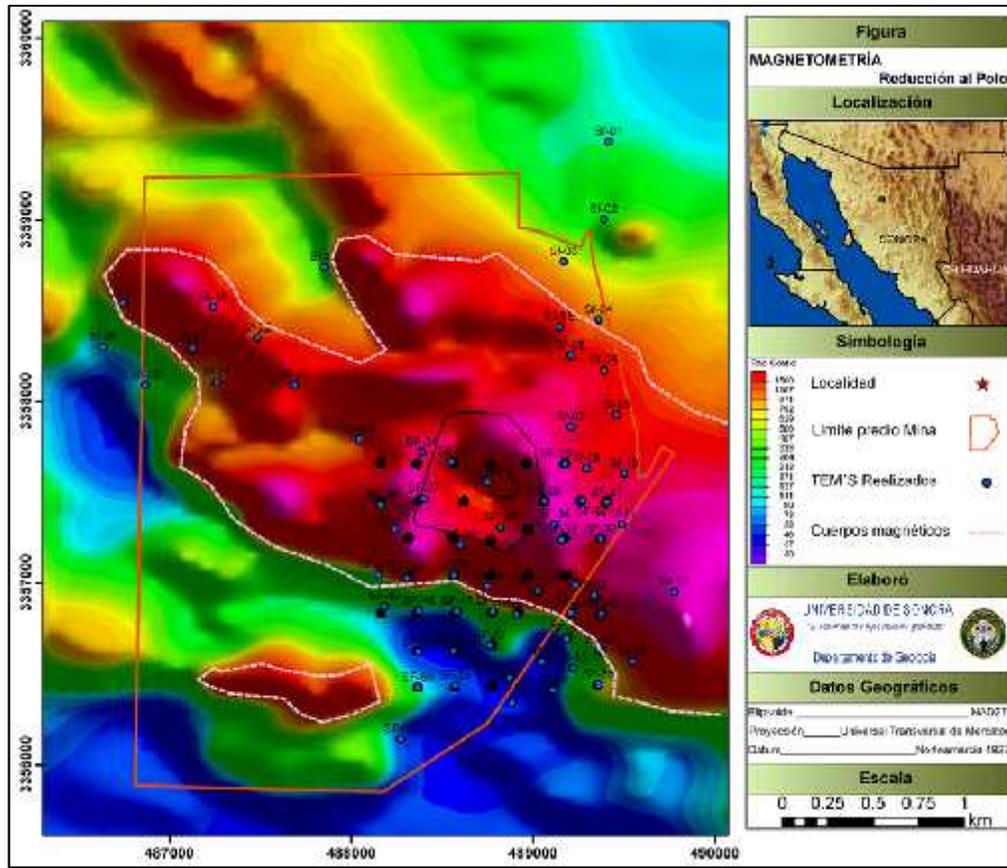


Figura 54. - Mapa de anomalía reducción de polo (RAP o RTP) en el proyecto San Francisco. Nótese la distribución de las masas magnéticas.

V.5.1.4 Señal analítica de la RAP

El proceso de señal analítica (SA-RAP) es ampliamente utilizado en la actualidad para resaltar aquellas zonas dentro del mapa magnético donde los gradientes en alguna dirección son altos, como por ejemplo en los límites de las anomalías magnéticas, y es de uso común debido a los resultados que ofrece y la supuesta independencia con respecto a la dirección del campo magnético primario. Nabighian desarrollo la idea de este proceso en 1972 y Roest (1992) demostró que la amplitud de la señal analítica tridimensional en una sola posición (x, y) puede derivarse de los tres gradientes ortogonales del campo magnético total con la siguiente expresión:

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2}$$

Dónde:

- A(x, y) es la amplitud de la señal analítica en (x, y)
- T es el campo magnético observado en (x, y)

Una gran ventaja que se obtiene al aplicar el proceso de señal analítica, es que el resultado está exento de los efectos de la inclinación del campo magnético terrestre,

evidenciando la localización de los límites de los cuerpos o fuentes que producen las anomalías magnéticas. Tradicionalmente el método de señal analítica se efectúa sobre datos de intensidad magnética total, pero actualmente se cree que si se aplica sobre datos de reducción al polo se obtienen mejores resultados (Bilim y Ates 2003).

El mapa de señal analítica Figura 55 muestra las masas magnéticas concentradas sobre la fuente que las origina. A diferencia del mapa anterior, en este mapa se reducen los efectos del campo magnético y se resaltan los cuerpos con contenido magnético. Es este producto el más directamente interpretable, sin embargo, es necesario siempre observar el mapa de reducción al polo para verificar la congruencia de la interpretación, no hay que olvidar que el presente resalta información que debe estar contenida en el anterior.

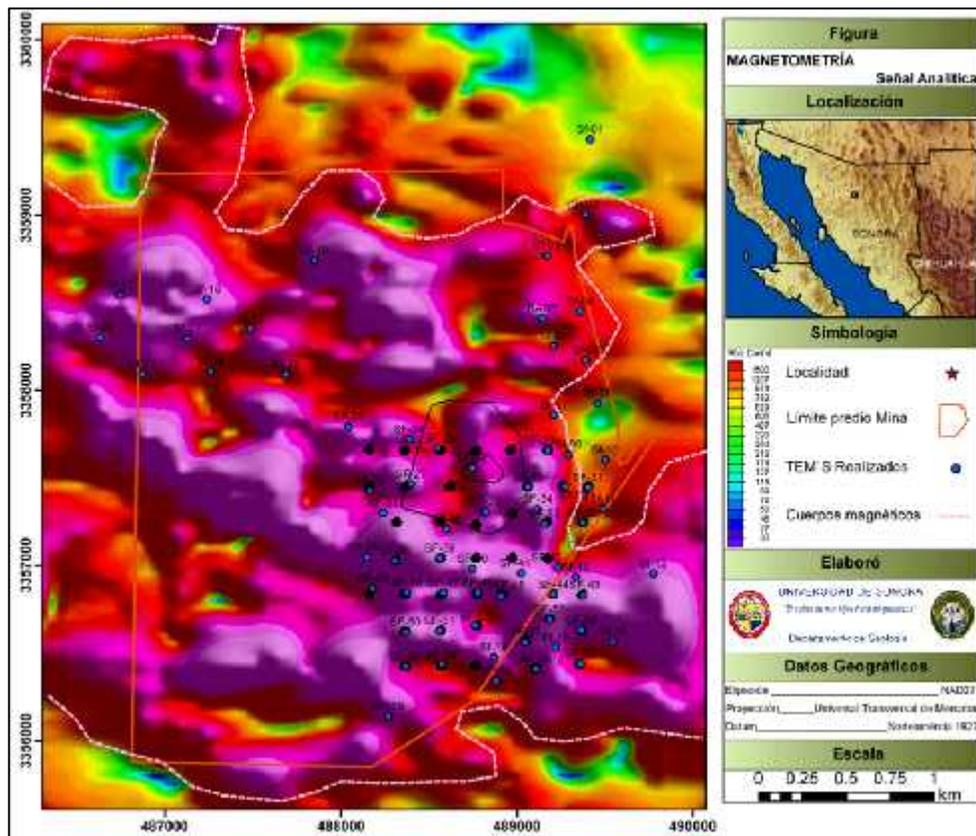


Figura 55. - Mapa de señal analítica (SA-RAP) proyecto San Francisco. La división entre zonas está hecha con base en las propiedades magnéticas.

V.5.1.5 Anomalía Magnética (TMI)

Las anomalías producidas por pequeños rasgos geológicos localizadas a profundidades relativamente pequeñas, suelen ser de longitud de onda corta y sólo perceptible en una distancia corta alrededor del punto (Figura 56).

Las anomalías que presentan un efecto de grandes dimensiones o bien aquella señal de baja frecuencia a la cual se le han restado los efectos de las señales de alta frecuencia se le conoce como anomalía regional, mientras que la anomalía residual representa los efectos magnéticos de alta frecuencia que usualmente se asocian a cuerpos magnéticos someros. En la anomalía residual se minimizan los efectos magnéticos de las anomalías profundas y es posible apreciar rasgos que difícilmente podían observarse en el mapa de la reducción al polo. El tamaño y la profundidad de los cuerpos aquí mostrados no rebasan los 2 km. Este mapa se obtiene de la sustracción de la anomalía regional de la anomalía magnética reducida al polo.

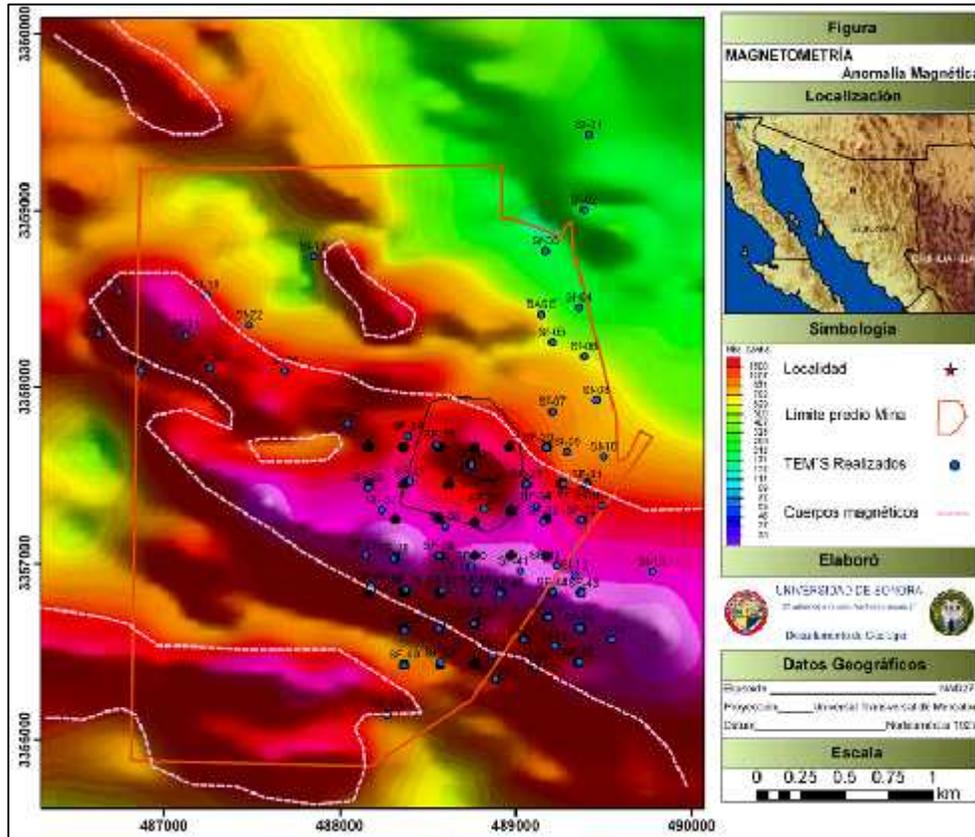


Figura 56. Mapa de anomalía magnética (TMI) Proyecto San Francisco. Nótese la correspondencia con los lineamientos interpretados a partir de los mapas DT-RAP.

V.5.2 INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA

V.5.2.1 Análisis espectral para la estimación de profundidades

Se utilizó el espectro de potencias para conocer la profundidad de las fuentes de las anomalías que aparecen en el área del proyecto San Francisco. En las Figuras 57 y 58 se muestra el espectro de potencias y estimación de profundidades determinadas para la anomalía regional, el cual muestra que la profundidad de las fuentes magnéticas se ubica en un intervalo de 0 hasta más de 3 km de profundidad.

El eje horizontal de las gráficas es el número de onda, el cual está directamente relacionado con la amplitud de las anomalías, donde 0.5 representa 2km, mientras que 2 representa 500m.

El espectro muestra que la mayor amplitud de las anomalías en esta zona es de 5km cuales se estima se ubican a 3,000 m de profundidad aproximadamente para la anomalía regional y 1,000m para la anomalía residual, esto último se debe a la remoción de los efectos regionales. Las anomalías de menor amplitud tienen 500m y se localizan aproximadamente a 500m de profundidad en el mapa residual y aproximadamente a 300m en el regional. Las anomalías de menor amplitud tienen 500m y se localizan aproximadamente a 500m de profundidad en el mapa residual y aproximadamente a 300m en el regional.

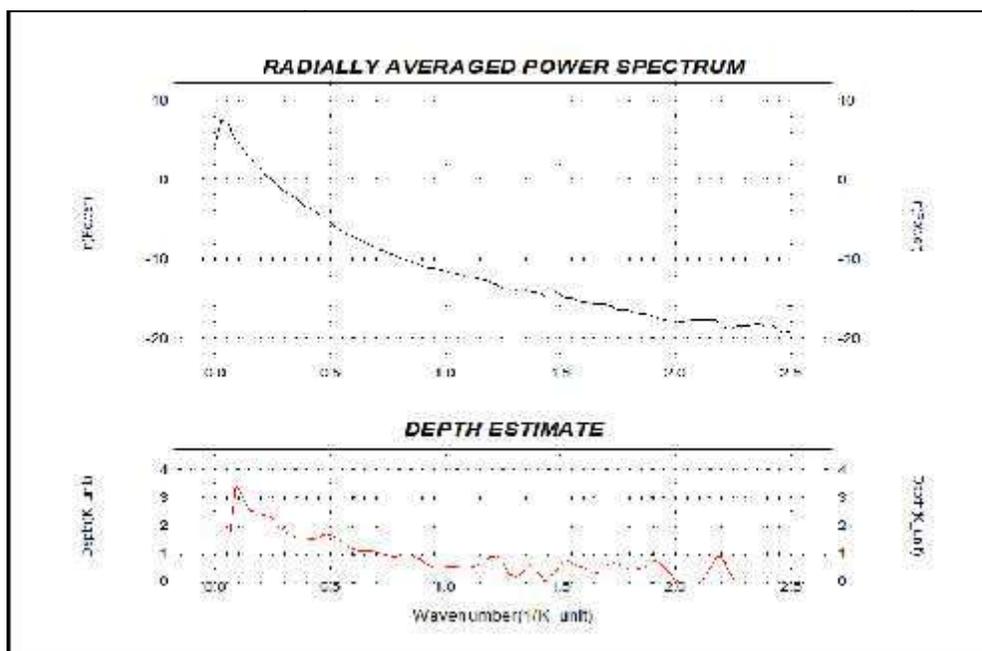


Figura 57. - Espectro de potencias y estimación de profundidades proyecto San Francisco.

Una regla empírica para conocer de forma aproximada la profundidad de las anomalías es medir su amplitud y en base a las gráficas anteriores estimar su profundidad. Esta estimación es relativa debido a que la amplitud de las anomalías se debe tanto a la profundidad como a la intensidad del campo magnético, pero funciona bien para tener una idea aproximada.

Las estimaciones anteriores sirven como parámetro para dar validez a la obtención de las anomalías residual y regional. Al conocer el rango de profundidades de las fuentes magnéticas de las anomalías que se presentan en el área de estudio es posible discriminar los resultados divergentes que en ocasiones arrojan los métodos automatizados de estimación de profundidades como la Deconvolución de Euler.

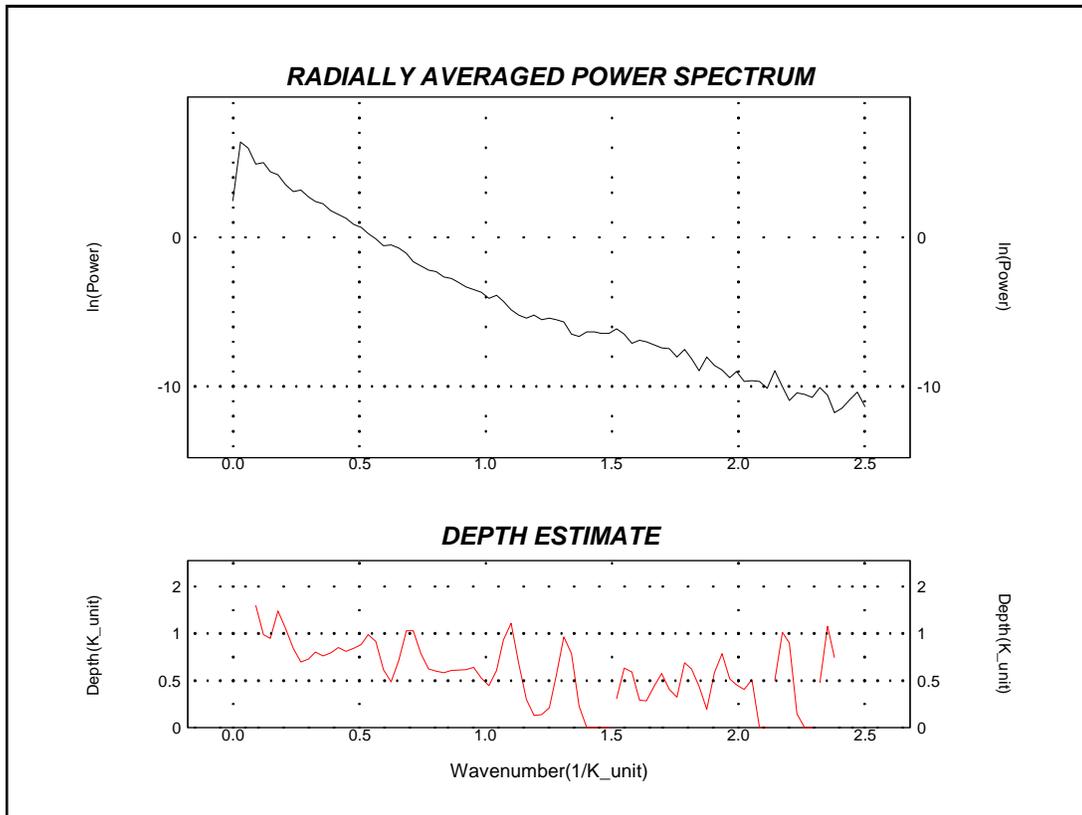


Figura 58. – Espectro de potencias y estimación de profundidades.

V.5.2.2 Método de Deconvolución de Euler

La Deconvolución de Euler es una potente herramienta de interpretación, tanto para datos gravimétricos como magnetométricos, que ha sido por varios años utilizada para hacer estimaciones de profundidad y formas de las fuentes causantes de las anomalías. La aplicación universal de esta técnica ha consistido en determinar la profundidad hasta el techo de las fuentes causantes de las anomalías gravimétricas o magnéticas (Thompson, 1982; Roy y otros, 2000; Keating, 1998).

La Deconvolución de Euler se basa en la ecuación de homogeneidad de Euler y adiciona un índice estructural para producir las estimaciones de profundidad. Usados conjuntamente, el índice estructural y las estimaciones de profundidad, permiten identificar y hacer valoraciones de profundidades para una amplia variedad de estructuras geológicas tales como fallas, contactos, diques, intrusivos, etc. (Reid et al. 1990, Roy et al. 2000).

Las soluciones de la Deconvolución de Euler pueden ser llevadas al espacio de tres dimensiones para representar los volúmenes de la masa de roca magnética causante de las anomalías medidas y que se encuentran representadas en el mapa.

La estimación de profundidades de las fuentes magnéticas por este método está basada en el Índice Estructural. El Índice Estructural (IE) es la tasa de cambio con la distancia para el campo magnético o de gravedad. Se relaciona con la forma de los cuerpos geológicos inferidos que determina el conjunto de soluciones de Euler. La Tabla 10 muestra la relación entre el IE para el campo magnético y las formas de los cuerpos geológicos inferidos.

Tabla 10. - Índice estructural y formas de los cuerpos geológicos inferidos.

Valor	Tipo de IE	Forma de los cuerpos geológicos inferidos
0	Resalto o borde de un plano	Las estructuras en forma de escalón muestran un incremento o decrecimiento uniforme en la respuesta magnética que es similar a o largo de varias líneas de levantamiento. Ejemplos: Contactos entre cuerpos de grandes dimensiones, como entre un granito y las rocas circundantes; bloques elevados a los lados de una falla, como los Horst-Graben.
1	Línea de dipolos	Falla/Dique– Cuerpos bidimensionales relativamente delgados que están en posición subvertical
2	Polo puntual	Pipas verticales– Estructural cilíndricas subverticales (e.g. diatremas)
3	Dipolo puntual	Fuente puntual (nominalmente esférica)– Fuentes que no tienen continuidad en ninguna dirección, generalmente de formas irregulares, pero nominalmente esféricas en los modelos matemáticos.

Estos procesos son tomados con sus debidas reservas, esta técnica debe aplicarse únicamente cuando se tienen varios parámetros de control que dan certidumbre a la estimación de las fuentes. Se menciona la técnica en este texto solo de manera informativa dado que se ha vuelto popular.

V.5.3 Modelo del sistema de fracturamiento local

V.5.3.1 Análisis Estructural

Los medios rocosos fisurados son conjuntos macroscópicamente heterogéneos y anisótropos en cuando a comportamiento hidráulico, aún en el caso de que se puedan considerar como homogéneos a escala pequeña o mediana (caso de fisuras pequeñas y muy densas), por lo que el flujo del agua es más complejo que en acuíferos en régimen granular. Una porosidad secundaria a partir de la presencia de discontinuidades que presente el macizo rocoso, incrementará su permeabilidad, la cual puede ser de dos tipos:

- Primaria: simultánea a la formación de la roca (diaclasas columnares en basaltos, etc.)
- Secundaria o adquirida: posterior a la formación de la roca (fracturación tectónica, fisuras de descompresión).

En este contexto, el comportamiento hidráulico de los macizos fisurados depende de una serie de factores:

- Esfuerzos tectónicos: condicionan la existencia de todo tipo de fracturas (fallas. Diaclasas, exfoliación, etc.).
- Acciones endógenas: dan lugar a diques, filones, intrusiones, etc., que unas veces favorece y otras impiden el flujo del agua.
- Clima: condiciona la alteración superficial de la roca y la formación de mantos permeables; si las fisuras se rellenan de materiales impermeables (arcilla por ejemplo) la permeabilidad del macizo rocoso se ve seriamente afectada.
- Erosión: libera sobrecarga, produciendo descompensaciones que crean fisuras nuevas y ensanchan las pre-existentes.

Las fracturas son discontinuidades que representan planos de ruptura con paredes más o menos rugosas y con una cierta abertura media; aunque no es raro encontrar fracturas de hasta 20cm de abertura, lo normal es que no pasen de algunos pocos centímetros (2-5), siendo las más frecuentes con dimensiones milimétricas, a las que se les llama fisuras. Con frecuencia, las fracturas son estrechas y extensas, en otras ocasiones son de muy reducida extensión y aisladas, por lo que el movimiento del agua en las mismas es difícil (aun cuando la acumulación de agua en ellas sea importante) y su recarga deficiente. Muy importante es el caso de permeabilidad creciente, donde en algunos tipos de roca (calizas y yesos, por ejemplo) las discontinuidades se ensanchan gradualmente por procesos de disolución, dando como consecuencia que el sistema evolucione progresivamente hacia una mayor heterogeneidad y anisotropía.

De manera general entonces, el movimiento del agua subterránea en los terrenos fracturados depende de una serie de características de estas discontinuidades, entre las que destacan: 1) tipo; 2) frecuencia o densidad dentro de la roca; 3) la abertura promedio y la presencia o no de rellenos minerales; y 4) la orientación de los planos de éstas y la inclinación de la línea que genere la intersección de estos planos.

Si bien es cierto que al igual que en un acuífero granular también se identificará una zona saturada y otra no-saturada, dentro de los acuíferos en roca fracturada existen superficies piezométricas virtuales debido a la interconexión de fracturas, en donde eventualmente cada una de éstas posee un nivel piezométrico propio, y aunque el movimiento del agua es complejo, siempre es por una red interconectada y a favor de diferencias de carga hidráulica o presión piezométrica. Para el caso del proyecto San Francisco, su condición de un macizo fracturado y la presencia de estructuras mayores (fallas), está condicionando el flujo tanto regional como local del agua subterránea (Figura 59).

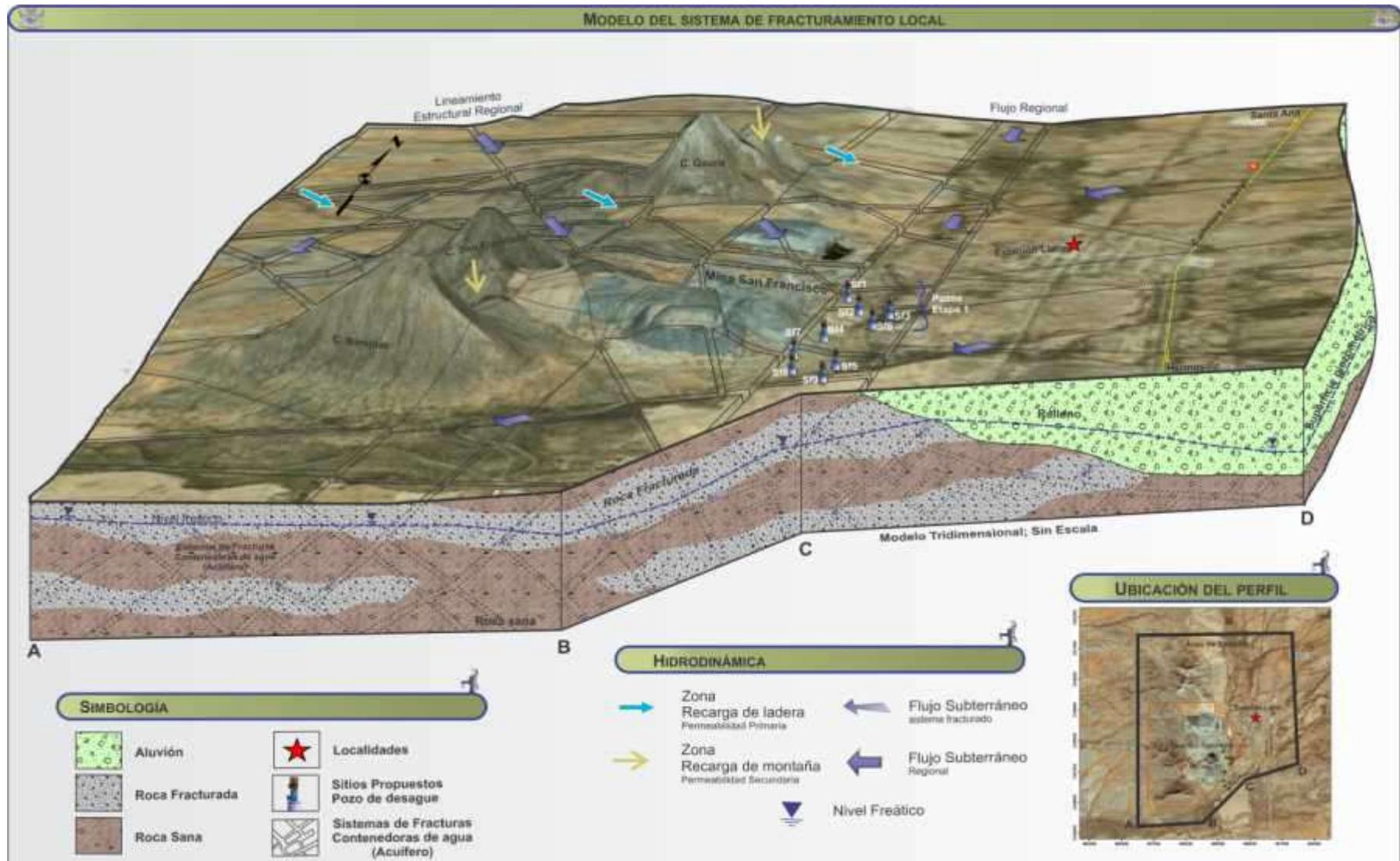


Figura 59. Modelo del sistema de fracturamiento local proyecto San Francisco.

V.6 GRAVIMETRÍA (CASO ACUÍFERO SAN JOSE DE GUAYMAS)

V.6.1 Ejecución e interpretación de gravimetría

Los estudios gravimétricos están basados, en términos generales, en el registro de los cambios en la densidad de los materiales del subsuelo. Esto se realiza ejecutando mediciones a partir de una malla de puntos ubicados arbitrariamente en los que se miden las variaciones verticales en la atracción de gravedad (G). A partir de esto, se pueden realizar interpretaciones acerca de la concentración de masas que contrastan lateralmente en densidad con respecto al medio que lo rodea.

En cada estación gravimétrica se midió la variación de la atracción de la gravedad en su componente vertical, y se tomó un punto de referencia o estación base determinado arbitrariamente (ubicado con GPS) con el fin de utilizarlo para autocalibrar el equipo. El equipo utilizado es un gravímetro AUTOGRAV CG-5 de SCINTREX, el cual fue calibrado para que tomara 60 lecturas por minuto y promedio calculado, así como para que arrojara el valor incluyendo la corrección por marea.

Antes de iniciar con la medición en las estaciones, fue establecido el punto base (Baseg), del cual se tomó lectura al inicio y al final del día. Al llegar al sitio se colocó el gravímetro en el plato base, se niveló y se realizó la lectura tres veces, anotando los resultados en la libreta de campo. Una vez terminado el levantamiento de los datos en campo, se procede al tratamiento e interpretación de la información.

V.6.1.1 Perfiles gravimétricos

En los estudios hidrogeológicos la gravimetría representa un método de exploración indirecta que se utiliza principalmente para la interpretación de las características a profundidad de la cuenca estudiada, principalmente su geometría. Este método tiene como fundamento la medición del campo de gravedad, midiendo los cambios de densidad responsables de su variación.

En este contexto, los cuerpos rocosos del basamento que se encuentran sepultados por sedimentos pueden aumentar la aceleración de la gravedad en una región determinada, debido a su mayor densidad (Figura 60).

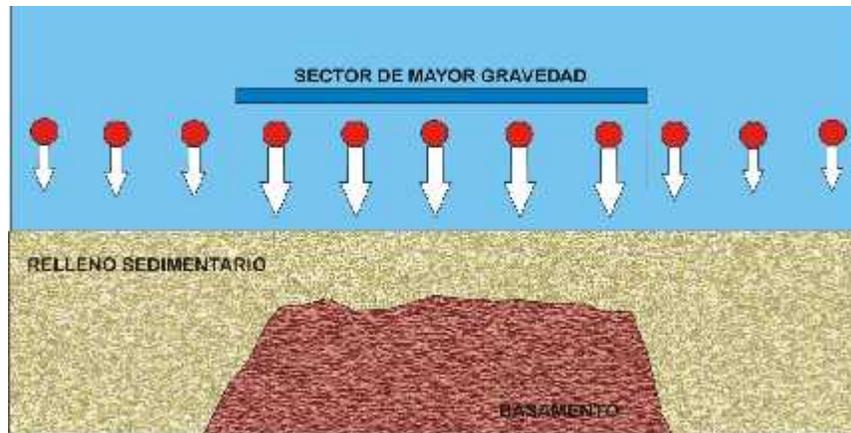


Figura 60. Esquema que ilustra el comportamiento de la gravedad debido a la presencia del basamento en el subsuelo.

El gravímetro es un equipo que puede medir diferencias muy finas en la gravedad. La mayoría de los gravímetros emplean resortes cuyo efecto se opone a la fuerza de gravedad que actúa sobre una masa. El equipo de un gravímetro es entonces una balanza muy sensible con un peso definido que sufre las diferencias de la gravedad. Arriba de un sector con mayor gravedad la balanza marca un valor elevado, porque el objeto sufre aumento de peso al tener impuesta una gravedad de mayor aceleración (Figura 61).

El método gravimétrico hace uso de campos de potencial natural igual que el método magnético y algunos métodos eléctricos. Con este método se realizan mediciones relativas, es decir, se miden las variaciones laterales de la atracción gravitatoria de un lugar al otro, puesto que en estas mediciones se pueden lograr una precisión satisfactoria más fácilmente en comparación con las mediciones del campo gravitatorio absoluto. Los datos procesados apropiadamente entregan las variaciones en la gravedad, que solo dependen de variaciones laterales en la densidad del material ubicado en la vecindad de la estación de observación.

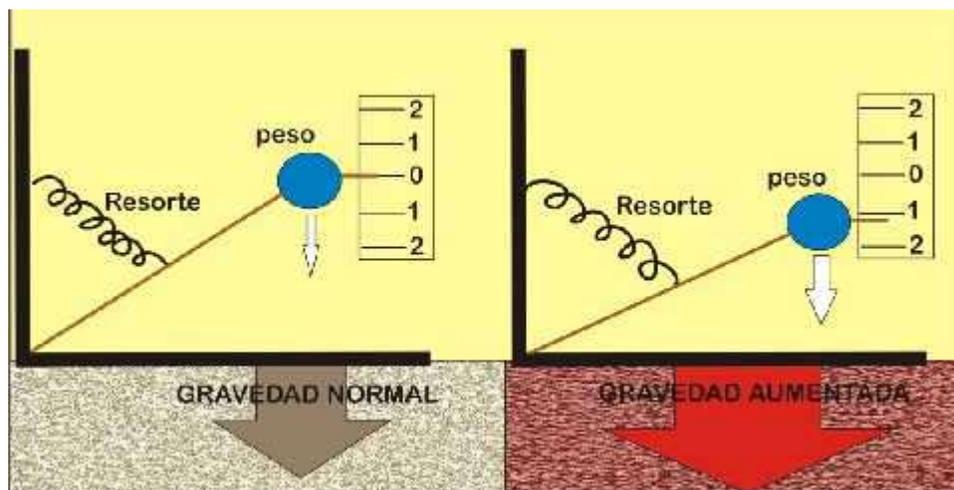


Figura 61. Principio del funcionamiento de un gravímetro (Griem 2007).

V.6.1.2 Procesamiento gravimétrico

La desviación estándar de los resultados obtenidos en el levantamiento gravimétrico realizado en el acuífero San José de Guaymas, tuvo un promedio de 0.02. Los datos fueron procesados en una hoja de cálculo EXCEL para efectuar las correcciones correspondientes (Anexo I), obteniendo finalmente la Anomalía de Bouguer Simple (Figura 62). Esta última se procesó en el software WingLink®, aplicando el filtro de polinomio de grado 2 con el propósito de hacer la separación Regional-Residual (la Anomalía de Bouguer tiene la suma de la influencia regional y local (residual)) y así obtener el plano de Anomalía Residual (Figura 63).

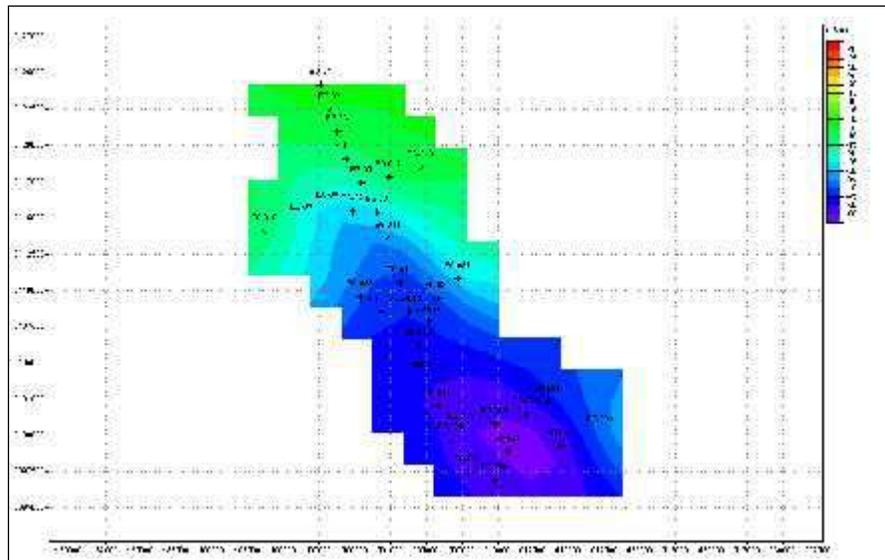


Figura 62 Plano de anomalía de Bouguer en el acuífero San José de Guaymas

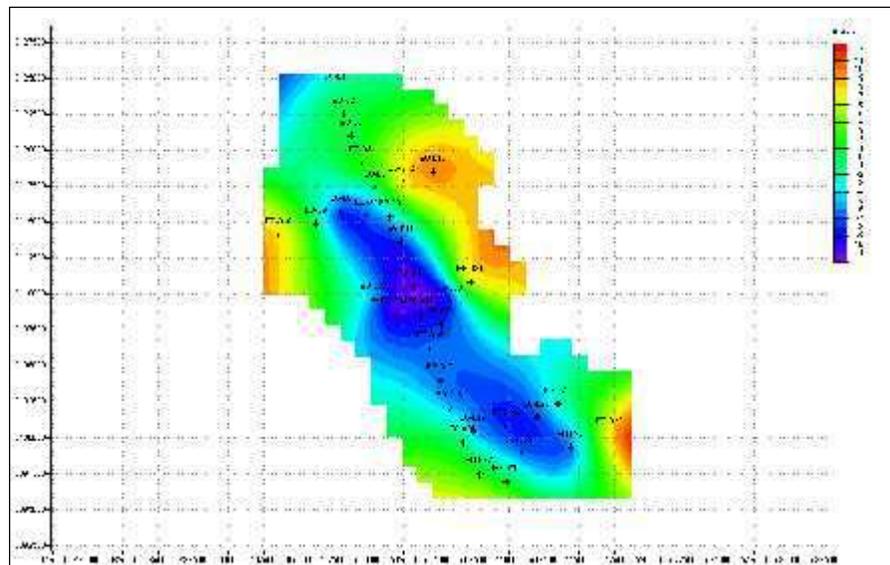


Figura 63. Plano de anomalía residual del acuífero San José de Guaymas

A partir de la concentración de anomalías negativas ubicadas en el plano de anomalía residual, se puede establecer que la cuenca que aloja al acuífero San José de Guaymas presenta una orientación NW-SE y está conformada por tres depresiones importantes: la primera de ellas se tiene en la porción noroeste con anomalías de hasta -15.529 mGals en la estación EG-08; en la porción central se presenta una segunda depresión, quizá la más importante ya que en la estación EG-29 se presenta un valor de -47.367 mGals; la tercera se manifiesta en la porción sureste del área, donde la estación EG-25 presenta un valor de -15.43 mGals. Es importante establecer que las estaciones EG-13, EG-23 y EG-31 fueron tomadas prácticamente sobre el basamento basáltico en el límite oriental del área. En una representación más detallada de la anomalía residual en 3-D realizada con el software SURFER 8.0 pueden observarse más claramente las tres depresiones (Figura 64).

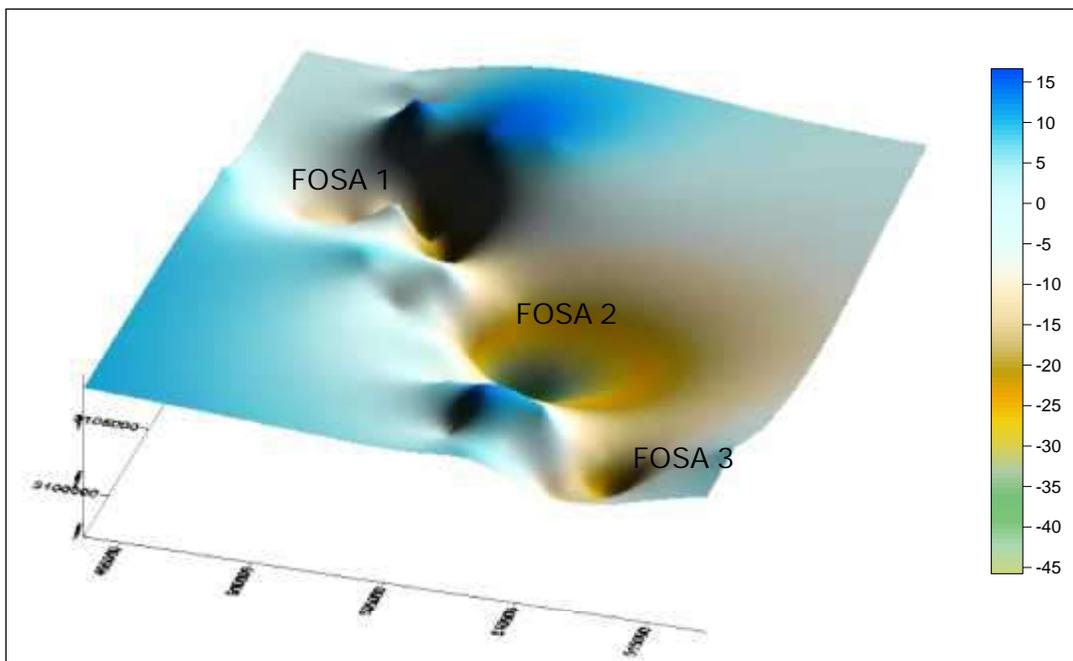


Figura 64 Representación esquemática en 3D del plano de Anomalía Residual del acuífero San José de Guaymas (unidades en mGals).

V.6.2 Modelación de perfiles

Con el objetivo de tener una idea de las características de la profundidad del basamento y su configuración dentro del área, se trazaron tres perfiles a partir del plano de Anomalía Residual para ser procesados en el módulo de modelación directa 2.5 D del propio WingLink® (Figura 65).

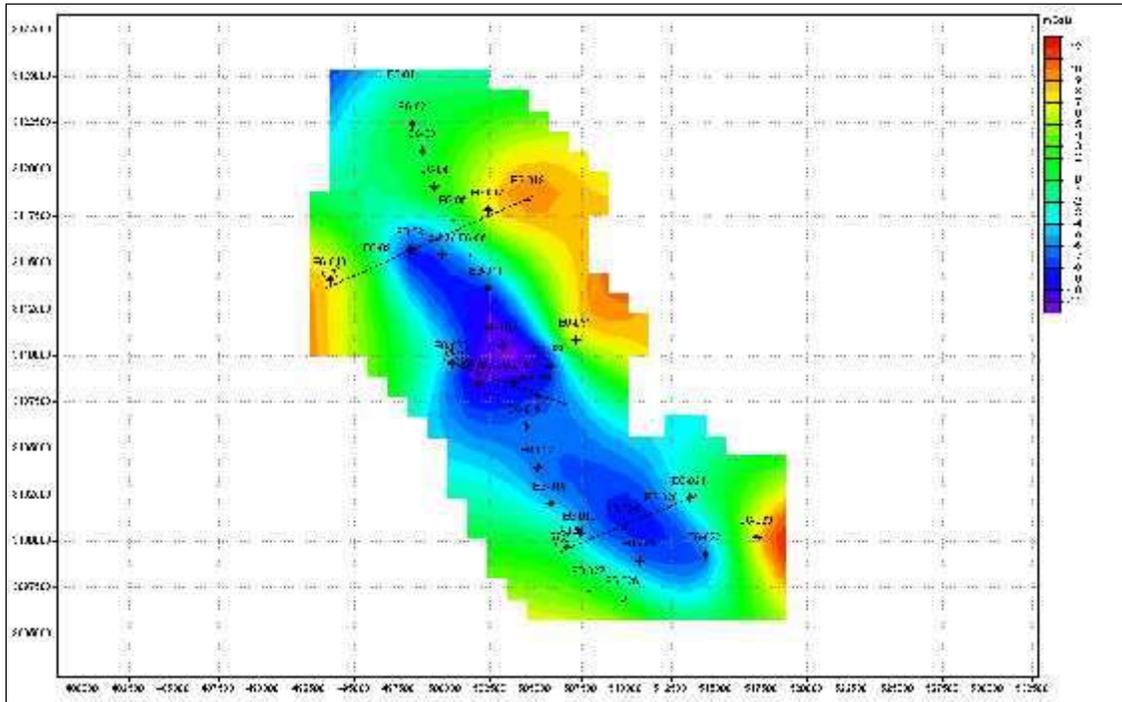


Figura 65 Plano de Anomalia Residual donde se muestra la distribución de los 3 perfiles modelados dentro del área en el acuífero San José de Guaymas.

La función de estos modelos es hacer coincidir la curva observada con la calculada dada por el software. Para integrarlos, se estableció que el basamento sobre el que descansan los sedimentos que rellenan la cuenca del acuífero San José de Guaymas, está constituido por: 1) rocas granodioríticas mesozoicas cubiertas discordantemente por 2) una secuencia volcánica y volcanoclástica dominada por rocas félsicas del Mioceno medio, y 3) una secuencia basáltica del Mioceno superior que se encuentra sobreyaciendo a la secuencia anterior y que aflora en gran parte de la porción oriental de la cuenca. Las densidades utilizadas para este proceso se muestran en la Tabla 11

Tabla 11 Densidades utilizadas en la modelación de los perfiles Del acuífero San José de Guaymas.

LITOLOGÍA	DENSIDAD
Sedimentos	1.90 gr/cm ³
Secuencia basáltica	2.99 gr/cm ³
Secuencia volcánica félsica	2.61 gr/cm ³
Granodiorita	2.72 gr/cm ³

Perfil 1-1'

Este perfil se localiza en la porción noroeste del área de estudio y se constituye por las estaciones EG-07, EG-08, EG-09, EG-010, EG-012 y EG-013, presentando una orientación NE-SW y una longitud de 11,500 m (Figura 66).

En este perfil se presenta la depresión noroeste, la cual es limitada en su porción oriental por una falla normal sepultada, de manera que en esa zona se incrementa el espesor del relleno sedimentario que alcanza el valor máximo de 452 m, entre las estaciones EG-08 y EG-09. Debajo del relleno sedimentario se presenta el basalto del Mioceno superior, que es la roca de mayor densidad en la sección, que a su vez sobreyace a rocas volcánicas y plutónicas del Mioceno medio y el Mesozoico, respectivamente.

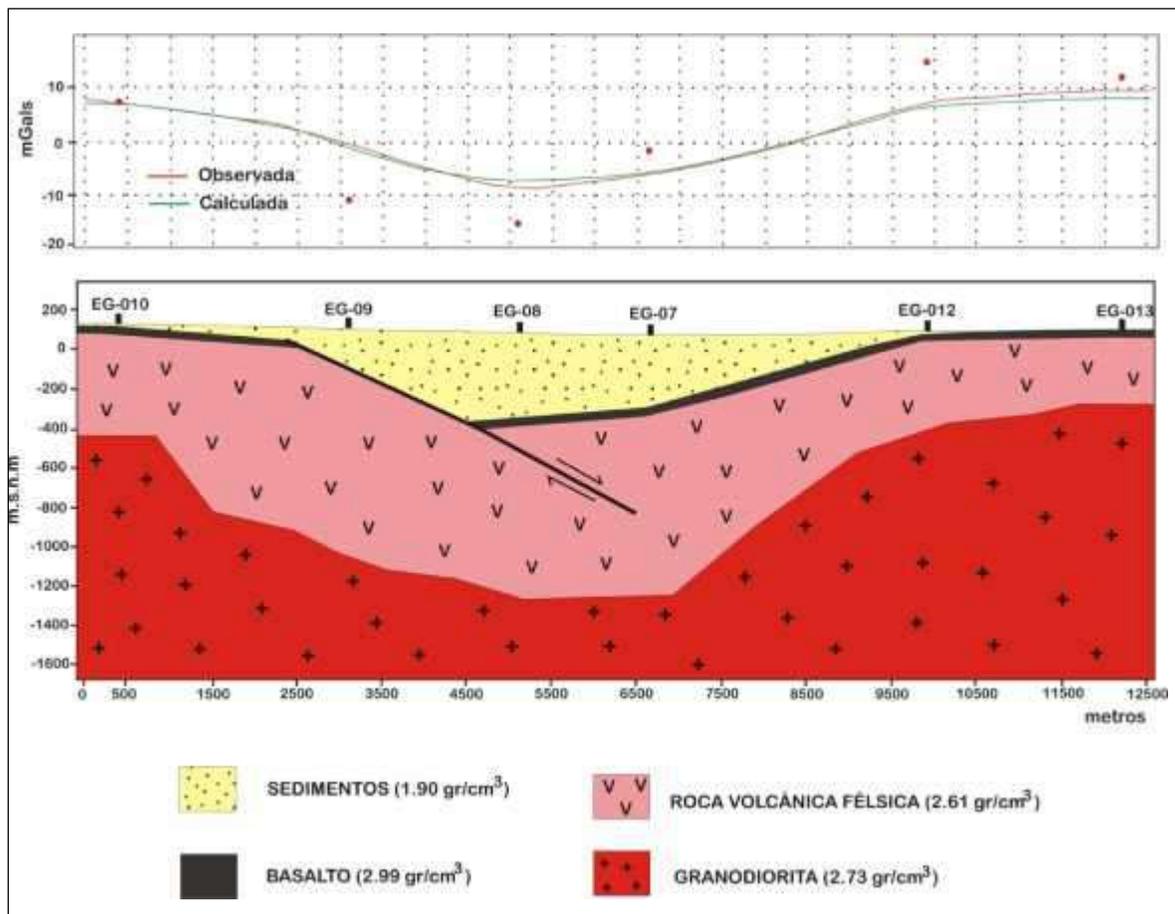


Figura 66 Modelo del perfil 1-1' acuífero San José de Guaymas.

Perfil 2-2'

Este perfil se localiza en la porción sureste del área estudiada y está constituido por las estaciones EG-019, EG-020, EG-021, EG-024 y EG-028, presentando una orientación NE-SW y una longitud de 7,700 m (Figura 67).

Este perfil corta a la depresión sureste, la cual se interpreta que es limitada por una falla normal sepultada en su porción oriental. El espesor de los sedimentos que rellenan la fosa llega hasta los 290 mm entre las estaciones EG-020 y EG-024. Al igual que en la sección anterior, el relleno sedimentario descansa sobre derrames de rocas basálticas del Mioceno superior, y en ocasiones directamente sobre las rocas volcánicas félsicas que también subyacen al basalto. Bajo las unidades anteriores, se presenta el basamento cristalino formado por rocas intrusivas.

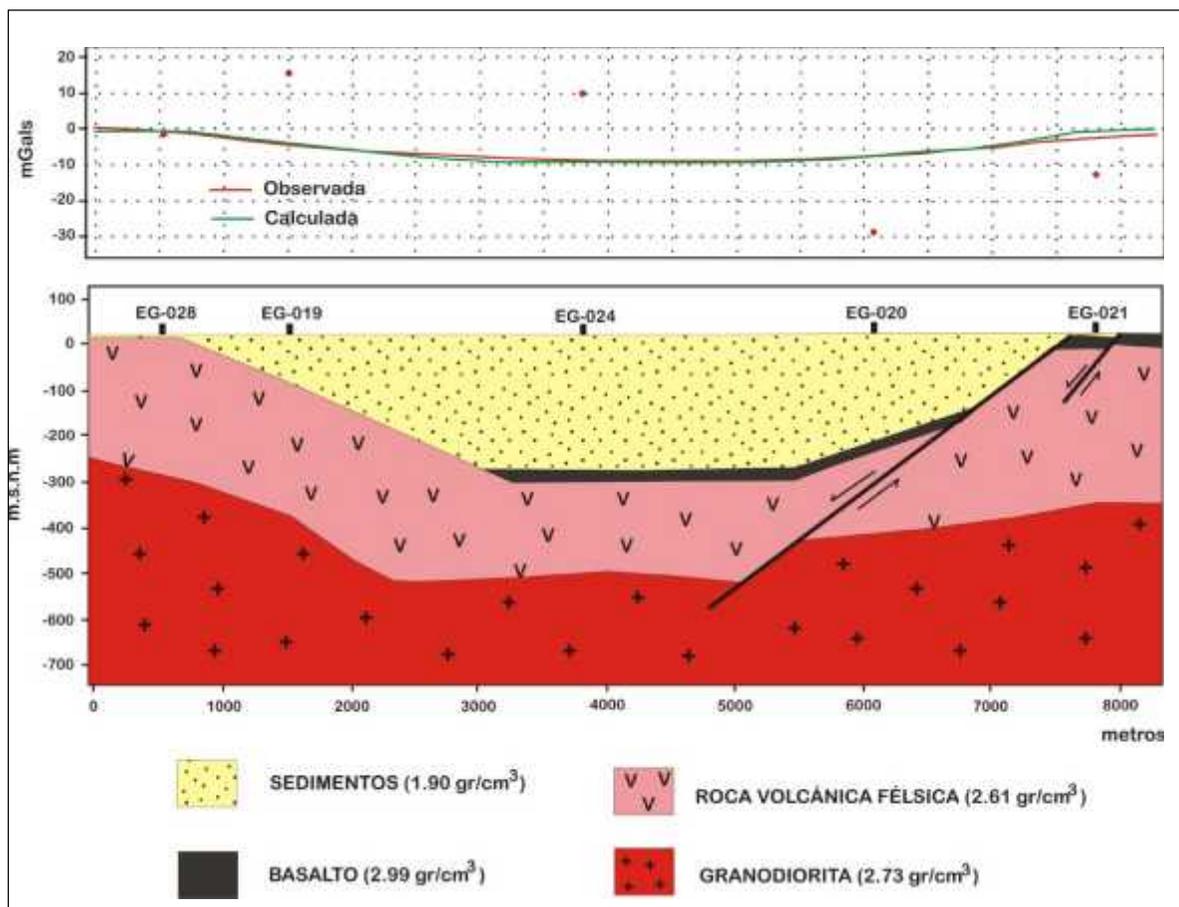


Figura 67 Modelo del perfil 2-2' acuífero San José de Guaymas.

Perfil 3-3'

Este perfil se localiza en la porción central del área de estudio y está constituido por cuatro estaciones gravimétricas: EG-015, EG-029, EG-032 y EG-033. Presenta una orientación NW-SE y una longitud de 5,200 m (Figura 68).

El perfil muestra un corte de la depresión central, la cual se interpreta que es limitada al noroeste por una falla normal sepultada, permitiendo que hacia esta porción se incremente el espesor del relleno sedimentario, alcanzando el valor máximo entre las estaciones EG-032 y EG-033 con 490 metros. A diferencia de los perfiles anteriores, la unidad granodiorítica del Mesozoico se encuentra a una profundidad mayor a 800 m, dado que no fue detectada.

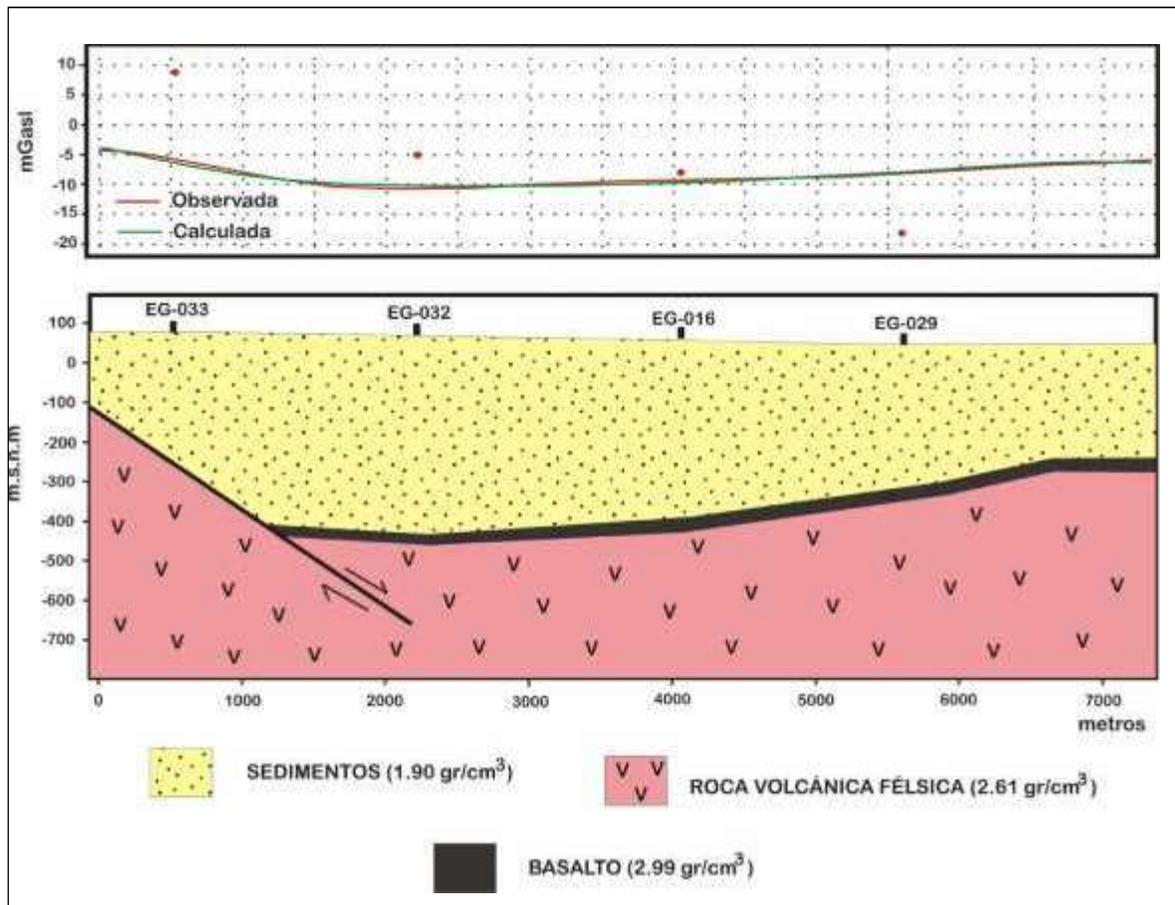


Figura 68 Modelo del perfil 3-3' acuífero San José de Guaymas.

V.7 MODELO HIDROGEOFÍSICO CASO ACUÍFERO PUERTO LIBERTAD

El modelo hidrogeofísico del acuífero Puerto Libertad se obtuvo de la información de resistividad de los perfiles geoelectricos, la cual se asoció a diferentes tipos de roca y sedimentos de granulometría variable, así como a zonas saturadas de agua dulce y agua salobre a salada. Con esta integración, los perfiles geoelectricos se interpretan como secciones hidrogeofísicas. Además, se integraron diagramas de cerco y diferentes vistas de las secciones. Fueron interpretadas 14 secciones desde el punto de vista hidrogeofísico, de las cuales se describen dos de las más representativas del área.

La sección hidrogeofísica de la Figura 69, tiene una orientación NE-SW, y muestra a la unidad granítica tanto como un **basamento impermeable**, como una **roca fracturada** que permite el paso de agua a través de ella. Sobreyaciendo a la unidad, se encuentra una roca volcánica impermeable y material granular poco consolidado formado por grava, arena y boleos principalmente, el cual presenta horizontes de gravilla arenosa. Se encuentran zonas que presentan alta conductividad debido a la salinidad del agua, la cual es mayor hacia la costa.

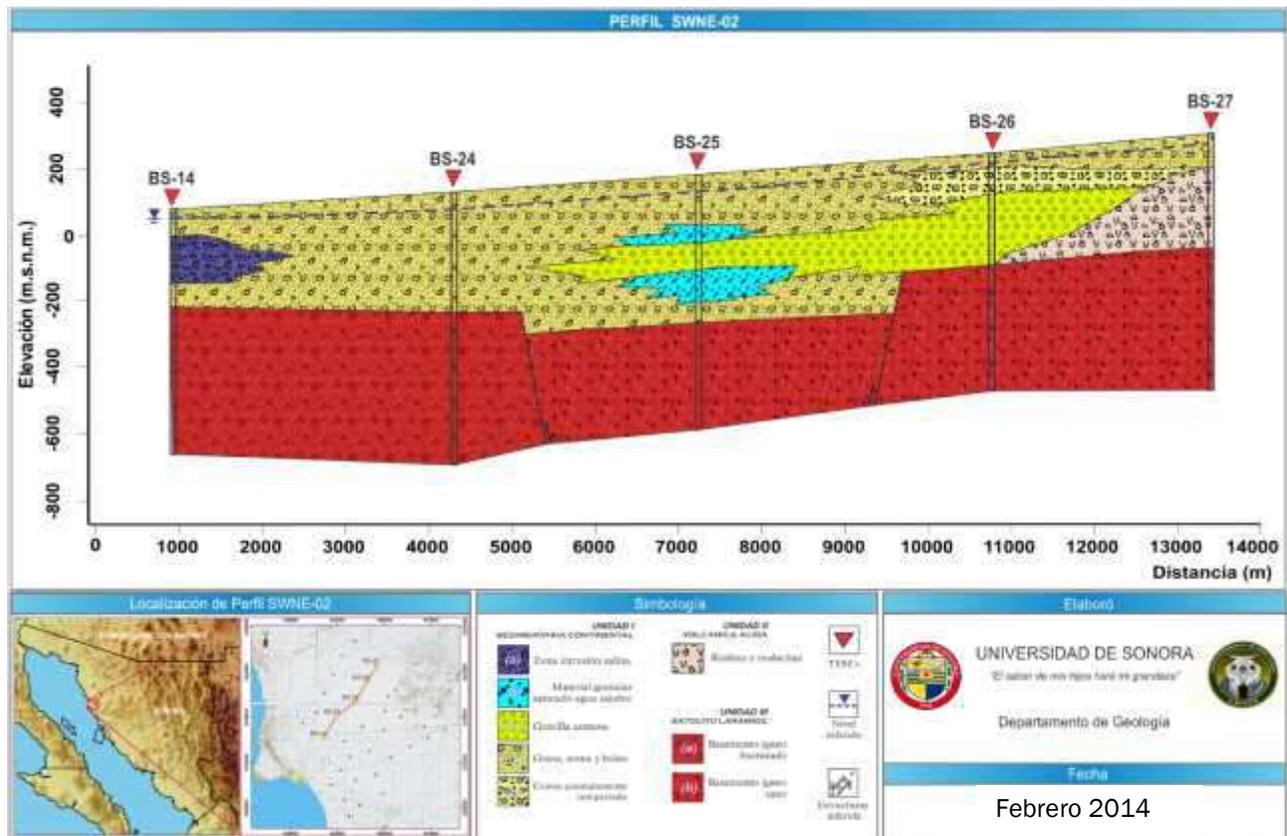


Figura 69 Sección hidrogeofísica SWNE-02 acuífero Puerto Libertad.

La sección hidrogeofísica de la Figura 70, tiene una orientación casi E-W. En ésta se muestra la geometría del basamento impermeable que en superficie aflora en la Sierra de Aguirre. También se muestra la misma roca pero fracturada, en dirección hacia una de las fosas del área. Sobreyaciendo a esta unidad, se encuentran los sedimentos que rellenan las fosas y que están formados principalmente por gravas, arenas y boleos. Estos sedimentos son producto de la denudación de las rocas de los alrededores y por lo tanto son heterogéneos en su composición, dureza y grados de compacidad. Por ello, la penetración de agua marina tiene mayor o menor presencia, y la mezcla de aguas de diferente calidad se refleja como producto de la estratigrafía.

Por otro lado es posible también que dentro de la columna estratigráfica estén presentes horizontes o niveles sedimentarios de materiales depositados durante etapas de transgresión marina en las que el avance de la línea de costa tierra dentro propicia la sedimentación de niveles limo-arcillosos interestratificados con lentes de depósitos evaporíticos, que con la recarga del acuífero fueron disueltos. Esto permite proponer la posible ocurrencia de estos sedimentos depositados en ambientes marino-transgresivos.

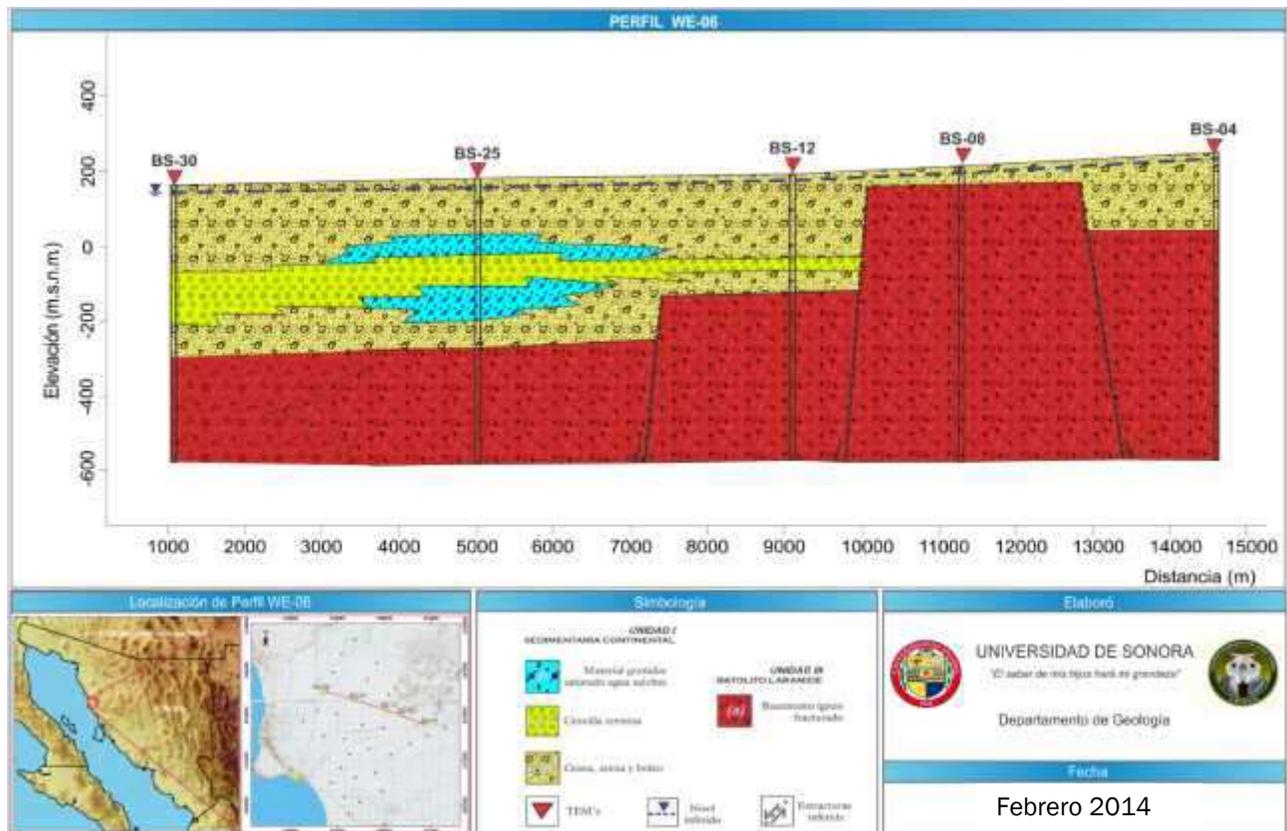


Figura 70 Sección hidrogeofísica WE-06 acuífero Puerto Libertad.

El modelo hidrogeofísico de Puerto Libertad se integró con las 14 secciones hidrogeofísicas, de las cuales 8 son paralelas a la costa con aproximadamente 8 a 10 km de longitud y con una dirección W-E; y las 6 restantes tienen una orientación SW-NE con aproximadamente 12 a 15 km de longitud.

Al colocar con diferentes orientaciones las 14 secciones, se puede observar el comportamiento hidrogeológico del área de estudio (Figura 71). En la figura se observa un basamento fracturado y/o alterado, que probablemente se encuentra saturado con agua salada en las cercanías de la costa, así como un segundo basamento sano. Esta roca granítica sana, cuyo afloramiento en superficie corresponde a la sierra los Cirios, actúa como barrera impermeable a la intrusión marina. Las secciones mostradas descubren en la parte central del área, un canal con relleno sedimentario, su espesor varía de 300 a 500 m, y por su textura, este ha facilitado la intrusión salina. Se aprecia muy claramente, este canal, que corresponde con la extensión completa de la fosa 1. En una segunda fosa que corresponde con la identificada previamente como Fosa 2 en el modelo, ubicada entre la Sierra Julio y Sierra Aguirre, existe un espesor de 400 a 600 m. El espesor granular varía de 66 a 600 m y descansa sobre el basamento granítico, que en ocasiones se encuentra fracturado y también como roca sana, siendo éste el límite hidrogeológico a profundidad de las fosas. Las rocas volcánicas sobreyacen a las rocas graníticas y son afectadas también por las estructuras tectónicas del Terciario.

En el modelo hidrogeofísico, en color rojo se muestra la roca intrusiva sana, que actúa como basamento hidrogeológico; también se muestra esta roca intrusiva pero con fracturamiento importante, lo que la convierte en otra unidad hidrogeofísica diferente. Las rocas volcánicas están representadas por un tono rosado, descansando sobre las rocas intrusivas, sin embargo su importancia hidrogeológica es baja, ya que su distribución en el subsuelo es muy limitada (solo se presenta en dos de las secciones) y su permeabilidad también. Los sedimentos semiconsolidados se presentan en tonos amarillos, variando desde conglomerado en las zonas más litificadas, hasta grava, arena, boleos y gravilla arenosa, siendo esta unidad la más importante desde el punto de vista hidrogeológico. Dentro de la unidad de sedimentos aluviales se detectaron zonas con baja resistividad, que se asociaron a lentes de agua salada (color morado) y agua salobre (color azul), las cuales se manifiestan a una profundidad que varía entre 46 y 85 m, con espesores entre 140 y 200 m.

El agua salobre aparece desde la línea de costa y hasta la sección hidrogeofísica WE-03 (a 10 km de distancia de la playa). La franja de agua salada se detectó en todas las secciones perpendiculares a la costa (con dirección SW-NE) y en las secciones paralelas detectada hasta la WE-05. El frente de intrusión se presenta en forma de digitación, como modelo, sería semejante a los dedos de una mano, donde entre los dedos hay agua salobre en sedimentos de las fosas y los dedos son propiamente las sierras impermeables.

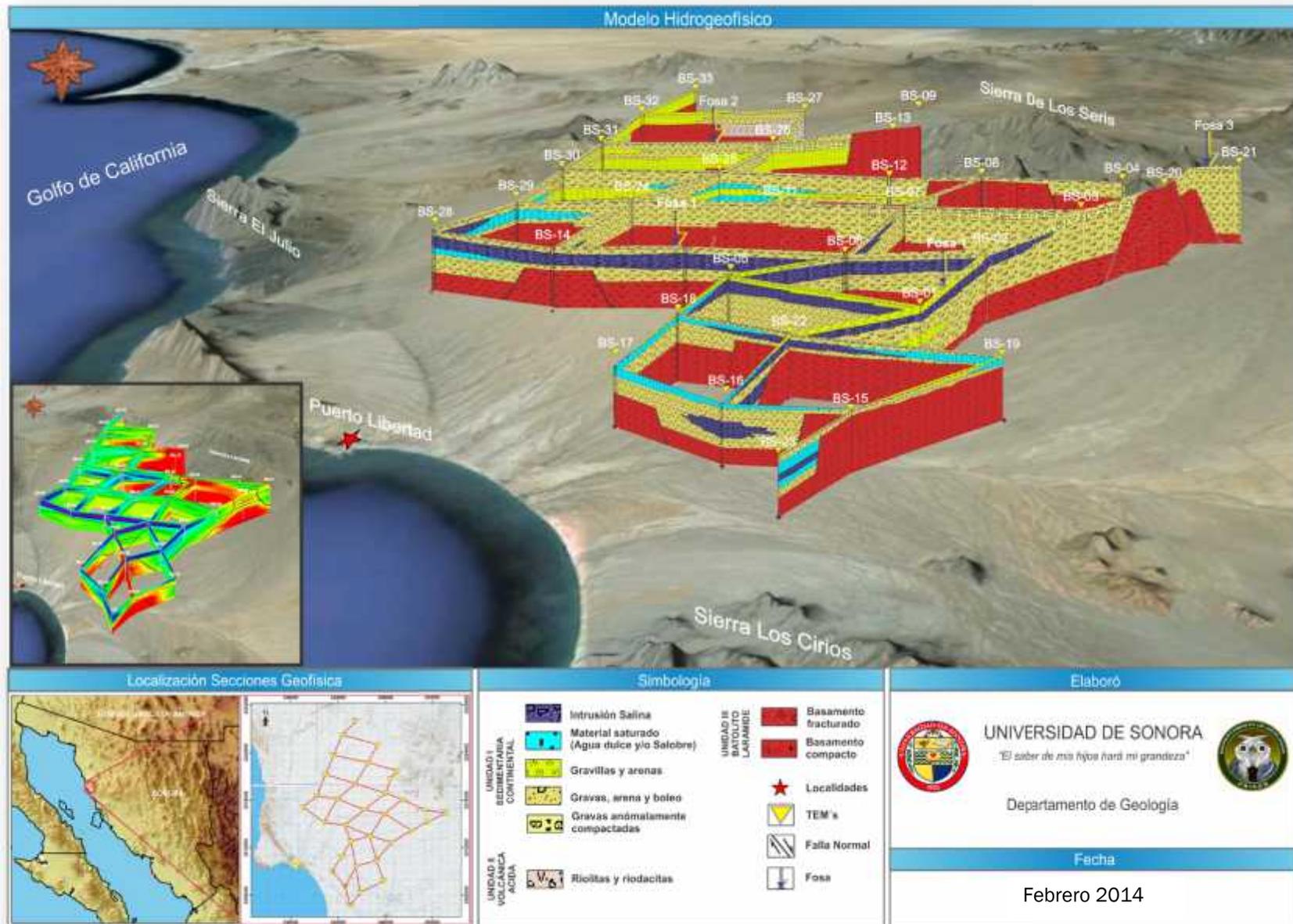


Figura 71 Modelo Hidrogeofísico acuífero Puerto Libertad.

V.7.1 Discusión de resultados caso acuífero Puerto Libertad

Las investigaciones geofísicas generalmente alcanzan a estudiar los primeros 300m de la superficie terrestre. Dentro de este rango de profundidades, las técnicas geofísicas han sido aplicadas con éxito en la caracterización de acuíferos de diferentes tipos (Figura 72), sintéticamente clasificados como:

Primarios. Aluviales en secuencias permeables de arenas y gravas alternadas a unidades impermeables de limos o arcillas, o en niveles/formaciones permeables continuas asociadas a rocas como calizas, carbonatos, areniscas, etc.

Secundarios. Estructuras de origen tectónico (fracturas, fallas, etc.) o secundaria (Karsts etc.) que pueden almacenar agua.

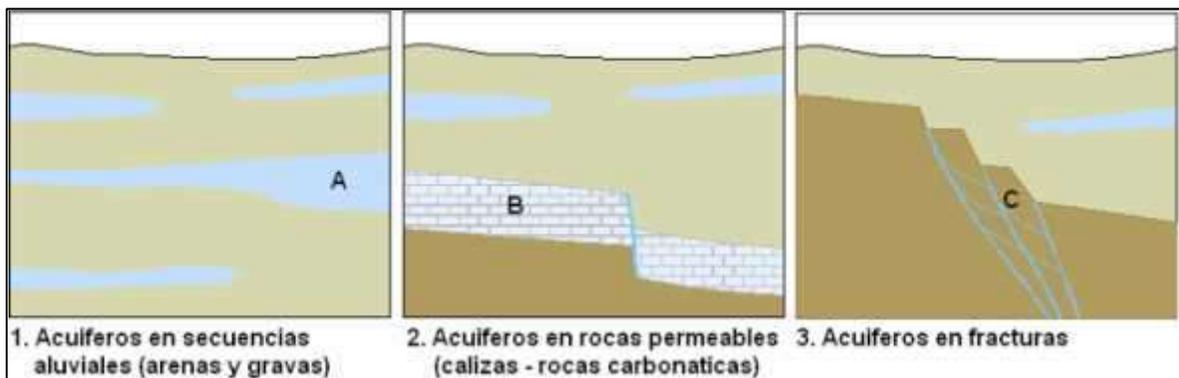


Figura 72 Acuíferos primarios en: 1. sedimentos clásticos (arenas y arenas/gravas), 2. Rocas permeables (calizas o carbonatadas), y 3. Acuíferos secundarios en fracturas

La zona en estudio presenta intrusión salina, la cual se manifiesta hasta 12 km tierra adentro, desde la línea de costa hasta el TEM BS-07, rumbo a la sierra Aguirre.

Se determinaron tres fosas de importancia:

- Fosa 1.- Es la más importante de ellas por su extensión se ubica en la parte centro – suroeste, pues abarca aproximadamente un área de 105 km². Cuenta con tres depresiones de importancia, que alcanzan 500 m, 700 m y 800 m de profundidad.
- Fosa 2.- Se localiza en la porción noroeste del área de estudio. Su extensión es de aproximadamente 30 km², y alcanza una profundidad máxima de 700 m.
- Fosa 3.- Se encuentra al sur de la sierra de Aguirre, en la porción este del área. Su extensión es pequeña, pues abarca aproximadamente 16 km².

La hidrodinámica en la zona es de tipo natural: el flujo subterráneo va de las sierras de los alrededores hacia las partes bajas, hasta descargar en el mar, al sureste del poblado de Puerto Libertad. La elevación del nivel estático aumenta a medida que aumenta la elevación topográfica. De manera que la penetración de agua marina se ha dado en forma natural, es decir no ha sido provocada por sobreexplotación de agua subterránea del acuífero.

La cuña de agua salada, debido a su mayor densidad, se encuentra debajo de la columna de agua dulce, penetrando en hasta 12 km al continente. La forma de la pluma tiene una geometría que semeja lentes o “dedos” debido a las características de los sedimentos presentes en el relleno de las fosas, pues la penetración es más difícil en las zonas arcillosas. La profundidad a la que se encuentra la cuña varía entre 46 y 85 m, y su espesor va desde 140 a 200 m.

La intrusión ha sido provocada por la diferencia de carga hidráulica entre la corriente del continente y la del mar, debido a la baja precipitación y alta evaporación que se presentan en el área, y a la escasez de flujos regionales.

La tectónica distensiva del Terciario, provocó una serie de fallas normales de alto ángulo y el desplazamiento de los bloques a su vez, dejó a las rocas graníticas fracturadas en las zonas de falla, lo que les proporcionó una permeabilidad secundaria de interés hidrogeológico. Las zonas que resistieron el fallamiento, se convirtieron en barreras impermeables tanto para el frente de intrusión como para el agua dulce en su viaje hacia la costa.

Como resultado se sabe que el acuífero se encuentra en una cuenca sedimentaria producto de la generación de bloques caídos definidos por fallas normales orientadas NW-SE y NE-SW desarrolladas probablemente durante la tectónica del “Basin and Range” y la apertura del Golfo de California. El basamento cristalino está controlado por un conjunto de altos topográficos (horst) y fosas (gravens) tectónicas con orientación NW-SE, NE-SW y E-W que fueron rellenadas por sedimentos marinos y continentales, los cuales constituyen el acuífero. La relevancia hidrogeológica de estas estructuras mayores radica en que representan fracciones de fosas tectónicas que a manera de canales de alta permeabilidad, facilitan el proceso de intrusión marina hacia el continente.

El acuífero Puerto Libertad cuenta con 25 aprovechamientos (17 pozos y 8 norias), que extraen un volumen anual calculado de 2.7 Hm³/año. El uso que predomina es el pecuario.

Salvo los aprovechamientos localizados en las localidades El Picú y Santa Amalia (111 y 114, respectivamente) los resultados de los análisis del resto de los aprovechamientos, muestran concentraciones dentro de los rangos establecidos por la NOM. El aprovechamiento 114 rebasa los LMP por salinidad en términos de CE y al contenido de STD, Cl y Na,

ubicándose en una familia de agua clorurada magnésico-sódica, siendo este el único aprovechamiento no apto para uso y consumo humano.

La calidad del agua del acuífero varía en salinidad expresada en términos de su conductividad eléctrica de 800 a 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (micro siemens por centímetro). De aquí que la variación entre esta agua y la ubicada en la franja costera es fácilmente distinguible. Apoyados en la interpretación geofísica se aprecia que en el frente de la bahía existe una penetración marina de cortas dimensiones, entre el centro y sur de Puerto Libertad y se definen dos zonas de interfase de agua salina; una pluma de agua salobre que penetra entre Puerto Libertad y el oeste rumbo a la sierra Bacha con espesores de hasta 100 m, y otra de mayor longitud que penetra continente adentro y se extiende desde Puerto Libertad en dirección noreste, con espesores variables desde unos pocos metros a un promedio de 60m de agua salobre-salada.

El flujo que penetra es almacenado y circula por el relleno sedimentario, es principalmente de textura gruesa, y constituye un acuífero de tipo libre. Sin embargo, el almacenamiento se comporta en forma errática, ya que fuera de la influencia de los cauces, existen zonas de bajo rendimiento donde se intercalan rellenos sedimentos finos que reducen la conductividad hidráulica del acuífero. La profundidad al nivel se encuentra mayormente por debajo de 70 m.

De la prueba de infiltración realizada, con una columna de agua de 3.9 m, se alcanzó la infiltración de 1.47 lt/s. A medida que la columna disminuye de igual manera lo hace el gasto, por lo que el gasto promedio en la prueba fue de 0.037 lt/s, considerando un volumen de 199.03 litros que se infiltraron en 5400 segundos. No fue posible aumentar la longitud de la columna de agua, pues la única pipa disponible no podía suministrar un gasto mayor. A mayor columna, se podrá alcanzar mayor volumen de infiltración. La conductividad hidráulica obtenida en la prueba es de **$1.18 \times 10^{-7} \text{ m/s}$** (método de Moench, acuíferos libres).

Se calcula como entradas significativas al área de balance: entradas horizontales ($4.12 \text{ Hm}^3/\text{año}$) y recarga vertical ($2.12 \text{ Hm}^3/\text{año}$). Las salidas son: bombeo ($2.7 \text{ Hm}^3/\text{año}$), salidas horizontales ($0.05 \text{ Hm}^3/\text{año}$) y evapotranspiración ($0.30 \text{ Hm}^3/\text{año}$). El cambio de almacenamiento se calcula en $3.19 \text{ Hm}^3/\text{año}$.

El volumen concesionado de aguas subterráneas es de $5.2 \text{ Hm}^3/\text{año}$, la descarga natural comprometida corresponde al volumen de salidas horizontales ($0.05 \text{ Hm}^3/\text{año}$), y la recarga total es de $6.2 \text{ Hm}^3/\text{año}$, de manera que la disponibilidad estimada para el acuífero Puerto Libertad es de **$0.92 \text{ Hm}^3/\text{año}$** .

VI. CONCLUSIONES

En base a la metodología planteada en este trabajo se puede concluir que:

- ❖ Para estudios preliminares o de reconocimiento. La aplicación de los SIG permite una distribución de los parámetros en función de las características especiales que define la geología de la zona de estudio, permitiendo incorporar una consideración que en estudios anteriores se realizaba de forma aproximada. Asimismo se contemplan otras ventajas en la preparación de las capas de información que definen el modelo hidrogeofísico y controlando los errores que pueden incidir en problemas en la caracterización hidrogeofísica. La recopilación de datos se hace con ayuda de mapas geológicos y topográficos regionales e información de fotografías aéreas e imágenes de satélite. También se requiere recopilar información de pozos antiguos presentes en el área. En este ámbito la geofísica puede contribuir a través de la ejecución en los pozos existentes (activos y abandonados) de logs (tipo gamma) que permiten reconstruir la estratigrafía y las condiciones geológicas.
- ❖ Para una caracterización general. Una vez definidas las posibles zonas de interés o estructuras susceptibles de almacenar aguas, se procede a planificar un estudio de superficie, mediante la combinación de distintas técnicas de investigación geofísica. El uso de estas técnicas es legitimado por su carácter no destructivo, su compatibilidad ambiental (no afecta el entorno) y sus ventajas técnico-económicas. Se debe tener en cuenta que no tiene sentido efectuar sin más una campaña de investigación geofísica “para buscar agua” si no se ha efectuado antes un estudio hidrogeológico que haya fijado el modelo del acuífero (ocurrencia – distribución geométrica, materiales y estructuras) y se haya escogido la metodología mejor para caracterizar el modelo de acuífero esperado en la condición geológica – estructural específica del sitio investigado. No existe una metodología universal de investigación que funcione para cualquier modelo de acuífero o ambiente geológico. Para el éxito del estudio es importante una correcta planificación que considere todos los parámetros geocientíficos y el test de diferentes métodos y configuraciones.
- ❖ Para una caracterización a detalle. Al finalizar la etapa anterior, se pueden emplazar pozos exploratorios con gran precisión sobre aquellas áreas y estructuras geológicas más promisorias. De esta forma, se puede lograr una efectividad de pozos productores cercana al 90%. Todo esto tiene como principal implicación el ahorro de tiempo, de dinero y la optimización de los resultados. Sírvase notar que la existencia de una perforación en un sitio donde se conoce, a través de la integración de datos en un SIG, el entorno geológico, estructural e

hidrológico, permite el monitoreo del acuífero y su clasificación en una base de datos global que permita planificar y regular la gestión de los recursos hídricos.

- ❖ Este breve repaso al desarrollo de los métodos geofísicos aplicados a la hidrogeología ha puesto de manifiesto que en la última década se han producido avances muy significativos. Actualmente se dispone de métodos más rápidos, económicos y sobre todo más resolutivos. En particular, el método de sondeos electromagnéticos (TEM) abre grandes expectativas que habrán de confirmarse con nuevas investigaciones y más casos de aplicación. Hay que hacer constar, sin embargo, que ningún método puede considerarse como superior a los otros, ya que cada estudio requerirá la aplicación de las caracterizaciones o técnicas más adecuadas en función del contexto geológico y de los demás condicionantes ambientales.
- ❖ Las técnicas geofísicas superficiales son utilizadas para obtener información acerca de las unidades del subsuelo que controlan el almacenamiento, movimiento y calidad de las aguas subterráneas. Todos los métodos geofísicos se basan en la medición de una propiedad física específica de los materiales que conforman el subsuelo, por ejemplo, la resistividad y la conductividad eléctrica, la velocidad de propagación del sonido, el campo magnético, el campo gravitacional, entre otras. Algunas de las herramientas de mayor uso y eficacia en la exploración de aguas subterráneas, tanto someras como profundas son: métodos eléctricos o galvanicos (SEV y tomografía eléctrica), métodos electromagnéticos (FDEM, VLF, TDEM y AMT/CSAMT), sísmica de refracción/reflexión, radar (GPR y Borehole Radar) y resonancia magnética nuclear (NMR o PMR), cada una de ellas corresponde a una de las propiedades físicas anteriormente mencionadas.
- ❖ Con base en lo anterior, el uso de la técnica empleada y su metodología descrita, es perfectamente compatible con el uso eficiente en la resolución de problemas de prospección hidrogeológica con fines de investigación del agua subterránea y es aplicable en cualquier medio acuífero.

REFERENCIAS CITADAS

- Anderson, T.H., Silver, L.T., 1974, Late Cretaceous plutonism in Sonora, Mexico and its relationship to circum pacific magmatism: Geological Society of America, Abstracts with Programs, 6, 484.
- Anderson, T.H. y Silver, L.T., 1977, U-Pb Isotopic Age Of Granitic Plutons Near Caborca, Sonora: Econ. Geology, V.72, P. 827-836.
- Anderson, t.h., Silver, l.t., 1979, The role of the Mojave-Sonora Megashear in the tectonic evolution of northern Sonora, en: T.H. Anderson, J. Roldán-Quintana (eds), Geology of Northern Sonora, Geological Society of America. Field Trip Guidebook 7, 59-68
- Anderson, T.H.; Rodríguez-Castañeda, J.L.; y Silver, L.T., 2005, Jurassic rocks in Sonora, Mexico—relations to the MojaveSonora megashear and its inferred northwestward extension, in Anderson, T.H.; McKee, J.W.; y Steiner, M.B., eds., The Mojave-Sonora megashear hypothesis—development, assessment, and alternatives: Geological Society of America Special Paper 393, p. 51–95.
- Arias, M. E., 2002, "Aplicaciones Geofísicas a la Hidrogeología de Costa Rica". Revista Geológica de América Central. N: 27. 11-20.
- APHA (American Public Health Asociation), 1995, Standard Methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., New York, 769 pp.
- Brown, E. Charles. ,1988, Determination of rock properties by borehole-geophysical and physical testing techniques and ground water quality and movement in the Durham Triassic Basin, North Carolina. 29pp. U.S.Geological Survey Professional Paper 1432. Washington.
- Barajas M., Mackrain F., Lopez M., y Mendoza R., 2000, Waning miocene subduction and arc volcanism in Baja California: the San Luis Gonzaga volcanic field..Tectonophysics. (No. 318.): pp 27-51 p. (PA: CPGOA9904-2000)
- Córdova, C., 1988, Cartografía Geomorfológica en Escala Pequeña del Occidente de la República Mexicana, México D.F., UNAM, Facultad de Filosofía y Letras, Tesis Profesional., 127p. (inédita).
- Custodio, E & Llamas, M. R., 1996, Hidrología subterránea. Editorial Omega. Barcelona. Tomos I y II
- Davis, S.N. y De Wiest, R., 1971, Hidrogeología. Ariel, 563 p.
- Damon P., Shafiqullah M. Roldan G. J. y Cocheme J. J., 1983, El Batolito Larámide (90-40 Ma) de Sonora. AIMMGM, Memoria XV, P. 63-95.
- Damon, P. E., 1964, Dating of Mesozoic-Cenozoic metallogenetic provinces within the Republic of Mexico (1965-1975), Archivo interno CRNNR
- Eguiluz-de Antuñano, Samuel; Aranda-García, Mario; y Marrett, Randall, 2000, Tectónica de la Sierra Madre Oriental: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 53, p. 1-26.

- Fetter, C. W., 1994, *Applied Hydrogeology*, University of Wisconsin-Oshkosh. Tercera Edición. Estados Unidos p.681
- Freeze, R.A.; Cherry, J., 1979, *Groundwater*, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, US.A. p.604
- García I., López B., Muñoz E., 2011, aplicación de la prospección geofísica utilizando el método schlumberger para la exploración del agua subterránea en canton los magueyes, colonia santa lucia, municipio de ahuchapan, Universidad de el Salvador, 100pp.
- García E., 1983, *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía. UNAM. D.F., México. 219pp.
- García, C., 1996, *Técnicas y metodología para la interpretación de registros geofísicos de pozos en yacimientos de origen vulcánico-sedimentario*. Tesis de Doctorado. ISCTN. La Habana-Cuba. 110pp.
- García J.I., López N.B., Muñoz J.E., 2011, *Aplicación de la prospección geofísica utilizando el método Schlumberger para la exploración del agua subterránea en Canton los Magueyes, colonia santa lucia, municipio de Ahuachapan*. Tesis Universidad de el Salvador p.80
- Gastil, R.G., & D. Krummernacher., 1977, *Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahia de Kino*. GSA Bull. 88(2); 89-98.
- Gastil, R. G., Neuhaus, J., Cassidy, M., Smith, J. T., Ingle, J. C., jr., and Krummenacher, D., 1999, *Geology and paleontology of southwestern Isla Tiburon, Sonora, Mexico*: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 16, no. 1, p. 1-34.
- González-León, C.M., 1980, *La Formación Antimonio (Triásico Superior-Jurásico Inferior) en la Sierra del Álamo, estado de Sonora*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v 4, p. 13-18.
- González L. C., 1994, *Stratigraphy Depositional Environment and Origin of the Cabullona Basin Northeastern Sonora, Mexico*. Tesis Doctor of Philosophy, University of Arizona, p.144
- González L. C.; Timothy F. L., 1995, *Stratigraphy, Depositional Environments and Origin of the Cabullona Basin, Northeastern Sonora*, Geological Society of American Special Paper 301, P. 121-141.
- González L. C.; Timothy F. L., 1995, *Stratigraphy, Depositional Environments and Origin of the Cabullona Basin, Northeastern Sonora*, Geological Society of American Special Paper 301, P. 121-141.
- Gómez Rivero., 1979, *A semiquantitative technique for predicting producibility limits of reservoirs by well log analysis*. 10pp. SPWLA, 20 Annual Logging symposium, June 36.

- Hinnell, A. C., T. P. A. Ferré, J. A. Vrugt, J. A. Huisman, S. Moysey, J. Rings, and M. B. Kowalsky., 2010, Improved extraction of hydrologic information from geophysical data through coupled hydrogeophysical inversion, *Water Resour. Res.*, 46, W00D40, doi: 10.1029/2008WR007060.
- Herckenrath, D., E. Auken, L. Christiansen, A. A. Behroozmand, and P. Bauer-Gottwein., 2012, Coupled hydrogeophysical inversion using time-lapse magnetic resonance sounding and time-lapse gravity data for hydraulic aquifer testing: Will it work in practice?, *Water Resour. Res.*, 48, W01539, doi: 10.1029/2011WR010411.
- Harry Vereecken, Andrew Binley, Giorgio Cassiani, Andre Revil y Konstantin Titov., 2006, *Applied Hydrogeophysics*, Published by Springer, pp 377.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática., 1993, Estudio hidrológico del Estado de Sonora. Gobierno del Estado de Sonora, & INEGI,
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Cartas topográficas escala 1:250 000: Puerto Peñasco (H12-01), Caborca (H12-04), Ángel de la Guarda H12-07 y Hermosillo H12-08 (INEGI, 2000),
- Jones, P.H. & T.B. Bufford., 1951, Electric logging applied to ground-water exploration. *Geophysics* 16(1): p.115-139.
- Jones & Bufford,1951; Keys & MacCary, 1971, Brown, 1988, Modelo hidrogeofísico de la Cuenca sur de la Habana. Colomb. 4:3-9. ISSN 0121-2974. Santa Fe de Bogota, D.C. - Colombia.
- Keys, W.S. & L. MacCary., 1971, Application of borehole geophysics to water-resources investigations. In *Techniques of Water-Resources Investigations of the USGS*. 126pp.
- Keller, G.V. and F.C. Frischknecht., 1970, *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*, Pergamon press, New York, 115p.
- Katsube, T. & P. Humet., 1987, Permeability determination in crystalline rocks by standard geophysical logs. *Geophysics* 32(3):342-352
- López J.A. y Gómez J., 2007, La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos Españoles. *Enseñanza de la Ciencias de la Tierras*, 2007.(15.3) 266-273, I.S.S.N.:1132-9157.
- Lugo-Hubp, J. y Córdova-Fernández de A. C., 1990, Morfogénesis (Mapa de la República Mexicana) Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, Hoja geomorfología 1, No. IV. 3,3.
- Mercado, A., 1988, Intrusión marina- factor determinante en la gestión de los acuíferos costeros. *TAHAL-Water Planning for Israel*. Pp 315-349.
- Mazac, Kelly & Landa., 1985, Application of borehole geophysics to water-resources investigations. In *Techniques of Water-Resources Investigations of the USGS*. 126pp.
- Mazac, O.; W.E. Kelly & I. Landa.,1985, A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers. *Journal of Hydrology* 79:1-19.

- Mazor, E., 1997, Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, The applied Approach, second edition, Revised and expanded Marcel Dekker, Inc, Halsted Press a Division of John Wiley and Sons, U.S.A.
- Mark Goldman., 1988, Métodos de Prospección Eléctrica en el control de la Intrusión Marina. Instituto para la investigación Petrolífera y la Geofísica. Israel. Pp 75-109.
- Miguel Rangel Medina, Rogelio Monreal Saavedra and Christopher Watts., 2011, Coastal Aquifers of Sonora: Hydrogeological Analysis Maintaining a Sustainable Equilibrium. Hexagon Series on Human and Environmental security and peace VOL 7 Published by Springer, pag. 73-85. I.S.S.N.:1865-5793.
- Ministerio de Agricultura, Autoridad Nacional del Agua y Dirección de Conservación y Planteamiento de Recursos Hídricos., 2011, "Evaluación de las Aguas Subterráneas del Acuífero Asia-Omas". Pag. 103.
- Monreal Saavedra, R.; Morales Montaña, M.; Castillo Gurrola, J. y Rangel Medina, M., 2000, Estudio geohidrológico del comportamiento del acuífero mediante la realización de pruebas de bombeo y conceptualización a detalle de la intrusión salina en el acuífero de la Costa de Hermosillo. Comisión Nacional del Agua y Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- Nakanishi, M. and winterer, E.L. 1988, Tectonic history of the pacific-Farallon-Phoenix triple junction from late Jurassic to Early Cretaceous: An abandoned Mesozoic spreading system in the Central Pacific Basin. Journal of Geophysical Research 103: doi: 10.1029/98JB00754. Issn: 0148-0227.
- Peccerillo, A., 2005, Plio-Quaternary volcanism in Italy. Petrology, Geochemistry, Geodynamics. Springer, Heidelberg. 365 pp.
- Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España., 2005, "Groundwater and saline intrusion, Selected papers from the 18th Salt Water Intrusion Meeting, Cartagena", Editorial Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, p. 76 (Hidrogeología y aguas subterráneas;15), ISBN: 84-7840-588-7.
- Peccerillo, A., 2005, Plio-Quaternary volcanism in Italy. Petrology, Geochemistry, Geodynamics. Springer, Heidelberg, 365 pp.
- Rodríguez-Castañeda, J.L., 1984, Geology of Tuape region, northcentral Sonora, Mexico: Pittsburgh, PA, University of Pittsburgh, tesis de maestría en ciencias, 157 p.
- REPDA "Registro Público de Derechos de Agua". CONAGUA.
- Rosa M. Valcarce Ortega & Jacqueline Gonzalez Espinosa., 1998, Modelo Hidrogeofísico de la Cuenca Sur de la Habana. Geofísica Colombiana. N4 pp.3-9. ISSN 0121-2974 Santa Fe Bogotá, D.C.- Colombia.
- Sanz A.G., 1998, Aplicación de los métodos geofísicos al estudio de la intrusión en acuíferos costeros. Tecnología de la intrusión salina en acuíferos costeros. Experiencia Española, Granada España. Pp111-134

- Sanchez A.R.; Mazariegos A.; Rodrigo F.B.; y. Gavela W.R., 1988, Estado actual del conocimiento de la intrusión marina en las Islas Baleares. pp 569-584.
- Sengpiel, K.P., 1986, Groundwater prospecting by multifrequency airborne electromagnetic techniques, I: Airborne Resistive y Mapping, Geological Survey of Canada, 131-138.
- Staude, J.-M. G., and Barton, M. D., 2001, Metallogeny of northwestern Mexico: Bulletin of the Geological Society of America, v. 113, 1357-1374.
- Servicio Geológico Mexicano. Cartas geológicas escala 1:250,000: Ángel de la Guarda H12-07 y Caborca (H12-04).
- Urrutia L.G. & Arias M.E., 2006, Hidrogeofísica de la Cuenca del Río San Antonio, El Salvador: Aplicación al Modelo Conceptual y Vulnerabilidad Intrínseca, Revista Geológica de América Central, 34-35: 121-129, 2006 ISSN: 0256-7024.
- Universidad de Sonora., 2005, "Atlas de aguas subterráneas y red de monitoreo del estado de Sonora". Estudio realizado para la Comisión Nacional del Agua.
- Universidad de Sonora., 2006, "Estudio de Caracterización Físicoquímica y Piezometría de los Acuíferos Costeros de la Región Noroeste". Estudio realizado para la Comisión Nacional del Agua.
- Universidad de Sonora., 2007, Estudio técnico para determinar la factibilidad de extracción de aguas subterráneas para su desalación en los acuíferos de Caborca, Puerto Libertad, Arivaipa y Fuerte Mayo, Sonora. Estudio realizado para la Comisión Nacional del Agua, 2007.
- Valcarce, R.M., 1995, Metodos Geofisicos en Pozos para el Estudio de Acuíferos Carsticos. Tesis de Maestría. 74. ISPJAE, La Habana-Cuba, citado en Geofísica Colombiana N4 pp.3-9 marzo,2000 Santa Fe de Bogotá D.C. ISSN-0121-2974.
- Verstappen, Th. y Van Zuidam, R., 1981, El sistema ITC para el levantamiento geomorfológico. ITC Publication 41 pp.
- Wilson, F. & Rocha, S.V., 1949 Coal deposits of the Santa Clara district near Tonichi, Sonora, Mexico. U.S. Geol. Survey Bulletin. 962-A, p.1-80