



UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

**“ESTUDIO GRAVIMÉTRICO DE LA CARTA BUENAVISTA H12–
D63 EN LA PORCIÓN SURESTE DE SONORA, MÉXICO”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

Licenciado en Geología

PRESENTA:

Abraham Antonio Lizola Romero



Hermosillo, Sonora, México.

Octubre 2017

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



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

Agradecimientos:

Primero me gustaría agradecer sinceramente a mi directora de tesis, la Doctora Silvia Martínez Retama, por su esfuerzo y dedicación. Sus conocimientos, su orientación, su persistencia y su manera de trabajar han sido fundamentales para la realización de esta tesis.

A mis sinodales:

Dr. Francisco Abraham Paz Moreno

M.C. Alma Patricia Sámano Tirado

Por haber inculcado en mí un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico, valores sin los cuales no podría tener una formación completa.

A mis padres y familiares por brindarme su apoyo moral y económico para continuar mis estudios y lograr el objetivo trazado para un futuro mejor y ser orgullo para ellos.

Por último, pero no menos importante, a la Universidad de Sonora por haberme formado para un futuro mejor como Licenciado en Geología.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	10
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Antecedentes	12
1.2. Justificación	14
1.3. Objetivos	14
1.4. Metodología	14
2. GEOGRAFÍA	15
2.1. Localización	15
2.2. Accesos y vías de comunicación	15
2.3. Fisiografía	16
3. GEOLOGÍA	17
3.1. Geología superficial	18
3.1.1. Rocas del Paleozoico	19
3.1.1.1. Secuencia sedimentaria ordovícica	19
3.1.2. Mesozoico	21
3.1.2.1. Grupo Barranca	21
3.1.3. Cretácico superior	23
3.1.3.1. Formación Tarahumara	23
3.1.4. Cretácico superior–Oligoceno	25
3.1.4.1. Batolito laramídico de Sonora	25
3.1.5. Cenozoico	26
3.1.5.1. Formación Báucarit	26
3.1.5.2. Formación Lista Blanca	26
3.1.6. Cuaternario	27
3.1.6.1. Cobertura sedimentaria	27

3.2. Geología estructural	28
3.2.1. Deformación dúctil	29
3.2.2. Deformación dúctil-frágil	29
3.2.3. Deformación frágil	29
3.3. Marco tectónico	30
4. MÉTODO GRAVIMÉTRICO	32
4.1. Ley de gravitación universal	32
4.2. Campo gravitacional de la tierra	33
4.3. Medición de la gravedad	34
4.3.1 Medición relativa usando un péndulo	34
4.3.2. Medición relativa usando el gravímetro	35
4.3.3 Medición relativa usando caída libre	35
4.4. Corrección de datos gravimétricos	36
4.4.1 Forma de la tierra	36
4.4.2. Corrección por latitud	37
4.4.3. Corrección por deriva	39
4.4.4. Corrección por aire libre	40
4.4.5. Corrección de Bouguer	41
4.5. Separación de anomalía regional y residual	45
4.5.1. Tendencia de la superficie	46
4.6. Modelado bidimensional	47
4.6.1. Método de Talwani	47
5. LEVANTAMIENTO GRAVIMÉTRICO DEL AREA DE ESTUDIO	50
5.1. Perfiles gravimétricos medidos en campo	50
5.1.1. Adquisición de datos	50
5.1.2. Determinación de la densidad	51
5.1.3. Corrección de datos	53
5.1.4. Anomalía de Bouguer	54

5.1.5. Anomalía regional y residual	55
5.2. Anomalía de gravedad de Bouguer completa del INEGI 2010 de la Carta Buena Vista	57
5.2.1. Adquisición de datos	57
5.2.2. Anomalía de Bouguer	60
5.2.3. Anomalía regional y residual	60
6. MODELADO GRAVIMÉTRICO	61
6.1. Modelación de perfiles gravimétricos medidos en campo	61
6.1.1. Secciones geológicas de los perfiles	62
6.1.2. Modelado bidimensional con Método de Talwani	64
6.1.2.1. Perfil A	67
6.1.2.2. Perfil B	68
6.1.2.3. Perfil C	69
6.1.2.4. Perfil D	70
6.2. Modelación de perfiles de la anomalía de gravedad de Bouguer completa de INEGI	71
6.2.1. Secciones geológicas de los perfiles	72
6.2.2. Modelado bidimensional con Método de Talwani	75
6.2.2.1. Perfil 1	75
6.2.2.2. Perfil 2	76
6.2.2.3. Perfil 3	77
6.3. Correlación de información geológica-geofísica	78
6.3.1. Correlación de perfiles gravimétricos medidos en campo con la geología	78
6.3.2. Correlación de anomalía residual del INEGI con geología	79
6.3.3. Análisis de imágenes de satélite	81
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83

8. BIBLIOGRAFÍA	85
9. APÉNDICE	91

Tabla de figuras

Figura	Descripción	Página
Fig.-1	Localización y vías de acceso (SGM, 2001).	15
Fig.-2	Ubicación de la Carta Buena Vista en el contexto de tectonoestratigráficos (SGM 2011).	17
Fig.- 3	Columna estratigráfica Carta Buena Vista H12-D63.	20
Fig.- 4	Carta geológica–minera (SGM 2011, modificada).	21
Fig.- 5	Afloramiento de andesita de la Formación Tarahumara (SGM, 2011).	24
Fig.-6	Esquema estructural de la Carta Buena Vista (SGM, 2011).	30
Fig.-7	Esquema del geoide y el elipsoide (INEGI).	37
Fig.-8	Corrección por deriva (H. Burger, 1992).	39
Fig.-9	Anomalía de Bouguer (H.Burger, 1992).	42
Fig.-10	Barra delgada para derivar en la corrección de Bouguer (Burger, 1992).	43
Fig.-11	Ajuste polinomial de primer, tercer y quinto orden (Burger, 1992).	47
Fig.-12	Modelo para calcular los efectos en la gravedad de un cuerpo irregular de dos dimensiones	48
Fig.-13	Aproximación poligonal de la sección vertical de cuerpo irregular bidimensional.	49
Fig.-14	Localización de las estaciones medidas en campo.	50
Fig.-15	Gravímetro CG-5 marcaScintrex.	51
Fig.-16	Geoposicionador (GPS) Garmin Etrex Legend.	51
Fig.-17	Densitómetro (Electronic Densimeter EW- 300SG) marca Alfa Mirage.	52
Fig.- 18	Fotografía de muestras.	53
Fig.-19	Mapa de anomalía Bouguer de las lecturas obtenidas en campo.	55
Fig.-20	Mapa de anomalía regional de las lecturas obtenidas en campo.	56
Fig.-21	Mapa de anomalía residual de las lecturas medidas en campo.	57
Fig.-22	Localización de estaciones gravimétricas del INEGI.	59
Fig.-23	Mapa de anomalía de Bouguer completa de datos del INEGI.	60
Fig.-24	Mapa de anomalía regional datos del INEGI.	61

**Estudio gravimétrico de la Carta Buena Vista H12–D63 en la porción sureste de Sonora,
México
Universidad de Sonora**

Fig.-25	Mapa de anomalía residual datos del INEGI.	61
Fig.-26	Mapa geológico y ubicación de perfiles gravimétricos medidos en campo (SGM, 2011).	63
Fig.-27	Secciones geológicas elaboradas a partir del mapa geológico y la ubicación de los perfiles gravimétricos medidos en campo.	64
Fig.-28	Mapa de anomalía residual y ubicación de perfiles gravimétricos medidos en campo	66
Fig.-29	Modelo geológico para el perfil A. En la parte superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La parte inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	68
Fig.-30	Modelo geológico para el perfil B. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	69
Fig.-31	Modelo geológico para el perfil C. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	70
Fig.-32	Modelo geológico para el perfil D. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	71
Fig.-33	Mapa geológico y ubicación de los perfiles datos del INEGI (SGM, 2011).	72
Fig.-34	Secciones geológicas elaboradas a partir del mapa geológico y la ubicación de perfiles gravimétricos datos del INEGI.	73
Fig.-35	Mapa de anomalía residual datos del INEGI y ubicación de perfiles.	75
Fig.-36	Modelo geológico para el perfil 1. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	76
Fig.-37	Modelo geológico para el perfil 2. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	77
Fig.-38	Modelo geológico para el perfil 3. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.	78
Fig.-39	Correlación de la geología superficial del área de estudio con la anomalía de residual obtenida de estaciones gravimétricas medidas en campo (SGM, 2011).	79
Fig.-40	Correlación de la geología superficial de la Carta Buena Vista H12–D63 con la anomalía de residual datos del INEGI (SGM, 2011).	80
Fig.-41	Sensor pasivo captando la energía que emiten los objetos en la superficie (INEGI).	81
Fig.-42	Imagen de satélite donde se observan las fallas y estructuras del área de estudio.	82

Índice de Tablas

Numero	Descripción	Pág.
1	Densidades de muestras recolectadas en el área de estudio	52
2	Densidades correspondientes a los cuerpos geológicos considerados en el modelo.	67

Resumen

La Carta Geológica Minera 1/50000 Buena Vista se ubica en la porción centro–oriental del Estado de Sonora, en los municipios de La Colorada y Guaymas. Se encuentra limitada por las coordenadas geográficas 28° 30' a 28° 45' de latitud norte y 110° 00' a 110° 20' de longitud oeste, con una superficie de 904 km². Fisiográficamente forma parte de la provincia de la Sierra Madre Occidental, subprovincia de Sierras y Valles Paralelos.

Las unidades litológicas que afloran están constituidas por rocas sedimentarias e ígneas plutónicas y volcánicas que varían en edades que van desde el Ordovícico al Cuaternario. Las rocas más antiguas son de edad Ordovícico–Pérmico y consisten principalmente de calizas y areniscas depositadas en ambiente de cuenca marina. Afloran en la porción norte de la carta. Las rocas sedimentarias del Grupo Barranca de edad Triásico superior afloran en la mayor parte de la carta, y están conformadas por arenisca y lutita. En la porción sur afloran rocas volcánicas de edad Cretácico superior–terciario–paleoceno, consideradas como el componente volcánico del arco larámide, las cuales están constituidas por andesita, toba andesítica y aglomerado andesítico. Las intrusiones están extensamente expuestas y afectan a las rocas del Grupo Barranca y a la secuencia marina del Paleozoico. Se trata de granito y granodiorita que forman parte del Batolito Larámide de Sonora.

En el presente trabajo se elaboró un estudio gravimétrico con la intención de obtener la morfología y profundidad del basamento, así como también crear un modelo estructural del subsuelo. Por lo tanto se realizó un levantamiento gravimétrico que consistió en 4 perfiles que fueron ubicados a lo largo de la carretera federal Numero 16; estos perfiles cuentan con 42 estaciones, las cuales se encuentran distribuidos a distancias de 600 a 1,300 metros aproximadamente de separación de cada estación. Los datos obtenidos en el levantamiento gravimétrico fueron corregidos por deriva, elevación, latitud y Bouguer.

Después de corregir los datos se llevó a cabo el procesamiento de estos en el software WinGlink, donde se obtuvo la anomalía residual al realizar un ajuste

polinomial de tercer grado. También se utilizaron datos gravimétricos de la red geodésica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para complementar el estudio.

En cuanto a los datos del INEGI, estos fueron valores promedios estimados de la anomalía de gravedad de Bouguer completa, los cuales se adquieren sobre el terreno y poseen todas las correcciones necesarias. Los datos mencionados corresponden a 96 estaciones que están dentro de la Carta Buena Vista H12–D63 con una distancia promedio de 4 kilómetros entre cada estación, lo cual nos indica que el estudio proporcionado por el INEGI es de distancias más amplias entre cada estación; ello quiere decir que es un estudio regional y con menos detalle que el levantamiento realizado en este estudio. Estos datos también fueron procesados y se determinó la anomalía residual por ajuste polinomial de tercer grado.

Para proceder a la modelación bidimensional de los perfiles gravimétricos obtenidos en campo y los del INEGI, se analizó la geología superficial del área de estudio y se construyeron secciones geológicas para cada perfil. En base a lo anterior se planteó un modelo inicial del subsuelo.

Posteriormente todos los perfiles fueron modelados, utilizando el Método Talwani. Se modelaron 4 perfiles del levantamiento gravimétrico y 3 perfiles de los datos obtenidos del INEGI, los cuales cuentan con una orientación NE–SW perpendicular al rumbo de las anomalías de los cuerpos geológicos. Específicamente los modelos obtenidos muestran altos gravimétricos relacionados a intrusivos, mientras tanto los bajos gravimétricos se encuentran relacionados a cuencas y rocas sedimentarias.

A partir de 4 perfiles trazados sobre el mapa de anomalía residual obtenido del levantamiento gravimétrico se creó un modelo geológico, el cual muestra el basamento representado por rocas volcánicas de la Formación Tarahumara del Cretácico superior en contacto con rocas sedimentarias del Grupo Barranca del Triásico superior. Ambos cuerpos se encuentran afectados por intrusivos granodioríticos y cuarzomonzoníticos del Cretácico superior–terciario.

También se observan estructuras tipo horst y graben, creando cuencas sedimentarias con espesores promedio de 2 kilómetros con relleno sedimentario variado entre conglomerados de la Formación Báucarit, sedimentos no consolidados, areniscas y lutitas.

En relación a la anomalía de Bouguer de datos del INEGI, la anomalía residual se obtuvo a partir de un ajuste polinomial de primer grado, el cual muestra altos gravimétricos relacionados a cuerpos intrusivos que por lo general se presentan al cortar rocas del Grupo Barranca, mientras que los bajos gravimétricos exponen una orientación NW–SE en donde se modela una gran cuenta sedimentaria rellena por sedimentos cuaternarios y rocas de la Formación Báucarit.

Al comparar ambos estudios (medidos y del INEGI) se expone un patrón similar respecto a las anomalías gravimétricas. Los altos gravimétricos se encuentran ligados a intrusivos de dimensiones batolíticas originadas por un arco magmático que creó cuerpos granoides de tipo monzogranito (orogenia larámide) y rocas de la Formación Tarahumara (andesita–toba andesítica). Los bajos gravimétricos corresponden a depósitos relacionados a la apertura del Golfo de México, lo cual crea rocas que forman parte del Grupo Barranca, mientras que los sedimentos cuaternarios y conglomerados de la Formación Báucarit que rellenan las cuencas formadas por un evento distensivo de tipo horst y graben.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Los principales trabajos son de carácter minero, y algunos de geología de semidetalle y regional. Por ejemplo, Dumble (1900) describe la División Barranca del Triásico superior como una serie de rocas volcánicas del Cretácico inferior y la División Báucari del terciario superior. Por su parte, King (1939) elevó a rango de formación las divisiones Barranca y Báucarit descritas anteriormente por Dumble.

Wilson y Rocha (1946) con el objeto de evaluar los recursos de carbón del noroeste de México, aportaron datos muy valiosos sobre la estratigrafía del Triásico superior, concluyendo que en la región de Santa Clara la litología y los fósiles indican que existieron depósitos de facies palustres.

Fries (1962) hace un estudio de las rocas precámbricas y paleozoicas del Estado de Sonora y presenta un mapa geológico de toda la entidad, el cual de alguna manera le fue de ayuda a Rangin (1977–1982) quien trabajó en el noreste de Sonora, principalmente poniendo énfasis en los aspectos estructurales de las rocas mesozoicas, pues en ellas se basó para realizar el estudio geológico preliminar sobre la evolución estratigráfica del noroeste de México.

En 1999 el Consejo de Recursos Minerales edita la Carta Sierra Libre H12-11 a escala 1:250,000, la cual incluye la Carta Buena Vista H12–D63. El trabajo es geológico regional, con énfasis en yacimientos minerales. Se puede apreciar que en la zona que corresponde a la Carta Buena Vista las unidades más antiguas corresponden a calizas del Ordovícico, arenisca–lutita–triásicas de la Formación Santa Clara, volcánicas del Cretácico superior y conglomerados del Mioceno. Así mismo se indican las minas y prospectos que existen en el área, entre las que destacan las de carbón y grafito.

Los ingenieros Corral G. Ramón y Guzmán E. J. Belem del Consejo de Recursos Minerales (2003) levantan la cartografía geológico–minera y geoquímica de la Carta Tecoripa (H12-D64) a escala 1:50,000, colindante al oriente, en la que describen la estratigrafía estructural, tectónica, yacimientos minerales y geoquímica.

En el año 2006, Procesos Analíticos Informáticos, S.A. de C.V., levantó para el Servicio Geológico Mexicano (SGM) la geología y la geoquímica de la Carta Suaqui Grande (H12-D74) a escala 1:50,000 ubicada al sureste de la carta objeto del presente estudio.

El INEGI (2010) realizó levantamientos gravimétricos con fines geodésicos cuyo objetivo fue generar datos de valores de gravedad para la determinación del geoide de México y para la elaboración de cartas gravimétricas.

1.2. Justificación

El atractivo principal por lo cual se ha puesto interés en el área es la presencia de valiosos depósitos minerales, por ende cuenta con múltiples estudios geológicos mineros y geoquímicos, pero cuenta con poca información geofísica. Por ello, el estudio gravimétrico que se presenta en la tesis a continuación proporciona información útil para determinar la profundidad y configuración del basamento, así como el modelo estructural para la zona.

1.3. Objetivos

- Proporcionar un modelo geológico del subsuelo en el área de Buena Vista
- Identificar la presencia de fallas y fracturas para darles seguimiento.
- Conocer la profundidad y configuración del basamento.
- Determinar del espesor del relleno sedimentario.

1.4. Metodología

La elaboración de la presente tesis consistió en distintas etapas, las cuales se realizaron de la siguiente manera:

- Se llevó a cabo una revisión de bibliografía y de los estudios previos.
- Se hizo un reconocimiento geológico de la zona.
- Se realizó un muestreo de rocas de la zona de estudio para medir su densidad
- Se efectuó un estudio gravimétrico (adquisición de datos).
- Se realizaron las correcciones y procesamiento de los datos generados.
- Se determinó la correlación geofísica–geológica.
- Se hizo la modelación de perfiles y la interpretación de los datos generados.

2. Geografía

2.1. Localización

La carta geológica minera Buena Vista, se localiza en el extremo sureste del Estado de Sonora, aproximadamente a 85 km en línea recta al sureste de la capital. Se encuentra limitada por las coordenadas $28^{\circ} 30'$ a $28^{\circ} 45'$ de latitud norte y $110^{\circ} 00'$ a $110^{\circ} 20'$ de longitud oeste, con una superficie aproximada de 904 km². Políticamente comprende parte de los municipios La Colorada, Guaymas y Suaqui Grande.

2.2. Accesos y vías de comunicación

Al área se llega desde Hermosillo por la carretera federal Número 16, Hermosillo-Tecoripa, con un recorrido de 85 kilómetros, desde donde se desprenden un gran número de caminos de terracería y brechas que dan a acceso a la mayor parte del área de estudio (figura 1).

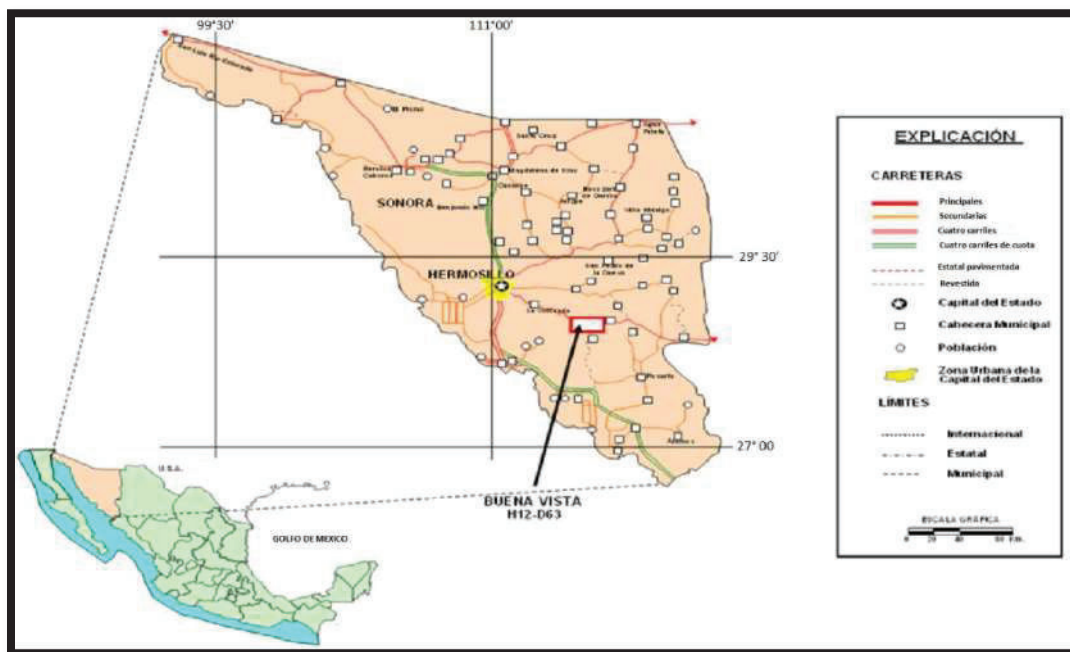


Figura 1. Localización y vías de acceso (SGM, 2011).

2.3. Fisiografía

De acuerdo con la clasificación de provincias fisiográficas de Raisz E. (1964) la Carta Buena Vista se ubica en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, sub-provincia de Sierras y Valles Paralelos, los cuales comprenden una superficie de 8,662 km². La sub-provincia de Sierras y Valles Paralelos se caracteriza por ser una región en la que el paisaje dominante es de sierras alargadas, separadas por amplios valles intermontanos, como es el caso de las sierras Verde, El Zamotal y Las Arenas. Están dispuestas paralelamente con alineamiento estructural de rumbo general noroeste-sureste.

La Sierra El Salto se alinea al norte. Las altitudes varían entre los 850 y 1,000 metros sobre el nivel del mar (msnm) y en los valles de 200 a 400 msnm.

Las unidades paleozoicas forman escarpes muy pronunciados que son, al mismo tiempo, muy resistentes a la erosión porque están conformados por rocas masivas y compactas. Las rocas del Cretácico forman lomeríos y mesetas, y las intrusivas por lo común alteradas y erosionadas están dispuestas en lomas suaves. Algunos afloramientos de andesitas y pórfidos tienen topografía más prominente. Las rocas de la Formación Báucarit rellenan los valles y forman lomeríos y cerros con topografía suave. Finalmente, el conglomerado, las limolitas, gravas, arenas y el aluvión son cuaternarios y conforman planicies, lomeríos y cordones con relieve plano.

3. Geología

La Carta Buena Vista se encuentra ubicada en el terreno tectonoestratigráfico Cortés (Campa-Uranga, 1999, modificada por el CRM, 2004) acrecionado al cratón de Norteamérica, definido como un terreno compuesto por rocas Mesozoicas y del Paleozoico tardío, que subyace a la mitad sur de Sonora (figura 2). El terreno Cortés consiste de una secuencia sedimentaria deformada, con facies de aguas profundas, de edad Ordovícico-Pérmico, la cual fue acrecionada al terreno Caborca (Stewart *et al.*, 1990; Poole *et al.*, 1991).

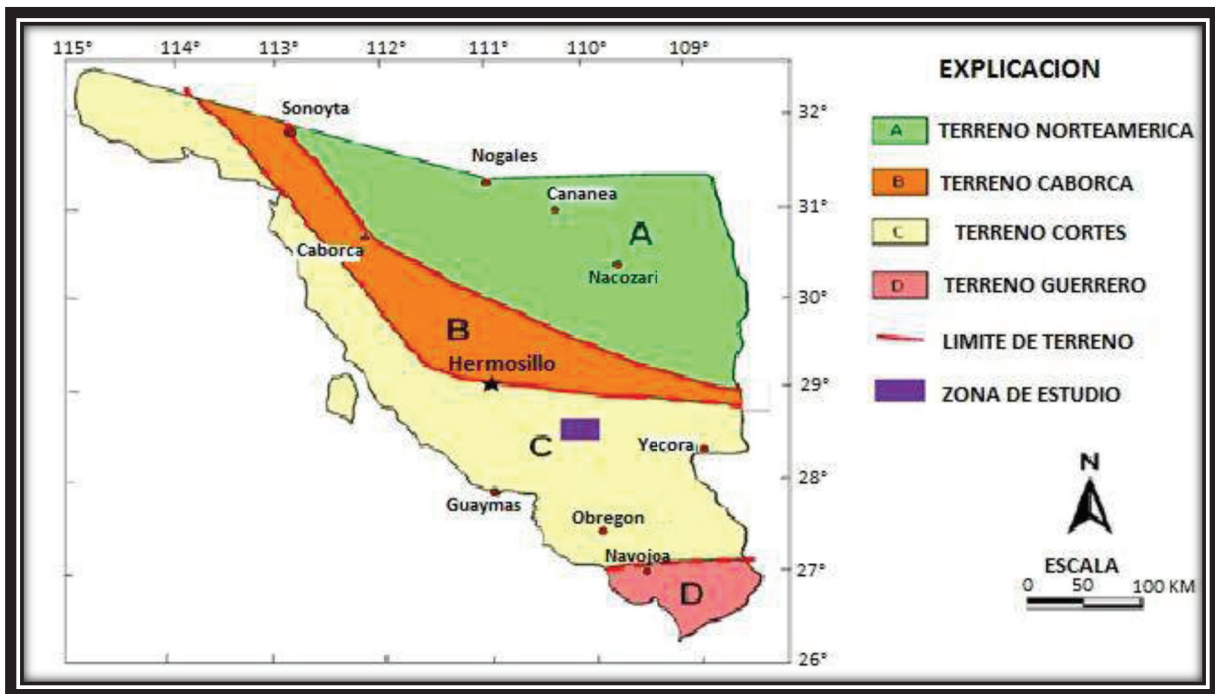


Figura 2. Ubicación de la Carta Buena Vista en el contexto de terrenos tectonoestratigráficos (SGM 2011).

Las rocas del Grupo Barranca cubren discordantemente la zona de sutura y restringen la edad de la acreción al Pérmico medio-triásico tardío (Poole *et al.*, 1991). Los sedimentos fluvio-deltaicos del Grupo Barranca fueron depositados en cuencas alargadas transtensionales y/o extensionales tipo *rift* o *pull-apart* orientadas este-oeste (Stewart y Roldán-Quintana, 1991) cuando la región estuvo

constituida por áreas elevadas con rocas del basamento Precámbrico, las cuales aportaron los sedimentos clásticos.

El Cretácico superior–terciario inferior sugiere un tectonismo caracterizado por actividad magmática calcoalcalina, así como varias fases de pórfidos de composición ácida-intermedia que se extienden hasta principios del Terciario. Las rocas granodioríticas con biotita-hornblenda tienen edades K-Ar entre 90-40 Ma (Damon *et al.*, 1983). De esta manera se considera que el batolito de Sonora y las rocas volcánicas asociadas dacíticas-andesíticas de la Formación Tarahumara con edades U-Pb entre 90-70 Ma (McDowell *et al.*, 1993, 2001) constituyen un arco magmático que registra al progreso de convergencia de placas y la deformación continental relacionada que afectó a Sonora durante este tiempo.

El terciario superior marca no sólo el inicio de un régimen tectónico de distensión sino también el depósito de sedimentos detríticos continentales de la formación Báucari que en algunos lugares estuvieron acompañados por derrames volcánicos de fisura y de composición andesítica-basáltica, así mismo como depósitos no consolidados más jóvenes.

Relacionada a esta tectónica extensiva ocurren episodios volcánicos, principalmente de composición félsica con abundantes rocas compuestas por toba riolítica y riolita, denominadas como Formación Lista Blanca (Morales *et al.*, 1990).

Durante el Pleistoceno se depositan gravas y arenas que constituyen un conglomerado polimíctico mal consolidado con afloramientos al noreste, noroeste, centro y suroeste de la carta. Finalmente, en el Holoceno, se deposita aluvión.

3.1. Geología superficial

En la Carta Buena Vista afloran rocas sedimentarias e ígneas, tanto volcánicas como intrusivas cuyas edades varían desde el Ordovícico inferior al Holoceno (figuras 3 y 4).

3.1.1. Rocas del Paleozoico

Las rocas sedimentarias del Paleozoico son las más antiguas en la región, con escasos afloramientos en la porción norte de la carta.

3.1.1.1 Secuencia sedimentaria ordovícica

Estratigráficamente es la unidad antigua mejor expuesta en la carta. Se trata de una secuencia sedimentaria compuesta principalmente por caliza, arenisca y ocasionalmente lutita.

La roca más abundante es caliza de color gris claro en muestra fresca y gris oscuro a negro al intemperismo; la textura predominante es packestone y en menor proporción mudstone. Contiene abundantes fusulínidos. También se observa caliza débilmente silicificada. En su conjunto se aprecia fuertemente fracturada y con pliegues de arrastre en las zonas de falla. La arenisca es calcárea de color gris oscuro con tonalidades ocre y rojiza al intemperismo. La lutita es más escasa, está dispuesta en capas delgadas menores a 5 centímetros de espesor. Es de color gris oscuro a negro, presenta coloración rojiza y amarillenta al intemperismo. Sus afloramientos se restringen a la porción norte de la carta.

Las rocas paleozoicas se encuentran en contacto discordante y por falla normal con las rocas del Grupo Barranca, está cortada por un intrusivo laramídico de composición granito-granodiorita.

Estudio gravimétrico de la Carta Buena Vista H12-D63 en la porción sureste de Sonora, México
 Universidad de Sonora

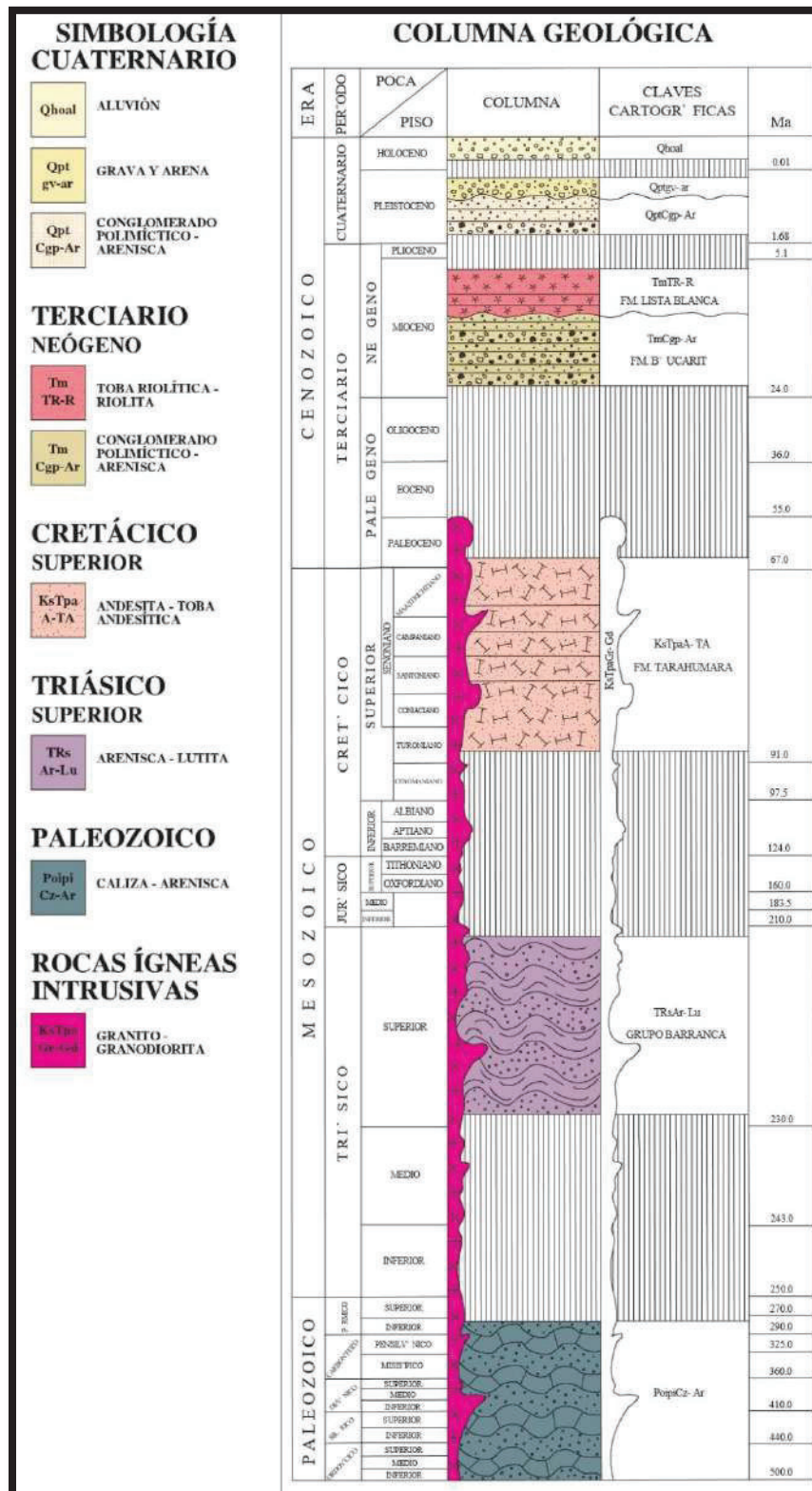


Figura 3. Columna estratigráfica Carta Buena Vista H12-D63 (SGM,2011)

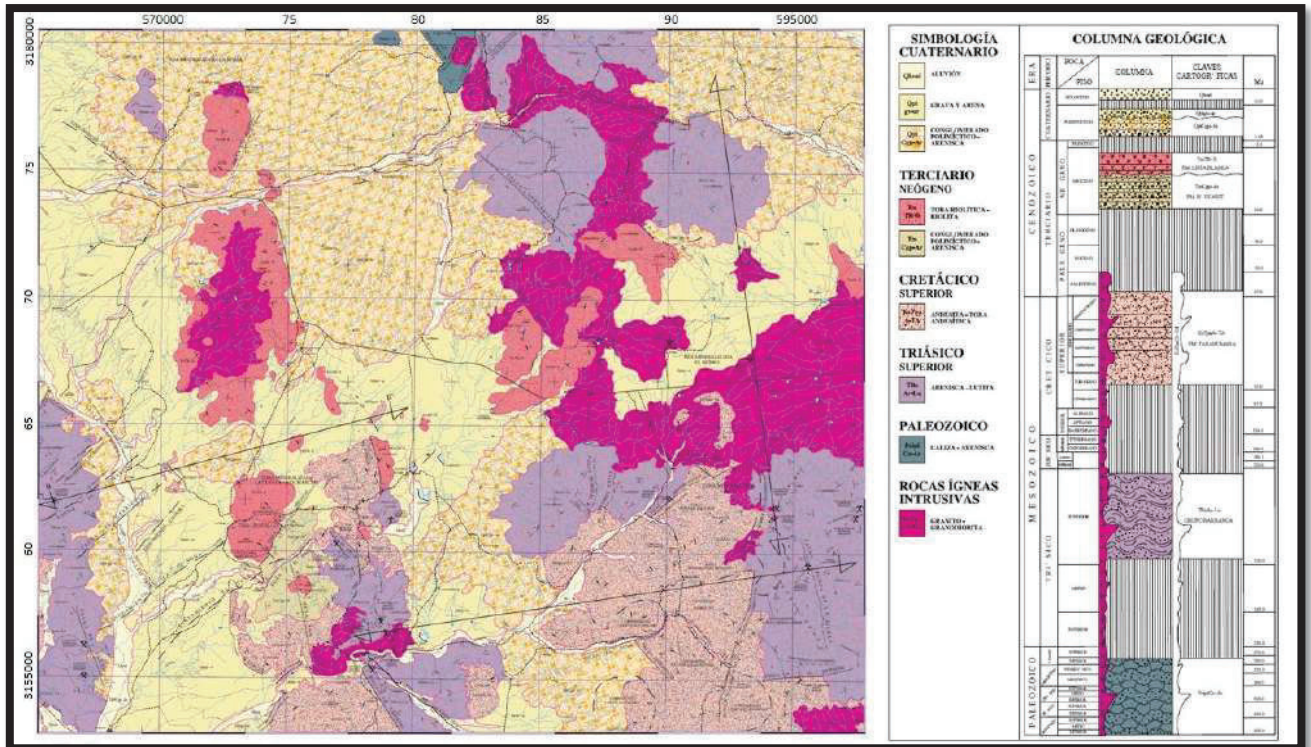


Figura 4. Carta geológica–minera (SGM 2011).

3.1.2. Mesozoico

Las rocas del Mesozoico se encuentran ampliamente distribuidas y están representadas por rocas sedimentarias de edad Triásico superior. En el Cretácico superior–terciario Paleoceno se emplaza el batolito laramídico, constituido por granito y granodiorita, además de las rocas volcánicas asociadas de la Formación Tarahumara que se encuentran afectadas por alteración hidrotermal.

3.1.2.1 Grupo Barranca

Dumble (1900) introdujo la unidad “División Barranca”, una secuencia de siliciclastos, los cuales dividió en tres miembros: inferior, medio y superior.

King (1939) agrupó a los sedimentos del Mesozoico inferior y los elevó de grado, llamándolos Formación Barranca.

Wilson y Rocha (1946) al estudiar los yacimientos de carbón de la región de Santa Clara, señala que la Formación Barranca está constituida por tres miembros, estableciendo que los mantos de carbón están genéticamente asociados con el miembro medio.

Por su parte Alencaster et al (1961) a partir de flora y fauna fósil le asigna una edad del Triásico tardío y propone que la Formación Barranca se eleve al rango de "Grupo Barranca" que comprende tres unidades litoestratigráficas:

- Formación Arrayanes, en la parte inferior.
- Formación Santa Clara en la parte media.
- Formación Coyotes en la superior.

Los sedimentos del Grupo Barranca tienen afloramientos extensos al sureste de la carta, en la Sierra Verde, en la porción suroeste al norte de la población de San Marcial.

La lutita contiene mantos de carbón y en algunas localidades grafito y carbón grafitoso, dependiendo del grado de metamorfismo regional y el recalentamiento aportado por la intrusión del batolito laramídico. Son de color negro y en ocasiones se pueden observar plantas fósiles. Vásquez, M.R. (2000) refiere que el género y especie más comúnmente presente es *zamites fragilis*.

La arenisca es de color gris claro, de grano fino a medio y en ocasiones se le puede apreciar de forma masiva. Los rumbos preferenciales de los estratos son al N 50°-70° W, con buzamientos al SE con 45°-65° de inclinación.

Stewart y Roldán (1991) estimaron un espesor total para el Grupo Barranca de 3,150 metros distribuidos; para la Formación Arrayanes en 1,150 metros; Formación Santa Clara 1,400 metros; y 600 metros para la Formación Coyotes.

La unidad está cubierta discordantemente por rocas volcánicas de la Formación Tarahumara y es similar a las rocas del Triásico superior de la región de San Javier, al suroeste de San José de Moradillas. Son de origen deltaico porque las secuencias de grano fino son prodelta, acompañadas por depósitos de

frente de delta. Esta unidad tiene interés geológico-minero puesto que aloja yacimientos minerales metálicos y no metálicos, especialmente los de carbón y grafito.

3.1.3. Cretácico superior

3.1.3.1. Formación Tarahumara

Esta secuencia fue descrita sobre el arroyo El Obispo por Dumble en 1900, quien registró rocas sedimentarias intercaladas con seudoformas silíceas pobremente preservadas, por lo cual les asignó una edad cretácica. Posteriormente Wilson y Rocha (1946) denominaron Formación Tarahumara a rocas volcánicas de composición andesítica, dacítica y vulcano sedimentarias que afloran en el arroyo Agua Cercada, en el área del Pozo de Nacho, ubicado al sureste de la carta.

Posteriormente Cruz-Frisby(1989) la describió en su trabajo de tesis de la carta La Dura como una “secuencia de rocas volcánicas de color verde, la cual consiste de brechas, aglomerados, tobas y coladas de composición intermedia” (figura 5). Esta secuencia subyace discordantemente al Grupo Barranca. Justo en el contacto existe una brecha con fragmentos de arenisca que King (1939) consideró como el miembro basal de esta formación.

Dumble (1901) encontró ostreidos y gasterópodos, placas de equinodermos y una pequeña gryphae que permiten considerarla, con reservas, del Albiano-Cenomaniano.

Investigaciones recientes realizadas por el Departamento de Geología y el Instituto de Geología de la UNAM (Amaya-Martínez y González-León, C., 1993) enfocadas al estudio de las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara, permiten separarla en dos miembros:

1. El miembro inferior volcánico, con las características litológicas descritas para la localidad tipo.
2. El miembro superior, volcanosedimentario constituido por un paquete de rocas piroclásticas de composición riolítica y riodacítica con intercalaciones

lenticulares de arenisca tobácea, lutitas y en ocasiones bandas de pedernal.

Al sur de la Carta Buena Vista los afloramientos consisten de derrames de andesita y toba andesítica propilitizadas y silicificadas que se manifiestan morfológicamente como cerros y promontorios. La andesita contiene andesina y hornblenda oxidadas en matriz microlítica. También se presenta como andesita porfídica sericitizada y silicificada.

Las rocas descritas se correlacionan con la Formación Tarahumara de la parte centro-oriental de Sonora, con un rango de edades entre 90-70 Ma, U-Pb (McDowell *et al.*, 2001) y con la Formación Mesa de la región de Cananea con edades Ar-Ar de 72.6, 69.1 y 66 Ma (Gray, 1997, reporte interno).

El vulcanismo de composición intermedia se relaciona a la actividad de arco volcánico que se registra por la convergencia de placas litosféricas a finales del Cretácico superior y principios del terciario.

En Sonora, la Formación Tarahumara presenta condiciones muy favorables para hospedar yacimientos de cobre diseminado y vetas con oro y polimetálicas.



Figura 5. Afloramiento de andesita de la Formación Tarahumara (SGM, 2011).

3.1.4 Cretácico superior–Oligoceno

3.1.4.1 Batolito laramídico de Sonora

En 1915 Lindgren reconoce el avance hacia el oriente de los plutones del Cretácico al Paleógeno en el oeste de los Estados Unidos. Posteriormente Anderson y Silver (1979) Coney y Reynolds (1977) extendieron este concepto a Sonora y reconocen que la transgresión del arco volcánico se extendió 1,000 kilómetros tierra adentro y regresó a la costa pacífica durante el Neógeno. Damon *et al.*, (1983) definen el batolito larámide de Sonora (90-40 Ma) que incluye granito anatexítico hiperaluminoso de dos micas, post-arco volcánico. Estas rocas son la continuación al sur del cinturón batolítico del oeste norteamericano. La forma y distribución de los afloramientos está controlada, de manera regional, por la erosión y por los eventos tectónicos posteriores a su emplazamiento, principalmente la de extensión terciaria.

Damon *et al.* (1983) concluyeron que los pórfidos sub-volcánicos que bordean la Sierra Madre Occidental superior son cúpulas que tienen su raíz en los batolitos compuestos de Sonora y Sinaloa. Esto ha sido confirmado por la cartografía geológica levantada por Cochemé (1985) en el área de Santa Rosa de Yécora.

En la carta existen extensos afloramientos de rocas plutónicas en las porciones noreste, centro y centro-oriental, en las partes topográficas más bajas en donde generan suelo de arena gruesa de aproximadamente 20 centímetros de espesor, contrastando con las rocas volcánicas intermedias, cuyos afloramientos tienen una morfología de lomas homogéneas generalmente de poca elevación.

De acuerdo con Damon (1981) la etapa de mineralización fue casi contemporánea con el emplazamiento del plutón principal. En la parte noreste hay varios pequeños cuerpos intrusivos compuestos totalmente por sílice amorfo que semejan *dedos* que cortan al batolito que petrográficamente varía de granodiorita a cuarzomonzonita y granodiorita cortada en algunas localidades por diques aplíticos.

3.1.5 Cenozoico

Aflora en buena parte de toda la carta el conglomerado polimítico con intercalaciones de arenisca, rocas volcánicas félsicas y aluvi3n.

3.1.5.1. Formaci3n Báucarit

La Formaci3n Báucarit fue originalmente definida por Dumble (1900) como “Divisi3n Báucari” para referirse a una secuencia de areniscas arcillosas y conglomerados en capas horizontales cuya localidad está en el poblado de Báucarit, en el margen oeste del río Cedros, municipio de Quiriego. En 1939 King le asigna el nombre de “Formaci3n Báucarit” y la defini3 como una secuencia de arenisca, conglomerado y lutita bien estratificadas, ligeramente consolidada, en cuya parte inferior contenía flujos y aglomerados basálticos intercalados.

La Formaci3n Báucarit es una secuencia de siliciclastos de grano grueso constituidos por una alternancia de conglomerado y estratos de arenisca. El conglomerado es polimítico de color gris claro a café amarillento que intemperiza en gris oscuro. Los fragmentos tienen formas subredondeadas y subangulosas, con tamaños que varían desde 2 hasta 50 centímetros y aún mayores.

La mayor parte de los clastos corresponden a tobas, flujos lávicos y aglomerados de la Formaci3n Tarahumara. La arenisca está menos compactada y fue clasificada como arcosa-subarcosa según Martínez (1984).

La Formaci3n Báucarit tiene sus mejores afloramientos en el Picacho, El Pilar y la Mesa San Juan, en el centro-sur de la carta en donde rellenan los bloques hundidos que se generaron durante el evento de distensi3n del Mioceno temprano-medio.

3.1.5.2. Formaci3n Lista Blanca

Estas rocas están expuestas en afloramientos dispersos, principalmente en la porci3n central de la carta, como es el caso de los cerros Prieto, Los

Chiltepines, Loma Sanguijuela, El Jabalí y El profesor en donde cubren discordantemente a las rocas más antiguas; también es común que el contacto sea tectónico por falla normal.

La unidad está compuesta por toba riolítica, riolita y aglomerado de la misma composición, con variaciones a riodacita, dacita y, en menor proporción, andesita. Son de color blanco-rosa-pardo a rojizo con estructura compacta y tobácea.

El espesor de esta secuencia no fue medido, pero se estima que es mayor de 200 metros hacia la porción norte de la carta.

La cubierta ígnea es la transición entre el vulcanismo de la Sierra Madre Occidental y el de las sierras y valles ampliamente distribuido en el Estado de Sonora.

Se correlaciona con la Formación Lista Blanca fechada por K/Ar en 10.4 ± 0.2 Ma en la localidad tipo (Morales *et al.*, 1990), y 12.3 ± 1.2 a 12.6 ± 0.4 Ma dentro de los límites de la carta (McDowell *et al.*, 1997).

3.1.6 Cuaternario

3.1.6.1 Cobertura sedimentaria

Conglomerado polimíctico-arenisca

Se trata de una unidad de conglomerado polimíctico mal consolidado, con intercalaciones de arenisca débilmente litificada. El conglomerado está dispuesto en capas de 10 a 40 centímetros de espesor. Los clastos están generalmente bien redondeados, usualmente de andesita, riolita, arenisca, granito y granodiorita en matriz limo-arcillosa. Las areniscas en algunas localidades se encuentran semiconsolidadas, en capas de 5 centímetros de espesor y con algunos niveles de limolita.

Esta unidad se encuentra mayormente distribuida en la mitad norte de la carta en donde forma abanicos aluviales. Se calcula un espesor de 100 metros, y

sobreyace discordantemente a las rocas más antiguas; a su vez está cubierta por grava-arena y depósitos aluviales de los ríos y arroyos.

Grava-arena

Estos depósitos continentales están expuestos en la porción occidental de la carta, principalmente en el valle que forma el Río Mátape, al norte de San Marcial. Consisten de grava y arena no consolidadas, depositadas en las partes planas y en los valles. Los espesores son delgados y no sobrepasan los 10 metros.

Aluvión

El aluvión rellena los cauces de los ríos y arroyos. Se trata de material suelto constituido por grava, arena, limo y arcilla, resultado de la erosión de rocas preexistentes. Los materiales los transportan las corrientes fluviales y los deposita sobre su cauce, tal y como sucede en los arroyos Mátape, El Serrucho, Las Peñitas, Las Chinchas, El Tule y Tucurubabi.

3.2 Geología estructural

Se interpretaron tres sistemas preferenciales, dos de lineamientos rectos y uno de lineamientos curvos (Servicio Geológico Mexicano 2011). El primero es un sistema con rumbo que va de N-S a NW-SE y el segundo con dirección NE-SW. El primero corresponde al evento distensivo que dio origen al arreglo en pilares y fosas que posteriormente se rellenaron con material detrítico continental. Se trata de un sistema de fallas normales como La Matanza, Mátape, El Salto, La Tazolera, El Carrizo y El Najjar, que delimitan la semifosa San Marcial con los bloques El Carricito, San Juan, La Cruz y El Pápago. Otras fallas de este sistema son El Divisadero Grande, El Jabalí, El Profesor y Santa Fe, que delimitan a las semi-fosas de Los Mautos y Las Mercedes, que son fallas y fracturas más recientes que en algunos puntos cortan y desplazan a las primeras, por ejemplo

La Ciénega y El Carricito. El tercero corresponde a una estructura curvilínea en la parte central de la carta y otras más pequeñas al sur-sureste y noreste que se atribuyen a posibles cuerpos sepultados de rocas subvolcánicas. (Servicio Geológico Mexicano, (SGM), 2011. Carta Geológica-Minera Buena Vista, H12-D63).

3.2.1. Deformación dúctil

La deformación dúctil más evidente se genera durante el episodio compresivo laramídico. Los pliegues en las rocas sedimentarias del Paleozoico y en los siliciclastos del Triásico tienen ejes con dirección preponderantes al NW, aunque también hay algunos al NE y E-W. En la lutita o la arenisca del Grupo Barranca se observan pliegues tipo *kink* asociados a fallas inversas locales, normalmente convergencia al NE.

3.2.2. Deformación dúctil-frágil

La deformación dúctil-frágil únicamente se detectó en las rocas paleozoicas y triásicas en las que los pliegues se encuentran truncados por fallas inversas locales.

3.2.3. Deformación frágil

Se mapearon dos sistemas de fallas normales(SGM) 2011: el primero, que es el más frecuente, tiene orientación al N10°-50°W, y otro más con rumbo general al NE.

El sistema de fallas NW-SE es consecuencia de los eventos de distensión que dieron lugar al arreglo en fosas y pilares tectónicos. Regionalmente son las de mayor longitud y se orientan al N 10°-50° W, con inclinaciones de 60°-85° al NE. En la mayor parte de los casos delimitan fosas como la de San Marcial, o bien tienen desplazamientos laterales que desplazan bloques. Los sistemas de fallas

El basamento Paleozoico está conformado por sedimentos que se depositaron en ambiente marino durante el Ordovícico-Pérmico. A finales del Pérmico, y hasta el Triásico medio, en la porción central de Sonora se desarrolla una importante fase compresiva en dirección NNW, responsable de la superposición tectónica de facies de cuenca sobre plataforma (Stewart *et al.*, 1990). Durante el Triásico superior se depositaron los sedimentos fluvio-deltaicos y marinos someros del Grupo Barranca en una cuenca *rift* o *pull-apart* orientada este-oeste (Stewart y Roldán, 1991).

El evento tectónico esencialmente compresivo del Cretácico superior–terciario Eoceno se caracteriza también por actividad magmática calco alcalina, con emplazamiento de extensos cuerpos cristalinos y pórfidos de composición ácida a intermedia. En este contexto, las rocas del batolito laramídico de Sonora y las Vulcano sedimentarias asociadas de la Formación Tarahumara conforman un arco volcánico continental (Damon *et al.*, 1983). El emplazamiento del batolito de granitoide generó una aureola de calor que, aunado al metamorfismo regional que afectó a los siliciclastos del Grupo Barranca, contribuyó a la transformación del carbón en grafito por un lado y, por otro lado, fue factor en el desarrollo de alteración hidrotermal en la secuencia volcánica Tarahumara.

La actividad volcánica durante el Cretácico–terciario confirma la presencia de un arco magmático que persistió hasta por lo menos el Oligoceno, época en la que se modifica el régimen de arco a uno de extensión que favorece el desarrollo de fosas y pilares. Paralelamente se depositan potentes espesores de rocas volcánicas y vulcano–clásticas riolíticas, con andesitas y basaltos subordinados. Las fosas se rellenaron con sedimentos continentales que eventualmente conformaron a la Formación Báucarit.

4. Método gravimétrico

La geofísica es la ciencia que se encarga del estudio de la Tierra desde el punto de vista de la física. Usa para su estudio métodos cuantitativos físicos, entre ellos, métodos basados en la medida de la gravedad, como el método gravimétrico.

Debido a que un objeto sobre la superficie de la tierra es atraído por la masa de la tierra, los métodos de exploración gravimétricos detectan variaciones en las densidades del material del subsuelo midiendo la gravedad en la superficie y analizando los valores obtenidos.

Un valor promedio para la gravedad sobre la superficie de la tierra es 980 cm/s^2 , pero las variaciones tan pequeñas como 0.00001% del promedio necesitan ser detectadas en un estudio de rutina. Esto demanda instrumentos con una gran sensibilidad. Factores distintos a los cambios de densidad del subsuelo causan variaciones en la gravedad. Todos estos factores deben ser identificados y corregidos por sus efectos aplicados en nuestros datos, por ejemplo cambios en la elevación en la superficie terrestre conduce a variaciones en la gravedad, el punto de observación estará más cerca o más lejos del centro de la tierra y habrá más o menos material entre el punto de observación y el centro de la tierra.

Otro factor que afecta la exploración usando la gravedad es la complejidad del subsuelo. Todo ese material debajo de un punto de observación afecta a los valores de la gravedad. Por lo tanto estamos constantemente tratando de remover los efectos debido a los cuerpos en los cuales no tenemos ningún interés con el fin de aislar los efectos de los objetos de interés.

4.1 Ley de gravitación universal

La ley de gravedad universal de Newton establece que es la fuerza de atracción (F) entre dos masas (m_1 y m_2) separadas por una distancia (r) la cual está representada por la ecuación:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

- G = Constante universal de la gravedad ($6.6732 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{g}^2$).
- m_1 = Masa que descansa sobre la superficie de la tierra.
- m_2 = Masa de atracción (planeta tierra).
- r = Radio.

La fuerza también fue dada por la segunda ley de Newton, la cual establece que:

$$F = ma \quad (\text{Ec.2})$$

Donde a es la aceleración. Si nosotros definimos g como la aceleración gravitacional, entonces cuando la aceleración es causada sólo por la atracción gravitacional de la tierra, esta se encuentra representada por la siguiente ecuación:

$$F = mg = G \frac{m}{r^2} \quad (\text{Ec.3})$$

Y:

$$g = \frac{GM}{R^2} \quad (\text{Ec.4})$$

El valor g es expresado como m/s^2 (**SI**) o cm/ s^2 . En la geofísica la unidad de la aceleración gravitacional es el gal en honor a Galileo Galilei.

Debido a que las variaciones en la aceleración gravitacional g en las cuales estamos interesados son tan pequeñas, con frecuencia usamos ($1\text{mGal} = 0.001 \text{ Gal}$) para propósitos de exploración.

4.2. Campo gravitacional de la tierra

Se le denomina como campo gravitacional (o campo gravitatorio) de la tierra a la intensidad con que ésta atrae a los cuerpos hacia su centro. Cada cuerpo, cada masa, depende de su peso no sólo en la presión que la atmósfera haga sobre ella, sino también en qué tanto la gravedad de la tierra lo “jala” hacia ella. Una persona, por ejemplo, puede saltar más alto que otra (a pesar de tener la misma estatura o

el mismo peso) debido a que ha disminuido por instantes la barrera de la gravitación. Una moneda, en otro ejemplo, cae más rápido al suelo que una hoja de papel, a pesar que el volumen de la moneda sea menor al de la hoja, pero el peso con el que la tierra lo atrae hacia si es distinto.

4.3. Medición de la gravedad

En última instancia estamos interesados en la determinación de la aceleración de la gravedad en diversos sitios alrededor del mundo, para ello hacemos uso de instrumentos diseñados para medir la gravedad y efectuar directamente medidas absolutas. Tales dispositivos son difíciles de transportar y requieren un tiempo considerable para configurarse y utilizarse. Algo más fáciles de diseñar y utilizar son los instrumentos que determinan la diferencia de gravedad entre dos estaciones observadas.

4.3.1. Medición relativa usando un péndulo

El clásico instrumento para medir la gravedad absoluta y relativa es el péndulo, un ideal y simple péndulo que suspende un material el cual es adimensional de la masa de la cuerda que no se estira y es perfectamente flexible. Para tal dispositivo el periodo de tiempo está relacionado a la longitud de la cuerda y la aceleración gravitacional. Para poder llegar a mediciones más exactas utilizando el péndulo es necesario conocer las características exactas del péndulo, pues tiene una precisión no mejor que 1 mGal ya que necesitamos saber la gravedad observada por lo menos de 0.1 mGal. La ventaja del péndulo es que no es tan voluminoso y es fácil de transportar pero requiere bastante tiempo para oscilar y llegar a tomar una medición correcta.

4.3.2. Medición relativa usando el gravímetro

El principio por el cual el gravímetro fue diseñado en sí es muy simple. Si se coloca una masa en un resorte y este ensamble se mueve de una posición a otra, el resorte se alargará o se acortará en una pequeña cantidad debido a la variación en la gravedad. Sin embargo los pequeños cambios en la gravedad de un sitio a otro sitio resultan en un desplazamiento muy pequeño del resorte. Si empleamos un resorte muy débil, se extenderá 1 micra para un aumento de la gravedad de 1 mGal. A fin de que la precisión de la medición muestre cambios por una pequeña variación en la gravedad, se requiere un resorte con varias decenas de metros de largo. Lo largo de tal resorte es claramente poco práctico, pero esto ayuda para ilustrar otros factores que entran en el diseño del gravímetro. Una masa suspendida de un resorte largo oscilará arriba y abajo durante un periodo largo de tiempo después de ser incitado. Tal comportamiento no facilita lecturas rápidas, por lo que un alto grado de estabilidad es fundamental para que el trabajo de campo se avance a una velocidad aceptable.

Una gran cantidad de ingenio, un cuidadoso diseño y mucha prueba y error produjo varias combinaciones de resortes especiales conectados a una masa en el extremo. Estos conjuntos normalmente se mantienen juntos por diversas bisagras y palancas. No sólo los resortes son cortos y sensibles, sino que también deben garantizar períodos de oscilación de sólo pocos segundos.

Un componente crítico de la mayoría de los gravímetros modernos es el resorte de longitud cero. La tensión se coloca en un resorte durante la fabricación de tal manera que el resorte es mucho más sensible que lo normal y amplifica los desplazamientos causados por pequeñas variaciones en la gravedad.

4.3.3. Medición relativa usando caída libre

El péndulo puede ser usado para medir directamente la gravedad pero no con la alta precisión que quisiéramos. Hoy en día la mayoría de las mediciones absolutas utilizan lo que se llama el método de caída libre. Las primeras determinaciones precisas que utilizan este enfoque se hicieron en 1952, y por la

década de 1960 la disponibilidad y la sofisticación de los láseres y los dispositivos de medición y temporización electrónicos permitieron una precisión de 0,01 mGal.

Todos los métodos miden esencialmente la cantidad de tiempo que tarda un objeto al caer desde una cierta distancia. Uno de estos enfoques lanza un cuerpo verticalmente hacia arriba. El objeto pasó dos niveles establecidos en su camino hacia arriba y hacia abajo de nuevo.

4.4. Corrección de datos gravimétricos

4.4.1. Forma de la tierra

Si la tierra tuviera una simetría esférica perfecta y no rotara, entonces la gravedad debido a la masa de la tierra sería la misma en toda en la superficie. Por su puesto sabemos que no es así; por lo tanto es esencial identificar la causa de las variaciones en la gravedad, para que podamos corregirlas en nuestra búsqueda para explorar el subsuelo de la tierra. Un factor claro es la posición sobre la superficie de la tierra, debido a que la gravedad absoluta en el ecuador es 978.0 Gal, y en los polos la gravedad es de 983.2 Gal.

La rotación de la tierra produce una fuerza centrífuga dirigida hacia el exterior que actúa en dirección opuesta a la gravedad y, por lo tanto, disminuye el valor medido de g . El efecto de la fuerza centrífuga es mayor en el ecuador y disminuye a cero en los polos de la tierra que son los ejes rotacionales. Como un factor directo en la fuerza, g es mayor en los polos que en el ecuador por 3.4 Gal.

El comportamiento a largo plazo de la tierra es la de un fluido y la rotación de la tierra produce efectos centrífugos que causan que su forma sea un elipsoide. El hecho de que nuestro planeta no es esférico significa que está achatado en los polos. En otras palabras, el radio es mayor en el ecuador que en los polos por 6.6 Gal, porque la superficie en los polos está más cerca al centro de la tierra. Sin embargo, ya que el largo del radio es mayor en el ecuador, más masa es posicionada entre la superficie y el centro de nuestro planeta en el ecuador que en los polos. El factor masa causa que g decrezca por 4.8 Gal del ecuador al polo.

El efecto de la rotación, el factor distancia y el factor masa resultan en una red de incremento en la gravedad de 5.2 Gal mientras uno viaja del ecuador al polo. Esto explica la variación de la gravedad de 978.0 Gal en el ecuador a 983.2 Gal en los polos.

Nuestra meta en la exploración gravimétrica es la de obtener valores de la gravedad por cada variación (esto se debe a la distribución en la densidad del subsuelo) por lo tanto debemos derivar una ecuación que remueva la posición sobre la superficie de la tierra como causa de las diferencias de la gravedad, diferencias que permanecen en nuestros valores de gravedad medidos.

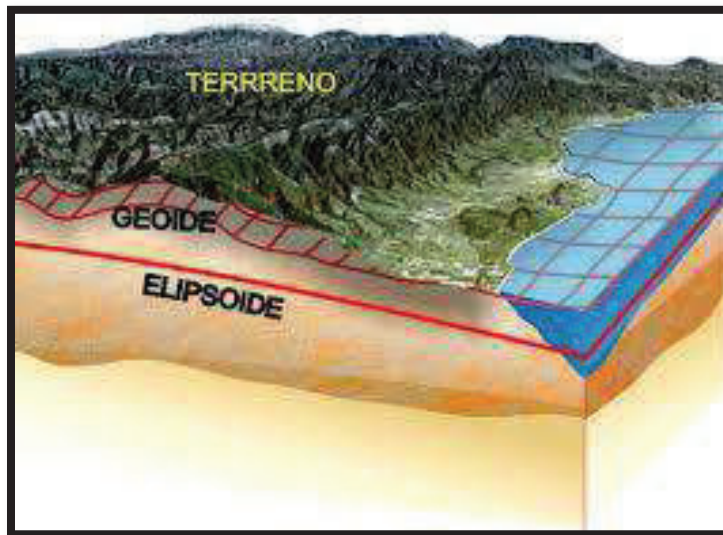


Figura 7. Esquema del geoide y el elipsoide (INEGI 2011).

4.4.2. Corrección por latitud

Vale la pena el considerar una superficie imaginaria regular que corresponde a la verdadera forma y grosor de la tierra. Esta es la superficie llamada un elipsoide, y coincide estrechamente con el nivel del mar en los océanos. Sin embargo la referencia del elipsoide no coincide exactamente con el nivel del mar de la superficie. Si pudiéramos cruzar los continentes con un canal abierto al océano, el nivel del agua en ese canal también sería el nivel del mar.

La superficie que pasa a través de la superficie del nivel del mar alrededor del mundo se conoce como geoide (figura 8) el cual contiene amplias ondulaciones que son menores en comparación con sus dimensiones totales. Pese a que la referencia del elipsoide, no encaja correctamente con el geoide, sólo se aproxima a tal grado que es aceptable para la mayoría de la exploración gravimétrica. Por lo tanto necesitamos una ecuación que corrija la posición de la referencia del elipsoide Ec.5:

$$g_n = g_e(1 + A\sin^2 \phi - B\sin^2 2\phi) \text{ cm/s}^2 \quad (\text{Ec.5})$$

A y B son constantes que toman en cuenta la velocidad angular de la rotación de la tierra, su tamaño y su elipse. Valores para A y B son determinados cuidadosamente por satélites y por miles de estudios de g en varias latitudes. Vale notar que la longitud no entra en el cálculo. La latitud está representada por ϕ , g_e es la gravedad sobre el ecuador al nivel del mar, y g_n representa la gravedad normal. El valor para g_e se determina a partir de las mediciones realizadas en los sitios costeros sobre el ecuador y desde un cuidadoso ajuste a los valores de otros sitios en diferentes latitudes.

Valores actuales para A, B, y g_e fueron proporcionados por la asociación internacional de geodesia en 1967, el resultado es la fórmula del sistema de referencia geodésico de 1967 o GRS67, la cual está representada como:

$$g_n = 978.03185(1 + 0.005278895\sin^2\phi - 0.0000234624\sin^4\phi) \text{ cm/s}^2$$

(Ec.6)

La gravedad normal g_n representa el valor de la aceleración gravitacional que debemos observar cuando la gravedad se mide en varias posiciones en la superficie de la tierra, la Ec. 6 corrige la posición.

4.4.3. Corrección por deriva

Si colocamos un gravímetro en una posición y tomamos lecturas cada hora, los valores que obtendremos de seguro variarán. Esta variación se debe a dos causas:

1. Por la deriva instrumental, que es causada por pequeños cambios en las constantes físicas en las componentes del gravímetro.
2. Por los efectos de las mareas, que se rigen por la posición del sol y de la luna con respecto a la tierra.

Debido a la extrema sensibilidad del gravímetro, la deriva instrumental afecta a la lectura en una medida tal que no puede ser ignorada. No se pueden predecir los cambios ni se puede estar regresando inmediatamente al punto de referencia para establecer la deriva y si es así su magnitud. La técnica más simple es obtener lecturas en un determinado sitio, visitar otros sitios y regresar al sitio original (el cual se conoce como estación base).

La secuencia de la curva es basada en el número de estaciones, en este caso está basado en 1-2-3-4 estaciones. Si regresáramos a la estación base cada hora o dos, podemos asumir una deriva lineal. La tasa de la deriva se establece simplemente por la división de la diferencia entre el punto inicial y los valores de la base final por el lapso de tiempo entre la estación base y las lecturas.

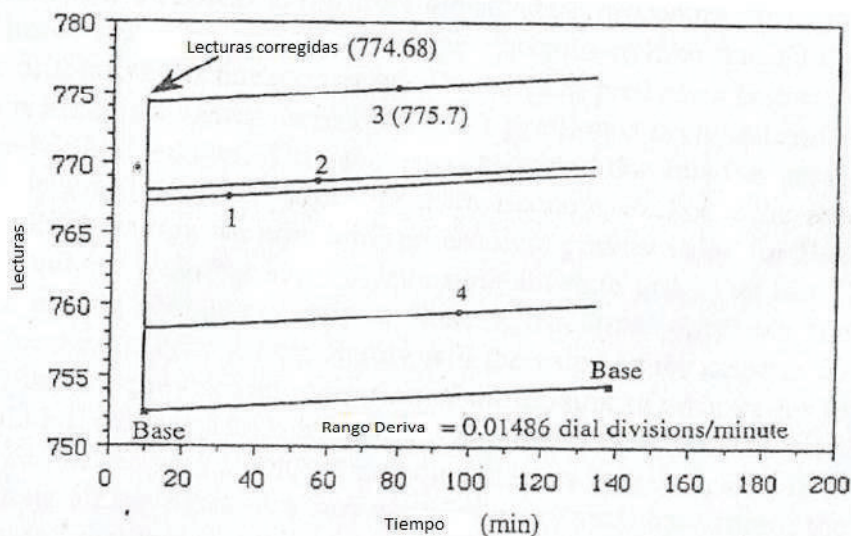


Figura 8. Corrección por deriva (H. Burger, 1992).

4.4.4. Corrección por aire libre

Regresemos a la tierra ideal, la cual es esférica y no tiene rotación. Ya hemos establecido que la aceleración gravitacional impartida por la tierra es

$$g = \frac{GM}{R^2} \quad (\text{Ec.7})$$

Si estamos interesados en el cómo la gravedad varia con la elevación, podemos determinar el gradiente vertical tomando la primera derivada de la fórmula (Ec.7).

$$\frac{dg}{dz} = \frac{dg}{dR} = -2 \frac{GM}{R^3} = -g \frac{2}{R} \quad (\text{Ec.8})$$

Si sustituimos los valores representativos a 45° de latitud, g al nivel del mar y R , el resultado es -0.3086 mGal/m. Este valor nos dice que la gravedad decrece cada vez que incrementamos nuestra distancia al centro de la tierra. Pero ahora tenemos una idea de la magnitud del decrecimiento. La ecuación (Ec.8) nos da una buena aproximación del valor que buscamos. Como en el caso de la corrección por latitud, debemos usar una representación más adecuada del verdadero carácter de la tierra y tomar una derivada de una ecuación que incluya factores como la rotación y la forma del elipsoide. La relación final (Grant and West, 1965,p. 237-238) es:

$$\frac{dg}{dR} = -.3086 - 0.00023 \cos 2\phi + 0.00000002z \quad (\text{Ec.9})$$

Donde ϕ es latitud, z es elevación y las unidades son mGal/m. En cualquier estudio de modesto grado, el ajuste de latitud (segundo término) en la ecuación (1-9) es muy pequeño. La corrección del gradiente vertical debido a la creciente distancia desde la superficie del elipsoide (tercer término) se convierte significativa solamente en regiones montañosas, donde es extrema la variación en la elevación. En la práctica ambos términos usualmente son ignorados y el valor de 0.3086 mGal/m es sólo el valor usado. Nótese que esta corrección considera solamente la elevación de diferencias relativas a un dato y no toma en cuenta la

masa entre el punto de observación y el dato, por esta razón la corrección es denominada corrección al aire libre.

Normalmente el datum usado para los estudios gravimétricos es el del nivel del mar, esto porque la gravedad decrece 0.3086 mGal para cualquier metro encima del nivel del mar, por lo tanto la corrección por aire libre se agrega a la gravedad observada. Si la elevación de los puntos de observación es debajo del nivel del mar, la corrección por aire libre es restada. Si el datum escogido no es al nivel del mar, el mismo procedimiento tiene relación con el dato seleccionado. Una vez más es importante notar que si queremos mantener una precisión de 0.1 mGal en nuestros valores finales de la gravedad, debemos saber la elevación de un punto de observación con exactitud de 33 cm.

El valor que se mantiene después de adherir la corrección de aire libre FA_{corr} y substraer la gravedad normal de la gravedad observada es denominado anomalía de aire libre. Podemos expresar la anomalía de aire libre Δg_{FA} como:

$$\Delta g_{FA} = g_{obs} - g_n + FA_{corr} \quad (\text{Ec.10})$$

4.4.5. Corrección de Bouguer

Si un punto de observación de la gravedad esta en A, es decir, en el nivel del mar, la corrección de aire libre no es necesaria. Si la estación está en B, en ese caso una corrección es aplicada por la diferencia z entre el nivel del mar y la elevación de la estación B. En este punto no hemos corregido la masa (capa) entre B y el nivel del mar, asumiendo que el nivel del mar es la referencia. Por ello es oportuno el recordar que nuestro propósito es aplicar una corrección para todos los factores que causan variaciones en la gravedad de una estación a otra, por lo que al final la única razón de las diferencias de gravedad debe ser las variaciones de densidad del subsuelo.

El enfoque habitual para corregir el exceso de material por debajo de B es calcular la atracción de capas de longitud infinita con densidad ρ y grosor z . Esta corrección se llama *corrección de Bouguer* en honor de Pierre Bouguer (1698-

1758) quien fue el primero en tratar de medir la atracción gravitatoria horizontal de montañas. Un examen superficial de la figura 9 claramente indica que es una aproximación.

Ahora pasaremos a desarrollar la corrección de Bouguer. Nuestro objetivo es obtener una relación para g . Hacemos esto sumando las contribuciones individuales de un pequeño volumen de elementos. Entonces usamos la relación derivada de un número infinito de lozas delgadas, porque debido a una infinidad de losas (bloques) es simplemente un conjunto de un número de hojas infinitas, esto proporciona el resultado deseado.

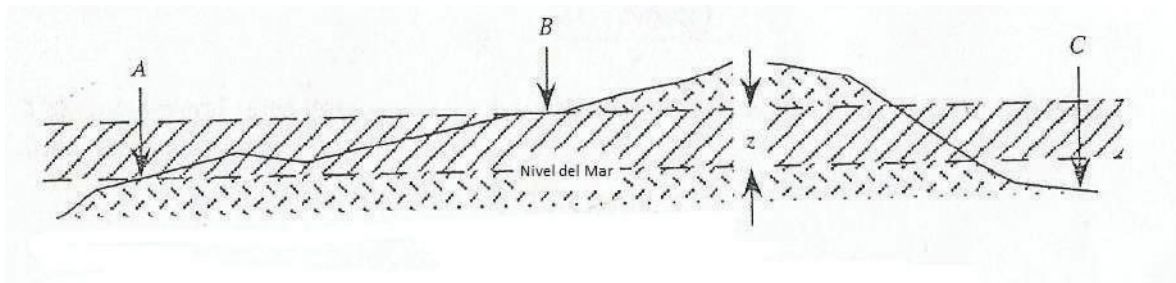


Figura 9. Anomalía de Bouguer (Burger, 1992).

Queremos determinar el pequeño valor de gravedad Δg en el punto P debido a una pequeña cantidad de elementos de un volumen dx, dy, dz y densidad ρ . Podemos utilizar la forma general de la ecuación para establecer la relación de g a lo largo de la dirección r , la cual nos da Δg_r :

$$\Delta g_r = \frac{G(\rho dx dy dz)}{r^2} \quad (\text{Ec.11})$$

Porque siempre estamos interesados en la vertical hacia abajo de la atracción gravitatoria Δg_z , multiplicamos. (Ec.11) por $\cos\theta$:

$$\Delta g_r = \frac{G(\rho dx dy dz)}{r^2} \cos \theta \quad (\text{Ec.12})$$

La atracción de una barra delgada es la suma de todos estos componentes:

$$\Delta g_r = \int_{x=-\infty}^{x=\infty} \frac{G(\rho dx dy dz)}{r^2} \cos \theta \quad (\text{Ec.13})$$

Antes de evaluar la integral notamos que $r = m / \cos\theta$, además, como la longitud del arco para un pequeño ángulo $d\theta$ es igual al radio r por el cambio en el ángulo $d\theta$, es sencillo de demostrar $dx = r d\theta / \cos\theta$ usando esta expresión:

$$\begin{aligned} \frac{G(\rho dx dy dz)}{r^2} \cos\theta &= \frac{G(\rho dy dz) r d\theta \cos\theta (\cos\theta)^2}{m^2 \cos\theta} \\ &= \frac{G(\rho dy dz) r d\theta \cos\theta (\cos\theta)^2}{m^2 \cos\theta \cos\theta} \\ &= \frac{G(\rho dy dz)}{m} \cos\theta d\theta \end{aligned}$$

Usando este resultado, ajustamos. (Ec.13):

$$g = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{G(\rho dy dz)}{m} \cos\theta d\theta \quad (\text{Ec.14})$$

La cual evalúa a:

$$g = \frac{2G\rho dy dz}{m} \quad (\text{Ec.15})$$

La ecuación (Ec.15) nos da g en p sobre una delgada barra.

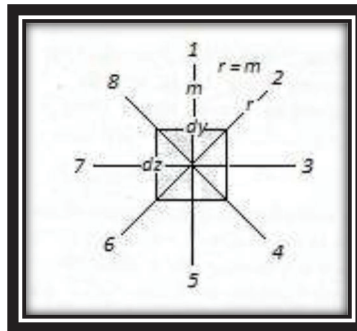


Figura 10. Barra delgada para derivar en la corrección de Bouguer (Burger, 1992).

El siguiente paso en nuestra derivación es barrer una capa fina utilizando una barra delgada. Para eso usamos (Ec.15) para calcular g sobre una delgada capa. Si las líneas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, y 8 son de igual longitud, entonces g es la misma al final de cada línea. La línea 1 es el equivalente a m en el diagrama

original y nos referimos a la línea 2 como r . Claramente $m = r$, y g es la misma en la posición 1 y 2. Esto nos da la misma vista de la barra delgada, donde la línea 2 que se etiqueta como r . Porque sabemos que g es debido a la barra delgada eq.1-15:

$$\Delta g_r = \frac{2G(\rho dydz)}{r} \quad (\text{Ec.16})$$

Los próximos pasos imitan exactamente lo que acabamos de enumerar, así siguiendo el mismo procedimiento:

$$\Delta g_z = \frac{2G(\rho dydz)}{r} \cos\theta \quad (\text{Ec.17})$$

$$g = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} 2G(\rho dz)d\theta \quad (\text{Ec.18})$$

Y

$$g = 2\pi G(\rho dz) \quad (\text{Ec.19})$$

Por lo tanto, el efecto de Bouguer o g es debido a una capa de extensión infinita y espesor z donde gz es $2\pi G(\rho z)$ y el valor de la corrección es $0.04193 \rho z$ mGal/m.

Debido a que la corrección de Bouguer supone la eliminación del efecto de la masa adicional por encima del datum que se suma a la gravedad observada, la corrección se resta de g_{obs} , si un punto de observación se encuentra en un punto por debajo del datum, tal como C en la figura 10, la corrección de Bouguer debe sumarse a la gravedad observada. Siguiendo la misma línea de razonamiento, ya que utilizamos en el caso de la corrección al aire libre, la gravedad residual restante después de la corrección de Bouguer B_{corr} se conoce como *anomalía de Bouguer* (Δg_b) y es igual a:

$$\Delta g_b = g_{obs} - g_n + FA_{corr} - B_{corr} \quad (\text{Ec.20})$$

Debido a que puede ser confuso para recordar la corrección de Bouguer y la de aire libre, lo mejor es registrar las diferencias de elevación de un dato que da

positivo cuando está por encima de la referencia y negativo cuando está por debajo del datum. Si se sigue este procedimiento, las diferencias pueden ser sustituidas directamente en la (Ec.21), la corrección será siempre en el sentido apropiado.

$$\Delta g_b = (g_{obs} - g_n + 0.3086 z - 0.04193\rho z)mGal \quad (Ec.21)$$

Hay que tomar en cuenta que las unidades son en miligales, así g_{obs} y g_n deben estar en miligales.

4.5. Separación de anomalía regional y residual

Cuando se mide la gravedad, sabemos que el valor registrado contiene contribuciones de fuentes de interés a poca profundidad, así como las contribuciones de fuentes mucho más profundas. Incluso los excesos de masas a distancias horizontales considerables desde un punto de observación afectan a los valores medidos. Por lo tanto, las fuentes más grandes, más profundas, pueden enmascarar fuentes ocultas de interés.

Las características más grandes producen anomalías de Bouguer que son suaves a distancias considerables. Estas tendencias suaves generalmente se conocen como las tendencias regionales o simplemente como regional. Las tendencias más agudas se relacionan a cuerpos pequeños en una extensión de área más pequeña. Si el regional es removido de los datos gravimétricos, los valores restantes o los valores residuales están relacionados con estas perturbaciones locales. Esto se refiere como anomalía residual o solamente como residual.

4.5.1. Tendencia de la superficie

Recordemos que nuestro objetivo es determinar las tendencias regionales en nuestros datos, estas son superficies matemáticas que representan a una de mejor ajuste en los puntos de datos distribuidos en el espacio xyz. Tal superficie se define por las funciones polinomiales y la superficie se ajusta a los datos usando el método de mínimos cuadrados. Por lo general se calculan tendencias de la superficie de diversos órdenes (primero, segundo, etc.) con el fin de seleccionar una para representar la tendencia regional, y después esta se substraer del mapa de anomalía de Bouguer para producir un mapa residual. La principal deficiencia de la utilización de superficies de tendencia para definir los regionales es que están definidas matemáticamente y, por lo tanto, no tienen en cuenta el conocimiento geológico.

La figura 11 ilustra la curva de la anomalía de Bouguer que se examinará previamente. Tres curvas se ajustan a nuestros datos: el ajuste polinomial de primer orden (línea recta) y el de tercer orden. La curva de primer orden proporciona una buena representación generalizada del campo regional. Si estos valores se substraen de la curva 1, el efecto de la anomalía del cauce del río enterrado sería bien delineada. Residuales sustanciales también estarían presentes cerca del comienzo y el final de la curva 1. Un polinomio de tercer orden da un mejor ajuste a los datos de Bouguer pero no definiría la anomalía residual debido al canal, como la curva de primer orden. Esta anomalía residual todavía se conserva, sin embargo los otros residuales se reducirían en intensidad.

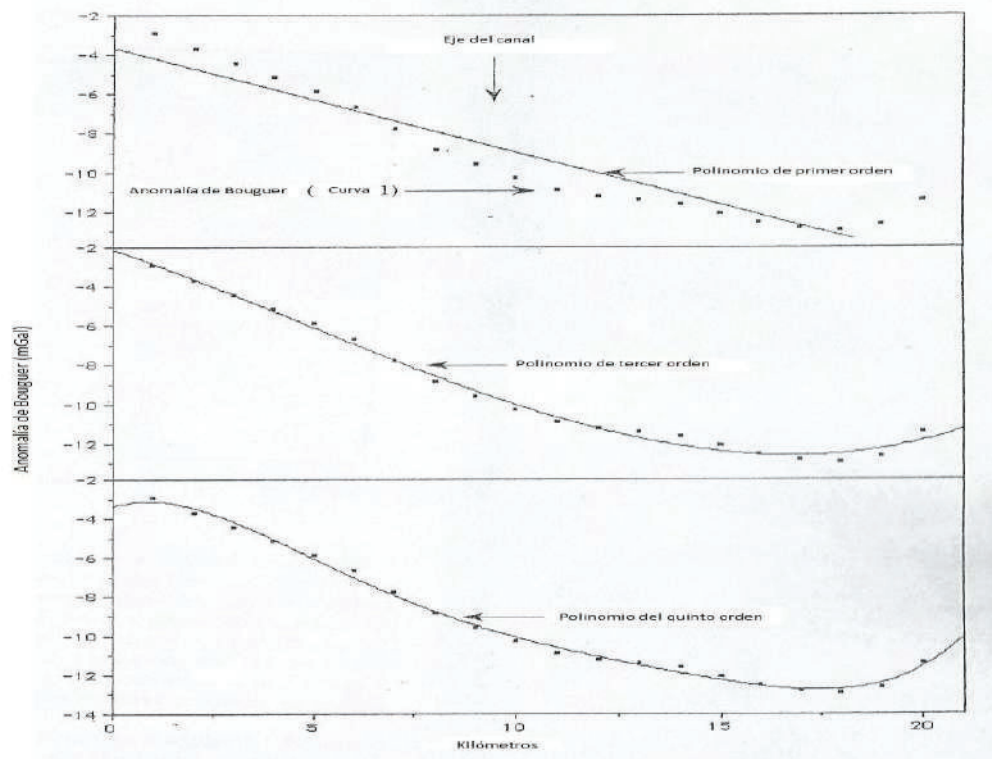


Figura 11. Ajuste polinomial de primer, tercer y quinto orden (Burger, 1992).

4.6. Modelado bidimensional

En geología, el modelado bidimensional corresponde a la representación de varias rocas. Tiene como finalidad el representar el contexto geológico-estructural, es decir tanto la composición como la alteración o cualquier otro tipo de característica en el suelo, para así efectuar un análisis más detallado del mismo, puesto que es necesario conocer el qué y el cómo, de donde estamos ubicados.

4.6.1. Método de Talwani

El primer gran salto cuantitativo en el proceso de interpretación se dió con el trabajo de Talwani (1959). Este trabajo presentó por primera vez un algoritmo automatizado para obtener la contribución gravimétrica de cuerpos bidimensionales irregulares, liberando el proceso de interpretación de las

estimaciones basadas en el cálculo de anomalía de cuerpos simples (esferas, láminas, entre otros).

El método de Talwani aproxima un cuerpo 2D irregular, remplazando la sección transversal del cuerpo por un polígono. Para utilizar este método se propone un modelo geológico (número de capas, espesores y densidades) y se calcula su respuesta (gravedad calculada). Esta respuesta se comprara con el perfil de la anomalía de Bouguer completa y el modelo geológico se modifica hasta que se logre el mejor ajuste entre ellos.

Partiendo de la anomalía de losas semi-infinitas con un borde inclinado, Talwani diseño un cuerpo de sección poligonal conformado por los bordes inclinados de las losas y sumó el efecto de cada una con la siguiente convención de signos: Negativo mientras aumente la profundidad al recorrer la cara del cuerpo en sentido horario, y positivo cuando disminuya la profundidad. La suma de las atracciones anula el efecto de las losas y deja solo el del cuerpo. La atracción de cada losa es

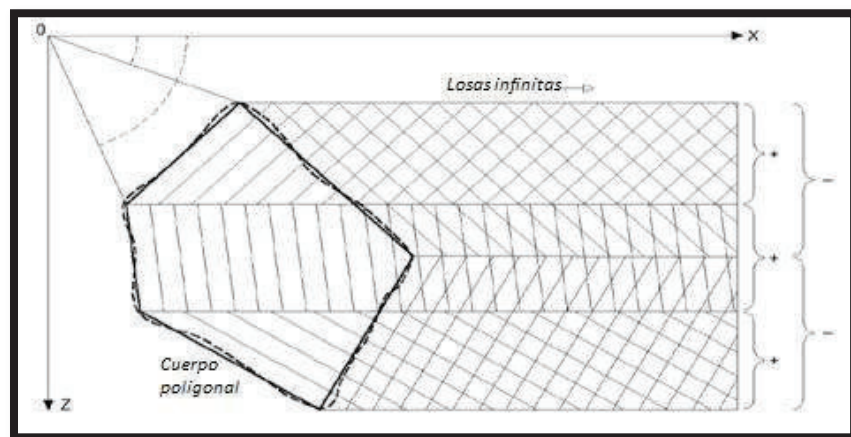


Figura 12. Modelo para calcular los efectos en la gravedad de un cuerpo irregular de dos dimensiones

$$\Delta g = 2.G.D[z_2\phi_2 - z_1\phi_1 - \{x_1\text{sen}\theta + z_1\text{cos}\theta\}\{\text{sen}\theta.\ln(r_2/r_1) + \text{cos}\theta(\phi_2 - \phi_1)\}]$$

Talwani logra mejorar su intento partiendo de la atracción de un cilindro horizontal. A modo simplemente ilustrativo se muestran las relaciones y el resultado final al

que llega. Este procedimiento es utilizado actualmente por todos los sistemas informáticos de modelaje en 2D

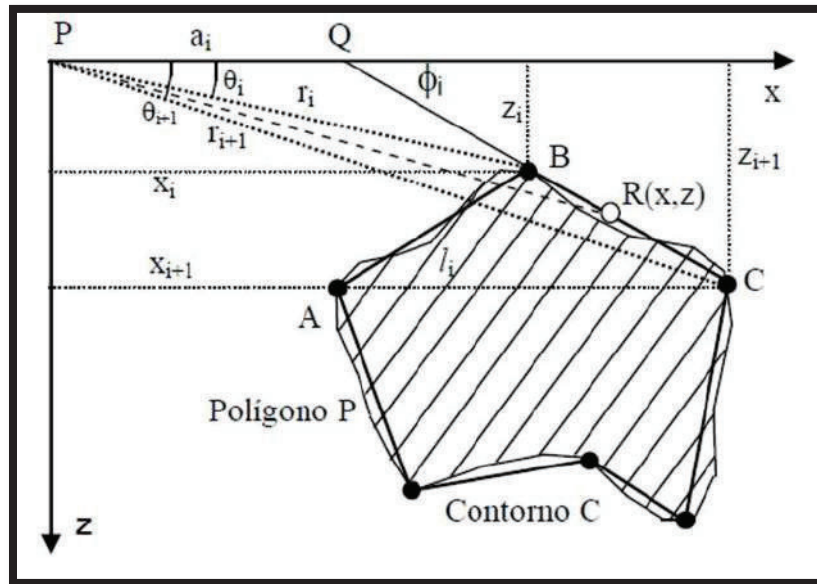


Figura 13. Aproximación poligonal de la sección vertical de cuerpo irregular bidimensional.

$$\Delta x_1 = x_{i+1} - x_i R_1 = (x_i^2 + z_1^2)^{1/2} S_1 = (x_i z_{i+1} - x_{i+1} z_i)$$

$$\Delta z_i = z_{i+1} + z_i R_1 = (x_{i+1}^2 + z_{i+1}^2)^{1/2} T_1 = (x_i x_{i+1} + z_i z_{i+1})$$

$$l_i = (\Delta x_i^2 - \Delta z_i^2)^{1/2}$$

$$g_i = 2. G. D. \frac{S_i}{l_i} \left[\Delta z_i \cdot \ln \frac{R_{i+1}}{R_i} - \Delta x_i \cdot \text{arctg} \frac{S_i}{T_i} \right]$$

La anomalía total será:

$$\Delta g = 2. G. D. \sum Z_i$$

5. Levantamiento gravimétrico del área de estudio

5.1. Perfiles gravimétricos medidos en campo

5.1.1. Adquisición de datos

Las ubicaciones de las estaciones gravimétricas se realizaron mediante la utilización de imágenes satelitales por medio de las cuales se reconoció el área a estudiar y se identificaron las diversas rutas de acceso, lo cual se consideró para planear el trabajo de campo.

Posteriormente se llevó a cabo un viaje de reconocimiento del área y se realizó el levantamiento gravimétrico, efectuándose un perfil W-E con 40 estaciones, con una longitud total aproximada de 38 kilómetros, con una separación entre cada estación variando entre 600 y 1,500 metros. De igual forma durante el trabajo de campo se verificaron los afloramientos litológicos y estructuras que se identificaron en la revisión bibliográfica previa al trabajo de campo.



Figura 14. Localización de las estaciones gravimétricas medidas en campo.

Para llevar a cabo las lecturas gravimétricas se utilizó un gravímetro de la marca Scintrex CG-5 propiedad del Departamento de Geología, UNISON (figura

15) el cual cuenta con una resolución de 0.001 mGal y un tope máximo de operación de 8,000 mGal. El gravímetro determina la lectura promedio de la gravedad observada en cada punto, la desviación estándar y el tiempo en el que se hizo la medición.



Fig.-15. Gravímetro CG-5 marca Scintrex.



Fig.-16. Geoposicionador (GPS)
Garmin EtrexLegend.

Las coordenadas de cada estación se obtuvieron mediante un geoposicionador (GPS) marca Garmin Etrex Legend (figura 16) el cual fue operado en coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator) con un datum en WGS84 (World Geodetic System).

Los valores de la gravedad observada adquiridos en el levantamiento se capturaron en formato digital para facilitar su manejo, y se obtuvo un perfil (perfil GOBS) para posteriormente generar un mapa utilizando el software WinGlink.

5.1.2. Determinación de la densidad

Para crear un modelo es recomendable conocer las densidades de las rocas presentes en los perfiles a modelar. Por lo cual se realizó un reconocimiento geológico de campo en el que se recolectaron un total de 19 muestras a lo largo de los perfiles gravimétricos, de las cuales sólo 6 fueron cortadas a un tamaño específico para poder medir su densidad (figura 18). Para poder crear un promedio adecuado de las densidades fue necesario tomar dos mediciones por cada

muestra. Para medir la densidad se utilizó la fórmula que se encuentra en Mirónov (1977), donde sugiere la fórmula:

$$\rho = \frac{W_3}{W_1 - W_2}$$

Donde:

ρ =Densidad en gr/cm³

W_1 = Peso de la roca en seco

W_2 = Peso de la roca inmersa en agua

W_3 = Peso de la roca húmeda

Para medir la densidad se usó un densitómetro (Electronic Densimeter EW-300SG) marca Alfa Mirage, de alta precisión y con resolución de 0.01 g/cm³ y con capacidad de 300 g (figura 17).Las densidades medidas de muestran en la tabla 1



Figura 17.Densitómetro (ElectronicDensimeter EW- 300SG) marca Alfa Mirage.

Roca	Densidad
Arenisca- conglomerado	2.3
Arenisca-lutita	2.42
Caliza	2.45
Andesita	2.53
Riolita–andesita	2.5
Granito	2.68

Tabla 1.- densidades de muestras recolectadas en el área de estudio



Figura 18. Muestras recolectadas.

5.1.3. Corrección de datos

Como se menciona anteriormente, la gravedad observada debe pasar por numerosas correcciones ya que las mediciones obtenidas se encuentran bajo la influencia de factores que crean variaciones en los datos, tales como la latitud y el tiempo. Por tal motivo fue necesario aplicar la corrección por deriva, latitud, aire libre y Bouguer. Para llevar a cabo estas correcciones se utilizó el programa Excel para crear una base de datos con todas las correcciones necesarias. La base de datos con las correcciones se muestra en el Apéndice A

Debido a que la forma de la tierra es un elipsoide, la rotación es un factor importante por corregir. En este sentido, la corrección por latitud nos ayuda a corregir el factor de la tierra: ancha en el ecuador, chata en los polos. Al obtener mediciones relativas de la gravedad es imprescindible utilizar la expresión del gradiente. Esta corrección indica el error al comparar la estación base con las estaciones medidas con respecto a cada kilómetro en dirección N-S, tomando en cuenta que la corrección se resta si nos acercamos a los polos al registrar el perfil y se suma si nos acercamos al ecuador.

Continuando con la corrección por deriva se registró una deriva de 0.257 mGal en 5.08 horas; a partir de esa medición se obtuvo la corrección para cada estación mediante una interpolación lineal.

La corrección por aire libre es necesario realizarla para corregir cambios encontrados en la elevación por cada estación respecto a la estación base, y consiste en colocar las lecturas medidas a un solo nivel de referencia o datum. Los valores de esta corrección se suman cuando la estación medida está sobre el nivel de referencia que en este caso es la estación base y se resta cuando está por debajo de esta (figura 14).

La corrección de Bouguer es muy similar a la de aire libre porque es una corrección que depende de la elevación, pero además de esto toma en cuenta la masa que está por encima o por debajo de la estación de referencia (Ec.19). Esta corrección se resta cuando la estación medida está por encima del nivel de referencia y se suma cuando está por debajo de dicho nivel (figura 9). En este caso en particular se utilizó una densidad de 2.67 gr/cm para realizar la corrección citada, la cual es la densidad cortical típica. Las mediciones observadas así como las correspondientes correcciones se presentan en el apéndice A.

5.1.4. Anomalía de Bouguer

Al concluir con todas las correcciones mencionadas anteriormente se obtiene la anomalía de Bouguer en base a la fórmula (Ec.20). Partiendo de estos valores se construyó una malla en el programa WinGlink utilizando el método de interpolación de mínima curvatura. La figura 19 muestra la anomalía de Bouguer de los perfiles obtenidos del estudio gravimétrico.

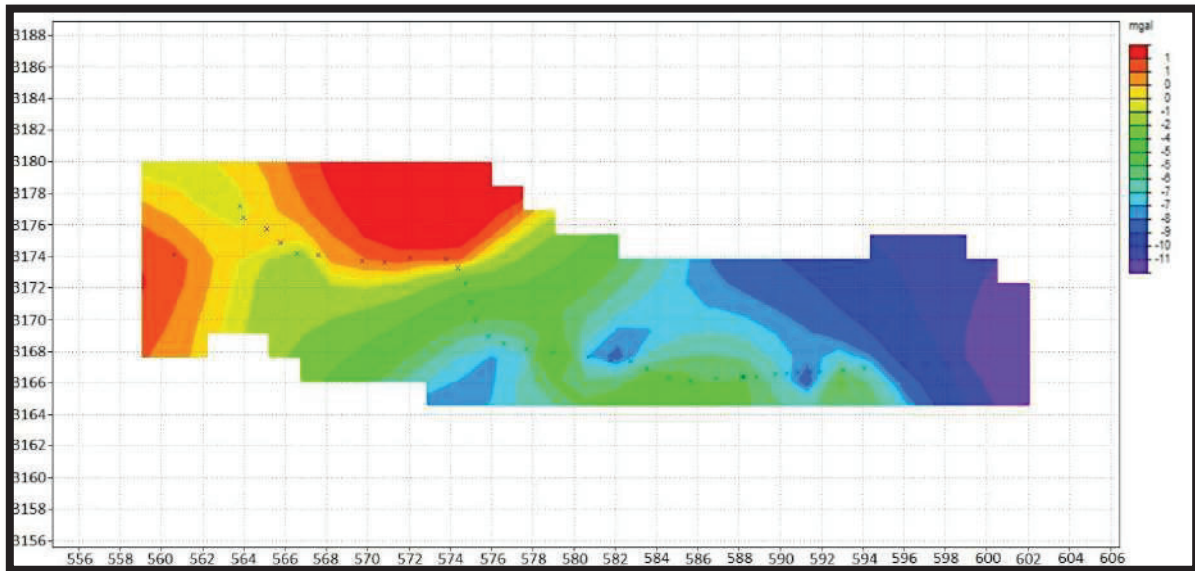


Figura 19. Mapa de anomalía Bouguer de las lecturas obtenidas en campo.

En el mapa de anomalía de Bouguer se observan varios tonos de colores que representan las anomalías gravimétricas. Los tonos rojos y amarillos están relacionados a altos gravimétricos, mientras que los tonos azules están asociados a bajos en la gravedad. Por lo tanto se pueden distinguir zonas anómalas bien definidas. En la porción este se puede apreciar un bajo gravimétrico con un rango de valores de -11 a -5 (mGal) y conforme se va acercando a la porción noroeste del perfil las tonalidades se tornan de color rojo indicándonos un alto gravimétrico con orientación NE-SW. En general los rangos en los valores del mapa de anomalía de Bouguer para los perfiles obtenidos en campo van de un rango de -11 a 1 mGal.

5.1.5. Anomalía regional y residual

Para determinar el regional fue necesario un ajuste polinomial de tercer grado (figura 20) ya que se empleó un ajuste polinomial de primer, segundo y tercer grado llegando a la conclusión que el ajuste polinomial de tercer grado era el ajuste que mejor enfatizaba las anomalías gravimétricas sin descuidar la información recabada. El mapa regional muestra dos anomalías gravimétricas muy

pronunciadas que van del rango de -11.5 a 1.0 mGal. En la porción Este de la carta se contempla un bajo gravimétrico bastante marcado y en la porción noroeste del mapa se muestra un gran alto gravimétrico.

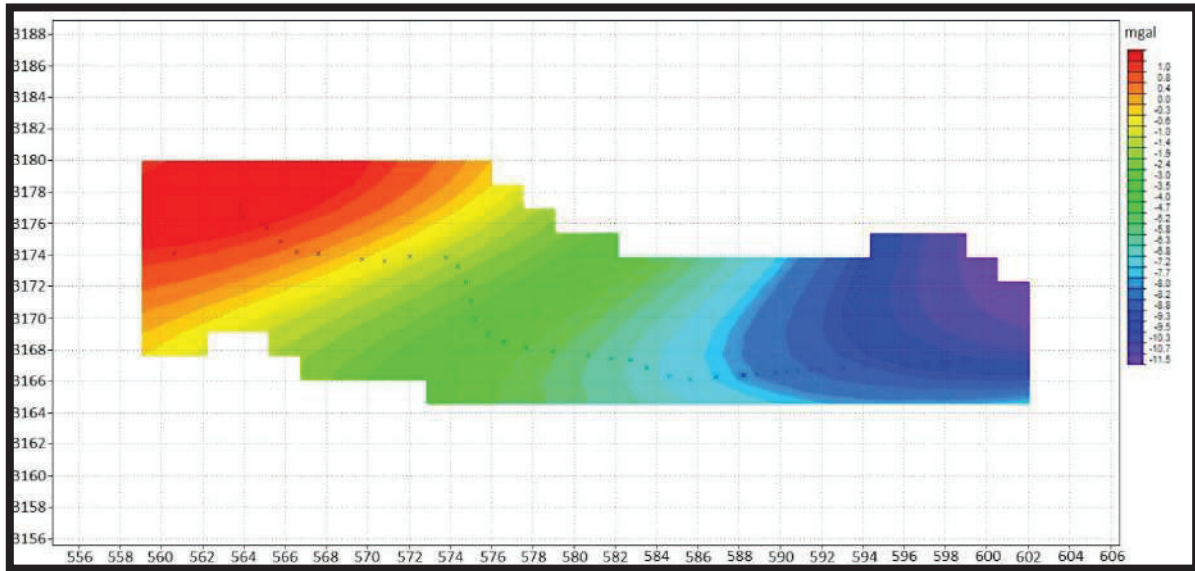


Figura 20. Mapa de anomalía regional de las lecturas obtenidas en campo.

Por otro lado, en el mapa de la anomalía residual (figura 21) se observan algunos altos gravimétricos asociados a cuerpos intrusivos y rocas andesíticas de la Formación Tarahumara y los bajos se encuentran relacionados a cuencas y rocas sedimentarias. Los rangos van de -2.2 a 2.2 mGal.

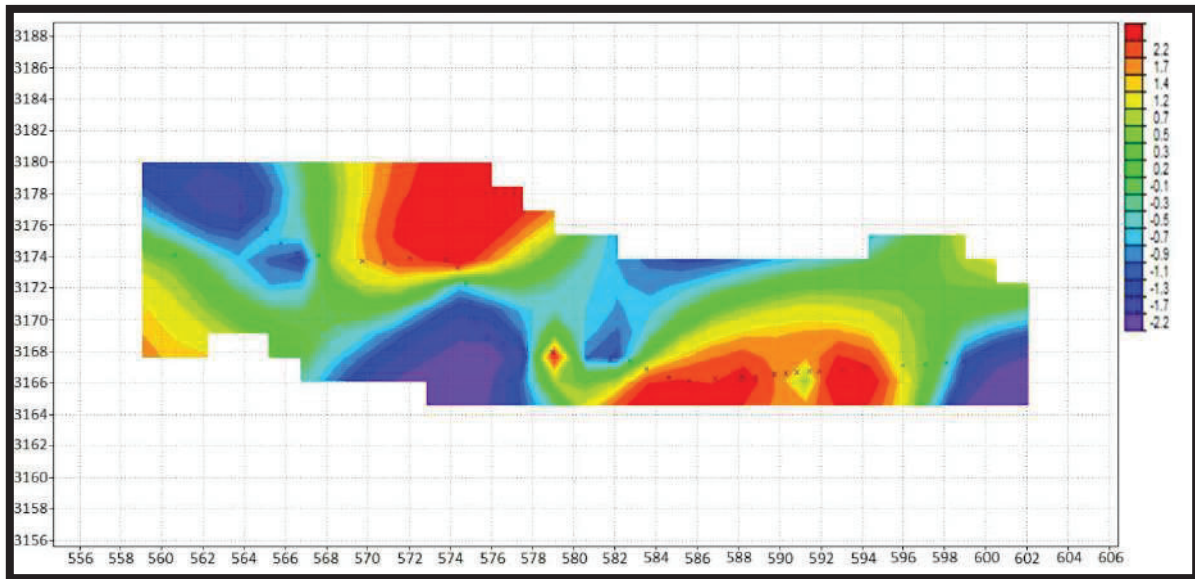


Figura 21. Mapa de anomalía residual de las lecturas medidas en campo.

5.2. Anomalía de gravedad de Bouguer completa del INEGI 2010 de la Carta Buena Vista

5.2.1. Adquisición de datos

Para complementar el estudio gravimétrico realizado se utilizó una serie de modelos gravimétricos de la república mexicana elaborados por el INEGI(2010). En este caso en particular se utilizaron los datos de anomalía de Bouguer completa, los cuales contienen valores estimados de la anomalía de Bouguer sobre el terreno.

Para producir dichos valores se utilizaron aproximaciones esféricas tanto para el cascarón de Bouguer como para el cálculo de corrección por terreno (INEGI, 2010). Los datos contienen todas las correcciones necesarias (aire libre, Bouguer, topográfica, etcétera) y sus unidades de medida se expresan en mGal.

La red geodésica gravimétrica del INEGI está compuesta por un conjunto de estaciones donde se han realizado observaciones gravimétricas distribuidas homogéneamente, a través de las cuales se determina el comportamiento de la fuerza de gravedad dentro del territorio nacional. Los levantamientos gravimétricos

realizados por el INEGI son con fines geodésicos y tienen como objetivo generar datos de valores de gravedad que son utilizados para la determinación del geoide de México y para la elaboración de cartas gravimétricas.

El conocimiento del valor de la gravedad es aplicable en el cálculo de separaciones entre el geoide y el elipsoide (altura geoidal) determinación de alturas ortométricas precisas y/o combinado datos gravimétricos con observaciones realizadas a través de instrumentos GPS. La información gravimétrica tiene aplicación en la prospección de depósitos minerales, petroleros, de gas y otros.

Los levantamientos geodésicos gravimétricos comprenden la medida de valores absolutos o relativos del valor de la gravedad sobre puntos situados en o cerca de la superficie terrestre cuyo propósito consiste en fundamentar y determinar el campo gravimétrico existente.

Actualmente la red gravimétrica nacional cuenta con estaciones con valores de gravedad de segundo orden, establecidas a través de levantamientos regionales ligados a la red básica por parte del INEGI. Cada estación de la red gravimétrica cuenta, entre otros datos, con el valor de la gravedad calculado. La metodología de medición o levantamiento de datos consiste en la determinación de la gravedad relativa de distintos puntos ubicados sobre líneas o circuitos. Para determinar el valor de la gravedad se utilizan gravímetros geodésicos analógicos y digitales, con sensibilidad de 0.01 y 0.001 miligales de precisión, respectivamente.

Los levantamientos se realizan a través de los siguientes procesos:

- Anteproyecto.- Consiste en ubicar sobre cartografía los posibles sitios de medición de acuerdo con los criterios de densificación establecidos para proyectar las mediciones gravimétricas en campo.
- Medición.- Consiste en obtener lecturas gravimétricas e información geodésica a través de la medición puntual en campo para determinar valores de gravedad.
- Procesamiento de datos.- Se transforman los datos de las observaciones de campo a valores de gravedad, depurados y validados por medio de

programas computacionales para ser integrados al banco de datos gravimétrico.

- Integración al banco de datos.- Los valores de gravedad obtenidos se vacían en el banco de datos gravimétricos.

Partiendo de este banco de datos gravimétricos fue necesario obtener los datos de la anomalía de Bouguer completa del INEGI 2010, se ubicó y se extrajo la información incluida en el polígono creado alrededor de la Carta Buena Vista H12-D63 que cuenta con las coordenadas: latitud norte $28^{\circ} 46'$ – $28^{\circ} 28'$ y con una longitud oeste $110^{\circ} 23'$ – $109^{\circ} 56'$. Este polígono fue creado gracias a 96 estaciones gravimétricas con un promedio de espaciamiento de 4,000 m entre cada estación, el cual se muestra en la figura 22, en donde se proyectó a escala ampliada dicho polígono.



Figura 22. Localización de estaciones gravimétricas de INEGI 2011

5.2.2. Anomalía de Bouguer

Los datos de anomalía de Bouguer completa de la red geodésica proporcionado por el INEGI fueron de suma importancia para poder llevar acabo el procesamiento de los datos geofísicos en el programa WinGlink, el cual se creó con una malla por el método de interpolación de mínima curvatura. El mapa de la anomalía de Bouguer completa se muestra en la figura 23.

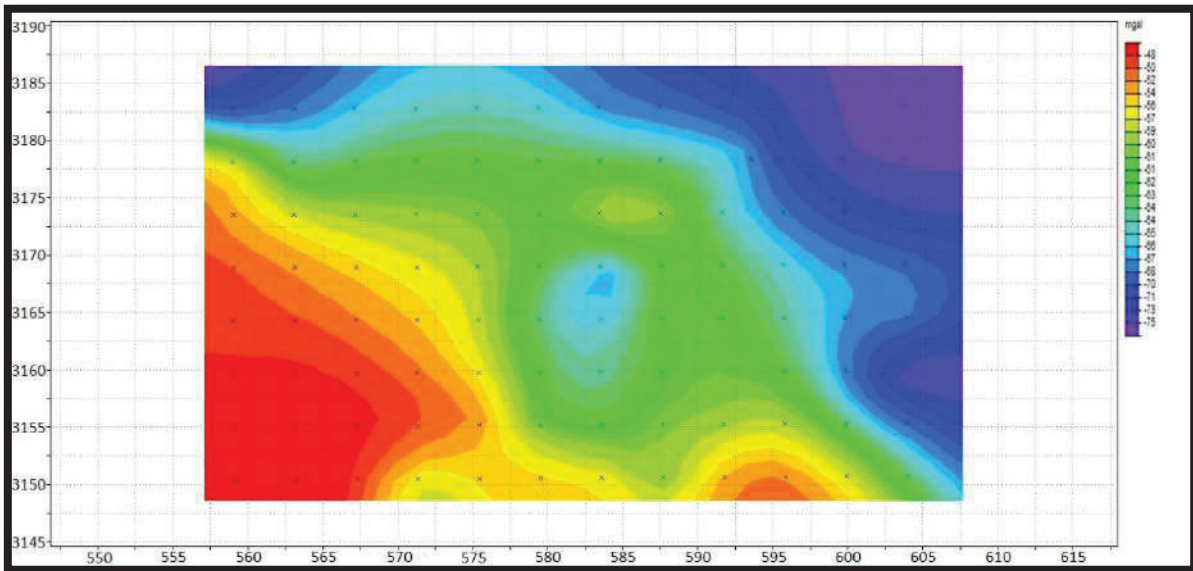


Figura 23. Mapa de anomalía de Bouguer completa de datos de INEGI.

5.2.3. Anomalía regional y residual

Para poder acordar la anomalía regional (figura 24) y la residual (figura 25) fue necesario realizar un ajuste polinomial de primer grado, ya que los datos adquiridos por el INEGI son datos muy suaves con respecto con los obtenidos en nuestro levantamiento gravimétrico, por lo que este ajuste fue el que mejor encajó a las anomalías regionales correspondientes a un plano inclinado. El mapa muestra un bajo gravimétrico en la porción noreste y un alto en la zona suroeste. El mapa de la anomalía residual presenta altos gravimétricos circulares relacionados a intrusivos y bajos relacionados a cuencas sedimentarias. Más adelante se explicará a detalle esta relación.

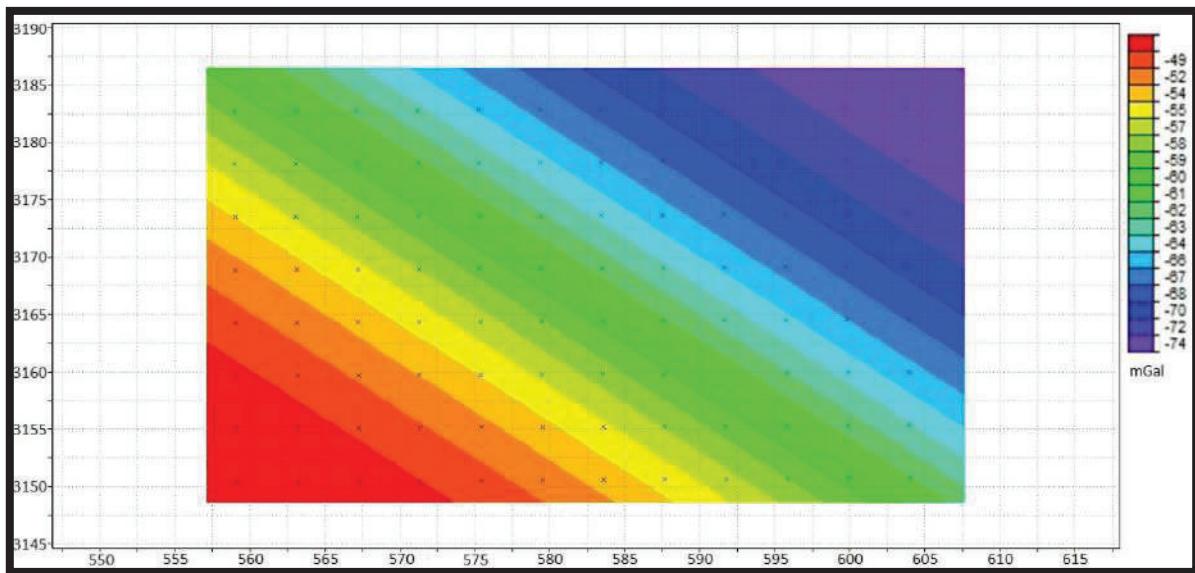


Figura 24. Mapa de anomalía regional datos de INEGI 2011

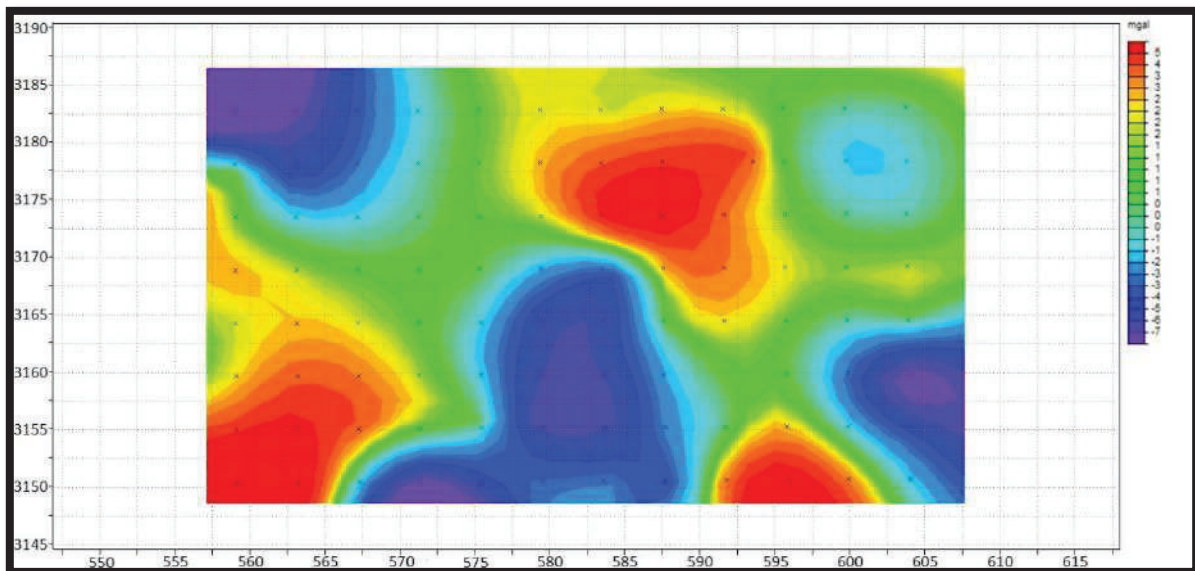


Figura 25. Mapa de anomalía residual datos de INEGI 2011

6. Modelado gravimétrico

6.1. Modelación de perfiles gravimétricos medidos en campo

Antes de crear los modelos bidimensionales de los perfiles gravimétricos medidos en campo se estudió la Carta Geológica Minera Buena Vista H12-D63. Este estudio nos ayudó a tener un mejor panorama respecto a la afinidad geológica en

relación a las anomalías, para posteriormente crear los perfiles que fueron modelados. Todo esto se ejecutó con la finalidad de proponer un modelo inicial en el subsuelo que correlacione la geología del área con la gravimetría.

En la figura 26 se presenta la geología superficial (SGM, 2011), la cual se tomó como un factor importante para trazar los perfiles gravimétricos obtenidos del levantamiento gravimétrico (perfiles observados). En la figura 27 se muestran las secciones geológicas correspondientes con cada perfil gravimétrico, en los cuales cada uno muestra las coordenadas de inicio y término, así como también la longitud (km) y la altura (m). Por lo tanto la geología correspondiente a cada perfil se explicará en el apartado siguiente.

6.1.1. Secciones geológicas de los perfiles

Todos los perfiles gravimétricos medidos en campo se ubican en la figura 26 y están señalados como sección A, B, C y D.

Sección A

Se muestra la sección geológica correspondiente al perfil A-A'. Esta sección tiene orientación casi E-O y muestra una cuenca sedimentaria rellena por conglomerado de la Formación Báucarit del Cenozoico y una pequeña cobertura sedimentaria del Cuaternario. Estas dos fueron tomadas en cuenta como aluvión para hacer más fácil su modelado. Aunque esta sección aporta poca información geológica intentamos interpretar lo que está por debajo de ella.

Sección B

Se presenta el perfil B-B', el cual tiene una orientación N-S. La sección muestra una secuencia volcánica en donde se presentan derrames lávicos del Cenozoico de la Formación Lista Blanca compuesta por riolitas y tobas riolíticas; las cuales

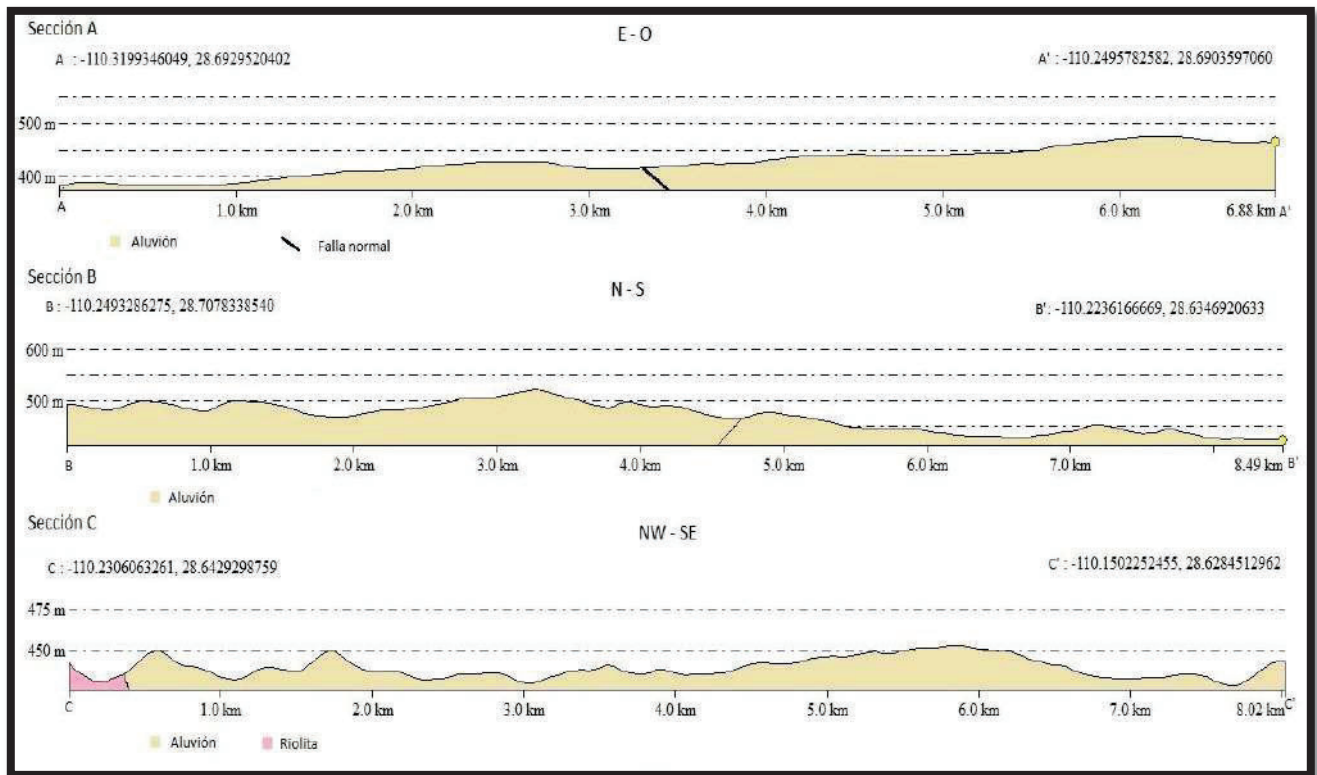


Figura 27. Secciones geológicas elaboradas a partir del mapa geológico y la ubicación de perfiles gravimétricos medidos en campo.

6.1.2. Modelado bidimensional con Método de Talwani

El desarrollo del modelado compromete concebir un modelo hipotético en donde se cree de estas formas geométricas para cada estructura y se calcule la respuesta del mismo. Este Método de Talwani también se conoce como modelado directo y consiste en elaborar modelos estructurales del subsuelo tomando como cimiento la densidad, forma y profundidad de los cuerpos que conforman dicho modelo. Los modelos bidimensionales toman en cuenta solamente el cambio en dos direcciones, con la profundidad Z y en la dirección de los perfiles, y se mantiene constante en el rumbo de la estructura.

Si definimos nuestros objetivos cuidadosamente, nuestros datos tienen buena distribución en la superficie, las densidades son suficientes para satisfacer los objetivos del estudio, los datos están correctamente corregidos y tienen la

precisión requerida, entonces se puede construir un modelo que se ajuste lo más cerca posible a la geología superficial. Los valores de la anomalía de Bouguer calculados para el modelo se comparan con los valores medidos con el fin de evaluar y ajustar el modelo.

Cuando se consigue un ajuste aceptable entre la curva del modelo propuesto y la curva de anomalía de Bouguer, la configuración geológica es posible que sea la correcta. Muchos modelos diferentes pueden producir valores de gravedad similares, por lo cual es necesario tener conocimiento sobre la geología del área de estudio y de la forma de los cuerpos.

Para realizar el proceso de modelado, los perfiles medidos en campo (perfiles observados) se trazaron sobre el mapa de anomalía residual de tercer grado (figura 28). Este mapa es el resultado de restar la anomalía de Bouguer con la anomalía regional determinada por la tendencia de la superficie y el ajuste polinomial de tercer grado. El mapa de anomalía residual resultante se seleccionó de entre otros, ya que las anomalías observadas en este ajuste polinomial se enfatizan mejor sin perder información.

Es importante resaltar que al momento de aumentar el grado de ajuste, el regional se va pareciendo más a su anomalía de Bouguer, lo que hace que el residual cada vez sea menor y tienda a ser impredecible. Por eso se recomienda que superficies de grados mayores a cuatro no se usen para definir un regional (Burger, 1992).

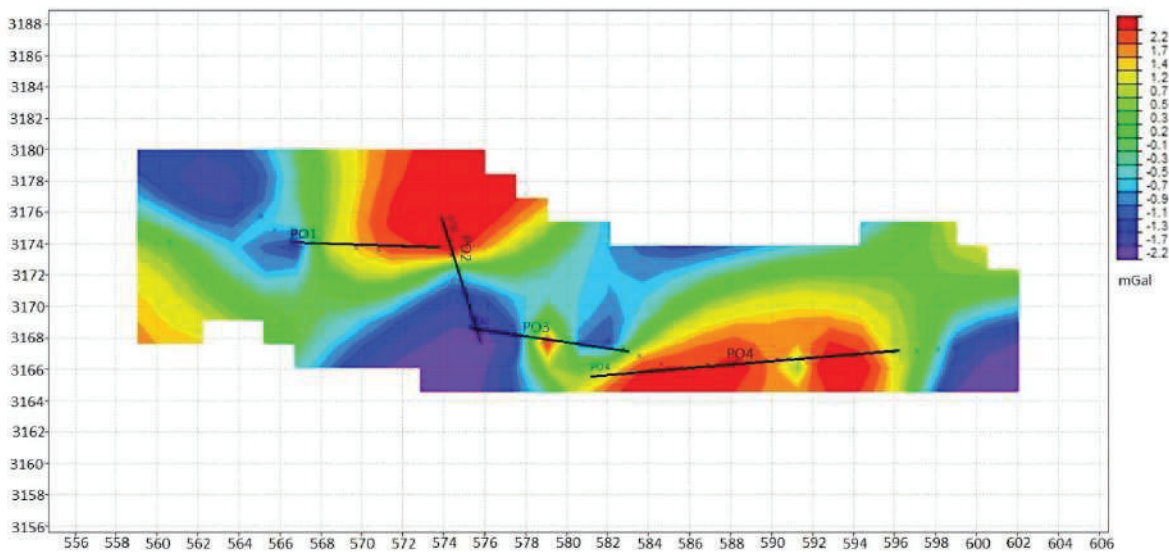


Figura 28. Mapa de anomalía residual con la ubicación de los perfiles gravimétricos medidos en campo.

El mapa de la figura 28 indica la ubicación de los 4 perfiles que fueron trazados con la intención de abarcar las anomalías más representativas de tal mapa e intentando abarcar los valores medidos en el levantamiento gravimétrico, haciendo uso lo menos posible los valores interpolados. La modelación gravimétrica 2D se realizó con el software WinGLink de Geosoft, el cual es un programa de modelado que permite un manejo interactivo entre el modelo geológico propuesto y la correspondiente respuesta gravimétrica calculada en tiempo real. Para tal fin se emplea el Método de Talwani et al. (1959). Este método aproxima un cuerpo 2D irregular reemplazando la sección transversal del cuerpo por un polígono. Para utilizar este método se propone un modelo geológico (número de cuerpos, tamaño y densidades) y se calcula su respuesta (gravedad calculada). Esta respuesta se relaciona con el perfil de la anomalía residual y el modelo geológico se modifica hasta que se logre el mejor ajuste entre ellos.

Para los modelos de estos perfiles se consideraron 4 cuerpos y se estimaron distintas densidades, las cuales se obtuvieron a partir de valores medidos y de tablas de los autores Dobrin (1975) R. Burguer (1992) tal como se ilustra en la tabla 2:

Cuerpo	Roca	Densidad
1	Aluvión	2.1 - 2.38
2	Arenisca-Lutita	2.368- 2.479
3	Caliza	2.4 - 2.44
4	Andesita	2.5 -2.56
5	Granito	2.55 - 2.6

Tabla 2.- Densidades correspondientes a los cuerpos geológicos considerados en el modelo.

6.1.2.1. Perfil A

A continuación se muestra el modelo geológico obtenido, correspondiente al perfil A (figura 29) el cual presenta una orientación W–E y una extensión de 7.2 kilómetros. En la parte superior de la figura se muestra la gráfica adquirida del perfil de anomalía residual, la cual se presenta en miligales, como también la respuesta calculada para el modelo en cuestión. En la parte inferior se presenta el modelo geológico propuesto, el cual se encuentra representado principalmente por una andesita o toba andesítica de la Formación Tarahumara la cual está actuando como base, y sobre ésta se encuentran conglomerados de la Formación Báucarit en conjunto con sedimentos del Cuaternario indicándonos el espesor de la cuenca sedimentaria, la cual tiene un rango aproximado de 800–1,000 metros de profundidad aproximadamente. Esta cuenca cuenta con un bajo gravimétrico en la zona oeste, la cual nos indica un espesor más amplio de la cuenca o una posible falla con respecto al alto marcado del lado este, lo que quiere decir que es un espesor más delgado.

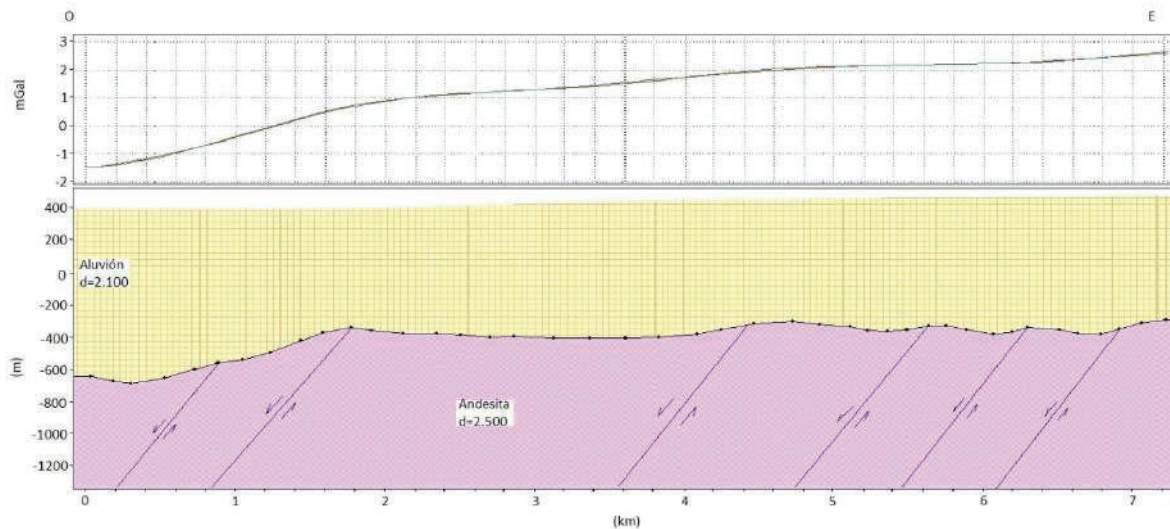


Figura 29. Modelo geológico para el perfil A. En la parte superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La parte inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

6.1.2.2. Perfil B

El modelo geológico propuesto para el perfil B se muestra en la figura 30 con una orientación casi norte–sur y una extensión de 8.25 kilómetros. El modelo geológico es muy parecido al modelo anterior, ya que se realizó en una cuenca con rocas sedimentarias de la Formación Báucarit (conglomerado–areniscas) y sedimentos cuaternarios, los cuales se encuentran relleno la cuenca. También se aprecia como base a la Formación Tarahumara (andesita) del Cretácico superior, la cual se encuentra como basamento para dicha cuenca. El espesor estimado del relleno sedimentario para este modelo fue de 800–1,400 metros aproximadamente. El espesor más profundo se observa en la parte central del perfil, el cual parece estar afectado por una falla que causa una mayor profundidad en la cuenca y el cual se muestra como un bajo gravimétrico.

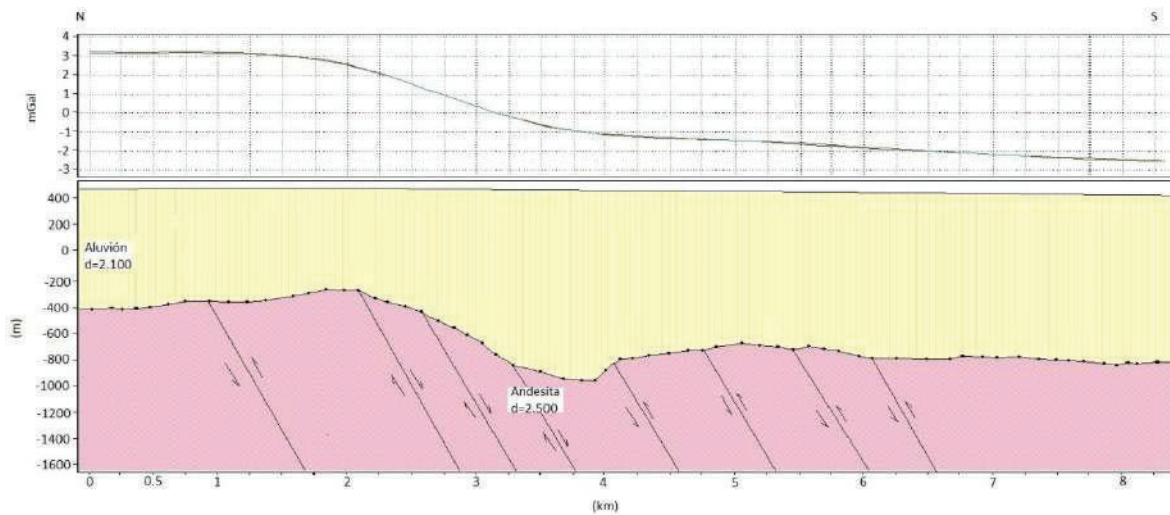
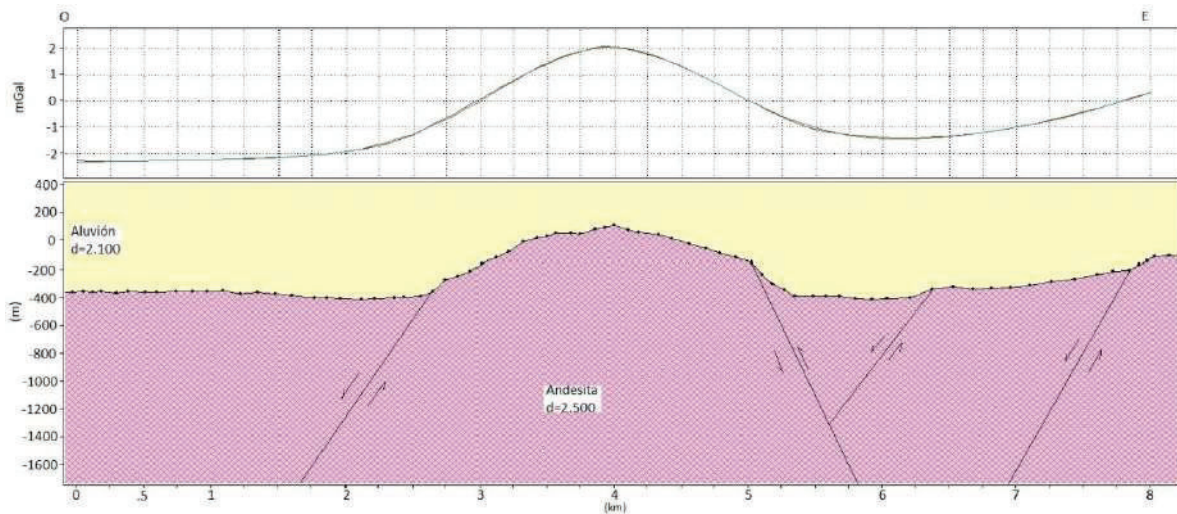


Figura 30. Modelo geológico para el perfil B. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

6.1.2.3. Perfil C

Este modelo geológico que representa al perfil C de la figura 31 tiene una posición NW–SE con una extensión de 8 kilómetros aproximadamente. En la parte centro del modelo se encuentra un alto gravimétrico muy marcado, el cual nos presenta un panorama diferente con respecto a las cuencas anteriores, pues nos propone que este alto gravimétrico se encuentre delimitado por fallas normales que han elevado la andesita de la Formación Tarahumara casi a aflorar en la geología superficial, pero sigue cubierta por el conglomerado de la Formación Báucarit con un espesor muy delgado, creando cuencas más profundas a los lados. El espesor estimado para el centro de la carta es 250–370 metros, por otro lado el espesor calculado para las cuencas es de 600–900 metros de profundidad aproximadamente. Este comportamiento de fallas normales son típicas de las estructuras Horst y Graben.



6.1.2.4. Perfil D

El perfil D tiene una orientación casi O–E con una extensión de 15 kilómetros (figura 32). El modelo geológico muestra dos altos gravimétricos que están relacionados a la presencia de intrusivos de composición granítica en donde se aprecia que los intrusivos se encuentran cortando la Formación Tarahumara (andesita) y sobre esta se contempla el relleno sedimentario, el cual tiene un espesor promedio que va de 600–800 metros. Por otro lado el bajo gravimétrico se encuentra relacionado a una falla y crea mayor profundidad en esa parte de la cuenca.

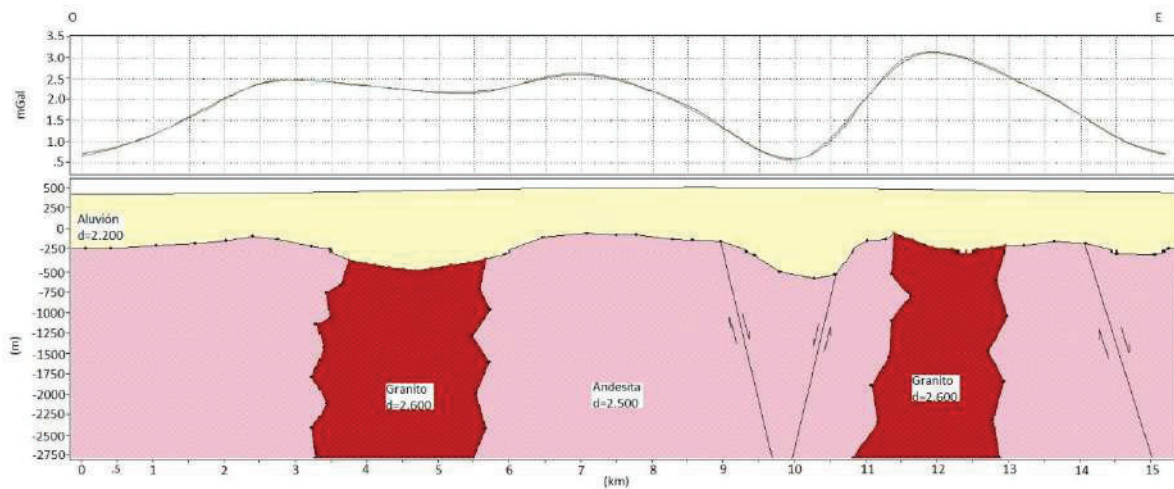


Figura 32. Modelo geológico para el perfil D. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

6.2. Modelación de perfiles de la anomalía de gravedad de Bouguer completa del INEGI

Para esta parte del trabajo se utilizó la anomalía de gravedad de Bouguer completa del INEGI (2010) la cual contiene valores estimados. Se seleccionaron las estaciones gravimétricas incluidas dentro de las coordenadas geográficas $28^{\circ} 30'$ a $28^{\circ} 45'$ de latitud norte y $109^{\circ} 20'$ a $110^{\circ} 00'$ de longitud oeste, que pertenecen a la Carta Buena Vista H12–D63. Consiguientemente se utilizó una malla en la base de datos que fue procesada en el programa WinGlink, donde primeramente se creó el mapa de anomalía de Bouguer para después aplicar un ajuste polinomial de primer grado para poder adquirir el mapa regional y residual, pues los datos del INEGI están muy suavizados y no es conveniente usar un polinomio de grado mayor porque se perdería mucha información. Sobre este mapa de anomalía residual fueron trazados 3 perfiles con orientación SW–NE, tal como se muestra en la figura 35. Los perfiles son perpendiculares al rumbo de las estructuras geológicas y se trazaron sobre las estaciones gravimétricas. En este mapa se observan altos gravimétrico bien definidos asociados a intrusivos, los

cuales están rodeados por bajos gravimétricos relacionados con cuencas o rocas sedimentarias, tal como se describe en las siguientes secciones.

6.2.1. Secciones geológicas de los perfiles

Como se explica previamente en el capítulo anterior, antes de efectuar la modelación fue necesario verificar la geología superficial del área de estudio. Como conclusión se reconocieron las principales estructuras que conforman la Carta Geológica Minera Buena Vista H12–D63. Por ende se intentó que los perfiles fueran perpendiculares al rumbo de las anomalías gravimétricas que tiene una orientación SW–NE y abarcaran toda o la mayor parte de la columna geológica de dicha carta (figura 33).

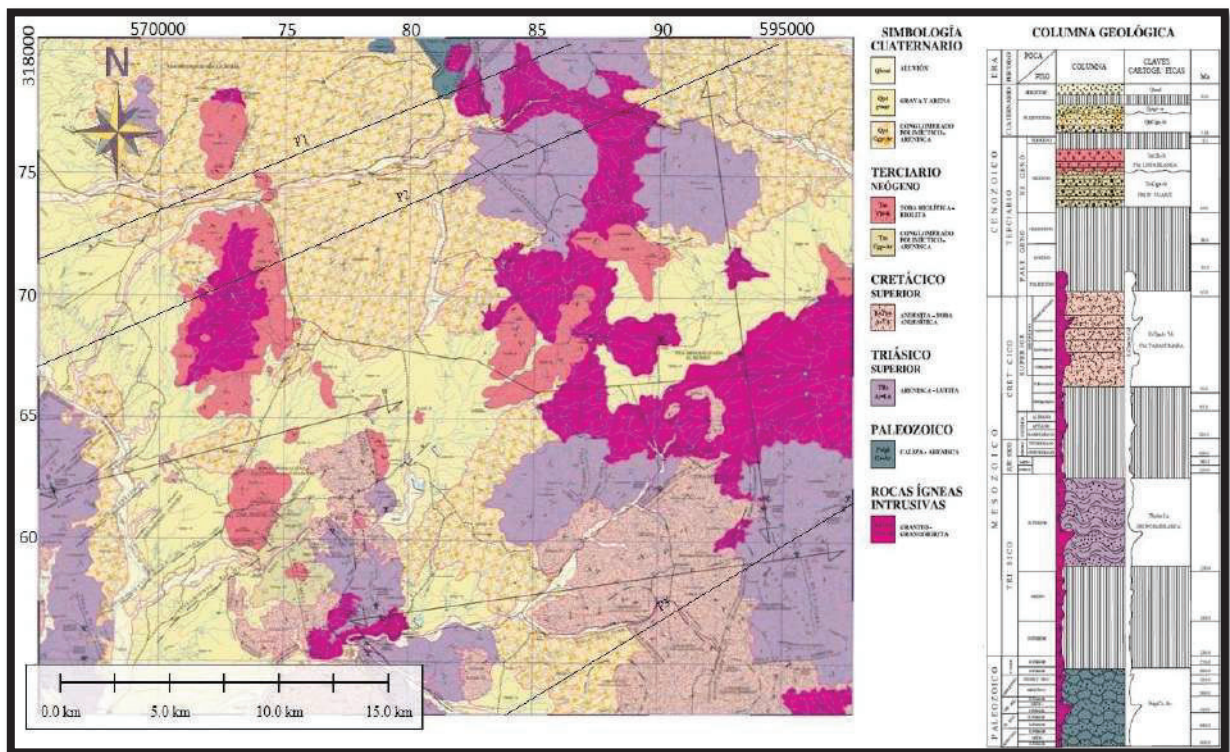


Figura 33. Mapa geológico y ubicación de los perfiles de datos del INEGI (SGM, 2011).

Esto nos ayudó a proponer un modelo inicial del subsuelo para posteriormente crear las secciones geológicas correspondientes a cada perfil, con la finalidad de encontrar un comportamiento y configuración del subsuelo en los modelos obtenidos para cada sección. La figura 34 muestra las 3 secciones geológicas correspondientes a cada perfil, a cuales se mencionan a continuación:

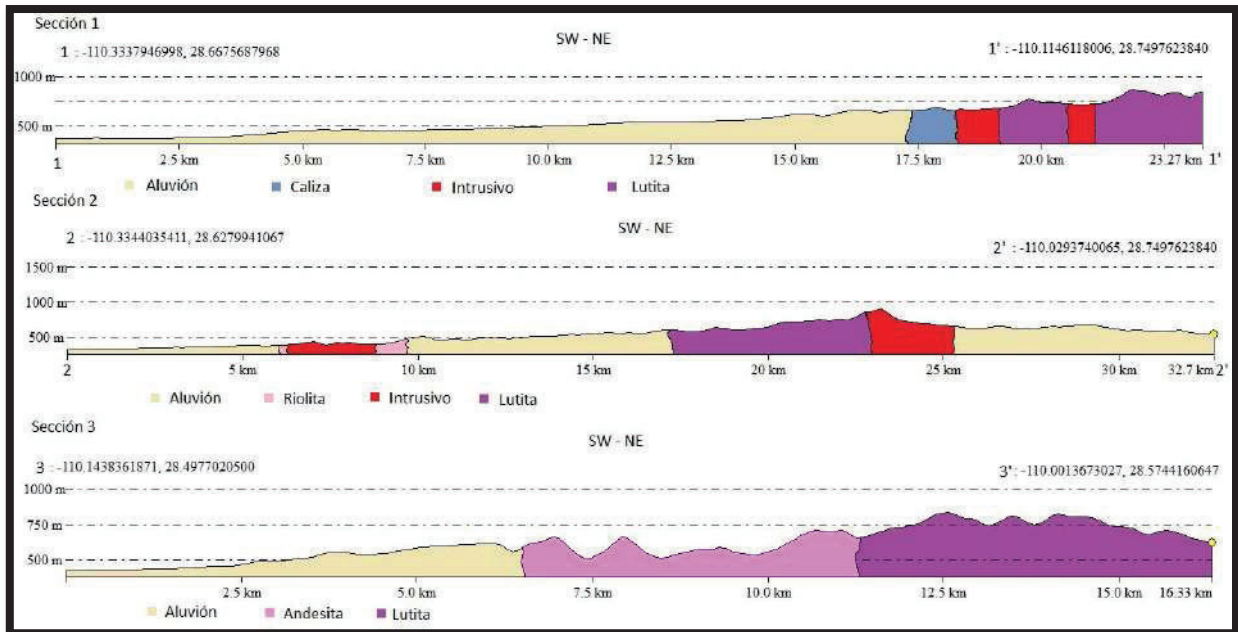


Figura 34. Secciones geológicas elaboradas a partir del mapa geológico y la ubicaci3n de perfiles gravimétricos a partir datos INEGI 2011.

Secci3n 1

Esta secci3n, la cual se observa en la figura 34 (1-1), muestra en la parte SW un relleno sedimentario conformado por conglomerados y areniscas de la Formaci3n Báucarit así como sedimentos cuaternarios. De lado NW de la secci3n se muestran agrupadas principalmente rocas lutitas y areniscas del Grupo Barranca del Triásico superior, las cuales se encuentran en contacto con las rocas más antiguas de edad Ordovícico–Pérmico y consisten principalmente en calizas, las cuales se depositaron en ambiente de cuenca marina. Estas secuencias sedimentarias posteriormente fueron intrusionadas, como se observa en la secci3n.

Sección 2

Esta sección cuenta con una extensión de 32 kilómetros aproximadamente que va 2–2' (figura 34) en donde se observa en la parte SW una secuencia de rocas sedimentarias compuestas de sedimentos cuaternarios y conglomerados de la Formación Báucarit que están bordeando a un cuerpo granitoide. En la porción central y NE de la sección se muestra un complejo sedimentario que abarca areniscas y lutitas del Grupo Barranca y relleno sedimentario, el cual se encuentra afectado por un granito–granodiorita que intrusióna dicho complejo.

Sección 3

En la sección 3, de extensión de 16 kilómetros que va de 3–3' (figura 34) se muestran rocas andesíticas de la Formación Tarahumara de edad Cretácico superior–terciario Paleoceno que se encuentran en contacto con rocas del Grupo Barranca (lutita–arenisca). Le sobreyacen rellenos de la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario.

6.2.2. Modelado bidimensional con el Método de Talwani

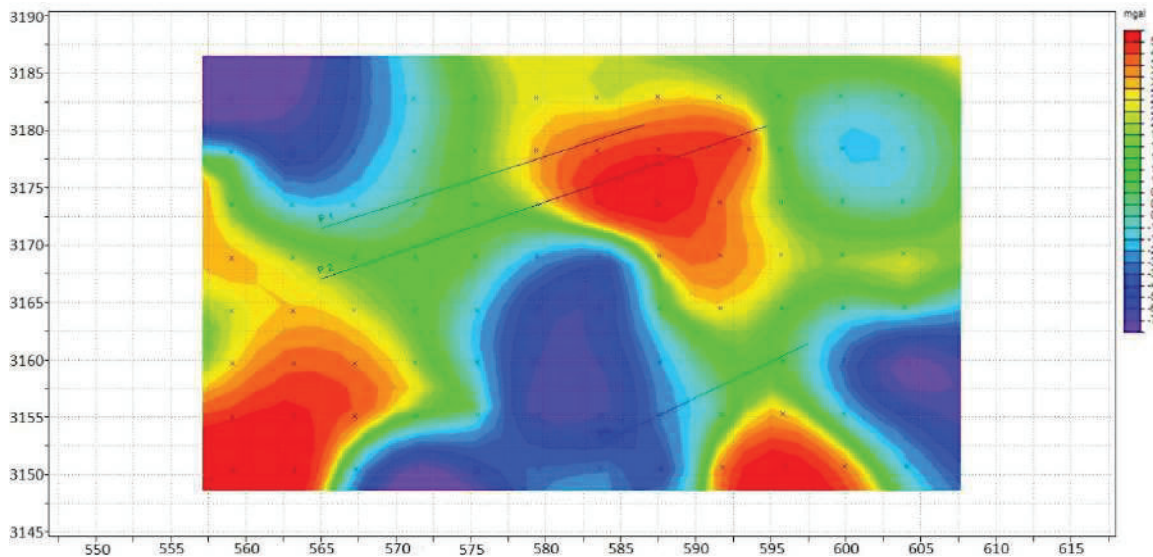


Figura 35. Mapa de anomalía residual datos tomados a partir del INEGI 2011 y ubicación de perfiles.

6.2.2.1. Perfil 1

El modelo geológico propuesto para el perfil 1, que se observa en la figura 36, muestra una extensión de 23 kilómetros sobre la superficie. En este modelo podemos apreciar la configuración del subsuelo; al empezar del lado SW del modelo se muestra la Formación Tarahumara (andesita) la cual está como base en la cuenca y está rellena de sedimentos de la Formación Báucarit que se muestra como bajo gravimétrico en la curva superior. Por lo tanto de lado NW del modelo se observa un alto gravimétrico, el cual se interpretó en base a la geología superficial como un intrusivo de composición granitoide, el cual intrusióna al Grupo Barranca (areniscas–lutitas) y a las calizas del ordovícico medio.

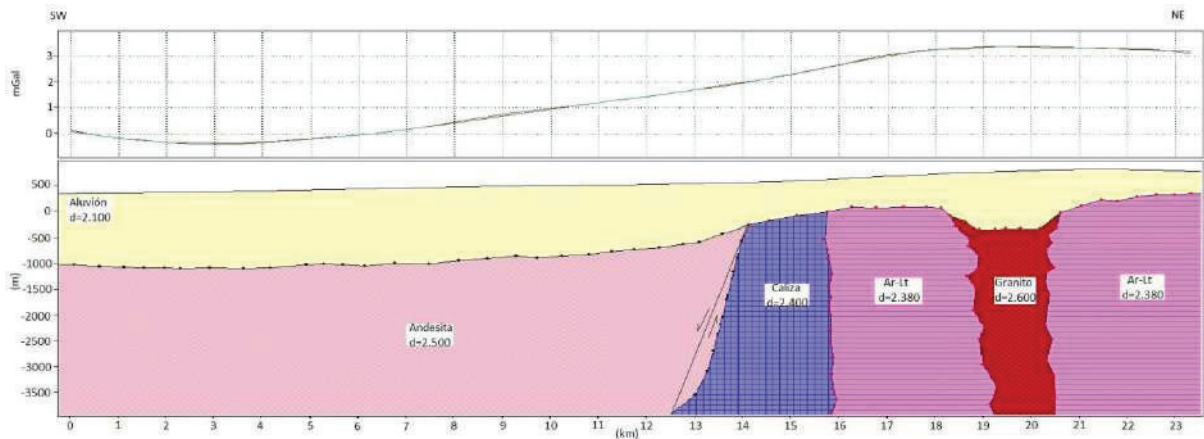


Figura 36. Modelo geológico para el perfil 1. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

6.2.2.2. Perfil 2

El modelo geológico propuesto para el perfil 2 (figura 37) muestra una extensión de 33 kilómetros. Podemos apreciar la configuración del subsuelo. Empezando del lado SW del modelo se muestra la Formación Tarahumara (andesita) la cual está como base en la cuenca y está rellena de sedimentos de la Formación Báucarit y cuaternarios que se muestran como bajo gravimétrico en la curva superior. Por lo tanto del lado NW del modelo se observa un alto gravimétrico, el cual se interpretó gracias a la geología superficial, en donde se observa un intrusivo de composición granitoide que intrusióna al Grupo Barranca (areniscas–lutitas) y a la andesita de la Formación Tarahumara.

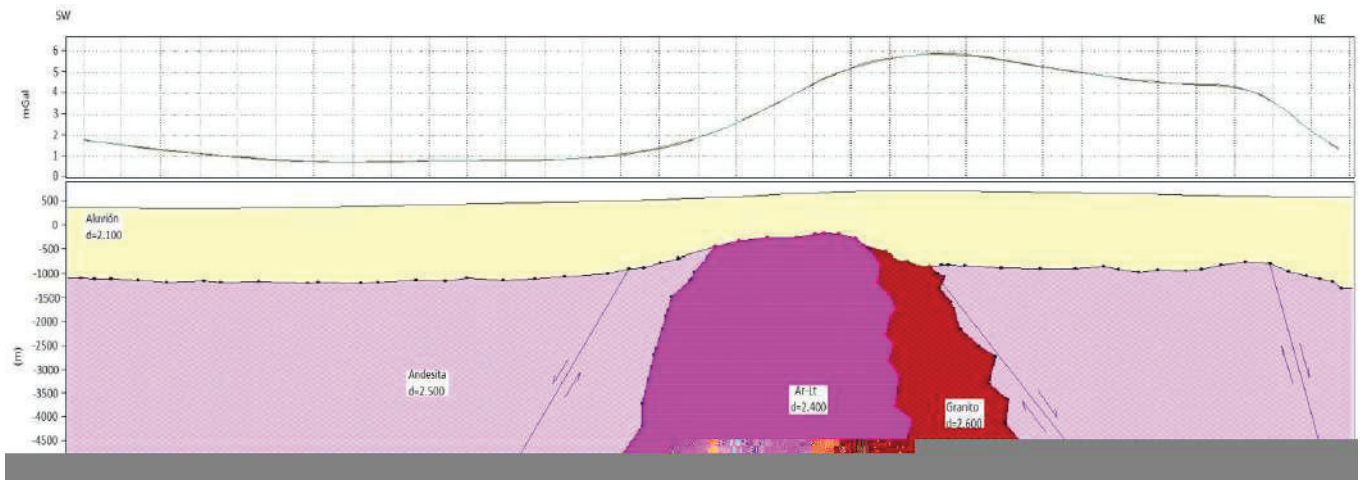


Figura 37. Modelo geológico para el perfil 2. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido.

6.2.2.3. Perfil 3

El modelo geológico propuesto para el perfil 3 (figura 38) muestra una extensión de 16 kilómetros. En él podemos apreciar la configuración del subsuelo, empezando del lado SW del modelo se muestra la Formación Tarahumara (andesita) la cual está como base en la cuenca con un espesor calculado de 900–1,180 metros rellena de sedimentos de la Formación Báucarit y cuaternarios que se muestra como bajo gravimétrico en la curva superior. Por lo tanto del lado NW del modelo se observa un alto gravimétrico, el cual se interpretó en base a la geología superficial como andesita de la Formación Tarahumara que está en contacto con el Grupo Barranca (areniscas–lutitas).

Cabe señalar que a los modelos geológicos propuestos de las figuras 36,37 y 38 les faltó un poco de ajuste para reducir el espesor del relleno sedimentario, y así lograr que afloraran algunas estructuras. Esto se logra realizando un corrimiento o “shift” a la anomalía Residual en donde se trazaron los perfiles. No se realizó porque la base de datos se dañó y no fue posible recuperarla.

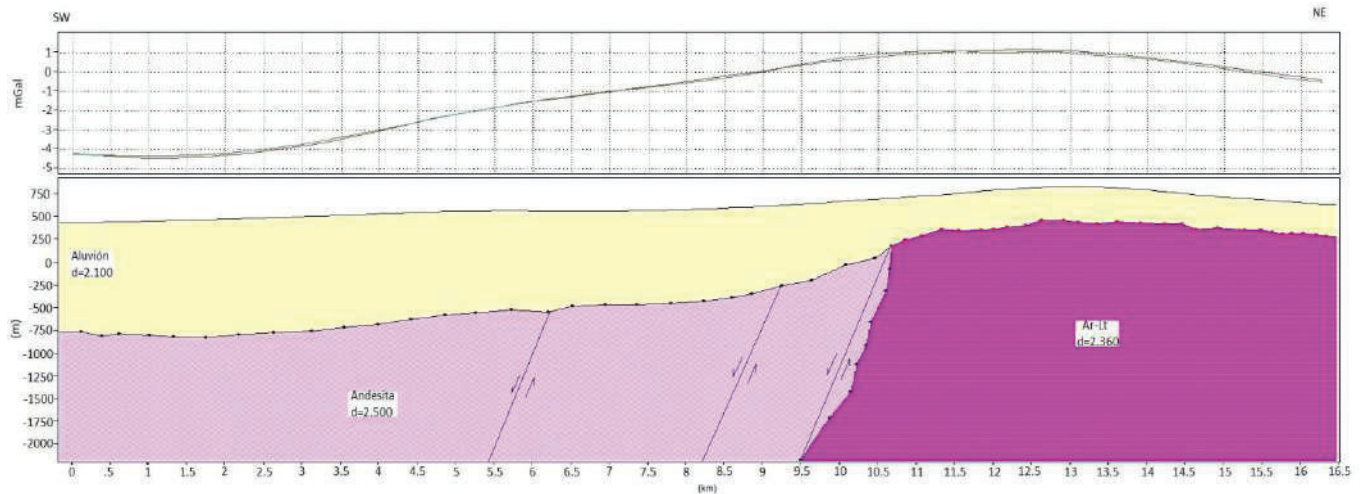


Figura 38. Modelo geológico para el perfil 3. En la gráfica superior se presenta el mejor ajuste entre la anomalía residual y la respuesta calculada del modelo geológico. La gráfica inferior muestra el correspondiente modelo geológico obtenido

6.3. Correlación de la información geológica-geofísica

6.3.1. Correlación de perfiles gravimétricos medidos en campo con la geología

Antes de comenzar con el modelado bidimensional es necesario correlacionar las anomalías gravimétricas y la geología superficial del área. En este caso en particular se empalmó digitalmente la geología superficial con el mapa de anomalía residual que se obtuvo en el programa WinGlink.

El mapa geológico se correlacionó con el mapa de anomalía residual de tercer grado, que refleja anomalías más someras, en el cual ya se eliminaron las estructuras profundas (figura 39). Por lo tanto al hacer el empalme se pueden observar dos altos gravimétricos, uno de lado este y el otro de lado noroeste del mapa, los cuales se encuentran relacionados a cuerpos platónicos de composición granitoide que tienen un rango -0.1 a 2.2 mGal. Los bajos gravimétricos se

encuentran vinculados a cuencas y rocas sedimentarias del Grupo Barranca, Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario con rangos de -2.2 a -0.1 mGal.

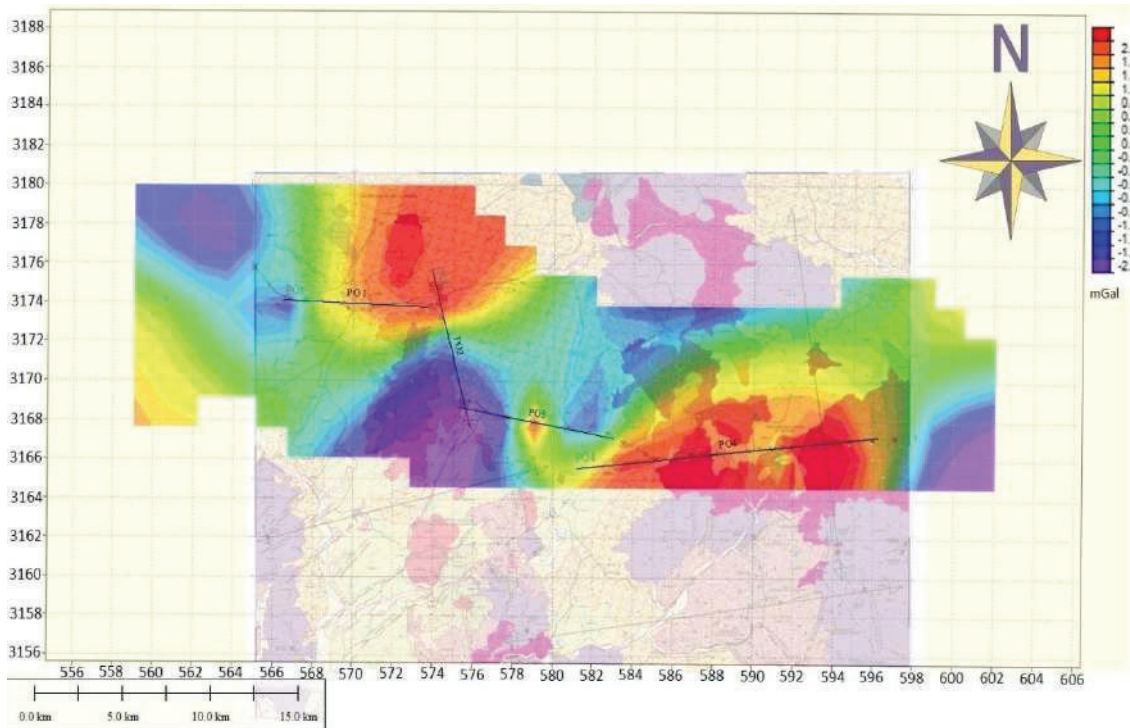


Figura 39. Correlación de la geología superficial del área de estudio con la anomalía de residual obtenida de estaciones gravimétricas medidas en campo (SGM,2011).

6.3.2. Correlación de la anomalía residual del INEGI con geología

Como mencionamos anteriormente, antes de iniciar con el modelado bidimensional fue necesario sobreponer el mapa residual del INEGI con la geología superficial de la Carta Geológica Minera Buena Vista H12-D63 para poder detectar rasgos someros y profundos en la geología. Este estudio proporcionado por el INEGI cuenta con un espaciamiento de 4 kilómetros de estación a estación, lo que nos indica que es un estudio más macro, lo cual representa un panorama regional del área de estudio.

La figura 40 muestra la relación de la Carta Buena Vista con el mapa residual, donde se descartan los rasgos geológicos regionales y muestra una relación más exacta de la geología del área de estudio con los altos y bajos gravimétricos. Como se mencionó anteriormente, los altos gravimétricos se encuentran relacionados a cuerpos granitoide que se encuentran intrusionando a la Formación Tarahumara (andesita, aglomerado) y al Grupo Barranca con un rango de 1 a 5 mGal y como en los casos anteriores los bajos gravimétricos muestran una orientación NW-SE marcando una cuenca, la cual se encuentra rellena de sedimento cuaternario y rocas de la Formación Báucarit con rangos de 0 a -7 mGal.

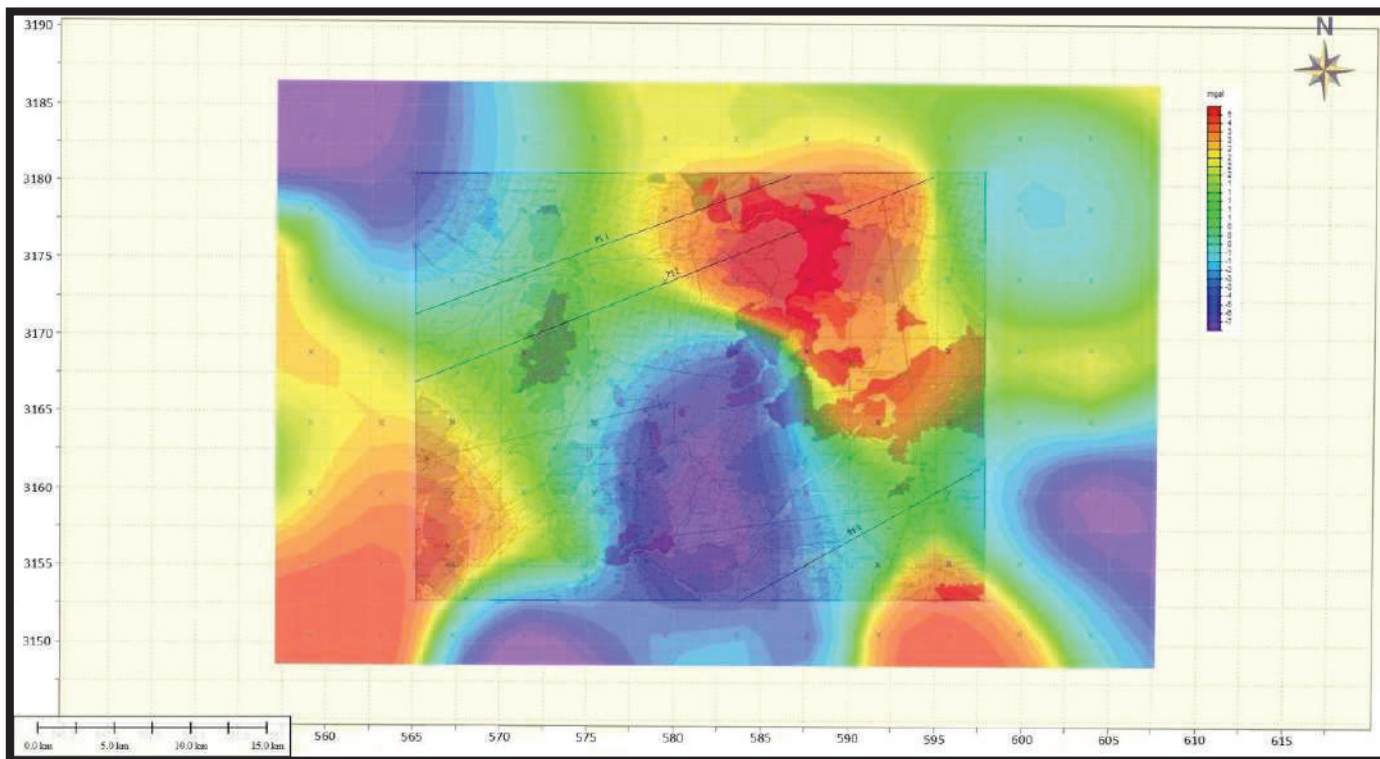


Figura 40. Correlación de la geología superficial de la Carta Buena Vista H12-D63 con la anomalía de residual datos INEGI (SGM,2011).

6.3.3. Análisis de las imágenes de satélite

Conceptos generales

Una imagen satelital es una representación visual de los datos reflejados por la superficie de la tierra que captura un sensor montado en un satélite artificial. Los datos son enviados a una estación en tierra en donde se procesan y se convierten en imágenes, enriqueciendo nuestro conocimiento de las características de la tierra en diferentes escalas espaciales.

Los satélites de observación de la tierra obtienen datos en el menor tiempo posible para dar seguimiento a la evolución de un fenómeno. Nunca antes se tuvo tanta información acerca de la evolución de la superficie terrestre, por ello lo sorprendente es la relativa rapidez para recibir los datos en tiempo real, en un centro de control, en la oficina o incluso en el hogar.

Cada vez tenemos imágenes de mayor resolución, con mayor cantidad de bandas en el espectro electromagnético y mayor disponibilidad para los usuarios, lo que amplía su potencial de aprovechamiento para fines diversos, como en el caso de nuestro país, los datos recabados pueden consultarse en el INEGI.



Figura 41. Sensor pasivo captando la energía que emiten los objetos en la superficie(INEGI, 2011).

Utilizando una imagen de satélite en donde se delimitó el área de estudio, imagen que se obtuvo gracias al programa Google Earth, se detectaron rasgos importantes acerca del área. Considerando cambios de coloración, lineamientos, cuerpos y fallas, se creó un mapa estructural, el cual muestra las fallas y cuerpos más importantes. En la figura 42 se observan algunas “familias de fallas” muy marcadas, algunas rectas y otras curvadas con una orientación NW–SE y N–S principalmente, lo que corresponde a un evento distensivo, así también se observan fallas con orientación NE–SW.

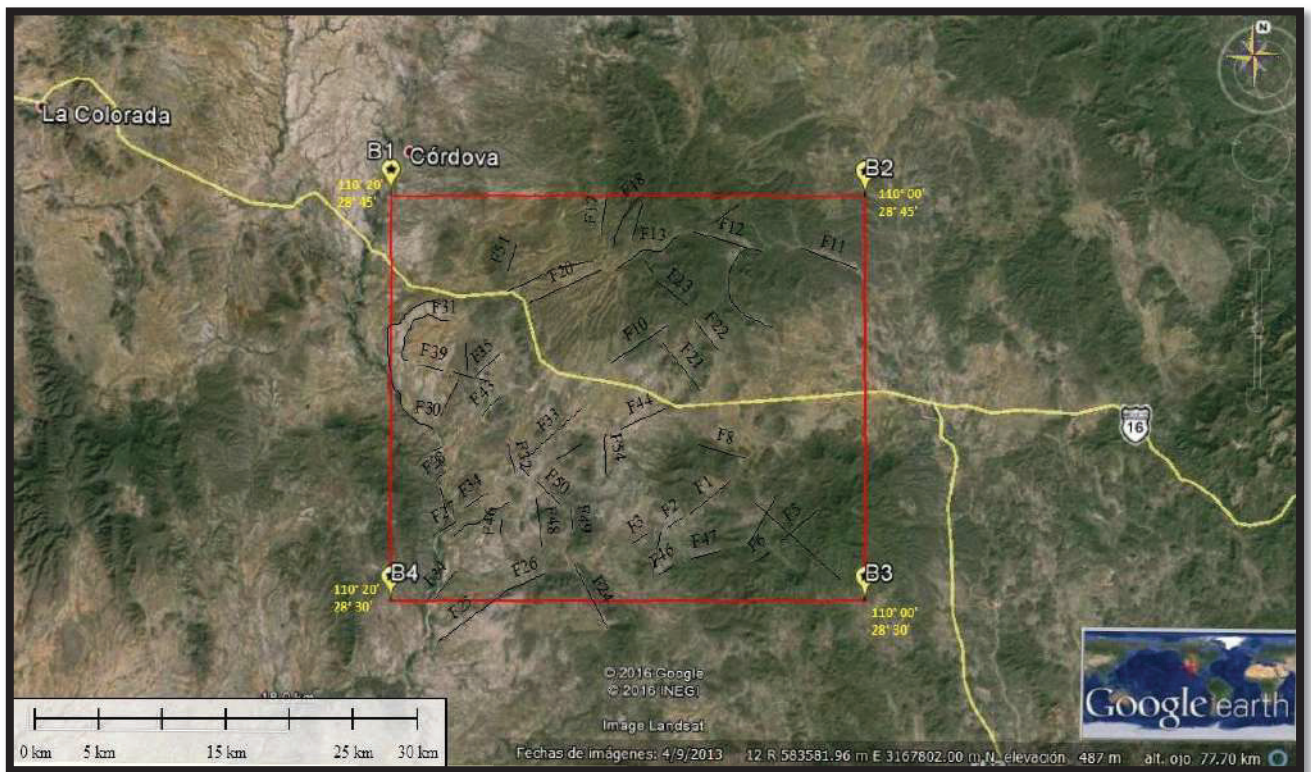


Figura 42. Imagen de satélite donde se observan las fallas y estructuras inferidas del área de estudio.

7. Conclusiones y recomendaciones

A lo largo del presente estudio se logró demostrar que al comparar ambos estudios gravimétricos (el del INEGI y el obtenido en campo) se muestran relaciones muy parecidas pero no iguales. Esto quiere decir que el espaciamiento de cada estación asociado a la resolución es muy importante a la hora de hacer un estudio a detalle, debido a que los espaciamientos de las estaciones medidas en campo (perfil observado) son de alrededor de 500 a 1,200 metros mientras que las distancias entre cada estación del INEGI son de 4,000 metros aproximadamente, lo cual implica que este último es un estudio más regional del área de estudio.

Las anomalías gravimétricas se encuentran relacionadas entre sí respecto a los altos gravimétricos, ya que ambos mapas, el de la anomalía de Bouguer y el residual muestran los altos gravimétricos circulares relacionados a grandes estructuras en donde se encuentran cuerpos granitoides intrusionando a rocas del Grupo Barranca o en algunos casos a rocas andesíticas de la Formación Tarahumara. Además los bajos gravimétricos tienden a marcar las cuencas sedimentarias con orientación NW–SE.

Los modelos geológicos que se obtuvieron a partir de 7 perfiles (4 de levantamiento gravimétrico y 3 de datos del INEGI) que fueron trazados sobre el mapa de anomalía residual muestran un basamento conformado por andesitas de la Formación Tarahumara del Cretácico superior, las cuales se encuentran en contacto discordante y por fallas normales con rocas sedimentarias del Grupo Barranca del Triásico superior, mismas que son cortadas por granito–granodiorita en forma de intrusiones que forman parte del Batolito Larámide de Sonora con edades 90–40 Ma.

En base a los modelos obtenidos se puede inferir la existencia de fallas con orientación NW–SE, N–S y NE–SW que originan estructuras de tipo Horst y Graben, las cuales se convierten en cuencas y se rellenan con rocas sedimentarias de la Formación Báucarit y con sedimentos del Cuaternario con espesores de entre 800–1,500 metros aproximadamente.

En ambos casos (campo e INEGI) los bajos gravimétricos asociados a rocas sedimentarias de la Formación Báucarit corresponden a los eventos de depósitos relacionados a la apertura del Golfo de California. Los altos gravimétricos asociados a cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas se relacionan a eventos ocurridos a principios del Cretácico superior al Eoceno (orogenia Larámide) donde se genera un arco magmático evidenciado por cuerpos calco-alcalinos. Las estructuras de tipo Horst y Graben presentes en los modelos están relacionadas al evento distensivo, donde las cuencas presentan rellenos con depósitos principalmente de la Formación Báucarit y sedimentos del Cuaternario.

Se debe considerar que la configuración del subsuelo propuesta se realizó a partir de un modelo matemático, en donde se consideraron diferentes parámetros para su aproximación, por ello se recomienda complementar el estudio incluyendo mayor información gravimétrica así como también correlacionar este estudio con otros métodos geofísicos para obtener un modelo más representativo del área de estudio, pues esta área en particular tiene gran importancia minera.

8. Bibliografía

Alencaster de C serna, Gloria; Pineada, Alicia Silva; Miller Jr, Halsey W. *Paleontología del Triásico superior de Sonora*. México. UNAM. Instituto de Geología. 1961.

Amaya, M. R. González, C. M. Las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara y su relación con las secuencias volcano sedimentarias en la porción centro oriental del Estado de Sonora. En *Memorias del II Simposio de la geología de Sonora y áreas adyacentes*. México. Universidad de Sonora. 1993.

Anderson T. H. Y Silver, L.T., 1979. Precambric and Paleozoic rocks of the Caborca región, Sonora, México. En: *Geology of norther Sonora*, Anderson, T. H. y Roldán Quintana, (editores): Geological Society of American, libro guía de excursiones, p.122.

Burger H. Robert Prentice Hall PTR; Har/Dskt edition (January 24, 1992), *EXPLORATION GEOPHYSICS OF THE SHALLOW SUBSURFACE*, smith college, Chapter 6, *EXPLORATION USING GRAVITY*, p. 317 - 373

Cochemé, J.J., 1985. Le magmatism ecéno zoïquedans le nord. Ou est du Mexique. Cartographie de la région de Yecora- Maicoba-Mulatos. Illustration magmatique de la fin d' un régime en subduction et du passage á un régime distensif. Thése de Doctorat d' Etat, Univ .d' Aix-Marseille, France.

Coney, P.J., and Campa, M.F. Tectono stratigraphic Terranes and mineral resourcedistribución in México. En *Canadian Journal of Earth Sciences*, volumen 20 (pp. 1040- 1050). 1983.

Coney, P. J. y S. J. Reynolds, 1977, Cordilleran Benioff zones: *Nature*, 270, 403-406.

Corral G.R. *Informe de la Carta Geológico-Minera y Geoquímica Tecoripa, clave H12-D64, Escala 1:50 000*. Archivo Técnico del SGM. Hermosillo. 2003.

CRM, (1999), Carta Geológica-Minera Sierra Libre H12-11, 1:250 000.

Curso de Prospección Gravimétrica v. s. Mironov, 1977 Sistema Geodésico de Referencia-67, Geodetic Reference System 67 (GRS-67).

Damon, P. E., Shafiqullah M. y Clark K. "Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis". *Revista del Instituto de geología*, vol. 5 núm. 2, 223-238. 1981.

Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J., Cocheme, J.J. El batolitolarámide (90-40 Ma) de Sonora. En *Memorias de la XV Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México* (pp. 63-95). Guadalajara. 1983.

Dumble, E. T. Notes on the Geology of Sonora, México, American Institute of Mining Engine, *Transactions*, p. 122-152. 1900.

Dumble, E.T., *Cretaceous of Obispo Canyon, Sonora, México*: Texas Academy Sciences, Vol. 4. 1901.

Fries, Carl, Jr. 1962 *Reseña de la geología del Estado de Sonora con énfasis en el Paleozoico*: Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros, V. 14, P. 257-273.

García-Cortez J.A. *Informe de la Carta Geológico-Minera y Geoquímica Tecoripa, clave H12-12, Esc. 1:250,000*. Archivo Técnico del SGM. Hermosillo. 2000.

Grant, F.S. and West, G.F. (1965) Interpretation Theory in Applied Geophysics. McGraw-Hill Book Co., New York, 583 p. 237-238.

Gray, 1997, reporte interno (INEGI).

Instituto Nacional De Estadística Geografía E Informática [en línea]: Modelos y Cartas Gravimétricas [fecha de consulta: enero 2015]. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/modelos_cartas.aspx

Introduction to Geophysical Prospecting M. B. Dobrin (2nd edition, 1960, 446 pp., McGraw-Hill, 74s.)

King, R.E. *Geological Reconnaissance in Northern Sierra Madre Occidental of México*. GSA, Bull. 50. 1939.

Lindgren, Waldemas 1915. 693. Profesor Daly's Igneous rocks and their origin: Science, new ser., Vol. 41, P. 166.

Martínez, R. 1984. Prospección geológica del grafito micro cristalino del Triásico del Municipio de Álamos, Sonora. Un published thesis. Instituto Politécnico Nacional.

McDowell, F.W., Roldán Q.J. Geochronology of Mesozoic-Cenozoic magmatism, in South-central Sonora: A Progress report. En *III Simposio de la geología de Sonora y áreas adyacentes* UNAM Inst. De Geología. P. 77-80.1993.

McDowell, F.W., Roldán Q.J., Amaya M. R. *Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico*. G.S.A. Bulletin, Vol. 109-10 p. 1349-1360. 1997.

McDowell, F.W., Roldán Q.J., Conelly, J. *Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico*. GSA Bulletin Vol. 113, No. 4, p. 521-531. 2001.

Morales, M., Bartolini, C., Damon, P.E., and Shafiqullah, M. K-Ar dating, stratigraphy, and extensional deformation of Sierra Lista Blanca, Central Sonora, Mexico. En *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 22, no. 7, p. A364.1990.

Poole. F.G., and Madrid, R.J., 1991 Comparasion of all octhonous Paleozoic eugeoclinal rocks in Sonoran, Marathon and antler orogens: Gologicas Society of America v.20, no.7. p 27.

Raisz E. *Landforms of Mexico*. Morphological map prepared for the geography Branch of the Office of Naval Research. Cambridge Mass. U.S.A.1964.

Rangin, Claude, 1977, sobre la presencia del Jurasico Superior con amonitas en Sonora septentrional: Univ. Nal. Auton. Mexico, Inst. Geologia, P. 1 – 4.

Rangin C. 1982. Contribution a l etude géologique du systeme cordilleran du nord-ouest du Mexique. Thése de doctorad état es scienses. Acad. Paris. Univ. Pierre et Marie Curie, p. 588.

Servicio Geológico Mexicano, (SGM), 2011. Carta Geológica-Minera Buena Vista, H12-D63, 1:50 000.

Servicio Geológico Mexicano, (SGM), 2006. Carta Geológica-Minera Suaqui Grande, 1:50 000

Servicio Geológico Mexicano, (SGM), 2006. Carta Geológica-Minera Tecoripa H12-D64, 1:50 000.

Stewart, J., Poole, F.G., Ketner, K.B., Madrid, R.J., Roldán–Quintana, J., 1990. Tectonic and stratigraphy of the Paleozoic and Triassic southern margin of North America, Sonora, México: Arizona Geological Survey, Special Paper 7, 183–202.

Stewart J. H. y Roldan, J., 1991. Grupo Barranca del Triásico superior: depósitos no marino y cuenca marina somera del NW de México., the geological society of American, special paper 254, P-19-36.

Talwani, M., Worzel, J.L. & Landisman, M., 1959. Rapid Gravity computation of two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone, Journal of the Geophysical research, Volumen 64, No. 1, p 49- 59.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., And Keys, D.A., 1976. Applied Geophysics: Cambridge University press, Chapter 2, Gravity Methods, p. 79-80.

Valencia-Moreno, M. Las rocas ígneas al oeste de Suaqui Grande, Sonora. En *Memorias del II Simposio de la geología de Sonora y áreas adyacentes*. México. Universidad de Sonora. 1993.

Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Barton, M.D., Patchett, P.J., Zürcher, L., Hodkinson, D., Roldán-Quintana, J., 2000, A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: identification of the southern edge of the North American Precambrian basement: Geological Society of America Bulletin, 113, 1409–1422.

Wilson, I. T., Rocha V. S., 1946, Los yacimientos de carbón de la región de Santa Clara, municipio de San Javier, Sonora. Comité directivo para la investigación de los recursos minerales de México, Bol. 9, 108 páginas.

Consultas de internet:

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Geoide gravimétrico mexicano.
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/que_es_geoide.aspx Consultado el día 1 de julio de 2016.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Imágenes de satélite.
www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/elementos.aspx
Consultado el día 1 de julio de 2016.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Modelos y cartas gravimétricas.
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/modelos_cartas.aspx Consultado el día 16 de mayo de 2016.

**Estudio gravimétrico de la Carta Buena Vista H12–D63 en la porción sureste de Sonora,
México
Universidad de Sonora**

9. Apéndice A

Base de datos. Tabla 1

Estación	Coordenadas			Gobs	Desv	Hora	DZ	C.E	C.B	C.C.	Distancia	Dacum	Dbase	CL	A.B.
	x	y	z												
EB	563798	3177143	361	3045.923	0.154	07:41	0	0	0	0	449041	968586	0	0	0
Bv-1	563939	3176473	368	3043.516	0.016	07:56	7	2.1595	-0.783111	1.376389	519545	1277102	670	0.456337	-0.574274
bv-2	565084	3175753	376	3046.192	0.022	08:02	15	4.6275	-1.678095	2.949405	757557	1196599	1390	0.946729	4.165134
BV-3	565741	3174883	380	3039.01	0.016	08:08	19	5.8615	-2.125587	3.735913	439042	459157	2260	1.539286	-1.637801
BV-4	566539	3174221	395	3037.924	0.016	08:15	34	10.489	-3.803682	6.685318	20115	27096	2922	1.9901742	0.6764922
BV-5	567610	3174083	392	3039.69	0.034	08:22	31	9.5635	-3.468063	6.095437	6981	164302	3060	2.084166	1.946603
BV-6	560629	3174083	423	3034.705	0.01	08:27	62	19.127	-6.936126	12.190874	157321	162029	3060	2.084166	3.05704
BV-7	569725	3173698	438	3031.363	0.018	08:33	77	23.7545	-8.614221	15.140279	4708	70949	3445	2.3463895	2.9266685
BV-8	570833	3173638	458	3026.727	0.016	08:39	97	29.9245	-10.851681	19.072819	66241	69567	3505	2.3872555	2.2640745
BV-9	572049	3173893	462	3027.925	0.016	08:47	101	31.1585	-11.299173	19.859327	3326	3326	3250	2.213575	4.074902
BV-10	573775	3173853	462	3027.506	0.04	08:56	101	31.1585	-11.299173	19.859327	0	331235	3290	2.240819	3.683146
BV-11	573775	3173853	462	3027.506	0.04	08:56	101	31.1585	-11.299173	19.859327	331235	1278308	3290	2.240819	3.683146
BV-12	574385	3173278	493	3019.363	0.034	09:01	132	40.722	-14.767236	25.954764	947073	2475044	3865	2.6324515	2.0272155
BV-13	574729	3172305	468	3021.454	0.029	09:08	107	33.0095	-11.970411	21.039089	1527971	2805082	4838	3.2951618	-0.1347492
BV-14	575004	3171069	459	3021.878	0.01	09:15	98	30.233	-10.963554	19.269446	1277111	2212832	6074	4.1370014	-0.6385526
BV-15	575215	3169939	429	3026.847	0.03	09:21	68	20.978	-7.607364	13.370636	935721	1176564	7204	4.9066444	-0.7987196
BV-16	575847	3168972	446	3021.597	0.024	09:27	85	26.2225	-9.509205	16.713295	240843	367248	8171	5.5652681	-2.0474369
BV-17	576590	3168482	449	3022.697	0.056	09:33	88	27.148	-9.844824	17.303176	126405	180156	8661	5.8990071	-0.0238169
BV-18	577679	3168128	428	3026.011	0.075	09:40	67	20.6695	-7.495491	13.174009	53751	127260	9015	6.1401165	-0.5978745
BV-19	578989	3167899	440	3026.737	0.037	09:46	79	24.3715	-8.837967	15.533533	73509	105927	9244	6.2960884	2.6436214
BV-20	580674	3167631	448	3021.274	0.027	09:53	87	26.8395	-9.732951	17.106549	32418	42417	9512	6.4786232	-1.0638278
BV-21	581763	3167454	441	3022.57	0.057	10:01	80	24.68	-8.94984	15.73016	9999	228888	9689	6.5991779	-1.0236621
BV-22	582737	3167359	427	3025.003	0.101	10:09	66	20.361	-7.383618	12.977382	218889	525763	9784	6.6638824	-1.2787356
BV-23	583537	3166892	438	3024.949	0.042	10:15	77	23.7545	-8.614221	15.140279	306874	347508	10251	6.9819561	1.1482351
BV-24	584602	3166339	453	3021.504	0.082	10:21	92	28.382	-10.292316	18.089684	40634	105633	10804	7.3586044	1.0292884
BV-25	585635	3166140	462	3021.672	0.036	10:26	101	31.1585	-11.299173	19.859327	64999	78601	11003	7.4941433	3.1024703
BV-26	588134	3166390	514	3011.267	0.027	11:03	153	47.2005	-17.116569	30.083931	13602	23696	10753	7.3238683	2.7517993
BV-27	586853	3166279	479	3016.925	0.048	10:31	118	36.403	-13.201014	23.201986	10094	10688	10864	7.3994704	1.6034564
BV-28	588847	3166369	524	3007.437	0.059	10:52	163	50.2855	-18.235299	32.050201	594	30326	10774	7.3381714	0.9023724
BV-29	588253	3166369	510	3010.386	0.04	10:40	149	45.9665	-16.669077	29.297423	29732	32479	10774	7.3381714	1.0985944
BV-30	589761	3166537	520	3007.702	0.092	11:19	159	49.0515	-17.787807	31.263693	2747	6010	10606	7.2237466	0.2664396
BV-31	590299	3166584	520	3007.408	0.03	11:26	159	49.0515	-17.787807	31.263693	3263	6967	10559	7.1917349	-0.0595721
BV-32	590858	3166636	517	3007.188	0.03	11:33	156	48.126	-17.452188	30.673812	3704	6224	10507	7.1563177	-0.9048703
BV-33	591426	3166692	518	3005.385	0.032	11:43	157	48.4345	-17.564061	30.870439	2520	14015	10451	7.1181761	-2.5493849
BV-34	591921	3166737	530	3005.913	0.36	11:49	169	52.1365	-18.906537	33.229963	11495	21383	10406	7.0875266	0.3074896
BV-35	593012	3166839	510	3010.704	0.045	11:58	149	45.9665	-16.669077	29.297423	9888	97062646	10304	7.0180544	1.0964774
BV-36	594064	3166933	482	3015.113	0.137	12:08	121	37.3285	-13.536633	23.791867	97052758	97052758	10210	6.954031	-0.064102
EB	563806	3176783	358	3045.666	0.18	19:36	-3	-0.9255	0.335619	-0.589881		0	360	0.245196	-0.601685

Apéndice B

Base de datos. Tabla 2

3182745.64	558976.04	416	-70.042
3182766.99	563042.77	403	-68.062
3182789.77	567110.49	417	-66.026
3182813.98	571178.23	490	-64.882
3182839.6	575245.02	564	-64.613
3182866.66	579312.8	699	-65.267
3182895.13	583380.61	957	-67.069
3182925.03	587447.47	736	-68.253
3182956.36	591515.33	634	-70.051
3182989.11	595583.21	546	-72.825
3183023.27	599650.14	503	-75.353
3183058.87	603718.08	582	-76.769
3178130.1	558999.45	392	-57.521
3178151.43	563067.79	376	-63.931
3178174.19	567137.13	404	-62.996
3178198.38	571206.49	507	-62.37
3178223.98	575274.89	531	-62.332
3178251.01	579344.29	622	-62.704
3178279.46	583413.71	764	-62.988
3178309.32	587482.18	709	-63.681
3178356.29	593522.46	594	-67.178
3178373.34	595621.15	564	-70.749
3178407.48	599689.7	470	-74.348
3178443.05	603759.26	516	-75.438
3173513.48	559022.83	429	-53.806
3173534.8	563092.79	362	-57.674
3173557.53	567163.74	383	-59.194

**Estudio gravimétrico de la Carta Buena Vista H12–D63 en la porción sureste de Sonora,
México
Universidad de Sonora**

3173581.69	571234.71	440	-59.731
3173607.27	575304.73	488	-60.343
3173634.27	579375.74	557	-61.275
3173662.7	583446.78	685	-59.47
3173692.54	587516.86	606	-59.74
3173723.81	591587.95	643	-64.593
3173756.5	595659.06	488	-68.105
3173790.6	599729.22	464	-71.051
3173826.14	603800.39	498	-72.895
3168896.89	559046.19	393	-50.446
3168918.19	563117.75	346	-52.87
3168940.9	567190.32	356	-55.173
3168965.04	571262.9	377	-56.953
3168990.59	575334.52	438	-58.836
3169017.57	579407.15	470	-62.682
3169045.97	583479.8	469	-65.953
3169075.78	587551.49	518	-61.803
3169107.02	591624.19	511	-62.574
3169139.68	595696.91	464	-65.347
3169173.75	599768.68	432	-67.39
3169209.25	603841.46	451	-68.759
3164281.44	559069.5	442	-49.099
3164302.71	563142.68	515	-50.125
3164325.41	567216.85	323	-52.194
3164349.52	571291.04	344	-54.719
3164375.05	575364.27	375	-58.159
3164402	579438.51	404	-63.846
3164430.38	583512.76	444	-65.737
3164460.16	587586.07	500	-61.493

**Estudio gravimétrico de la Carta Buena Vista H12–D63 en la porción sureste de Sonora,
México
Universidad de Sonora**

3164491.37	591660.37	535	-61.514
3164524	595734.7	496	-64.034
3164558.04	599808.09	448	-67.093
3164593.51	603882.47	370	-68.296
3159664.9	559092.79	383	-46.619
3159686.16	563167.58	425	-46.705
3159708.83	567243.35	363	-48.879
3159732.92	571319.15	315	-51.981
3159758.43	575393.99	341	-56.244
3159785.36	579469.83	404	-62.556
3159813.7	583545.69	468	-64.017
3159843.46	587620.6	452	-61.66
3155257.93	591696.52	541	-60.6
3159907.24	595772.46	807	-62.427
3159941.24	599847.44	535	-67.657
3159976.68	603923.44	377	-73.959
3155048.4	559116.05	364	-42.109
3155069.63	563192.44	332	-42.826
3155092.28	567269.82	300	-46.446
3155116.35	571347.22	304	-50.575
3155141.83	575423.67	327	-53.258
3155168.74	579501.11	372	-60.786
3155197.06	583578.58	416	-62.093
3155226.78	587655.1	557	-60.299
3155257.93	591732.61	591	-57.783
3155290.5	595810.16	589	-58.62
3155324.48	599886.75	443	-63.52
3155359.88	603964.35	353	-68.623
3150433.03	559139.28	291	-36.13

**Estudio gravimétrico de la Carta Buena Vista H12–D63 en la porción sureste de Sonora,
México
Universidad de Sonora**

3150454.24	563217.26	348	-39.219
3150476.87	567296.25	261	-49.348
3150500.92	571375.25	291	-56.859
3150526.38	575453.3	360	-55.53
3150553.25	579532.35	421	-55.479
3150581.54	583611.42	428	-56.707
3150611.24	587689.53	483	-59.844
3150642.37	591768.65	479	-54.091
3150674.9	595847.8	449	-52.582
3150708.85	599925.99	383	-57.524
3150744.21	604005.2	324	-63.341